

Municipio de Cajicá

Cundinamarca

Estudios Básicos de Amenazas

Capítulo 2:

Estudio Básico de Amenaza por Movimientos en Masa

Subcapítulo 1: Suelo Rural



2021

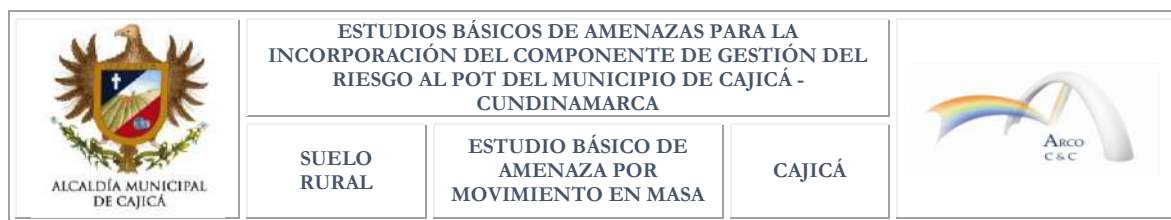


TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
2.1.1. OBJETIVOS.....	15
2.1.1.1. Objetivo general.....	15
2.1.1.2. Objetivos específicos	15
2.1.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ESTUDIO	16
2.1.2.1. Área de estudio.....	17
2.1.3. ANTECEDENTES.....	19
2.1.4. METODOLOGÍA.....	20
2.1.4.1. Análisis de susceptibilidad.....	21
2.1.4.1.1. Insumos para el análisis de la susceptibilidad	22
2.1.4.1.2. Pesos de evidencia (Weight of Evidence, WofE)	76
2.1.4.1.3. Hipótesis de falla	80
2.1.4.1.4. Variable de agrupamiento	80
2.1.4.1.5. Curva de éxito y validación.....	81
2.1.4.1.5.1. Categorías de susceptibilidad	82
2.1.4.2. Caracterización de la amenaza.....	84
2.1.4.2.1. Probabilidad espacial.....	85
2.1.4.2.2. Probabilidad temporal	88
2.1.4.2.2.1. Detonante lluvia	89
2.1.4.2.2.1.1. Probabilidad de excedencia de umbrales de lluvia	89
2.1.4.2.2.2. Detonante sismo	92
2.1.4.2.2.2.1. Aceleración pico del terreno (PGA).....	92

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C & C
SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ		

2.1.5. RESULTADOS	93
2.1.5.1. Susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo	93
2.1.5.1.1. Coberturas.....	93
2.1.5.1.2. Curvatura de plano	97
2.1.5.1.3. Pendientes.....	100
2.1.5.1.4. Elevación del terreno.....	103
2.1.5.1.5. Orientación de ladera.....	105
2.1.5.1.6. Aceleración pico del terreno (PGA).....	107
2.1.5.1.7. Unidades geológicas superficiales (UGS)	109
2.1.5.1.8. Susceptibilidad a movimientos en masa.....	111
2.1.5.1.8.1. Índice de susceptibilidad a movimientos en masa	111
2.1.5.1.8.2. Probabilidad de zonas susceptibles a movimientos en masa.....	113
2.1.5.2. Detonantes	115
2.1.5.2.1. Sismo	115
2.1.5.2.2. Lluvia.....	115
2.1.5.3. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa	127
2.1.6. VALIDACIÓN	131
2.1.7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LA ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA PROPUESTA Y LOS RESULTADOS DE LOS POMCA'S DE LAS CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ....	134
2.1.8. CONCLUSIONES	142
2.1.9. MEDIDAS DE INTERVENCIÓN ORIENTADAS A ESTABLECER RESTRICCIONES CONDICIONAMIENTOS MEDIANTE LA DETERMINACIÓN DE NORMAS URBANÍSTICAS.....	143

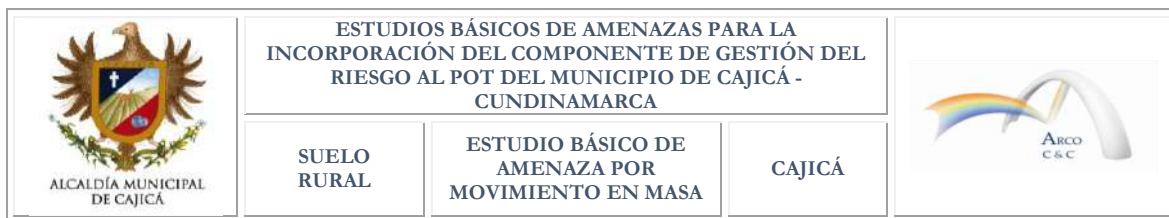
 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ		

2.1.10. DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y CONDICIÓN DE RIESGO146

2.1.10.1. Delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza..... 146

2.1.10.2. Delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo 150

2.1.11. REFERENCIAS.....153



LISTA DE ILUSTRACIONES

- Ilustración 1.** Localización geográfica del municipio de Cajicá, Cundinamarca..... 18
- Ilustración 2.** Modelo conceptual para el cálculo de la susceptibilidad por movimientos en masa.
..... 21
- Ilustración 3.** Cantera la Naveta al sur occidente del municipio, vía Manas-Molino, que muestra: roca, suelo y depósitos, en un mismo escenario, a) roca estratificada insitú, b) depósitos de tipo coluvión, c) Formación de suelo por acción de la meteorización, Estación 009 (X: 4887135,31 Y: 2105117.61). 24
- Ilustración 4.** Exposición de suelo con alto grado de meteorización, camino al cerro de las Cruces, vereda Chuntame, a) vista general del suelo expuesto, b) en detalle la macrofábrica heredada de la roca, y clastos matriz-soportados, perteneciente a la Formación Labor y Tierna, estación 022 (X: 4883693,98 Y: 2103462,78). Exposición de suelo sobre roca blanda de la Formación Guaduas, cerro Montepincio, vereda Chuntame, c) suelo totalmente meteorizado donde se visualizan los horizontes, la fábrica de la roca original se ha perdido, estación 068 (X: 4885921,39 Y: 2104752,62). 25
- Ilustración 5.** Afloramiento de la Formación Plaeners, sobre la vía Cajicá-Tabio, a) contraste entre la roca de arenisca fresca y competente a la derecha y la roca muy meteorizada a la izquierda, en detalle pequeño coluvión de material desprendido, b) el corte en carretera se intercala con partes en que la roca ha sido altamente meteorizada mostrando pequeños coluviones, c) El alto ángulo y diaclasamiento pueden dar lugar a caídas de bloque y/o mecanismos de falla en cuña o planares, estación 003 (X:4881718,81 Y:2101953.91) 27
- Ilustración 6.** Depósitos Coluviales y fluviotorrenciales que pueden llegar a ser potencialmente inestable; a) en la vereda Chuntame, cerca al Mirador la Cumbre, estación 004 (X: 4885232,44 Y: 2108792,98), b) Gavión de contención para suelos transportados fluviotorrenciales, sobre la vía Cajicá – Zipaquirá, estación 014 (X: 4888757,46 Y: 2,104,895.72). 28
- Ilustración 7.** Reptación incipiente en la base del Cerro Montepincio, vereda Chuntame, estación 069 (X: 4886005,53 Y: 2104722,65). 29
- Ilustración 8.** Flujo de detritos en la vereda Chuntame, a) tren de bloques rocosos confinados al canal, b) bloques de tamaño centimétricos potencialmente dañinos, c) Los fragmentos de roca se depositan donde la pendiente se suaviza, estación 075 (X: 4884022,55 Y: 2103935,93). 30

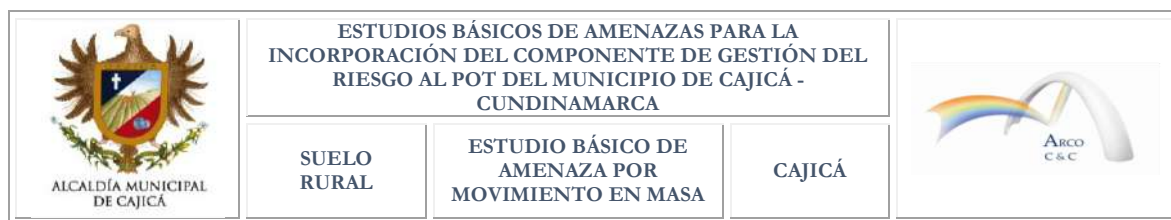


Ilustración 9. Movimiento en masa del tipo caída de roca, extremo sur occidental de la vereda Chuntame, a) macizo rocoso al borde de lo que parece ser un camino de herradura en mal estado, b) macizo rocoso diaclasado, pero competente, c) Fragmentos de roca caídos y que han sido embebidos dentro de una matriz de material fino, limoso y suelto, estación 072 (X: 4883431,31 Y: 2103804,71).....	31
Ilustración 10. Cantera de la Naveta, en el cruce de las vías Manas-Molina y Cajicá-Zipacquirá, (X: 4887399,85 Y: 2105363,29).	32
Ilustración 11. Deslizamiento en cuña en consecuencia la formación de coluviones en la Cantera de la Naveta, vía Manas-Molino, estación 009 (X: 4887135,31 Y: 2105117.61).....	32
Ilustración 12. Cantera, en la vía Cajicá-Tabio limite municipal al sur occidente de Cajicá, a) coluviones provocados de forma controlada para la extracción del material de construcción, b) fragmentos de roca que han cedido a la fuerte pendiente y la gravedad, estación 20 (X: 4881817,74 Y: 2102239,6).....	33
Ilustración 13. Eventos localizados a partir de información secundaria en el municipio de Cajicá.	35
Ilustración 14. Secuencia de actividades para la construcción del catálogo de eventos general.	37
Ilustración 15. Complemento para la construcción del catálogo de eventos.....	38
Ilustración 16. Eventos de movimiento en masa localizados a partir de información primaria en el municipio de Cajicá.....	39
Ilustración 17. Eventos de movimiento en masa localizados a partir de información secundaria en los alrededores del municipio de Cajicá.	41
Ilustración 18. Metodología del Inventario Geomorfológico.....	44
Ilustración 19. Ortofotografías empleadas para el inventario multitemporal.	47
Ilustración 20. Procesos morfodinámicos cartografiados por medio de fotointerpretación para el área rural del municipio de Cajicá.	48
Ilustración 21. Inventario geomorfológico unificado de movimientos en masa para el municipio de Cajicá.	50
Ilustración 22. Inventario geomorfológico de procesos morfodinámicos, periodo 2016.	54

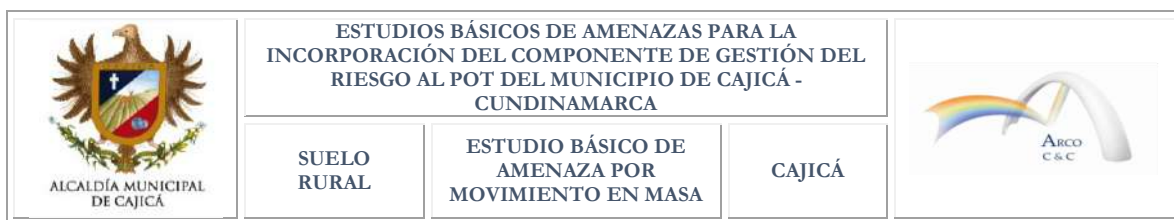


Ilustración 23. Inventario geomorfológico de procesos morfodinámicos, periodo 2017.	55
Ilustración 24. Inventario geomorfológico de procesos morfodinámicos, periodo 2018.	56
Ilustración 25. Inventario geomorfológico de procesos morfodinámicos, periodo 2019.	57
Ilustración 26. Inventario geomorfológico de procesos morfodinámicos, periodo 2020.	58
Ilustración 27. Mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) para el municipio de Cajicá, Cundinamarca.	60
Ilustración 28. Mapa de pendientes para el municipio de Cajicá, Cundinamarca.	73
Ilustración 29. Curvatura perpendicular a la dirección de máxima pendiente.	74
Ilustración 30. Mapa de curvatura para el municipio de Cajicá, Cundinamarca.	75
Ilustración 31. Representación gráfica de la relación deslizamiento y factor condicionante.	77
Ilustración 32. Metodología para el cálculo de la probabilidad temporal a partir de umbrales de lluvia.	89
Ilustración 33. Funciones que representan los umbrales de lluvia que detonan un movimiento en masa en un área específica de análisis.	90
Ilustración 34. Mapa de contrastes o pesos para la variable coberturas de la tierra para deslizamientos, en el municipio de Cajicá.	96
Ilustración 35. Mapa de contrastes o pesos para la variable curvatura de plano para deslizamientos, en el municipio de Cajicá.	99
Ilustración 36. Mapa de contrastes o pesos para la variable pendientes para deslizamientos, en el municipio de Cajicá.	102
Ilustración 37. Mapa de contrastes o pesos para la variable elevación del terreno para deslizamientos, en el municipio de Cajicá.	104
Ilustración 38. Mapa de contrastes o pesos para la variable orientación de ladera para deslizamientos, en el municipio de Cajicá.	106
Ilustración 39. Mapa de contrastes o pesos para la variable aceleración pico del terreno para deslizamientos, en el municipio de Cajicá.	108

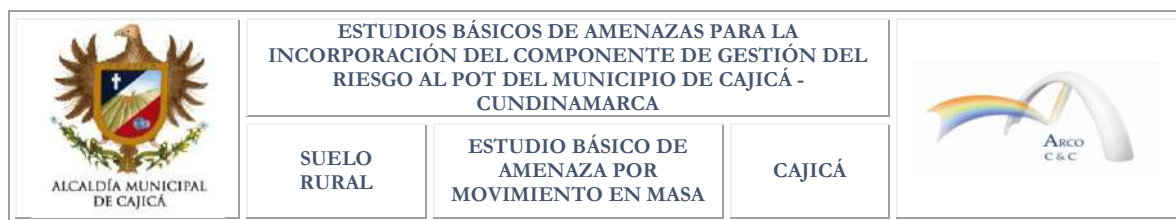


Ilustración 40. Mapa de contrastes o pesos para la variable unidades geológicas superficiales (UGS) para deslizamientos, en el municipio de Cajicá.	110
Ilustración 41. Índice de susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Cajicá.	112
Ilustración 42. Mapa de probabilidad a susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Cajicá.	114
Ilustración 43. Jerarquía de estaciones pluviométricas utilizada para el municipio de Cajicá, Cundinamarca.	116
Ilustración 44. Mapa de las estaciones, sus respectivos polígonos de Thiessen y los eventos reportados en el municipio de Cajicá, Cundinamarca, y sus alrededores.	117
Ilustración 45. Umbral para los 5 días anteriores al evento, estación 21205890 (GUANATA)..	118
Ilustración 46. Umbral para los 15 días anteriores al evento, estación 21205890 (GUANATA).	119
Ilustración 47. Umbral para los 30 días anteriores del evento, estación 21205890 (GUANATA).	120
Ilustración 48. Umbral para los 5 días anteriores del evento, estación 21205910 (LA COSECHA).	120
Ilustración 49. Umbral para los 15 días anteriores del evento, estación 21205910 (LA COSECHA).	121
Ilustración 50. Umbral para los 30 días anteriores del evento, estación 21205910 (LA COSECHA).	121
Ilustración 51. Días de precipitación que superan el umbral o Pt, para los 5 días anteriores al evento, estación 21205890 (GUANATA).	122
Ilustración 52. Días de precipitación que superan el umbral o Pt, para los 15 días anteriores al evento, estación 21205890 (GUANATA).	123
Ilustración 53. Días de precipitación que superan el umbral o Pt, para los 30 días anteriores al evento, estación 21205890 (GUANATA).	123
Ilustración 54. Días de precipitación que superan el umbral o Pt, para los 5 días anteriores al evento, estación 21205910 (LA COSECHA).	124

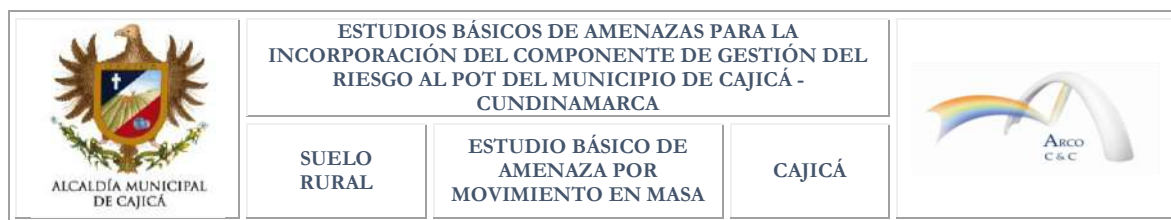
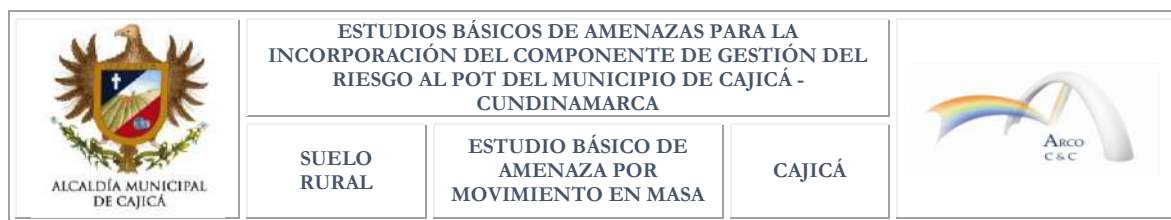


Ilustración 55. Días de precipitación que superan el umbral o P_t , para los 15 días anteriores al evento, estación 21205910 (LA COSECHA).	124
Ilustración 56. Días de precipitación que superan el umbral o P_t , para los 30 días anteriores al evento, estación 21205910 (LA COSECHA).	125
Ilustración 57. Mapa de amenaza por movimientos en masa para el municipio de Cajicá.	130
Ilustración 58. Resultados de la zonificación de amenaza por movimientos en masa, por el POMCA; Cuenca Hidrográfica Río Bogotá y Municipio de Cajicá.	140
Ilustración 59. Resultados de la zonificación de amenaza por movimientos en masa, por ARCO C&C.....	141
Ilustración 60. Proceso metodológico empleado para la delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza.	147
Ilustración 61. Delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza por movimientos en masa en el suelo rural del municipio de Cajicá, Cundinamarca.	149
Ilustración 62. Proceso metodológico empleado para la delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo.....	151
Ilustración 63. Delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo por movimientos en masa en el suelo rural del municipio de Cajicá, Cundinamarca.	152



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas para la elaboración de estudios básicos de amenaza por movimientos en masa.....	16
Tabla 2. Campos para la estructuración del Catalogo de eventos proveniente de actas e información secundaria.	36
Tabla 3. Registros de movimiento en masa en el municipio de Cajicá, Cundinamarca.	38
Tabla 4. Registro de ortofotografías utilizadas.	45
Tabla 5. Inventario geomorfológico unificado de procesos para el municipio de Cajicá.	49
Tabla 6. Inventario geomorfológico multitemporal de procesos para el municipio de Cajicá.....	51
Tabla 7. Unidades Geológicas Superficiales (UGS) identificadas para el municipio de Cajicá.....	63
Tabla 8. Relación deslizamientos L y factor condicionante W.	77
Tabla 9. Pesos finales para la variable coberturas de la tierra para deslizamientos, aplicando el método WofE en el área rural de Cajicá.	93
Tabla 10. Pesos finales para la variable curvatura de plano para deslizamientos, aplicando el método WofE en el municipio de Cajicá.	98
Tabla 11. Pesos finales para la variable pendientes para deslizamientos, aplicando el método WofE en el municipio de Cajicá.	100
Tabla 12. Pesos finales para la variable elevación del terreno para deslizamientos, aplicando el método WofE en el municipio de Cajicá.	103
Tabla 13. Pesos finales para la variable orientación de ladera para deslizamientos, aplicando el método WofE en el municipio de Cajicá.	105
Tabla 14. Pesos finales para la variable aceleración pico del terreno para deslizamientos, aplicando el método WofE en el municipio de Cajicá.	107
Tabla 15. Pesos finales para la variable unidades geológicas superficiales (UGS) para deslizamientos, aplicando el método WofE en el municipio de Cajicá.	109

	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

Tabla 16. Estaciones meteorológicas con cobertura para el municipio de Cajicá, Cundinamarca. 115

Tabla 17. Probabilidades para los 5,15 y 30 días anteriores al evento, Estación 21205890 (GUANATA)..... 126

Tabla 18. Probabilidades para los 5,15 y 30 días anteriores al evento, Estación 21205910 (LA COSECHA)..... 127

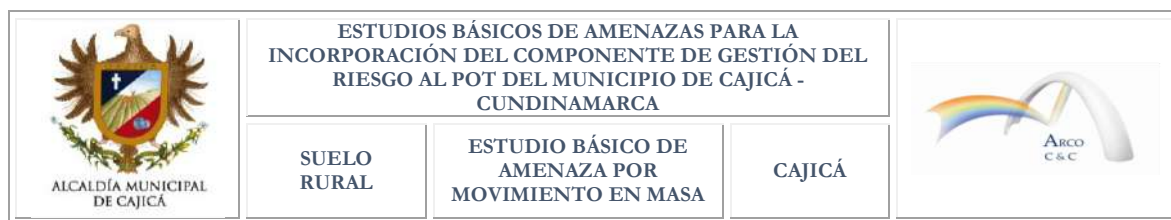
Tabla 19. Resumen de las áreas con condición de amenaza por movimientos en masa en el suelo rural del municipio de Cajicá, Cundinamarca. 150

Tabla 20. Resumen de las áreas con condición de riesgo por movimientos en masa en el suelo rural del municipio de Cajicá, Cundinamarca. 153

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C & C
SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ		

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Distribución tipológica del registro de movimientos en masa – municipio de Cajicá y alrededores.	42
Gráfico 2. Distribución mensual del registro de movimientos en masa – municipio de Cajicá y alrededores.	43
Gráfico 3. Distribución anual del registro de movimientos en masa - Municipio Cajicá y alrededores.	44
Gráfico 4. Ejemplo de una curva de éxito.	82
Gráfico 5. Curva de éxito y categorías de susceptibilidad a deslizamientos para el municipio de Cajicá.	83
Gráfico 6. Curva de éxito y categorías de amenaza total para el área rural del municipio de Cajicá.	128
Gráfico 7. Estadísticas de áreas y porcentajes de ocupación, amenaza por movimientos en masa en el área rural del municipio de Cajicá.	131
Gráfico 8. Área bajo la curva estimación - susceptibilidad deslizamientos.	132
Gráfico 9. Área bajo la curva predicción - susceptibilidad deslizamientos.	133
Gráfico 10. Área bajo la curva estimación y predicción – amenaza por movimientos en masa (deslizamientos).	134



INTRODUCCIÓN

En el marco de la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, del que trata la Ley 1523 de 2012, las entidades territoriales, por su misión y responsabilidad en la gestión del desarrollo social, económico y ambiental sostenible, así como los gobernadores y alcaldes que son parte del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, en quienes recae la directa responsabilidad de conocer y reducir el riesgo y tomar decisiones que permitan el manejo de desastres en el área de su jurisdicción en búsqueda de conducir al desarrollo local, lo cual involucra la planeación del territorio a través de los planes de ordenamiento territorial integrando de esta manera la gestión del riesgo de desastres, tal y como lo señala la Ley 388 de 1997, que relaciona la prevención de amenazas y riesgos naturales, el señalamiento y localización de las áreas de riesgo para asentamientos humanos, así como las estrategias de manejo de zonas expuestas a amenazas y riesgos. Por tal razón, se establecen los estudios básicos de amenaza por movimientos en masa para el área rural del municipio de Cajicá, como una acción estratégica en materia del conocimiento y reducción de fenómenos amenazantes en el territorio.

Para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa en el área rural del municipio, se empleó una metodología de tipo probabilístico, soportada en un análisis estadístico bivariado a través del modelo de Pesos de Evidencia (probabilidad Bayesiana) que parte de un catálogo e inventario de movimientos en masa en conjunto con los datos de precipitación diaria. La metodología aplicada conserva muchos de los lineamientos propuestos en la Guía Metodológica para la Zonificación de la Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000, desarrollada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017) e incluye aportes propios del equipo consultor con el fin de garantizar que la zonificación cumpla los requisitos estipulados en la normatividad.

El presente estudio básico es realizado a escala 1: 25.000, con el fin de dar cumplimiento al decreto 1807 de 2014 compilado en el decreto 1077 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, que contempla las definiciones para estudios básicos de amenaza que se desarrollen en suelo rural.

En adición, el presente documento contempla los objetivos básicos de que trata el estudio, en aras de contribuir al conocimiento de la amenaza por movimientos en masa suelo rural y las medidas de mitigación, consecuentemente se presentan las especificaciones del estudio y el área de estudio, los eventos históricos de movimientos en masa ocurridos en el área rural del municipio de Cajicá, seguido de la explicación en detalle de la metodología y los resultados obtenidos. Finalmente, se presentan las medidas de intervención orientadas a establecer restricciones y condicionantes

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C & C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

mediante la determinación de normas urbanísticas para las áreas categorizadas en amenaza alta y media.

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C & C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

2.1.1. OBJETIVOS

2.1.1.1. Objetivo general

Realizar el estudio básico de amenaza por movimientos en masa en el suelo rural del municipio de Cajicá, estableciendo las condiciones y escalas para incorporar de manera gradual la gestión del riesgo en la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo del Plan de Ordenamiento Territorial, en el marco de la Ley 1523 del 2012, Decreto 1807 de 2014, compilado en el Decreto 1077 de 2015.

2.1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar y zonificar las áreas en condición de amenaza por movimientos en masa en el suelo rural de Cajicá, aplicando una metodología de carácter probabilístico, mediante el modelo de Pesos de Evidencia (WofE) una técnica de análisis bivariado (probabilidad Bayesiana).
- Realizar verificación en campo antes y después de la obtención de resultados según la metodología, con el fin de minimizar el error y verificar la zonificación resultante.
- Realizar el informe final con el mapa de zonificación y su correspondiente categorización para el fenómeno de movimientos en masa.

2.1.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ESTUDIO

El estudio básico de amenaza por movimientos en masa en el suelo rural del municipio de Cajicá, Cundinamarca, cuenta con las especificaciones técnicas descritas en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Especificaciones técnicas para la elaboración de estudios básicos de amenaza por movimientos en masa.

Especificaciones técnicas para la elaboración de estudios básicos de movimientos en masa	
Especificación	Descripción
Área de Estudio	Área rural del municipio de Cajicá. Se refiere al área determinada por el municipio como suelo rural, en la que, se pueden presentar condiciones de amenaza por movimientos en masa. El estudio se realiza a escala 1:25.000 lo que condiciona la unidad mínima a cartografiar, en este caso un área de 1,5625 ha.
Metodología	Para la evaluación de la susceptibilidad del terreno frente a movimientos en masa, se empleó un análisis estadístico bivariado bajo el modelo de Pesos de Evidencia (WofE) (probabilidad Bayesiana), en donde a partir de un inventario geomorfológico, a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG), se estima el grado de importancia de cada una de las clases que integran las variables analizadas para la ocurrencia de estos procesos (cobertura, pendientes, elevación, curvatura de plano, unidades geológicas superficiales y aceleración pico del terreno (PGA). Para eventos de tipo deslizamiento (general), se calcula un Índice de Susceptibilidad (LSI, por sus siglas en inglés) y a partir de los pesos calculados, se estima la probabilidad de ocurrencia para cada uno; la susceptibilidad final corresponde a la adición de la probabilidad por deslizamientos asumiendo que es un proceso no excluyente e independiente. Para la zonificación de la amenaza se considera como detonante la lluvia, al estimarse la probabilidad condicional de que una precipitación P supere un umbral P_t y que esta última detone un movimiento en masa para un período de observación de un año. Habiéndose calculado la probabilidad temporal de la lluvia y la susceptibilidad final por deslizamientos, y asumiendo es un evento independiente, la amenaza en términos de probabilidad estará dada por el producto y las categorías quedarán establecidas con base en las áreas acumuladas donde ocurran los eventos, estando, en cualquier caso, las áreas de amenaza alta en las zonas donde se hayan acumulado el 75% del área del inventario (deslizamiento).

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C&C
SUELO RURAL		ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

Especificaciones técnicas para la elaboración de estudios básicos de movimientos en masa	
Especificación	Descripción
Insumos	Para la generación del estudio de amenaza por movimientos en masa se consideran las variables: cobertura, pendientes, curvatura de plano, unidades geológicas superficiales, aceleración pico del terreno (PGA), elevación del terreno, orientación de ladera, distancia a zonas de falla, geología, geomorfología, uso y coberturas del suelo, drenajes, clima y sismicidad, además de insumos básicos como la cartografía básica del IGAC, el modelo digital de elevación, las ortofotografías y la cartografía generada a escala 1:25.000, junto con la información adquirida en diferentes entidades y la recopilada durante el trabajo de oficina y de campo. Adicionalmente se tiene en cuenta la información presentada en las planchas del Servicio Geológico Colombiano, y los datos históricos recopilados de las diferentes bases de datos como DESINVENTAR, UNGRD, la plataforma del SIMMA, y en particular el banco de información de la oficina de Gestión del Riesgo del municipio.
Productos	Como productos, se presentan los mapas de zonificación de amenaza por movimientos en masa y el presente documento técnico realizado para el área rural del municipio de Cajicá.

Fuente: Estructura ajustada del Decreto 1807 de 2014, MVCT.

2.1.2.1. Área de estudio

El municipio de Cajicá tiene una extensión de 269,489 km². Se localiza en el centro del departamento de Cundinamarca, en dirección al norte del distrito capital del país a 193 km de esta. Siendo el tercer municipio más poblado luego de Zipaquirá y Chía, se ubica en la provincia Sabana Centro al destacarse por sus actividades de producción en cuanto a artesanías y tradiciones históricas. Limita al norte con el municipio de Zipaquirá, al sur con el municipio de Chía y cercano a este el distrito capital, por el oriente con el municipio de Sopo, por el occidente con el municipio de Tabio. Cajicá está conformado por un área rural compuesta por 4 veredas (90,92%); constituidas por 16 centros urbanos rurales y 27 sectores, la parte urbana (9,08%), constituida en el centro del municipio y en el barrio capellanía, localizado en las afueras del perímetro urbano en dirección norte confirmadas en el Plan Básico de Ordenamiento territorial.

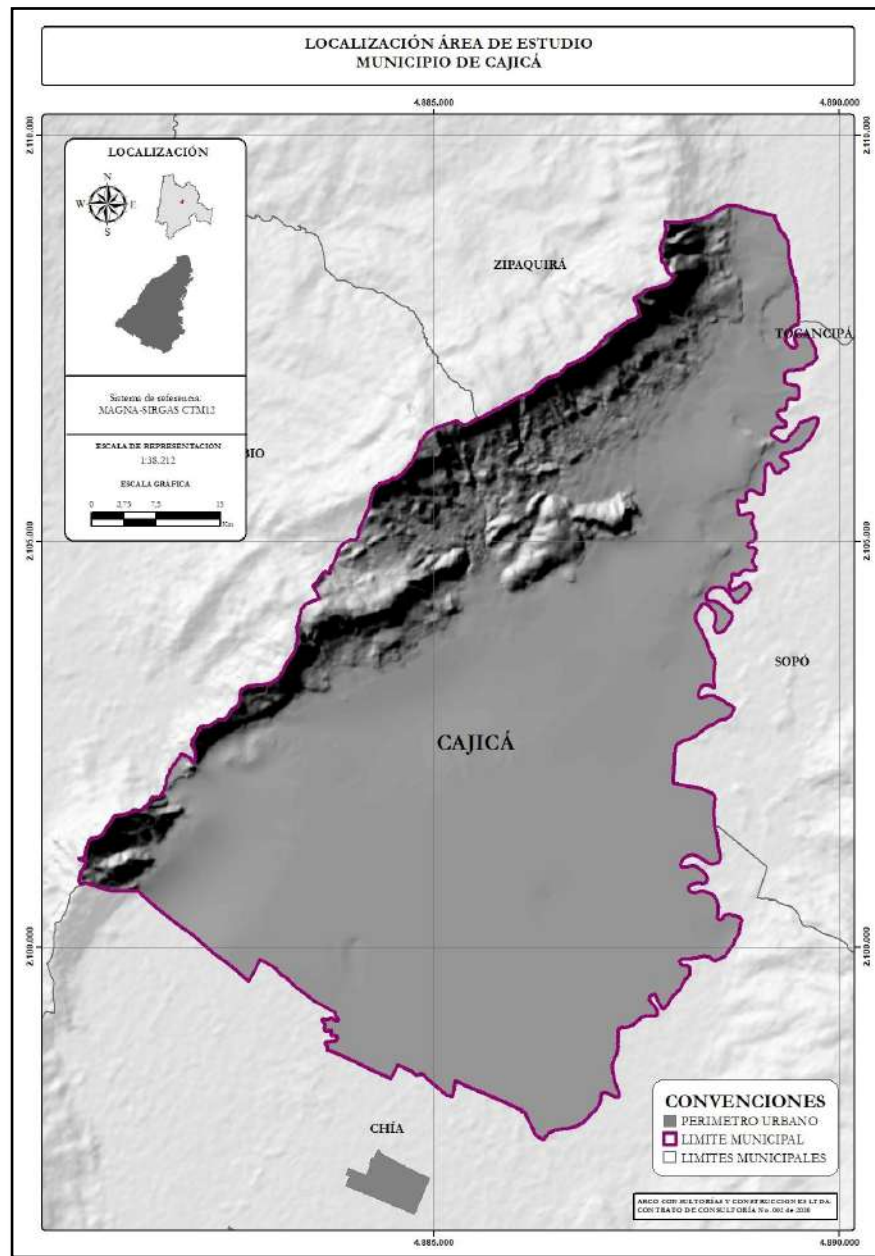
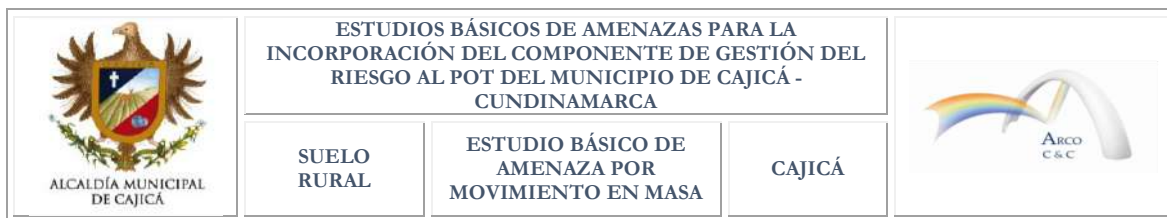


Ilustración 1. Localización geográfica del municipio de Cajicá, Cundinamarca.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

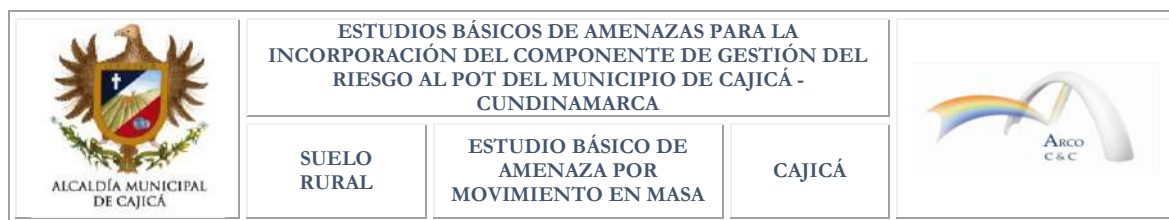


2.1.3. ANTECEDENTES

Como parte del proceso de elaboración de los estudios básicos de amenaza, y en particular para la temática de movimientos en masa para el área rural de Cajicá a escala 1:25.000, se consultan estudios realizados con antelación para el área del municipio, en aras de establecer un marco de referencia para el presente estudio. Teniendo en cuenta lo anterior cobran especial relevancia los resultados de la zonificación provenientes de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográfica POMCA, para el río Bogotá (Sector Tibitoc – Soacha), el cual ha sido aprobado y adoptado por medio de la resolución 957 del 02 de abril de 2019. Dichos resultados se encuentran a una escala de trabajo 1:25.000, presentándose más adelante en este documento una comparación de la metodología y la zonificación siendo pertinente señalar que, algunos de los insumos temáticos implementados en los POMCAS han sido revisados, ajustados e incorporados, si es el caso, de acuerdo con la pertinencia de cada uno en el proceso de zonificación de amenazas.

Se cuenta también para el municipio con estudios regionales consultados directamente en las bases de datos proporcionadas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), entre ellas se usan principalmente el Motor de Integración de Información Geocientífica (MIIG) por el cual se obtienen dos estudios regionales, el primero de ellos es la Zonificación Geomecánica de la Sabana de Bogotá, realizado en el año 2004, a una escala 1: 25 000. El segundo estudio obtenido, es el estudio regional de movimiento en masa a nivel nacional, el cual presenta planchas a escala 1: 100 000. También se utiliza el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) el cual proporciona la Clasificación Regional de Amenaza Relativa de Movimientos en Masa en Colombia a escala 1:100 000, mapas y memorias explicativas de la zonificación de la susceptibilidad y amenaza relativa por movimiento en masa a escala 1:100 000 (Plancha 209 – Zipaquirá, Plancha 228 – Bogotá Noreste).

Por otra parte, la administración municipal a través de la dependencia de Gestión del Riesgo de Desastres, adscrita a la Secretaría de Planeación, realiza el Plan Municipal de Gestión de Desastres de Cajicá para el año 2018, en el cual se definen diferentes aspectos relevantes en el municipio, entre ellos, la identificación, consolidación y priorización de escenarios de riesgo, junto con su caracterización (asociados a fenómenos hidrometeorológicos, incendios forestales, infraestructura de servicios públicos, entre otros). También presenta programas y acciones preventivos para las zonas en amenaza y demás.



También, se obtiene documentación proporcionada por el Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres de Cajicá (SIGRD), el cual presenta actas, proyectos, informes y demás a escala municipal, departamental y nacional, adicional a esto, muestra un histórico de eventos con sus respectivas características y demás observaciones. Se anexan los estudios principales proporcionados por el consejo de riesgo y amenaza:

1. Plan Municipal para la gestión del riesgo municipal del municipio de Cajicá, Cundinamarca (PMGR)
2. Estrategia municipal para la respuesta a emergencia del municipio de Cajicá, Cundinamarca (EMRE)
3. Estrategia municipal para la rehabilitación y recuperación del municipio de Cajicá, Cundinamarca (EMRec)

Finalmente, se llevó a cabo una revisión de eventos históricos ocurridos en el municipio, con el fin de complementar la información entregada por la Alcaldía, consultándose bases de datos nacionales como *DesInventar*¹, *UNGRD*², *CAR*³ y diferentes medios de comunicación. Esta información se presentará más adelante en el documento en el apartado de Catálogo de eventos.

2.1.4. METODOLOGÍA

La metodología empleada para la zonificación se basa en un modelo de Pesos de Evidencia (WofE), donde a través de un inventario geomorfológico de deslizamientos, se evalúan la incidencia de cada una de las clases que componen las variables: coberturas, curvatura de plano, pendientes, aceleración pico del terreno (PGA), elevación del terreno y unidades geológicas superficiales. La susceptibilidad del terreno frente a movimientos en masa, puede ser considerada como la adición de la susceptibilidad a deslizamientos, bajo la hipótesis de que la ocurrencia de estos eventos es independiente y no excluyente; así mismo, la amenaza final calculada, corresponde al producto de la susceptibilidad general y la probabilidad temporal de que en el transcurso de un año se supere un

¹ Sistema de inventario de efectos de desastres que proporciona información sistemática sobre la ocurrencia de desastres cotidianos de pequeño y mediano impacto

² Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.

³ Base de datos espacial suministrada por la Corporación autónoma Regional de Cundinamarca.

umbral de lluvia y que dicha precipitación sea capaz de detonar un movimiento en masa (**Ilustración 2**). A continuación, se presenta una descripción detallada de las etapas que integran el proceso de zonificación.

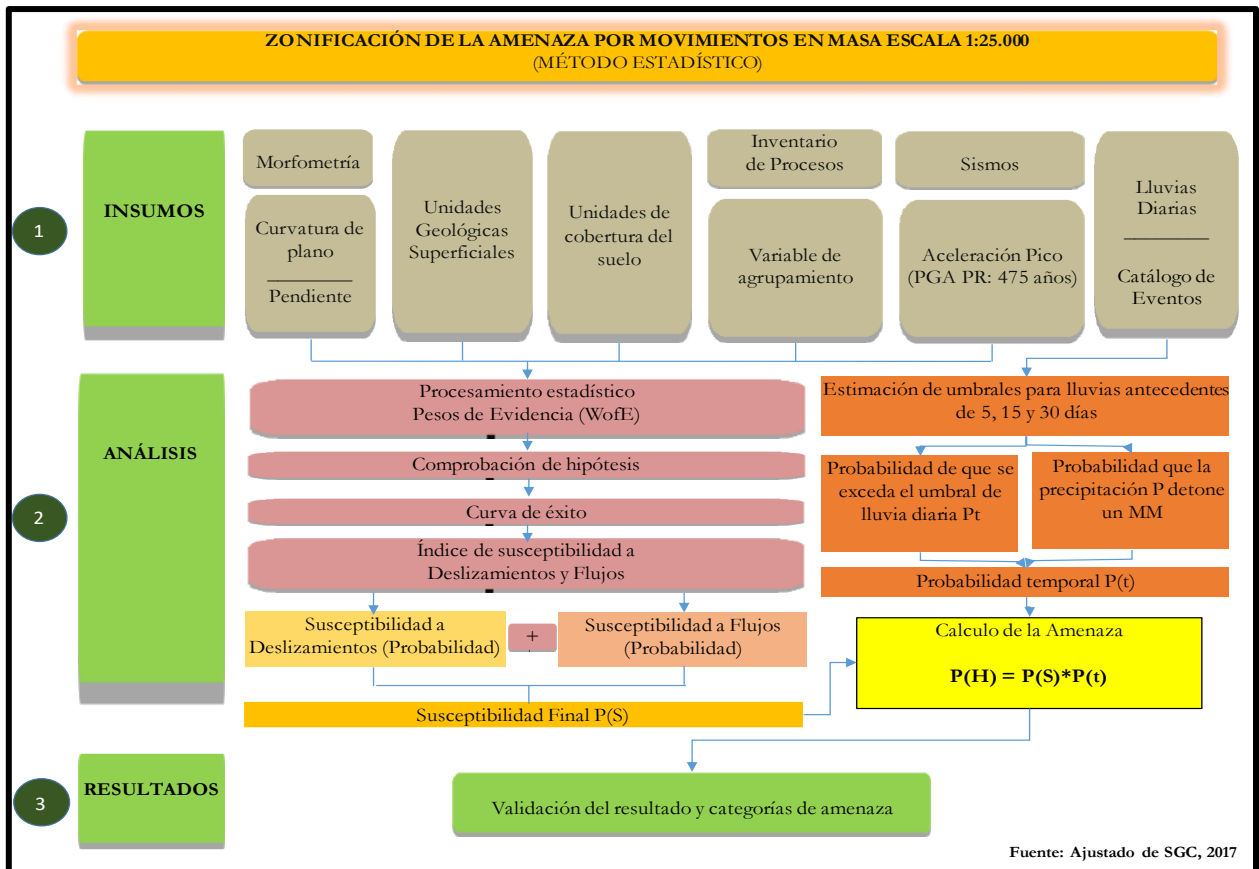
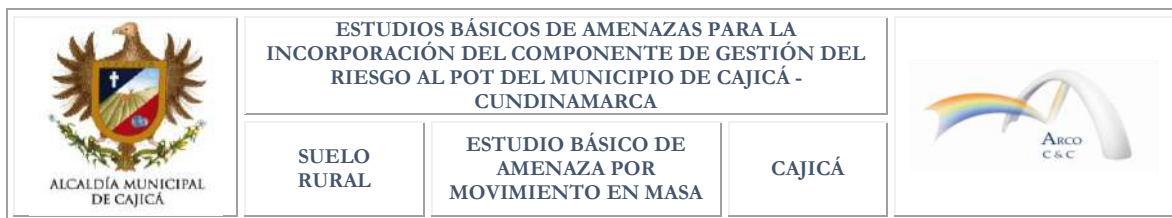


Ilustración 2. Modelo conceptual para el cálculo de la susceptibilidad por movimientos en masa.

Fuente: Ajustado de Servicio Geológico Colombiano (2017).

2.1.4.1. Análisis de susceptibilidad

El análisis de susceptibilidad llevado a cabo en este estudio guarda los elementos principales consignados en la Guía Metodológica para la Zonificación de la Amenaza por Movimientos en Masa



Escala 1:25.000, desarrollada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2017) e incluye otros aportes realizados por la Consultoría con el ánimo de garantizar que los resultados y la metodología sean acordes con lo requerido en la normatividad.

2.1.4.1.1. Insumos para el análisis de la susceptibilidad

Como primer paso se requiere la preparación de los factores condicionantes, tales como las unidades geológicas superficiales, producto de la combinación de los mapas geológico y geomorfológico, las unidades de cobertura de la tierra, el inventario de procesos morfodinámicos y las variables geométricas de pendientes, curvatura de plano y elevación del terreno.

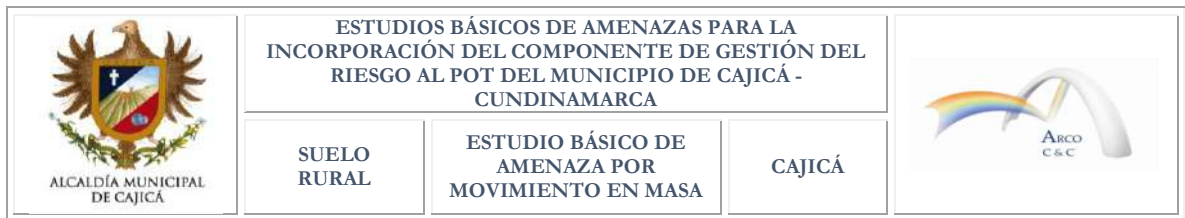
▪ Coberturas

La importancia de las coberturas vegetales radica en la protección de los suelos frente a los procesos erosivos al disminuir la escorrentía superficial, pues reduce el movimiento de agua en zonas con pendientes altas. De la misma manera, el sistema radicular, provee sustento a los horizontes del suelo, por lo que su presencia disminuye las probabilidades de deslizamiento y generación de discontinuidades superficiales. Para la construcción de este insumo se siguió el proceso presentado en el **(capítulo I. Numeral 1.5.8)**.

▪ Morfodinámica

La morfodinámica comprende los diferentes procesos naturales responsables de la transformación de la superficie terrestre a su estado actual y que para el presente estudio serán considerados especialmente los movimientos en masa ocurridos en el municipio. La clasificación empleada considera la propuesta del Proyecto Multinacional Andino: *Geociencias para las Comunidades Andinas (GEMMA, 2007)*, en donde se emplean tres tipos de movimiento en función de las características del desplazamiento del material: **deslizamiento, flujo y caída de rocas**.

Un *deslizamiento* es el desplazamiento de una masa de material (suelo o roca) a lo largo de una superficie de falla o de una delgada zona donde ocurre una deformación cortante. Un *flujo* es un



movimiento en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido, en algunas oportunidades se originan a partir de otro tipo de evento. Una *caída* consiste en el desprendimiento de bloques de roca o detritos de una ladera, sin que exista contacto a lo largo de la superficie, el material cae desplazándose principalmente por el aire (Varnes, 1978 en GEMMA 2007).

La zona rural de Cajicá presenta una topografía variada de pendientes abruptas-muy abruptas al occidente y una extensa planicie de pendiente plana a suavemente inclinada, en la cual se identifica un modelado fluvial reciente a sub-reciente, asociada a la dinámica del Río Frio (sector sur occidental) y el Río Bogotá (que recorre de sur a norte al costado oriental del municipio) con intervenciones antrópicas. En la zona de montañas predominan pendientes mayores a los 16°, en contraste con las zonas de planas con una inclinación de 0-2° producto de la dinámica fluvial la cual favorece las condiciones de estabilidad.

En las zonas montañosas y en la planicie se identifican rocas, suelos y depósitos **Ilustración 3;** las primeras constituidas por materiales geológicos de origen sedimentario (areniscas, lodolitas) afectados estructuralmente por pliegues y fallas, entre los cuales destacan estructuras regionales como el Anticlinal de Bogotá, la Falla de Boyacá y la Falla el Porvenir, además de procesos glaciales y denudacionales que también han modificado la resistencia de la roca induciendo fracturamiento del macizo y su consecuente meteorización y/o transporte.

	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	



Ilustración 3. Cantera la Naveta al sur occidente del municipio, vía Manas-Molino, que muestra: roca, suelo y depósitos, en un mismo escenario, a) roca estratificada insitú, b) depósitos de tipo coluvión, c) Formación de suelo por acción de la meteorización, Estación 009 (X: 4887135,31 Y: 2105117.61).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

Los suelos residuales, derivados de las rocas sedimentarias identificadas, poseen tamaños de partículas arena, arcillas y limos, que a su vez integran clastos matriz-soportados de diversos tamaños que no sobrepasan los 30 centímetros, en otros casos la roca está completamente meteorizada (saprolito fino) **Ilustración 4.** Tratándose de un suelo estos son fácilmente excavables y desmenuzables, pero también es posible observar estructuras heredadas de la roca madre, como los planos de estratificación o diaclasas. Algo similar en composición ocurre con los suelos transportados de tipo aluvial, coluvial o fluvio-torrencial, ya que el material presente proviene de la misma roca madre que es común en la región (areniscas y lodolitas en su mayoría) solo diferenciándose, en que tanto han sido transportados (con clastos más redondeados), ausencia de estructuras heredadas, un aumento de matriz o la presencia de un suelo ya maduro donde los clastos son pocos o están ausentes.

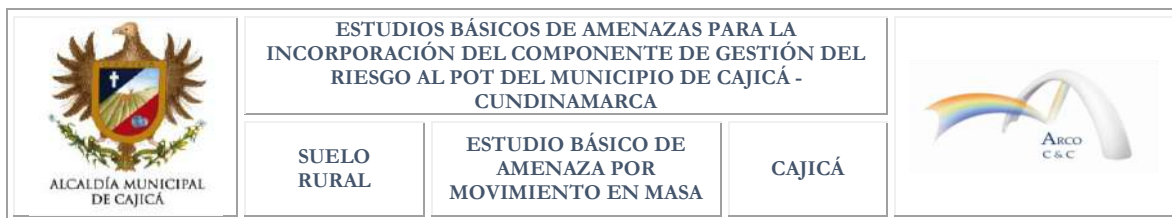
 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C&C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	



Ilustración 4. Exposición de suelo con alto grado de meteorización, camino al cerro de las Cruces, vereda Chuntame, a) vista general del suelo expuesto, b) en detalle la macrofábrica heredada de la roca, y clastos matriz-soportados, perteneciente a la Formación Labor y Tierna, estación 022 (X: 4883693,98 Y: 2103462,78). Exposición de suelo sobre roca blanda de la Formación Guaduas, cerro Montepincio, vereda Chuntame, c) suelo totalmente meteorizado donde se visualizan los horizontes, la fábrica de la roca original se ha perdido, estación 068 (X: 4885921,39 Y: 2104752,62).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

El municipio se caracteriza por tener dos tipos de relieve muy contrastantes, la planicie y la zona montañosa. La planicie (que es el área de mayor extensión) está dominada por el río Bogotá, y ha servido como receptora del material proveniente de la parte alta montañosa y de los depósitos del río Bogotá (principalmente) y el río Frio, esta gran área plana está limitada por la región montañosa que se asienta a lo largo del costado occidental y ha hecho de barrera natural para encausar los depósitos antes mencionados. Dentro de estos dos escenarios son comunes los depósitos de tipo



coluvial, de flujo de detritos, de caída de roca, aluviales y fluviotorrenciales, pero los de gran magnitud no son de fácil visualización debido a la abundante vegetación que enmascara la geomorfología de estos depósitos.

Los materiales presentes ya sea la roca estratificada parental, suelos o depósitos, son susceptibles a que su estabilidad se vea afectada por las condiciones naturales o por la intervención humana. Fuertes pendientes, condiciones estructurales propias de la roca de tipo estratificada, la intervención humana y las condiciones ambientales que favorezcan o aceleren la meteorización, derivan a la movilización de la roca y el suelo. Durante la fase de campo, se reconocen pequeños deslizamientos, depósitos coluviales y caída de roca, así mismo los materiales susceptibles a la ocurrencia de futuros movimientos en masa.

Los cortes en el macizo rocoso para la creación de vías son puntos críticos, pues alteran las condiciones naturales de la roca. Aunque la estabilidad también depende de la disposición estructural de la roca y que tan meteorizada esta la misma, es también la intervención humana la que puede desencadenar movimientos en masa que afectan a la población. Entre las veredas Chuntame y Canelón, en el límite municipal (extremo sur occidental de Cajicá) sobre la vía que de Cajicá conduce a Tabio, se observa la Formación Plaeners, la cual se expone en la vía con una pendiente alta (aproximadamente 70°). Aunque en la actualidad no hay un riesgo latente, pues el material desprendido es relativamente poco (pequeños coluviones en sectores muy meteorizados) y en general la resistencia del macizo es alta, cabe la posibilidad que el incremento de la meteorización, la pendiente alta y el diaclasamiento puedan presentar con el tiempo, deslizamientos de tipo planar (aquellos favorecidos por los planos de estratificación) (**Ilustración 5**).

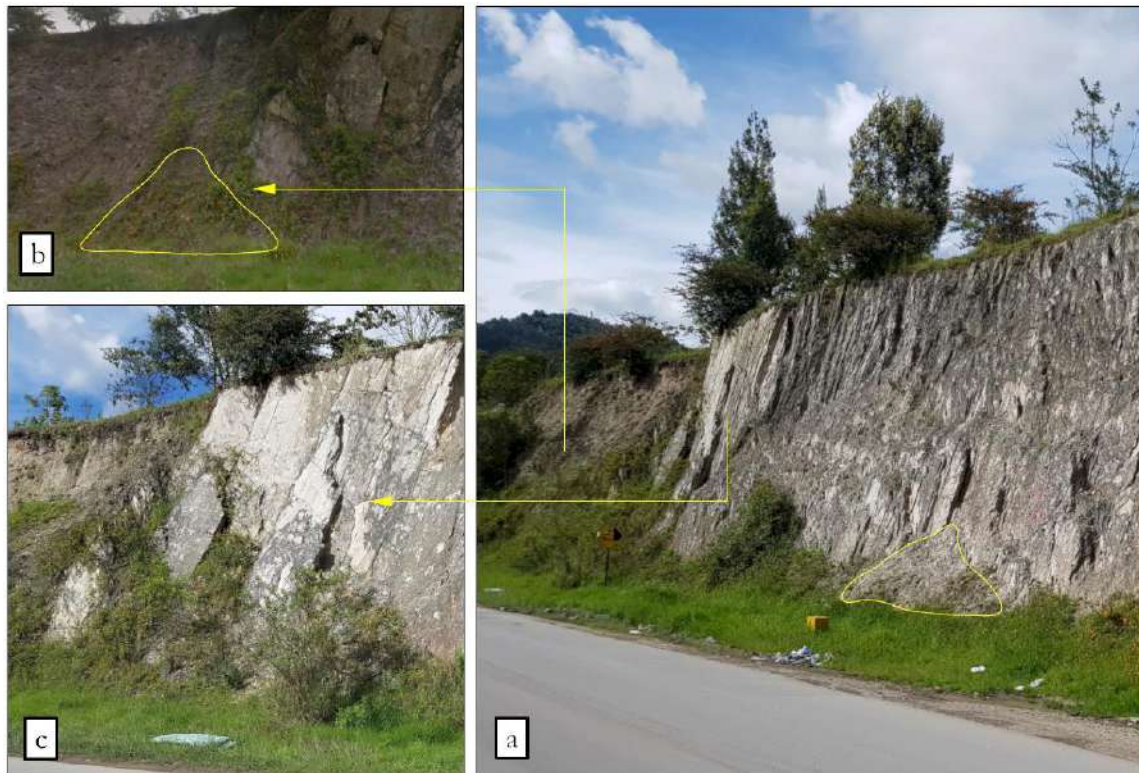


Ilustración 5. Afloramiento de la Formación Plaeners, sobre la vía Cajicá-Tabio, a) contraste entre la roca de arenisca fresca y competente a la derecha y la roca muy meteorizada a la izquierda, en detalle pequeño coluvión de material desprendido, b) el corte en carretera se intercala con partes en que la roca ha sido altamente meteorizada mostrando pequeños coluviones, c) El alto ángulo y diaclasamiento pueden dar lugar a caídas de bloque y/o mecanismos de falla en cuña o planares, estación 003 (X:4881718,81 Y:2101953.91)

En la vereda Chuntame, sobre la vía, algunos metros más arriba del Mirador La Cumbre, se observa suelo transportado coluvial (con un avanzado estado de meteorización) el cual puede ser propenso a un deslizamiento por licuación o deslizamiento por flujo de roca débil (de pequeña escala) obstruyendo el paso vehicular. Por lo cual se ha optado por la implementación de gaviones para así darle estabilidad al talud y como muro de contención. Estos gaviones también se han implementado sobre la vía Cajicá – Zipaquirá (costado occidental) en especial en zonas donde los depósitos de suelo transportado fluviotorrencial, alcanzan un espesor considerable, superior a los 3 metros, que los convierte en material de poca estabilidad, por lo blando de los mismos y el alto grado de pendiente debido al corte de la carretera (**Ilustración 6**).

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C&C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	



Ilustración 6. Depósitos Coluviales y fluviotorrenciales que pueden llegar a ser potencialmente inestable; a) en la vereda Chuntame, cerca al Mirador la Cumbre, estación 004 (X: 4885232,44 Y: 2108792,98), b) Gavión de contención para suelos transportados fluviotorrenciales, sobre la vía Cajicá – Zipaquirá, estación 014 (X: 4888757,46 Y: 2,104,895.72).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

En la parte central de la vereda Chuntame, Cerro Montepincio, se puede observar como la parte baja del cerro (compuesto por roca blanda de la Formación Labor y Tierna) puede estar siendo afectada por la reptación del suelo, aunque incipiente, debe prestarse atención y registrar su evolución con el paso del tiempo, pero cabe anotar que por su ubicación no representa un peligro para la comunidad (**Ilustración 7**).

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C&C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	



Ilustración 7. Reptación incipiente en la base del Cerro Montepincio, vereda Chuntame, estación 069 (X: 4886005,53 Y: 2104722,65).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

En la vereda Chuntame al norte de la vía Manas-Molino (ubicado en el cerro) se puede observar los clastos producto del movimiento en masa del tipo “flujo de detritos”. Este se caracteriza por estar confinado a un canal con pendiente pronunciada, con la presencia de trenes de bloques rocosos y grandes bloques individuales, que son el resultado del alto diaclasamiento de la roca, que inician en la cabecera por varios deslizamientos superficiales o por inestabilidad en segmentos del cauce que poseen pendiente muy fuertes. Esto hace que tengan un alto poder destructivo (**Ilustración 8**).

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C&C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	



Ilustración 8. Flujo de detritos en la vereda Chuntame, a) tren de bloques rocosos confinados al canal, b) bloques de tamaño centimétricos potencialmente dañinos, c) Los fragmentos de roca se depositan donde la pendiente se suaviza, estación 075 (X: 4884022,55 Y: 2103935,93).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

En la vereda Chuntame en el límite sur occidental del municipio, en el sector montañoso, cerca al mirador La Cumbre, es posible evidenciar movimiento en masa del tipo caída de roca (que no es masivo, ni de tipo flujo). Esto se debe al diaclasamiento de la roca dura de la Formación Arenisca Dura, en la cual algunos fragmentos han caído. Aunque en apariencia, por la competencia de la roca y el soporte estructural de la vegetación, podría tener una estabilidad prolongada, debe monitorearse; ya que al estar en una zona de pendiente moderada a fuerte y sumado a futuros eventos de temporada de lluvias, el macizo podría debilitarse y ser arrastrado como un flujo de detritos encausado por el que parece ser un camino de herradura en muy mal estado.

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	



Ilustración 9. Movimiento en masa del tipo caída de roca, extremo sur occidental de la vereda Chuntame, a) macizo rocoso al borde de lo que parece ser un camino de herradura en mal estado, b) macizo rocoso diaclasado, pero competente, c) Fragmentos de roca caídos y que han sido embebidos dentro de una matriz de material fino, limoso y suelto, estación 072 (X: 4883431,31 Y: 2103804,71).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

Canteras

En el municipio, gracias a la evolución geológica, son frecuentes las explotaciones de materiales de construcción, que ha convertido a Cajicá en fuente importante de este recurso por medio de las canteras en diferentes puntos. En dichas áreas es fácil identificar taludes expuestos, depósitos coluviales por la movilización de los materiales y mecanismos de falla debidos al conjunto de discontinuidades del macizo rocoso **Ilustración 10.**

	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

En la Cantera de la Naveta, en la vía Manas-Molino, se observan deslizamientos en cuña allí el cuerpo del deslizamiento encausa su movimiento en la intersección de los planos de las discontinuidades. Este tipo de deslizamiento debe ser monitoreado constantemente por la facilidad que encuentra el material de viajar a través de estos planos y más aún por la pendiente que estos tienen, **Ilustración 11.**



Ilustración 10. Cantera de la Naveta, en el cruce de las vías Manas-Molina y Cajicá-Zipacquirá, (X: 4887399,85 Y: 2105363,29).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).



Ilustración 11. Deslizamiento en cuña en consecuencia la formación de coluviones en la Cantera de la Naveta, vía Manas-Molino, estación 009 (X: 4887135,31 Y: 2105117.61).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

En la vereda Chuntame en el límite sur occidental del municipio y encerrado por la vía Cajicá-Tabio, se encuentra una cantera de gran escala en la cual es posible evidenciar movimiento en masa del tipo flujo de detritos con la posterior formación de coluviones que han sido provocados de forma controlada para la extracción del material, **Ilustración 12 (a)**. En el mismo lugar se observa también caída de roca (movimiento que se caracteriza por no ser masivo, ni de tipo flujo), esto se debe a la dinámica propia de la intervención antrópica, la gran pendiente consecuencia de la explotación económica del material arenoso y del cual se espera que haya un trabajo responsable en el diseño y planeación del proceso de extracción, sumado a un monitoreo constante del macizo rocoso **Ilustración 12 (b)**.

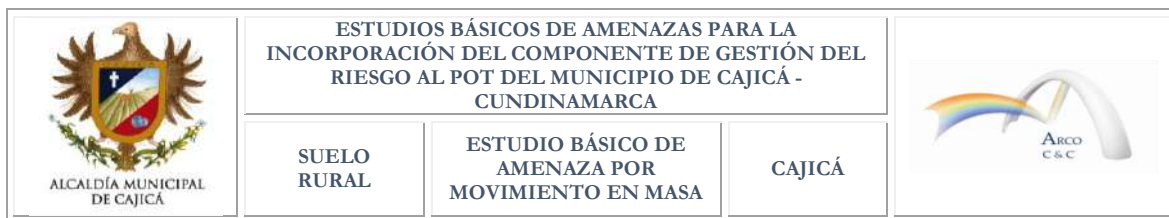


Ilustración 12. Cantera, en la vía Cajicá-Tabio límite municipal al sur occidente de Cajicá, a) coluviones provocados de forma controlada para la extracción del material de construcción, b) fragmentos de roca que han cedido a la fuerte pendiente y la gravedad, estación 20 (X: 4881817,74 Y: 2102239,6).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

▪ Catálogo de eventos

“Los movimientos en masa son desplazamientos del terreno a favor de la pendiente que se generan por acción de la fuerza de gravedad, bajo la influencia de ciertos factores como son el agua, los eventos sísmicos, la aplicación de carga excesiva, las excavaciones para la adecuación de viviendas o la apertura de senderos y vías, entre otros” (Alcaldía de Medellín, s.f.); Pueden clasificarse en diferentes grupos como: deslizamientos, flujos, desprendimientos, caídas de rocas, hundimientos o procesos de reptación. Cuando se producen estos movimientos se hacen evidentes cambios en el



paisaje como hundimientos o incluso caídas de rocas que se desprenden de las laderas, por lo que los movimientos en masa representan una potencial amenaza puesto que, pueden dejar a su paso, deterioro de infraestructura pública, viviendas, daño en cultivos y hasta taponamiento en los cauces, entre otras emergencias; por tal razón, es de vital importancia contar con un catálogo de eventos el cual permita conocer el comportamiento histórico de dichos procesos.

Un catálogo de eventos es una base de datos con información de la ocurrencia histórica de eventos (movimientos en masa, inundaciones, incendios forestales o avenidas torrenciales), obtenida a partir de fuentes de información secundaria como: comunicados de prensa, reportes de la Cruz Roja, la Defensa Civil, Bomberos, entre otras. Este tipo de información presenta limitaciones técnicas, pero en un alto porcentaje da cuenta de los impactos de los eventos de manera cualitativa o cuantitativa (INGEOMINAS (2002) en SGC, 2017).

Para la construcción del catálogo de eventos por movimientos en masa del el municipio de Cajicá, fueron consultados los registros históricos de diferentes bases de datos, entre ellas la plataforma del Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), DESINVENTAR, Sistema de información para la Gestión de Riesgo de Desastres de Cajicá (SIGRD), Gobernación de Cundinamarca, Corporación Autónoma Regional (CAR) (zonificación de puntos críticos), registros del Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hídrica del Río Bogotá (POMCA), el Plan Municipal de Gestión de Riesgo de Desastres de Cajicá, y demás registros informativos (noticias, periódicos y portales de información).

Finalmente se extrajo los datos existentes en dichos registros que dieran cuenta del tipo de evento amenazante, su lugar (componente, vereda, barrio), registro fotográfico (en caso de que este sea disponible), clasificación general y específica, fecha del evento, coordenadas, factores detonantes y condicionantes, entre otros. Dicha información es estructurada en una tabla **(Tabla 2)**, que permitiera posteriormente la representación de estos datos en forma de gráficos y representación espacial y temporal a través de un sistema de información geográfica SIG; en dicha tabla quedaron registrados 118 eventos en el municipio de Cajicá (Incendios Forestales, Inundaciones, Movimientos en masa, entre otros), los cuales lograron ser espacializados en su totalidad **(Ilustración 13)**.

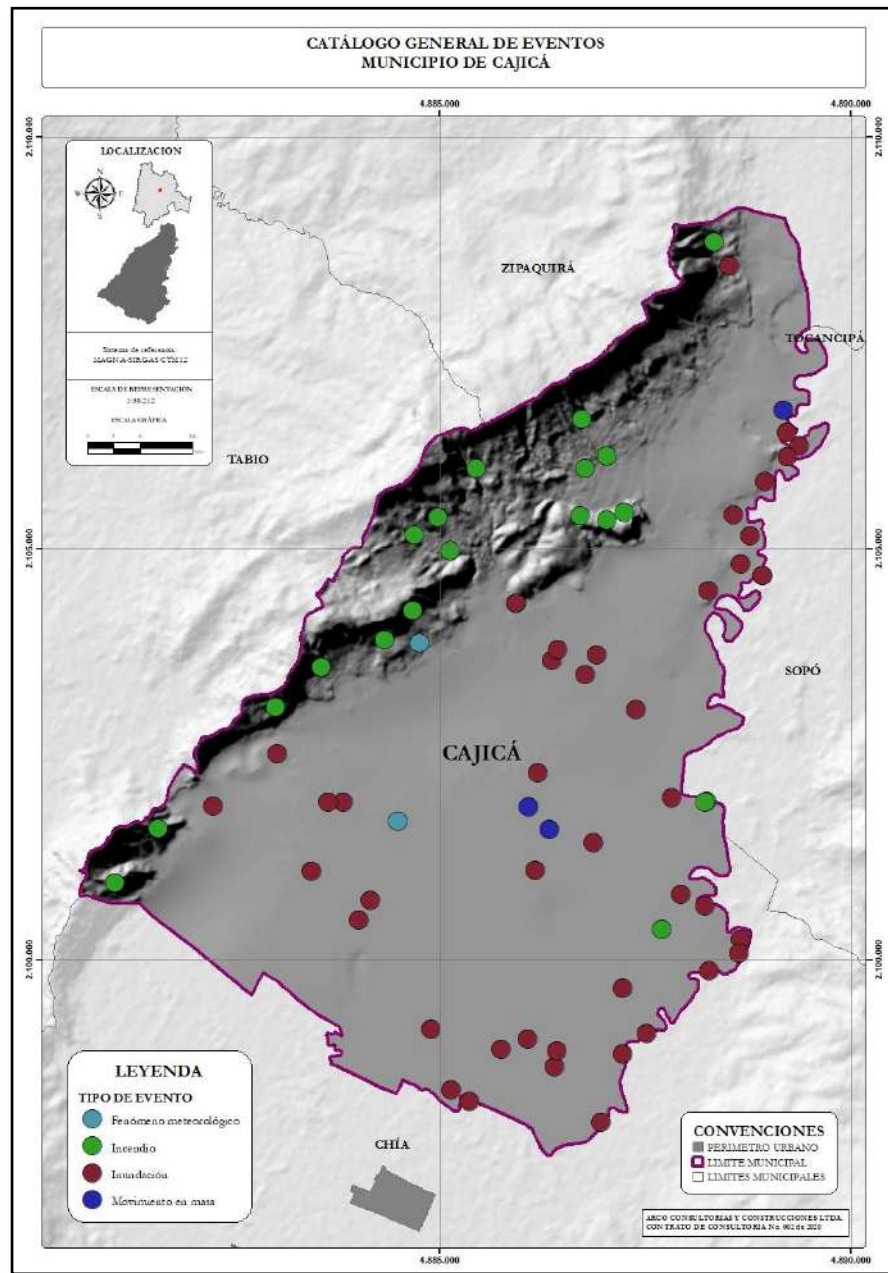


Ilustración 13. Eventos localizados a partir de información secundaria en el municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C & C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

Tabla 2. Campos para la estructuración del Catálogo de eventos proveniente de actas e información secundaria.

CAMPOS CONTENIDOS EN LA BASE DE DATOS ESTRUCTURADA	ID
	Municipio
	Componente (Urbano o Rural)
	Vereda o unicación
	Barrio
	Registro fotográfico
	Clasificación General
	Clasificación Especifica
	Fecha reporte
	Fecha evento
	Día/mes/año
	Latitud Longitud
	Detonante
	Factores condicionantes
	Recurrencia
	Consecuencias
	Observaciones del reporte
	Fuente
	Acceso/información a fuente

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

El esquema que representa la secuencia de actividades para la construcción del catálogo de información primaria (Bases de datos) y el catálogo con la información secundaria (informes, documentos, actas), se muestra en la **Ilustración 14**. Se debe destacar que ambas actividades se complementan una a otra, pues la consulta en las bases de datos establece los eventos sucedidos y la consulta en los documentos o actas, afirma estos eventos, no obstante, existen algunas excepciones,

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C & C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

pues no todos los eventos se encuentran simultáneamente en ambas fuentes.



Ilustración 14. Secuencia de actividades para la construcción del catálogo de eventos general.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

Se establece un catálogo general de eventos de 118 registros, de los cuales, 45 de estos no presentan coordenadas geográficas, optándose por definir una localización tentativa definida en función de la vereda o el barrio (esto no se anexa a la **Ilustración 13**). Se debe destacar que la gran mayoría de estos eventos generales, cuentan con registros fotográficos extraídos de las fuentes correspondientes, facilitando así su reconocimiento. Adicionalmente los eventos que presentaban mayor número de registros y de los cuales se obtuvo mayor cantidad de información en el municipio fueron: fenómenos meteorológicos (tormentas eléctricas, vendavales, sequías, heladas), inundaciones e incendios forestales.

Al momento de realizar la recopilación de eventos por movimiento en masa, se evidencia baja presencia en el municipio de Cajicá, generando así deficiencia de datos para el estudio a realizar, partiendo de esto, se decide aplicar una metodología, la cual consistirá en dos fases como se evidencia en la **Ilustración 15**, esto permite una mayor recopilación de eventos por movimiento en masa en el municipio y sus alrededores con fines de mejora del estudio.

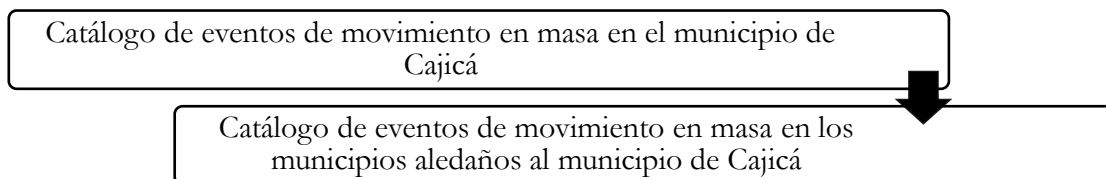
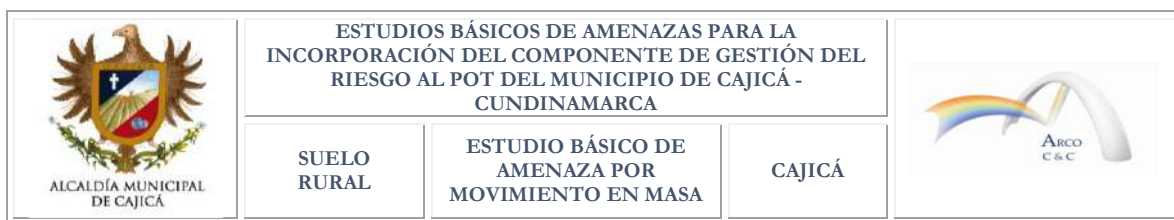


Ilustración 15. Complemento para la construcción del catálogo de eventos.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

La etapa final para la generación del catálogo que consolide los registros para movimientos en masa comprende la revisión y unificación de los parámetros que integran las bases de datos construidas, realizándose la depuración de los registros previos, homogenización de los criterios de entrada de los registros y el ajuste de la representación espacial final. Conforme a lo anterior se han identificado cuatro (4) eventos relacionados con movimientos en masa en el municipio (**Tabla 3**) y se realiza su espacialización en el municipio (**Ilustración 16**).

Tabla 3. Registros de movimiento en masa en el municipio de Cajicá, Cundinamarca.

MUNICIPIO	VEREDA	CLASIFICACIÓN ESPECÍFICA	FECHA EVENTO	LATITUD	LONGITUD	FUENTE
Cajicá	Casco Urbano	Deslizamiento	24/01/2012	4,921111111	-74,02777778	SIMMA
Cajicá	Casco Urbano	Deslizamiento	27/10/2010	4,964800176	-74,00000000	SIMMA
Cajicá	Casco Urbano	Deslizamiento	10/07/2010	4,918611000	-74,0255560	SIMMA, UNGRD, DesInventar, SIGRD
Cajicá	Zona Rural	Caída de Rocas	29/08/2016	4,983653000	-74,0049330	CAR

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

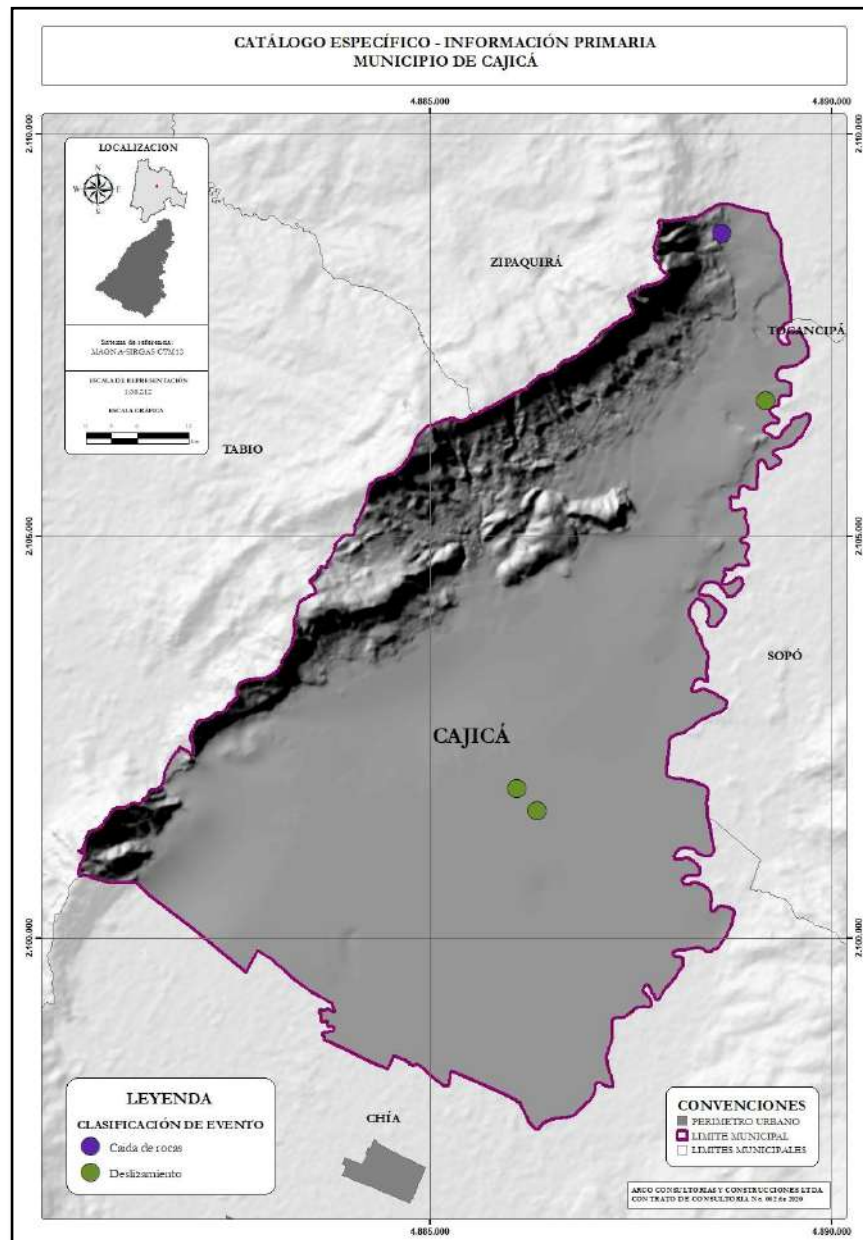
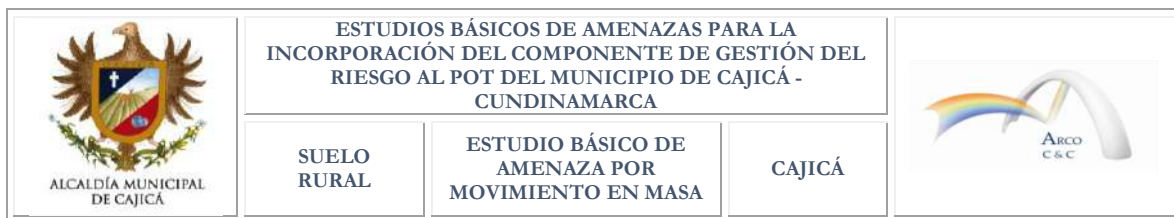


Ilustración 16. Eventos de movimiento en masa localizados a partir de información primaria en el municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)



Debido al bajo número de eventos en el municipio (como se nombra con anterioridad), es necesario adelantar una recopilación de registros de movimientos en masa ocurridos en los municipios colindantes a la zona de estudio (**Ilustración 17**), entre ellos Chía, Zipaquirá, Sopo, y Tabio. Esto por cuanto se requiere analizar el comportamiento de los procesos de inestabilidad frente a los valores de precipitación, siendo insuficiente el número de eventos reportados para el municipio.

Conforme a lo anterior, se recopiló un registro de 63 eventos asociados a movimientos en masa, de los cuales 59 pertenecen a las municipalidades colindantes y los 4 restantes al municipio de Cajicá. Con esta información se llevó a cabo el tratamiento y análisis de los datos para establecer la recurrencia y distribución espacial de los eventos, siendo importante señalar que la mayoría de los registros ocurren en la zona sur del casco urbano y hacia el sur del municipio como se muestra en la **Ilustración 16**, mientras que en los eventos recopilados en los municipios aledaños, la gran mayoría de estos ocurren hacia los centros urbanos y cabeceras municipales (**Ilustración 17**).

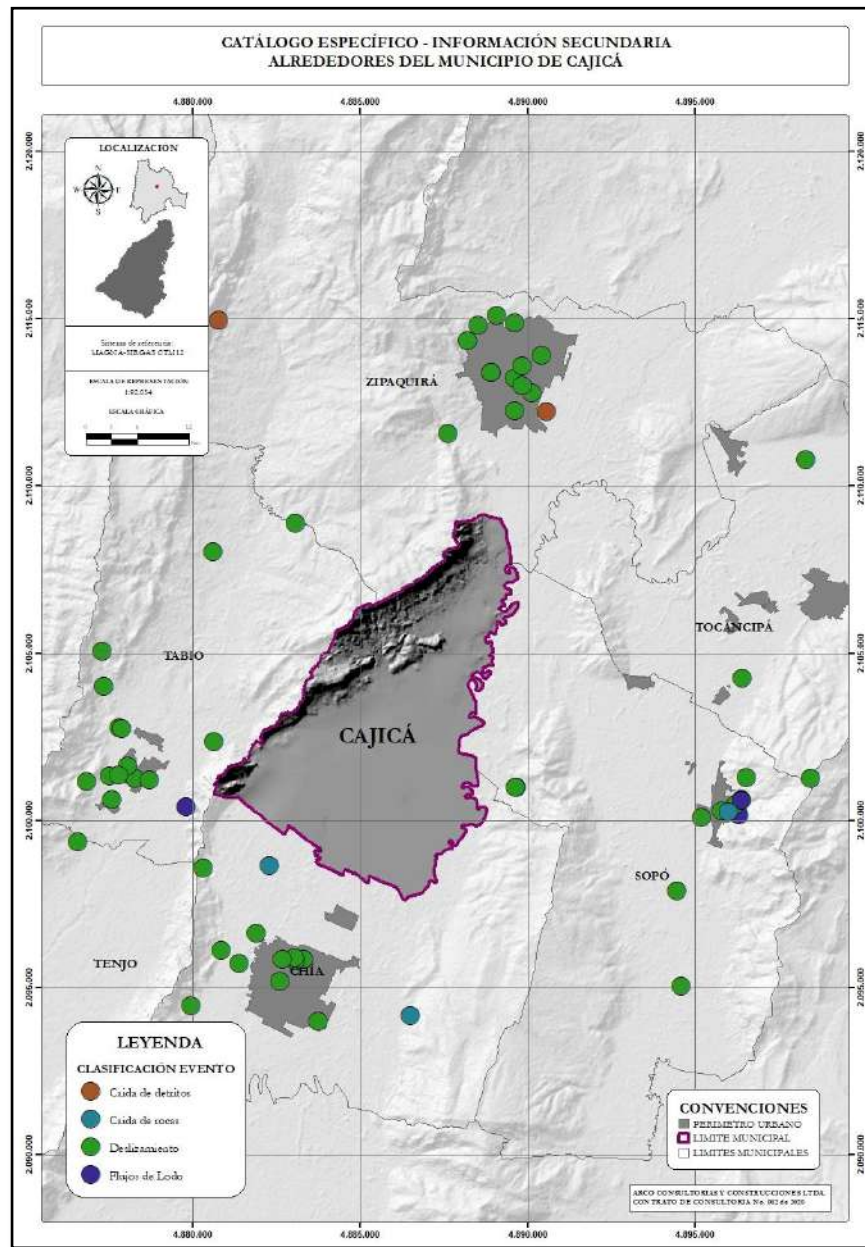
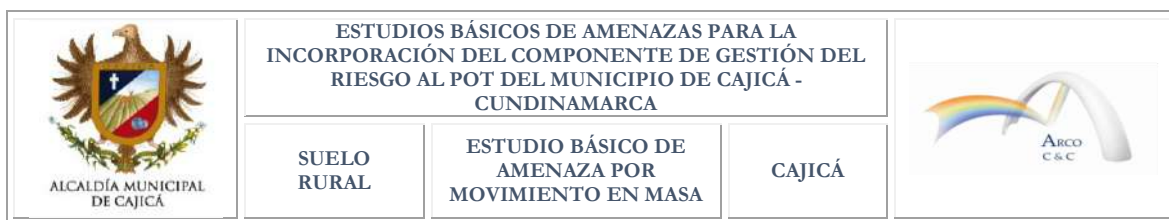


Ilustración 17. Eventos de movimiento en masa localizados a partir de información secundaria en los alrededores del municipio de Cajicá.

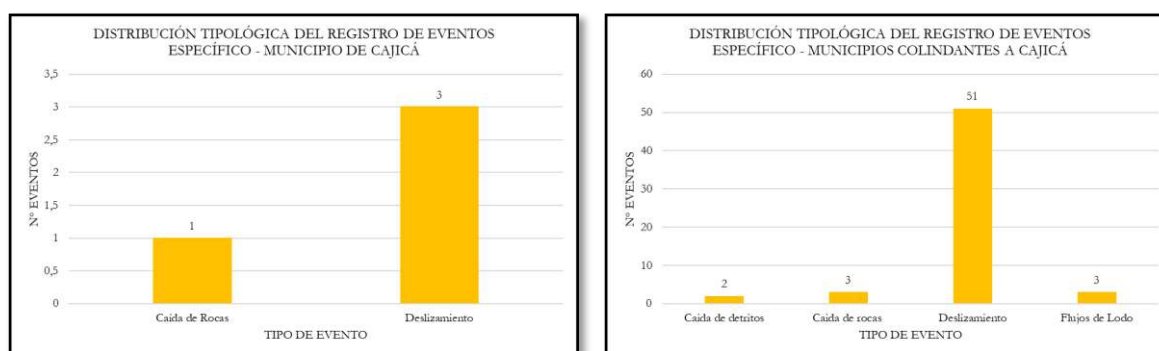
Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).



Por medio del catálogo específico de eventos de movimiento en masa del municipio de Cajicá y sus alrededores, se obtienen estadísticas relacionando principalmente el tipo de evento y su fecha de incidencia. De acuerdo con esto, los datos sugieren que el tipo de movimiento en masa de mayor recurrencia en la región y en el área de Cajicá, corresponde a los deslizamientos y en menor proporción los flujos y caídas.

De acuerdo con el Plan Municipal de Gestión del Riesgo se han identificado que los escenarios con riesgo por movimiento en masa son las zonas asociadas con fenómenos de origen geológico en el campo rural, y las zonas en las que se practica la actividad económica minería, empero, el riesgo por movimiento en masa no es un escenario prioritario de atención, lo cual concuerda con los datos obtenidos, pues se evidencia muy baja ocurrencia de este tipo de eventos.

Gráfico 1. Distribución tipológica del registro de movimientos en masa – municipio de Cajicá y alrededores.

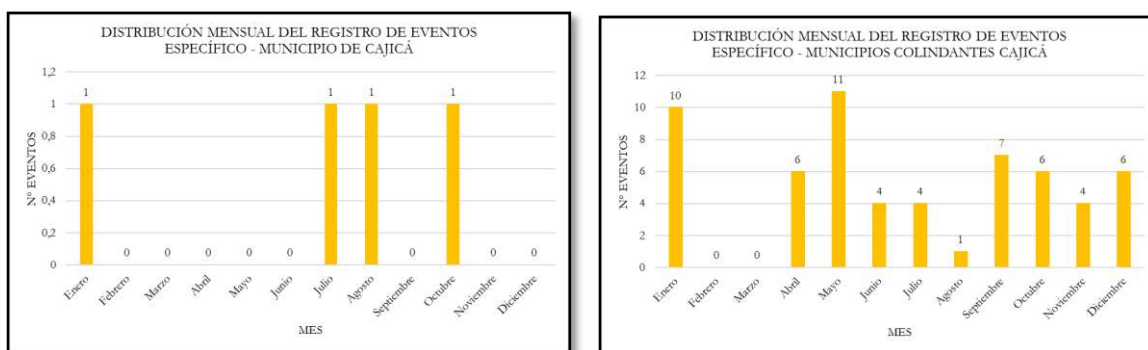


Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

En relación con la distribución temporal de los eventos, se evidencia una tendencia bimodal coincidente con el comportamiento de la precipitación en la provincia Sabana Centro, donde hacia los meses de abril/mayo y septiembre/octubre se dan los mayores valores de precipitación coincidentes con los periodos de mayor frecuencia de eventos, tanto para Cajicá como para los municipios aledaños. También se evidencia que, en el mes de enero, en Cajicá como sus alrededores,

hay un aumento de eventos destacable, causando hipótesis de posibles agentes detonantes ajenos al comportamiento y picos de precipitación en este mes.

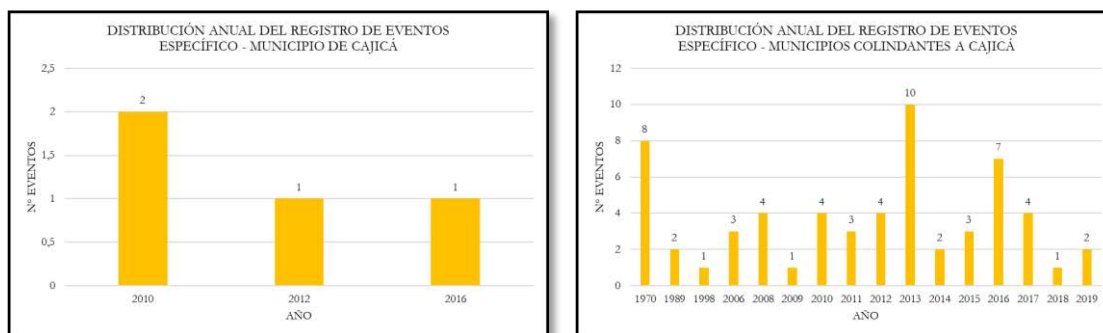
Gráfico 2. Distribución mensual del registro de movimientos en masa – municipio de Cajicá y alrededores.



Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

Frente a la frecuencia de eventos por año, se observa un registro discontinuo, resaltando los periodos de 1970, 2013 y 2016, en los cuales se presentan los máximos relativos en la región, mientras que, para el municipio de Cajicá, solo se identifica el año 2012 con este comportamiento. La tendencia observada dista de lo esperado para el periodo 2010-2011, en el cual se registraron los picos de precipitación en el territorio colombiano, pero a pesar de este comportamiento extremo, no necesariamente se ve reflejado en un incremento sustancial de reportes asociados a problemas de estabilidad de ladera detonados por lluvias.

Gráfico 3. Distribución anual del registro de movimientos en masa - Municipio Cajicá y alrededores.



Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

▪ Inventario Geomorfológico

La construcción del inventario geomorfológico comprende un proceso de fotointerpretación de imágenes de sensores remotos, las cuales presentan la resolución espacial suficiente para la identificación de movimientos en masa de tipo deslizamiento, flujo, caída, reptación, erosión, entre otros. El proceso metodológico para la construcción de dicho inventario se muestra en la **Ilustración 18**, el cual comprende la búsqueda y recopilación de imágenes aéreas de diferente temporalidad y con una resolución espacial adecuada; georeferenciación de esta información; fotointerpretación de las imágenes e identificación de cada proceso mediante un punto; y finalmente, la digitalización de cada área mediante un polígono a partir del punto previo.

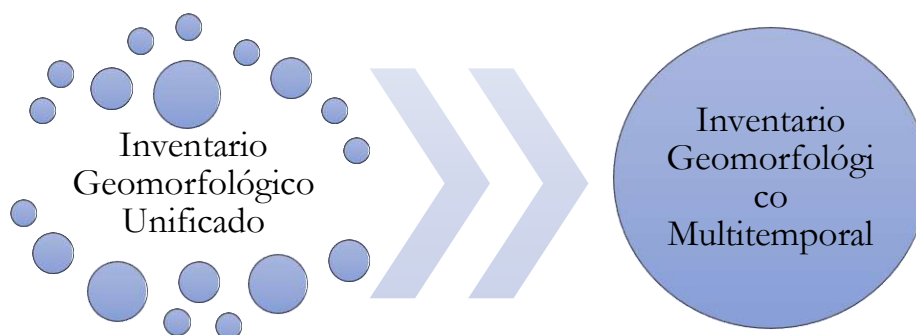
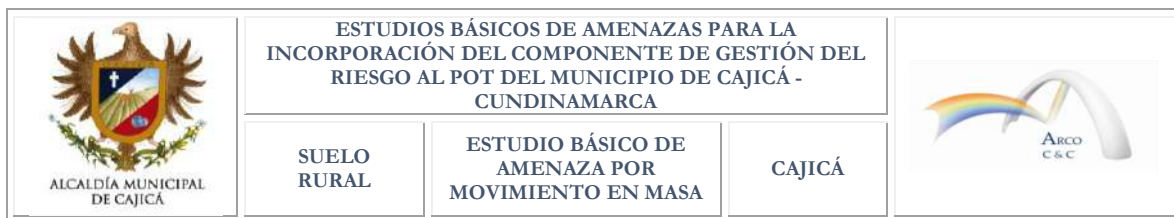


Ilustración 18. Metodología del Inventario Geomorfológico.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).



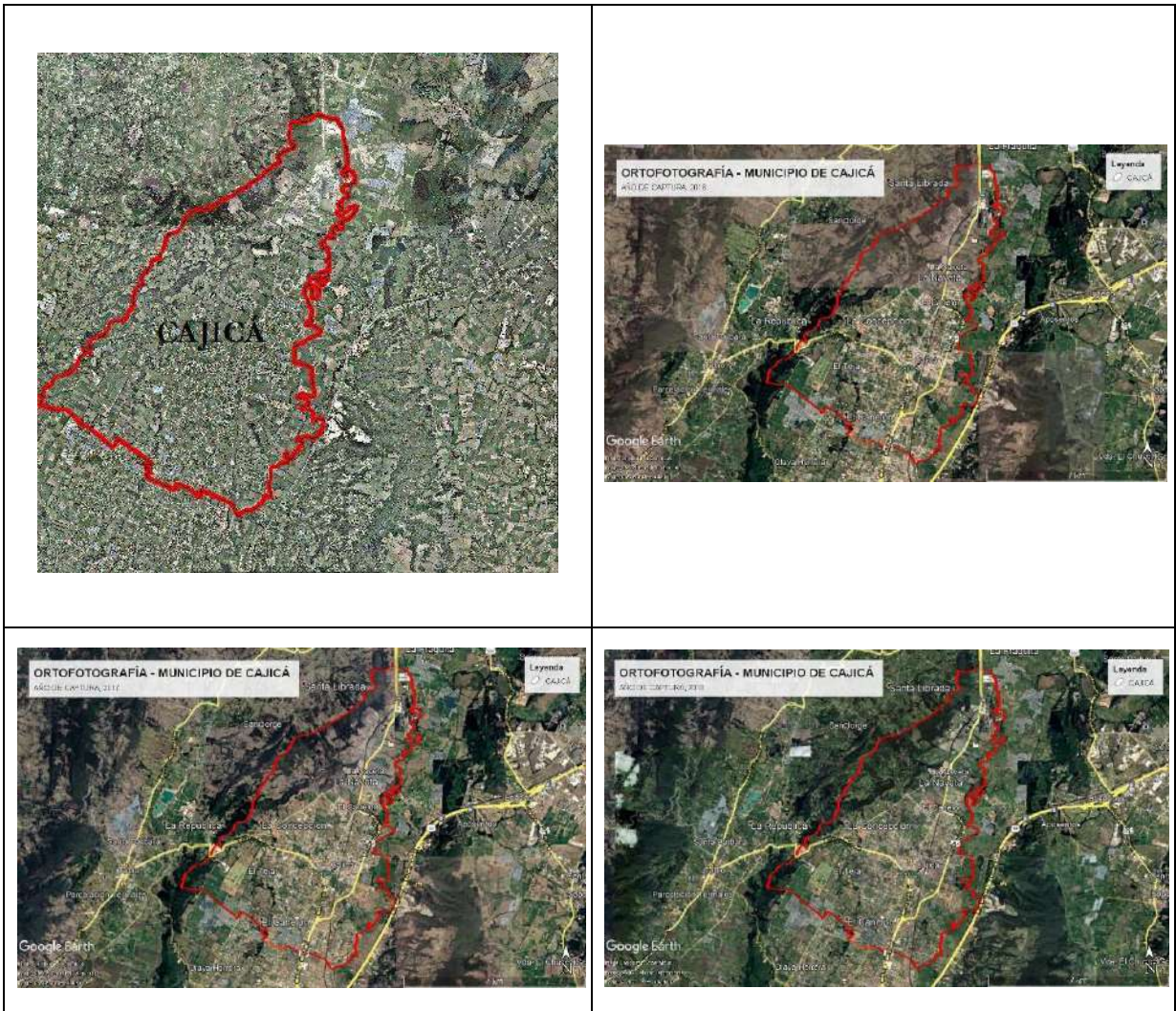
En la primera fase, se lleva a cabo la recolección de imágenes aéreas con suficiente resolución capturadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y aquellas disponibles de la plataforma Google Earth (**Tabla 4**), las cuales abarcan un periodo de análisis de 5 años (2016 – 2021). Las primeras son trabajadas en un Sistema de Información Geográfico, mientras que las segundas pueden ser fotointerpretadas directamente sobre Google Earth.

Tabla 4. Registro de ortofotografías utilizadas.

Año	Fuente de Imagen	Resolución
2014	IGAC	0,5m/píxel
2016	Google Earth	2m/píxel
2017	Google Earth	2m/píxel
2018	Google Earth	2m/píxel
2019	Google Earth	2m/píxel
2020	Google Earth	2m/píxel

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	



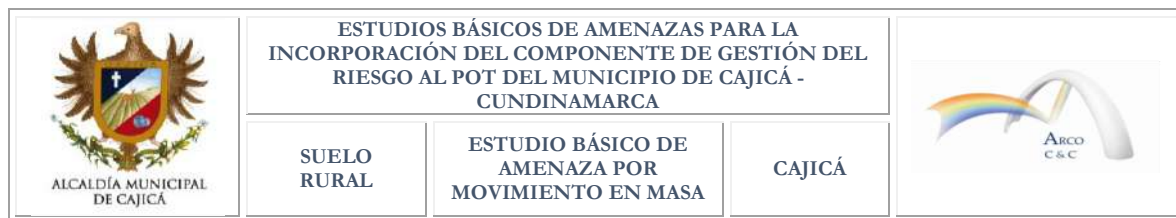


Ilustración 19. Ortofotografías empleadas para el inventario multitemporal.

Fuente: Google Earth, IGAC & Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

Sobre cada una de las imágenes se adelanta el respectivo proceso de fotointerpretación donde se busca identificar los diferentes rasgos asociados a procesos morfodinámicos tales como cicatrices, grietas de tracción, reptación, depósitos de origen coluvial, entre otros, derivados directamente del inventario unificado de eventos históricos. Cada uno de estos rasgos se identifica por medio de un shapefile de puntos o kmz, que luego servirán de base para la digitalización del respectivo polígono con la información asociada (identificador, año, tipo de evento). La ventaja del análisis multitemporal es que permite observar el comportamiento de cada proceso en lo referente a su actividad, extensión y estabilización, por lo que para una misma área es posible conocer si la zona una vez afectada por el proceso de inestabilidad continúa siendo activa o por el contrario se ha estabilizado.

Para el municipio de Cajicá ha sido posible identificar 6 tipos de procesos morfodinámicos en las diferentes imágenes interpretadas (**Ilustración 20**):

- Avenidas Torrenciales
- Caída de Suelo
- Coluviones
- Deslizamientos
- Erosión
- Reptaciones

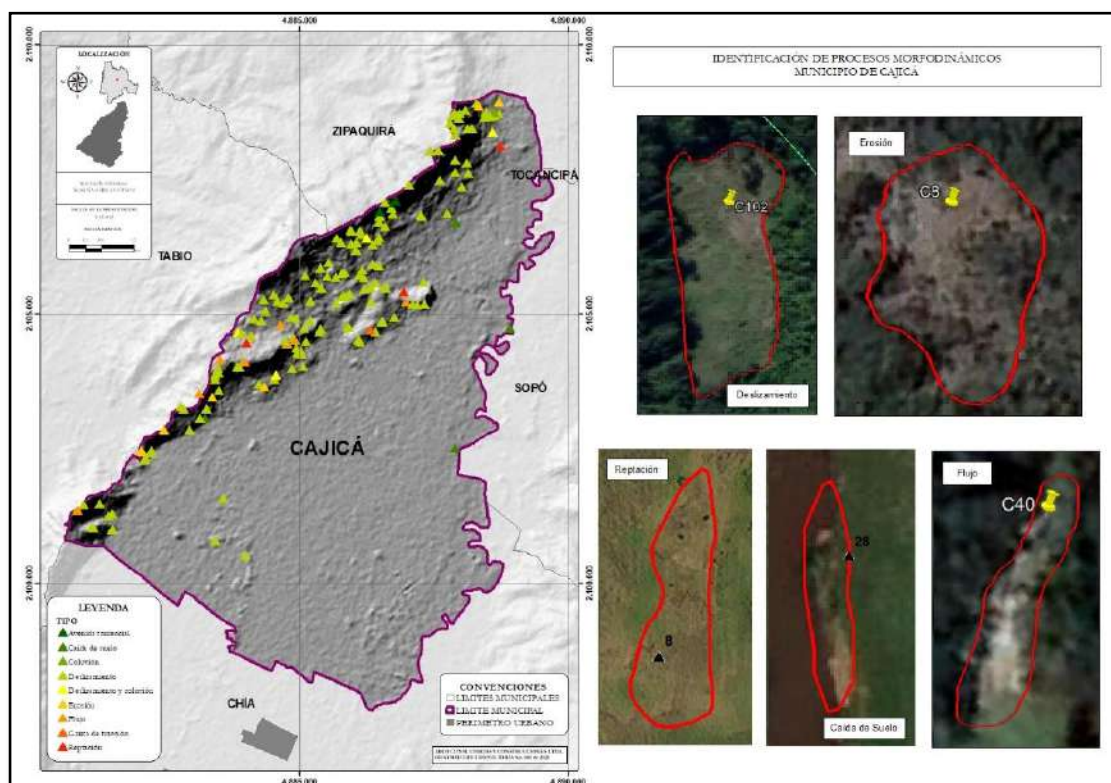


Ilustración 20. Procesos morfodinámicos cartografiados por medio de fotointerpretación para el área rural del municipio de Cajicá.

Fuente: Google Earth & Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

En la **Tabla 5**, se presenta el número total de eventos de acuerdo con el tipo de proceso y la cantidad de eventos históricos en el municipio de Cajicá, los cuales, se derivan directamente del inventario geomorfológico unificado que en conjunto representan un total de 169 procesos, de los cuales 156 corresponden a deslizamientos, 8 a avenidas torrenciales y 5 a caída de suelo.

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA		 ARCO C & C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	

Tabla 5. Inventario geomorfológico unificado de procesos para el municipio de Cajicá.

TIPO EVENTO	CANTIDAD
Avenida Torrencial	8
Caída de suelo	5
Coluvión	0
Deslizamiento	156
Erosión	0
Reptación	0
TOTAL	169

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

En cuanto a su distribución en el inventario geomorfológico unificado, se evidencia que la mayoría de eventos morfodinámicos se encuentran localizados en los límites norte y oeste del municipio sobre los cerros orientales (**Ilustración 21**), no obstante, algunos pocos se localizan en las zonas planas del municipio (suroeste y este) sin afectaciones a centros poblados o zonas urbanas del municipio, exceptuando el centro poblado La Esperanza, localizado en el este del municipio y cercano a un evento morfodinámico de tipo Caída de Suelo. El centro poblado con mayor probabilidad de afectación es Aguanica, pues presencia mayor cantidad a su alrededor de eventos de tipo deslizamiento, empero, la probabilidad sigue siendo baja, puesto que se encuentran a una distancia considerable del centro poblado.

La localización de la mayoría de los eventos de tipo deslizamiento se encuentran sobre los cerros orientales se asocia directamente a las formaciones de rocas duras, intermedias y blandas, entre ellas la formación Arenisca Dura, Conejo y Labor Tierna, caracterizadas por ser materiales sedimentarios de textura clástica consolidada y cementada, sobre pendientes desde los 15° hasta los 45° en su mayoría. Se debe destacar que los eventos de tipo Avenida Torrencial se encuentra todos sobre la unidad geológica superficial Roca Dura de la formación arenisca Dura (Rdfad), sobre pendientes de 35° en promedio. En cuanto a el evento morfodinámico caída de rocas, se localiza desde pendientes menores a 5° sobre coberturas vegetales (herbazales, pastos y vegetación secundaria) correspondiente a zonas de suelo transportado aluvial.

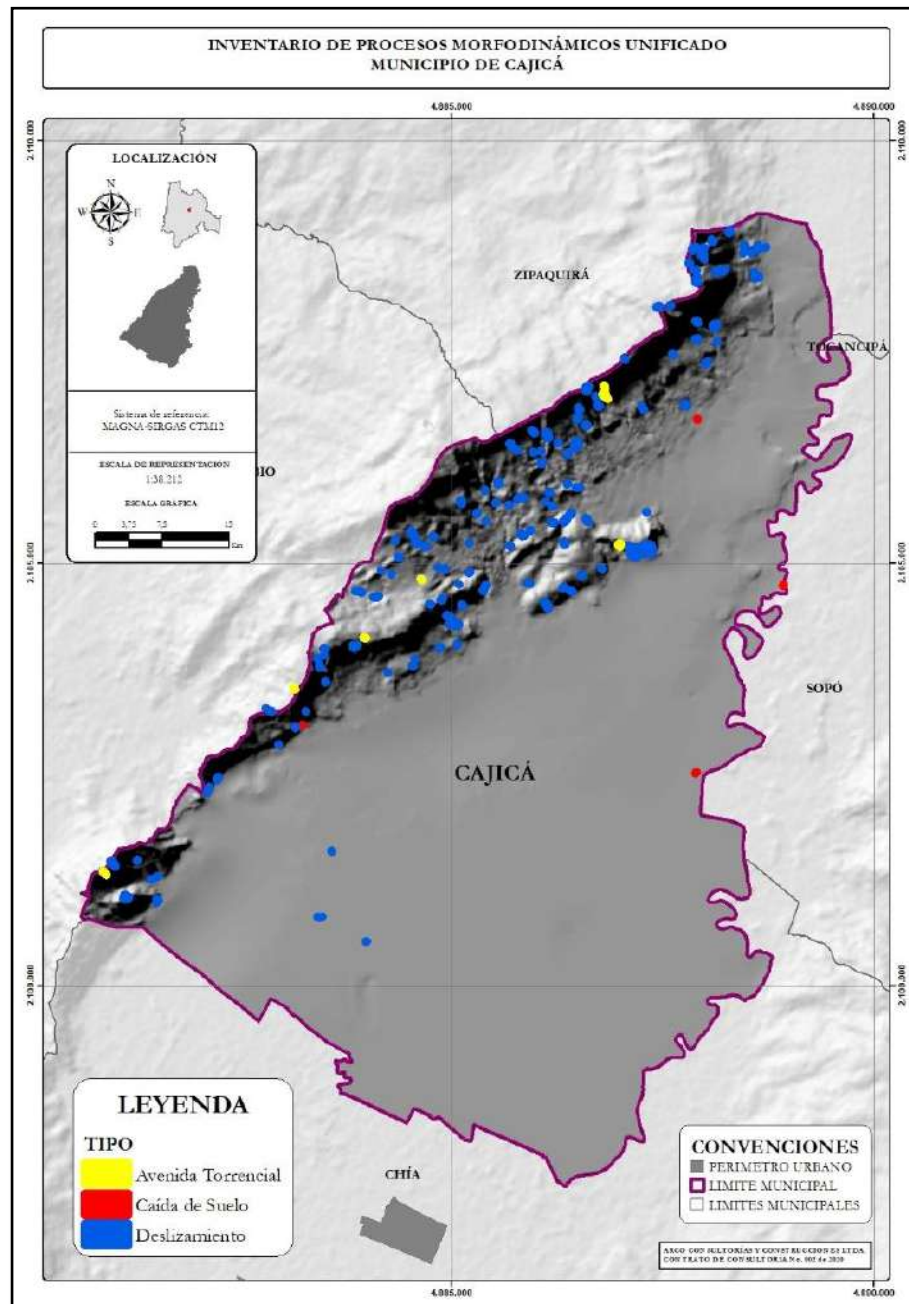
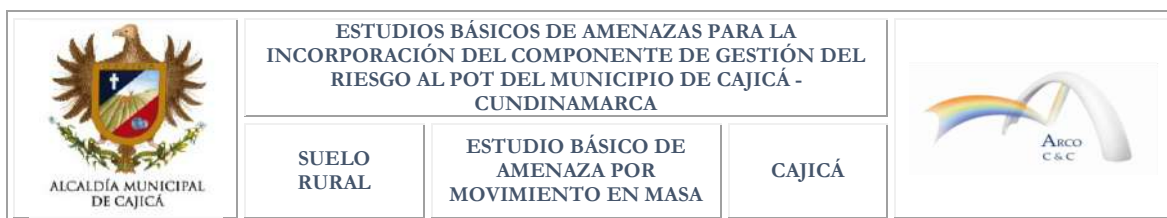


Ilustración 21. Inventario geomorfológico unificado de movimientos en masa para el municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).



En la **Tabla 6** se presenta el número total de eventos de acuerdo con el tipo de proceso, el período de suceso y su totalidad, estos eventos hacen parte del inventario geomorfológico multitemporal, el cual se deriva directamente del inventario geomorfológico unificado, identificando así la existencia de otros tipos de eventos (coluvión, erosión, reptación) presentes en la zona de estudio. Partiendo de esto, por medio de fotointerpretación, se identifican los eventos y las cicatrices existentes por los años establecidos (2016-2020).

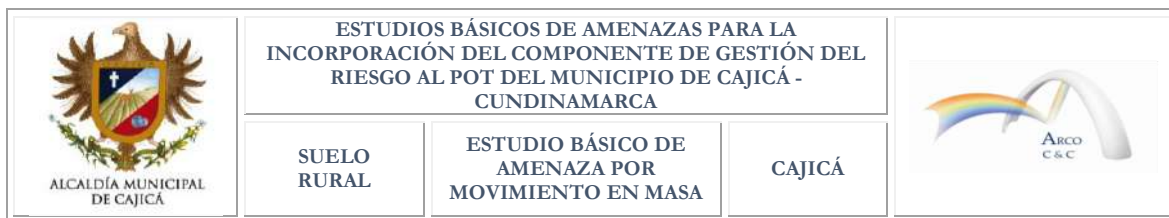
Tabla 6. Inventario geomorfológico multitemporal de procesos para el municipio de Cajicá.

TIPO EVENTO	PERIODO DE SUCESO				
	2016	2017	2018	2019	2020
Avenida Torrencial	2	3	9	1	1
Caída de suelo	1	0	4	0	0
Coluvión	1	1	4	1	0
Deslizamiento	91	74	129	61	39
Erosión	4	5	9	5	3
Reptación	0	0	3	0	0
TOTAL	99	83	158	68	43

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

De acuerdo con lo anterior, en el año 2018 se presencia mayor cantidad de ocurrencia de eventos (158) entre los cuales, se evidencia que el 81,64% son de tipo deslizamiento, este escenario no solo se destaca para el año 2018, pues el registro de eventos a través de los años, confirman que el tipo de proceso Deslizamiento, es el que más se presenta en el municipio, esto seguido de procesos de erosión en el terreno. También se identifica la cantidad de eventos sucedidos o cicatrices registradas, al pasar los años, tiene tendencia decreciente (despreciando el año 2018), promedio entre años de $\pm$ 18 eventos entre años.

Para el año 2016, se registran que el evento con mayor presencia es de tipo deslizamiento con un total de 91 sucesos, y el evento con menor presencia es la Reptación, la cual no registra existencia en la zona de estudio para este periodo. El segundo tipo de evento con mayor presencia es la erosión (4), este se encuentra localizado en los límites municipales orientación norte y oeste. El resto de los eventos se encuentran distribuidos en la zona norte y oeste del municipio, sobre las reservas naturales

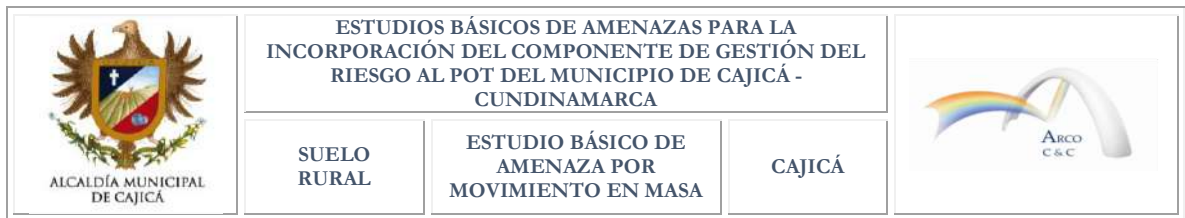


de los cerros orientales. No se registra ningún evento en las zonas planas del municipio, lo cual significa que la probabilidad de afectación a cascos urbanos o centros poblados es muy baja (ver **Ilustración 22**).

Para el año 2017, se registran que el evento con mayor presencia es de tipo deslizamiento con un total de 74 sucesos, y los eventos con menor presencia son la caída de suelo y la reptación, los cuales no registran existencia en la zona de estudio para este periodo. El segundo tipo de evento con mayor presencia es la erosión (5), este se encuentra localizado en los límites municipales orientación norte y oeste; uno de ellos se ubica con mayor cercanía al centro que los demás. El resto de los eventos se encuentran distribuidos en la zona norte y oeste del municipio, sobre las reservas naturales de los cerros orientales. No se registra ningún evento en las zonas planas del municipio, lo cual significa que la probabilidad de afectación a cascos urbanos o centros poblados es muy baja, no obstante, hay un aumento de eventos cercanos al centro poblado de Aguanica (**Ilustración 23**).

Para el año 2018, es el periodo con mayor registro de eventos con un total de 158 registros, en los cuales, el tipo de evento morfodinámico con mayor presencia es de tipo deslizamiento con un total de 129 sucesos, y el evento con menor presencia es la reptación (3). El segundo tipo de evento con mayor presencia es la erosión junto con las avenidas torrenciales con valores de 9 registros, estos se encuentran localizados en los límites municipales orientación norte y oeste en su mayoría, empero, alguno de ellos; en el caso de las avenidas torrenciales, se localizan en el centro norte del municipio. El resto de los eventos se encuentran distribuidos en la zona norte y oeste del municipio, sobre las reservas naturales de los cerros orientales. A diferencia de los años anteriores, se hallan registros en las zonas planas del municipio, de tipo deslizamiento y caída de suelo, esto aumenta la probabilidad de afectación a zonas urbanas o centros poblados, exaltando el centro poblado La Esperanza, pues se encuentra adyacente a un evento registrado de tipo caída de suelo, produciendo posibles afectaciones ante ocurrencias en el futuro (**Ilustración 24**).

Para el año 2019, se registran que el evento con mayor presencia es de tipo deslizamiento con un total de 61 sucesos, y los eventos con menor presencia son la caída de suelo y la reptación, los cuales no registran existencia en la zona de estudio para este periodo. El segundo tipo de evento con mayor presencia es la erosión (5), este se encuentra localizado en los límites municipales orientación norte y oeste; uno de ellos se ubica con mayor cercanía al centro que los demás. El resto de los eventos se



encuentran distribuidos en la zona norte y oeste del municipio, sobre las reservas naturales de los cerros orientales. No se registra ningún evento en las zonas planas del municipio, lo cual significa que la probabilidad de afectación a cascos urbanos o centros poblados es muy baja, no obstante, hay un aumento de eventos cercanos al centro poblado de Aguanica (**Ilustración 25**).

Para el año 2020, es el periodo con menor registros de eventos con un total de 43 registros, en los cuales, el tipo de evento morfodinámico con mayor presencia es de tipo deslizamiento con un total de 39 sucesos, y los eventos con menor presencia son la caída de suelo, coluvión y la reptación, los cuales no registran existencia en la zona de estudio para este periodo. El segundo tipo de evento con mayor presencia es la erosión (3), este se encuentra localizado en los límites municipales orientación norte y oeste. El resto de los eventos se encuentran distribuidos en la zona norte y oeste del municipio, sobre las reservas naturales de los cerros orientales. No se registra ningún evento en las zonas planas del municipio, lo cual significa que la probabilidad de afectación a cascos urbanos o centros poblados es muy baja (**Ilustración 26**).

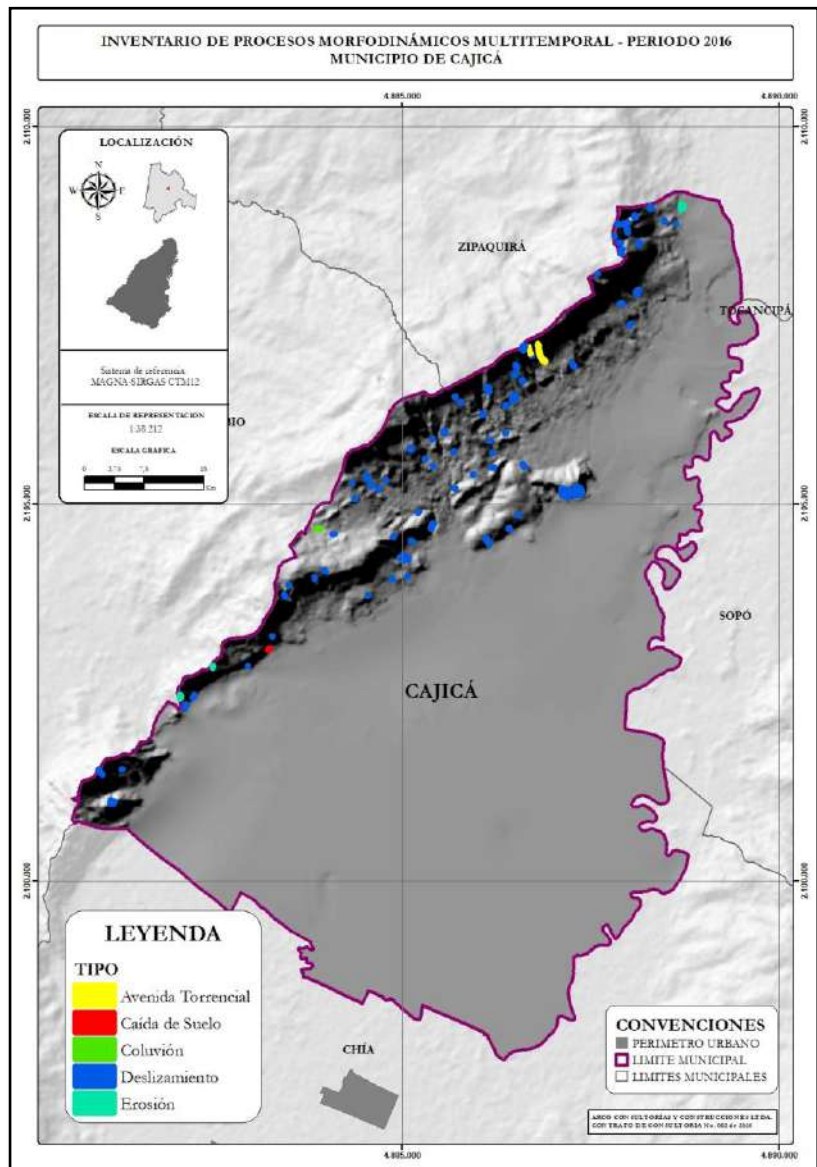


Ilustración 22. Inventario geomorfológico de procesos morfodinámicos, periodo 2016.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

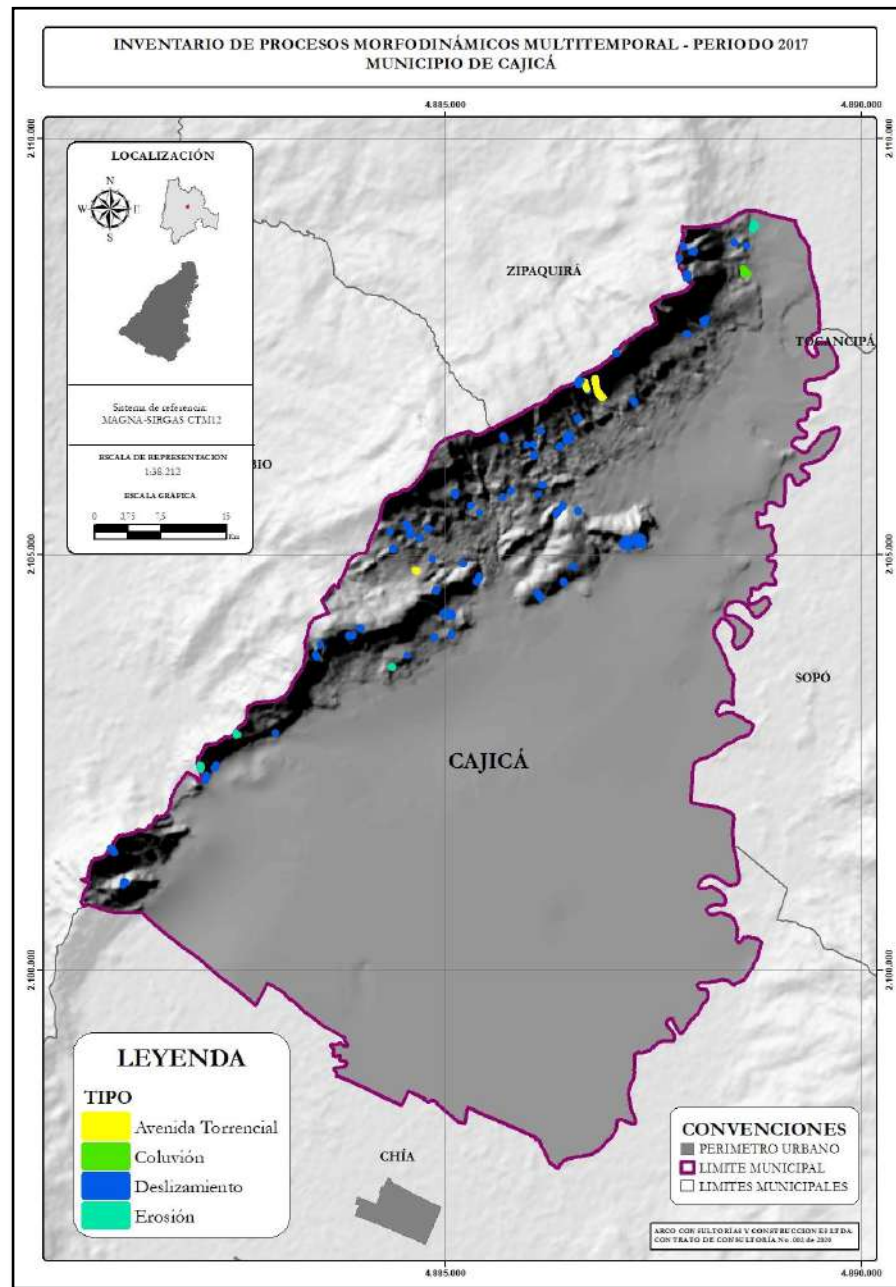


Ilustración 23. Inventario geomorfológico de procesos morfodinámicos, periodo 2017.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

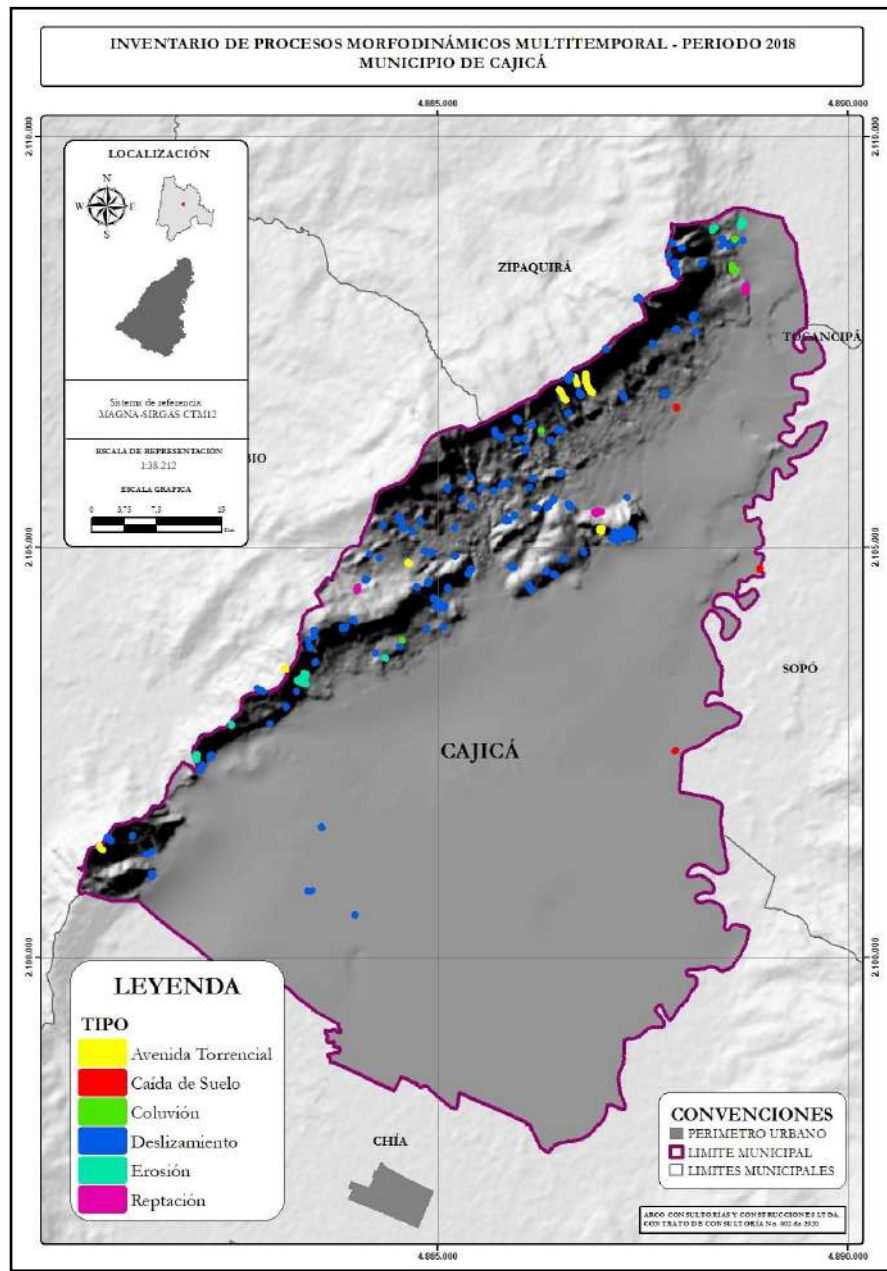


Ilustración 24. Inventario geomorfológico de procesos morfodinámicos, periodo 2018.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

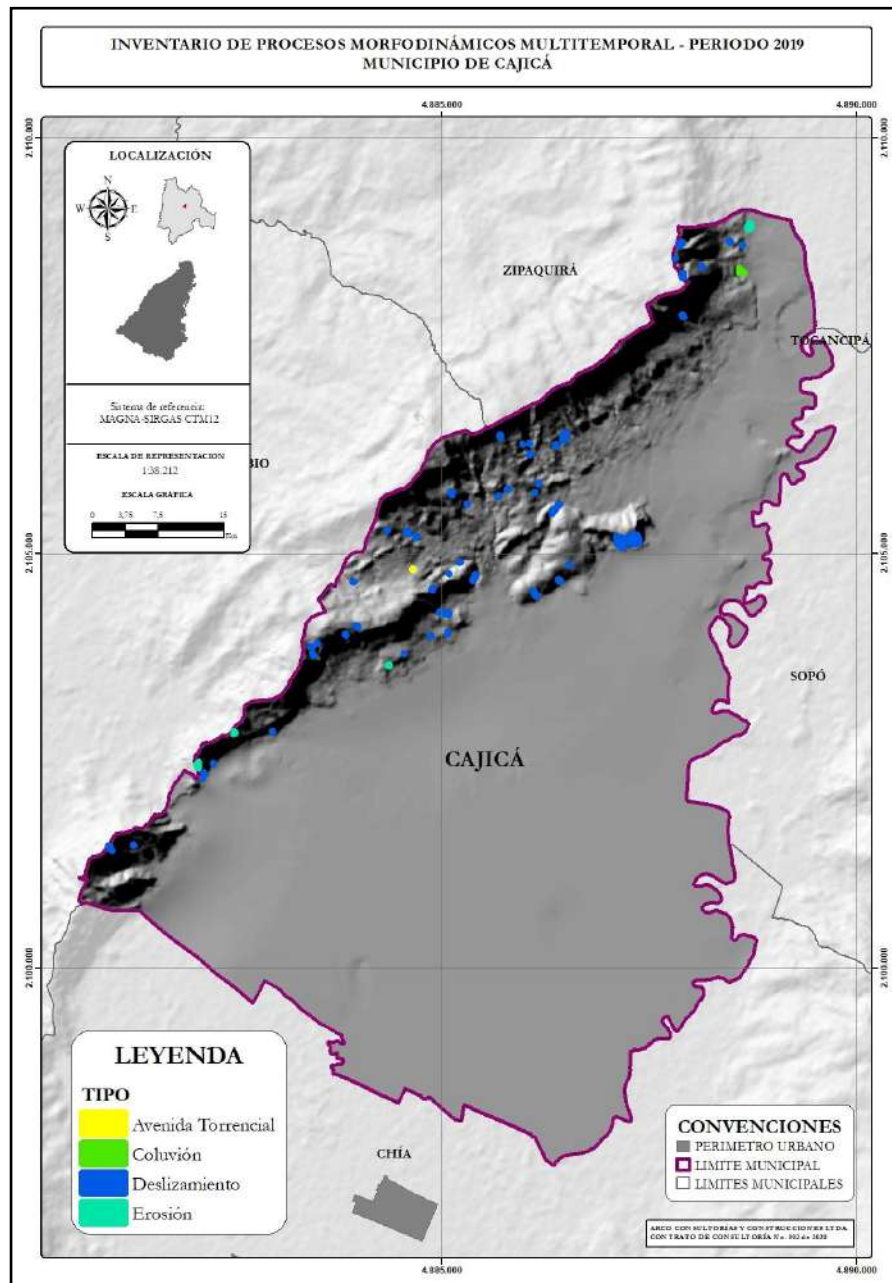


Ilustración 25. Inventario geomorfológico de procesos morfodinámicos, periodo 2019.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

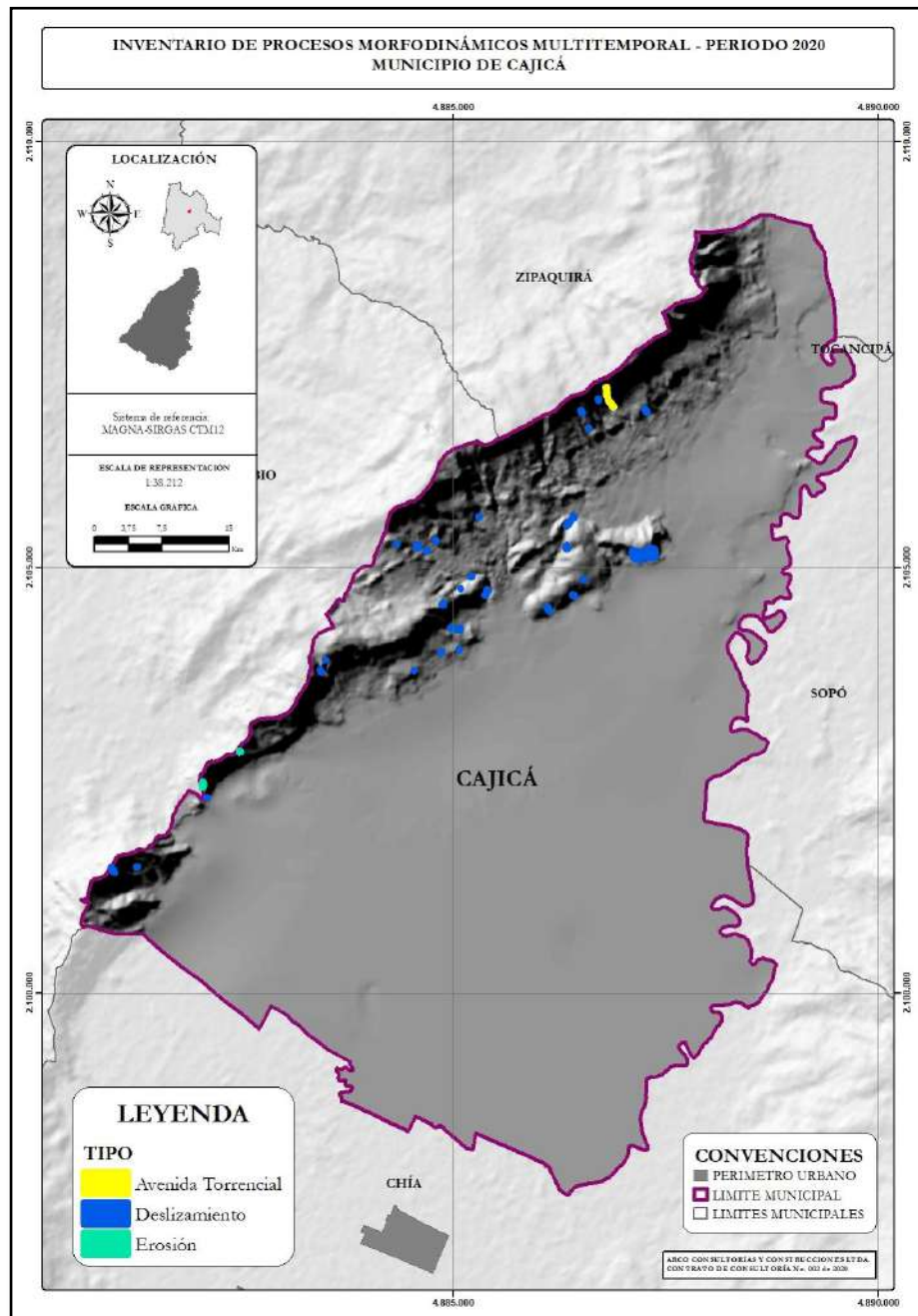


Ilustración 26. Inventario geomorfológico de procesos morfodinámicos, periodo 2020.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C&C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

▪ Unidades Geológicas Superficiales (UGS)

De acuerdo con la guía metodológica para elaboración de mapas de geología para ingeniería del Servicio Geológico Colombiano: *“un mapa de geología para ingeniería es un tipo de mapa geológico que muestra información sobre la distribución y propiedades físicas y mecánicas de las rocas y los suelos, el agua subterránea, las características del relieve y los procesos geodinámicos actuales, que son considerados los componentes básicos del ambiente geológico, de suma importancia en estudios de geología aplicada a la ingeniería”*.

El Mapa de Unidades Geológicas Superficiales UGS para el área rural del municipio de Cajicá (**Ilustración 27**), intenta capturar el comportamiento geomecánico de las rocas y suelos, el cual está determinado principalmente por propiedades físicas como origen, litología, composición mineralógica, textura, dureza, condición estructural, grado de fracturamiento y de meteorización, granulometría, humedad y consistencia. En este caso, se han definido dos materiales principalmente:

- **Rocas**
- **Suelos (residuales y transportados)**

La clasificación de rocas y suelos está basada en el principio de que las propiedades físicas de dichos materiales en su estado actual dependen de la combinación de otros factores como el origen, diagénesis, historia tectónica, metamorfismo y los procesos de meteorización, los cuales gobiernan el comportamiento mecánico de dichos materiales (INGEOMINAS, 2004).

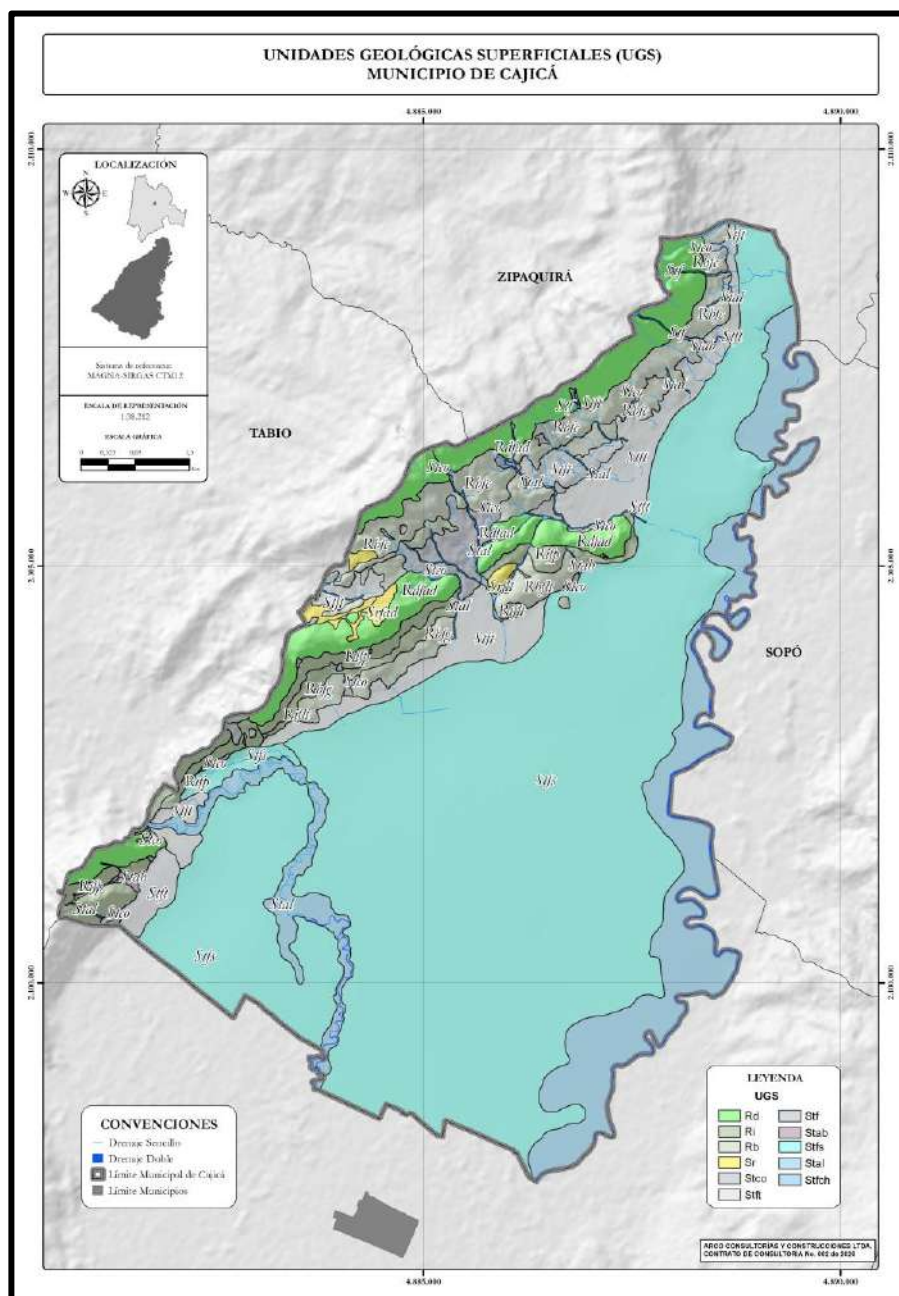
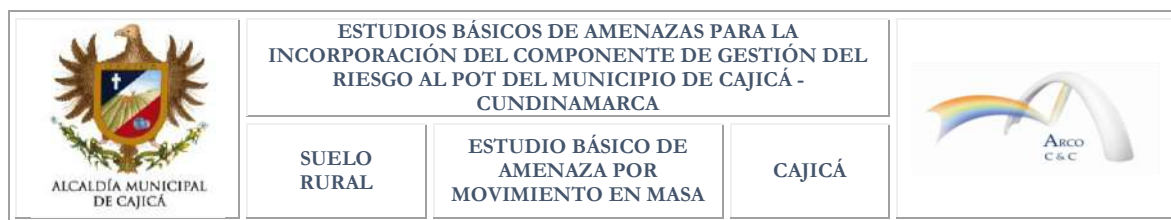


Ilustración 27. Mapa de unidades geológicas superficiales (UGS) para el municipio de Cajicá, Cundinamarca.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).



Para la generación del mapa de UGS, se lleva a cabo la siguiente secuencia de actividades:

- **Recopilación de información previa:** la primera etapa consiste en recopilar y analizar toda la información temática, secundaria o primaria provenientes de fuentes oficiales (Servicio Geológico Colombiano, Corporación Autónoma Regional de Boyacá), universidades o consultorías, que ayuden a definir y caracterizar las unidades temáticas. Dicha información abarca estudios geológicos, geomorfológicos estudios de suelos (IGAC), geotécnicos, hidrogeológicos y ambientales, tanto a escala regional como detallada (escalas 100.000, 50.000, 25.000 y 10.000). La información anterior es evaluada y posteriormente georreferenciada con el fin de ser empleada en la cartografía temática.
- **Preparación de insumos básicos:** para iniciar la interpretación y delimitación preliminar de zonas con comportamiento homogéneo, se recurre a un Sistema de Información Geográfica (SIG), sobre el cual se administran los diferentes insumos temáticos y básicos como:
 - ✓ Modelo Digital de Elevación (DEM Alos Palsar, con una resolución espacial de 12.5 m/pixel).
 - ✓ Ortofotografía del municipio (Instituto Geográfico Agustín Codazzi), con una resolución espacial de 1 m/pixel.
 - ✓ Base cartográfica del municipio, escala 1:10.000 y 1:25.000 generada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).
- **Delimitación de unidades con comportamiento homogéneo:** esta fase comprende el análisis e interpretación de los insumos básicos y temáticos, en donde a partir de la caracterización geológica y geomorfológica del municipio y la interpretación de imágenes de sensores remotos, se procede a la delimitación cartográfica de las diferentes unidades de roca y suelo teniendo en cuenta su homogeneidad y que será la base para la comprobación de campo.
- **Para la descripción y caracterización de las UGS se tienen en cuenta cinco parámetros fundamentales:** génesis, litología (composición y textura), propiedades ingenieriles, clasificación geomecánica, grado de meteorización y rasgos estructurales. Estas características serán obtenidas por medio de la descripción de afloramientos rocosos, pruebas índices de campo e información secundaria.

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C&C
SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ		

- ✓ **Génesis:** corresponde al origen del material.
 - ✓ **Litología:** composición mineralógica de las rocas y suelos y el arreglo de éstos (textura).
 - ✓ **Propiedades ingenieriles:** son propiedades directamente relacionadas con el origen y composición y, en consecuencia, con el comportamiento geomecánico del material cuando se encuentra expuesto en superficie. Incluye: dureza o resistencia, consistencia, humedad, densidad relativa y compacidad.
 - ✓ **Grado de meteorización:** corresponde a una descripción cualitativa del estado de meteorización de los materiales, tomando en cuenta la distribución y proporción relativa de la meteorización en el macizo rocoso y sus discontinuidades.
 - ✓ **Clasificación geomecánica:** son métodos que permiten asignar un índice de calidad al macizo rocoso, a través de la observación directa de sus características físicas o mediante la realización de pruebas de campo. Para el presente estudio el método de clasificación será el Índice Geológico de Resistencia (GSI).
 - ✓ **Rasgos estructurales:** corresponde a la densidad de rasgos lineales (grietas, diaclasas y fallas) y donde el grado de influencia de ésta sobre la resistencia del macizo, es capturado por medio de la calificación del GSI.
- **Validación y complementación de campo:** el objetivo del trabajo de campo es la toma de datos que permitan caracterizar las unidades de roca y suelo, así como corroborar, corregir y complementar el modelo geológico preliminar de la zona, planteado a partir del análisis de la información secundaria y fotointerpretación.
 - **Integración de información:** como resultado de las anteriores etapas, se obtiene un mapa de Unidades Geológicas Superficiales con la descripción sistemática de cada unidad representada en el mapa. Para la descripción de las unidades de suelo se reportará: génesis, propiedades ingenieriles y litología, complementados con el espesor y rasgos estructurales. En cuanto a unidades de roca, estas presentarán: clasificación geo-mecánica, litología, génesis y propiedades ingenieriles complementadas con información acerca del grado de meteorización y rasgos estructurales.

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
SUELO RURAL		ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

- **Preparación del mapa final y documento:** la última etapa para la construcción de este insumo temático corresponde a la preparación del mapa final con sus atributos, como también la elaboración del documento respectivo.

En la **Tabla 7**, se presenta la descripción de cada una de las unidades que componen el mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS):

Tabla 7. Unidades Geológicas Superficiales (UGS) identificadas para el municipio de Cajicá.

CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
UNIDADES DE ROCA		
Rocas duras (Rd)		
Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	Cuarzoarenitas, de grano fino a medio, bien cementadas, de consistencia dura (R4, clasificada como roca dura en el índice de resistencia a la compresión simple), en estratificación delgada gruesa a muy gruesa; en sectores su estructura es blocosa alterada de suave plegamiento con persistencia de los planos de estratificación (plegado compuesto de bloques angulares), con delgadas intercalaciones de limolitas y arcillolitas, síliceas y liditas. Macizo en conjunto débil a moderadamente meteorizado, moderadamente fracturado con varias familias de discontinuidades. El índice geológico de resistencia es muy bueno (GSI: 70-80 %, para un tipo de macizo III). La condición del macizo rocoso es húmeda. 
Rocas intermedias (Ri)		

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Riflt	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna	Cuarzoarenita clástica cementada de grano fino a grueso, de consistencia dura a moderadamente dura (R3-R4, en el índice de resistencia a la compresión simple) y compacidad dura; moderadamente meteorizada, estratificación en capas gruesas a muy gruesas de color amarillo pálido en las zonas de menor meteorización pasando por un gris azulado medio en la capa exterior del macizo (Ram grado III –Macizo Rocosó Meteorizado). Calidad de macizo húmedo Regular (GSI: 50-60 %, Clase o tipo del macizo IV – V). 
Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	Secuencia interestratificada en la que predominan areniscas de grano fino a medio, de color naranja grisáceo, el espesor va de capas muy delgadas a capas gruesas, con intercalaciones de menor espesor entre lamina media a capa muy delgada de: limolitas, arcillolitas, comúnmente síliceas y liditas; con estratificación en capas de muy delgadas a media. El macizo es de consistencia dura a media, moderada a débilmente meteorizado, con sectores localizados completamente meteorizados; en general el cuerpo está muy fracturado con estructura blocosa que consiste en bloques cúbicos formados por máximo tres familias de discontinuidades; índice geológico de resistencia bueno (GSI: 50-60 %), calidad de macizo húmedo regular.

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
		
Rocas blandas (Rb)		
Rbfad	Roca blanda de la Formación Arenisca Dura	Cuarzoarenitas, de grano fino a medio, poco cementadas, de consistencia blanda, en estratificación delgada gruesa a muy gruesa, con delgadas intercalaciones de limolitas y arcillolitas, silíceas y liditas; moderada a altamente meteorizadas; muy fracturadas; índice geológico de resistencia regulara pobre (GSI: 20-40 %) para los niveles arenosos. Fuente importante como material de construcción.
Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	Lutitas grises amarillentas a azules muy pálidas, de consistencia muy blanda (Resistencia R1) y compacidad de moderada a débil en estratificación laminar a capas medias de superficie rugosa con intercalaciones menores de areniscas de grano fino, calizas, arcillolitas calcáreas y limolitas silíceas. Roca moderadamente meteorizada a altamente meteorizada en sectores localizados. Índice geológico de resistencia regular a pobre (GSI: 20-40 %, para un tipo de macizo VI), la condición del macizo rocoso es húmedo.

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
		
Rbfg	Roca blanda de la Formación Guaduas	Arcillolitas y limolitas de color amarillo rojizo por meteorización, de consistencia blanda o compacidad débil, en estratificación gruesa a delgada; con intercalaciones de paquetes de areniscas cuarzosas, de grano fino a medio, en sectores altamente meteorizadas, estructura desintegrada y compacidad moderada; con índice geológico de resistencia de regular a pobre (GSI: 30-40 %, para un tipo de macizo VI), la condición del macizo rocoso es húmedo. 
Rbflt	Roca blanda de la Formación	Cuarzoarenitas, grano fino a grueso, poco cementadas, fácilmente friables, de consistencia blanda a extremadamente blanda (R0-R1, en el índice de resistencia a la compresión simple), estratificación gruesa de color amarillo pálido en las zonas de menor meteorización pasando por un gris azulado

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
	Labor y Tierna	medio hasta un café claro en las zonas con más meteorización (Ram grado IV – en los sectores altamente meteorizados que corresponde a un saprolito grueso) donde la roca decolorada y altamente alterada conserva algo de las estructuras heredadas, pero en general su estructura está compuesta por fragmentos sub angulares-tabulares mal seleccionados y matriz soportados: resultado de la alta meteorización que ha derivado en dicha matriz compuesta por minerales de arcilla, limo y arena que han perdido la cementación. Calidad del macizo húmedo muy malo (GSI: 0-20 %, Clase o tipo del macizo VIII – IX).  
UNIDADES DE SUELO RESIDUAL (Sr)		
Srfad	Suelo residual de la Formación Arenisca Dura	Suelo Cohesivo residual y matriz soportado predominantemente por partículas de diferentes tamaños de: arenas, arcillas y limos. Los clastos de areniscas son de diferentes tamaños desde gravas hasta cantos y guijarros, de morfología irregular, baja esfericidad y muy angulares; no hay gradación y la selección es pobre. La roca está completamente meteorizada (saprolito fino) pasando generalmente a colores variados, aunque el macizo rocoso está completamente descompuesto y/o desintegrado a suelo, aún conserva algo de la macro fábrica original y estructuras heredadas: como planos de estratificación, foliación y diaclasas. La Presencia de fragmentos de roca intacta o decolorada forman un entramado o se conservan como núcleos aislados y están entre 20 y 35%, fácilmente excavables y desmenuzables, aun

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
		sin ayuda del martillo; la resistencia a la compresión simple se puede clasificar como Clase S4 (suelo rígido) donde se necesita una fuerte presión para hincar el dedo. 
Srfc	Suelo residual de la Formación Conejo	Suelo residual arcillo limoso, derivado de las lodolitas, arcillolitas y calizas de la Formación Churuvita, tiene por lo menos 1.5m a 2m de espesor, la uña del pulgar penetra fácilmente, de consistencia firme. La condición general suelo residual es entre húmeda y seca.
Srflt	Suelo residual de la Formación Labor Tierna	El horizonte inferior se compone de un saprolito fino de roca completamente meteorizada y decolorada que pasa a tonalidades naranja amarillentas producto de la meteorización, el cuerpo está completamente descompuesto, pero conserva algo de la macrofábrica original. Los fragmentos rocosos observables no superan el tamaño de grano grueso, pero son deleznable con poca presión de los dedos quedando solo partículas de arena de grano medio. En otros sectores es más clara la macrofábrica original donde se puede ver las intercalaciones de areniscas y limos en capas medias, las estructuras heredadas como planos de estratificación, diaclasas, se conservan. La capa superior consta de suelo residual rico en materia orgánica con humus y restos de raíces de plantas de color marrón moderado, todo el material se ha convertido en suelo y no presenta la estructura ni la macrofábrica original. La condición general suelo residual es entre húmeda y seca.

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
		 
Srpf	Suelo residual de la Formación Plaeners	Suelo residual de textura arcillo-limoso, derivado de las areniscas de grano fino, limolitas y liditas de la Formación Plaeners, presenta tonalidades blancuzcas, de constitución blanda, no plástico, seco.
UNIDADES DE SUELO TRANSPORTADO (Str)		
Stab	Suelo transportado de abanico	El suelo transportado de abanico aluvial está constituido de gravas, matriz soportadas en una matriz arena a gruesa, clastos subredondeados de arenisca, matriz de consistencia firme, no plástico, los granos de la arena son gruesos y friables, matriz de arena, arcilla y limo.
Stal	Suelo transportado aluvial	Los suelos transportados de origen aluvial se encuentran asociados a los depósitos de llanuras de inundación y cauces actuales de drenajes principales (parte media y alta de la cuenca) y están conformados por arcillas, limos y arenas; esporádicamente con gravas y bloques redondeados, heterométricos y de composición variable, generalmente matriz soportados, sin estructuras heredadas.

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Stco	Suelo transportado coluvial	Suelo firme, húmedo y de material suelto compuesto por fragmentos de roca como areniscas y limos que van desde gravas, cantos, guijarros hasta bloques, embebidos en una matriz limo arcillosa, la roca parental corresponde a las Formaciones Conejo, Arenisca Dura, Plaeners y Labor y Tierna; cuyos fragmentos en su mayoría son angulares con diversidad de formas y una estructura caótica extremadamente mal seleccionada. Al tratarse de un suelo coluvial no presenta estructuras o macrofábricas heredadas a excepción de bloques de gran tamaño que no corresponden a roca insitu, pero que al expresar su estructura en capas propias del fragmento pueden ser confundidas con suelo residual o roca blanda. 

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Stf	Suelo transportado de flujo de detritos	Suelo firme, húmedo y de material suelto, compuesto por fragmentos de roca como areniscas y limos que van desde gravas, cantos, guijarros y bloques centimétricos a métricos de areniscas, siendo estos últimos los que más destacan. A nivel de afloramiento los fragmentos están embebidos en una matriz limo arcillosa, pero sobre la superficie del suelo, en la parte alta del depósito, los bloques se encuentran como material suelto con espacios vacíos entra sus contactos (comparable a una estructura clasto soportada, pero a nivel del piso). La roca parental corresponde a las Formaciones Conejo, Arenisca Dura, Plaeners y Labor y Tierna; cuyos fragmentos en su mayoría son irregulares-angulares con diversidad de formas y una estructura caótica extremadamente mal seleccionada. Al final del flujo en superficie se observan bloques centimétricos a métricos de areniscas, que destacan por estar dispersos y muy expuestos en superficie. Al tratarse de un suelo transportado no presenta estructuras o macrofábricas heredadas. 
Stfch	Suelo transportado aluvial - Formación Chía	Los suelos transportados de origen aluvial asociados a la Formación Chia se encuentran asociados a los depósitos de llanuras de inundación y cauces actuales de drenajes principales (parte media y alta de la cuenca) y están conformados por arcillas, limos y arenas; esporádicamente con gravas y bloques redondeados, generalmente matriz soportados, sin estructuras heredadas.

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 Arco C&C
SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ		

CÓDIGO	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana	Los suelos transportados de origen lacustre ubicados principalmente en los bordes de laderas, parte media y baja de la cuenca se encuentran conformado por arcillas, limos, arenas, gravas, turbas y capas de ceniza volcánica; siendo una fuente importante como material de construcción.
Stft	Suelo transportado fluvio- torrencial	Los suelos transportados de origen fluviotorrencial están compuestos predominantemente por gravas y bloques de composición heterogénea, en matriz de arenas, limos y arcillas.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

▪ Pendientes

La pendiente se puede considerar como un factor importante en la ocurrencia de movimientos en masa en la medida que se relaciona directamente con los esfuerzos de corte tangenciales y normales en los materiales superficiales e influye también en la distribución de agua en la ladera. La pendiente es el principal factor geométrico para tener en cuenta en los análisis de estabilidad y puede obtenerse como una variable cuantitativa continua a partir del DEM (Servicio Geológico Colombiano, 2017). En la **Ilustración 28**, se presenta el mapa de pendientes clasificado de acuerdo con los rangos propuestos por el Servicio Geológico Colombiano (2017).

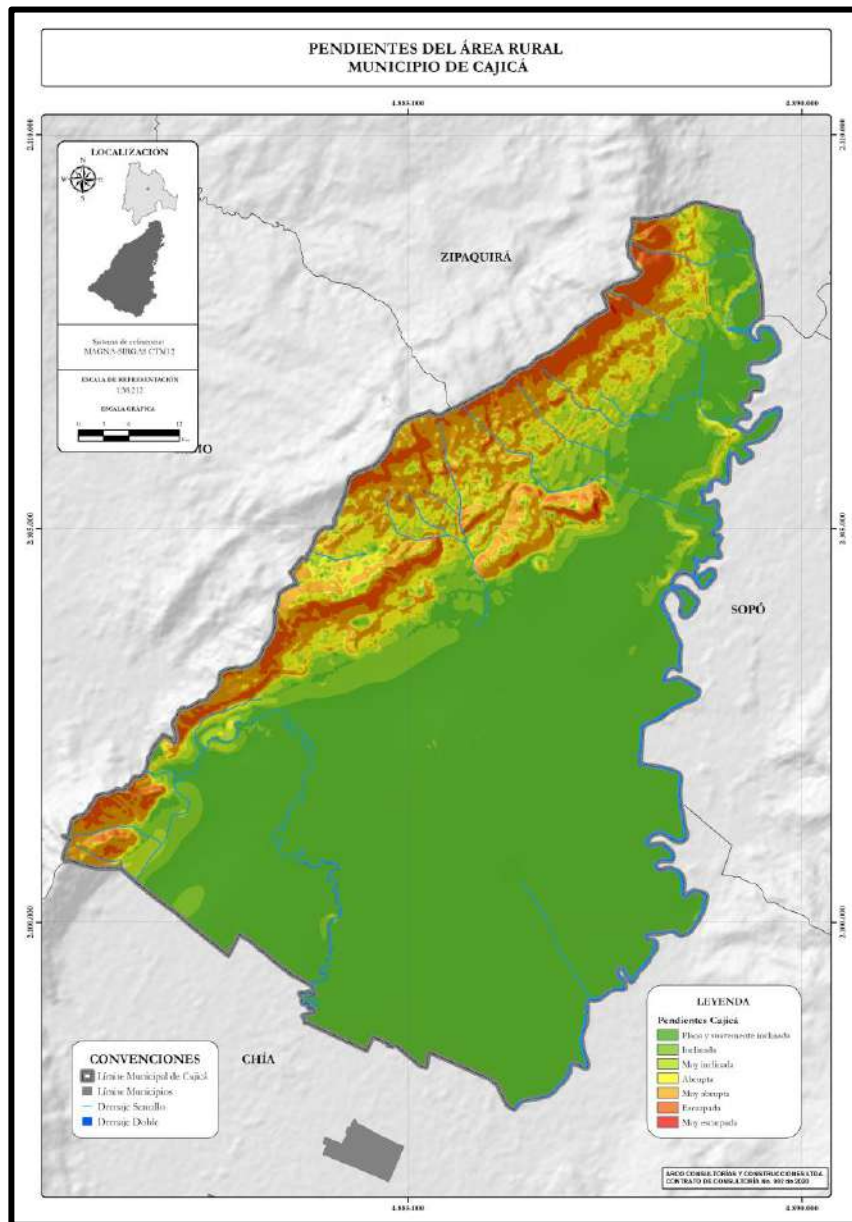


Ilustración 28. Mapa de pendientes para el municipio de Cajicá, Cundinamarca.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

▪ **Curvatura de Plano**

La curvatura de plano hace referencia a la forma de las laderas perpendicular a la dirección de máxima pendiente (**Ilustración 29**) y puede generarse como una variable cuantitativa y continua a partir del DEM. La variable se relaciona con los movimientos en masa en la medida que indica el grado de concentración o dispersión del drenaje superficial. Una curvatura cóncava es más efectiva en la captación de agua de lluvia que es un condicionante morfológico característico en la potencial generación de movimientos en masa superficiales y flujos (Carrara, 1983; Horton *et al.*, 2013, en Servicio Geológico Colombiano, 2017). En la **Ilustración 30**, se presenta el mapa de curvatura para el municipio:

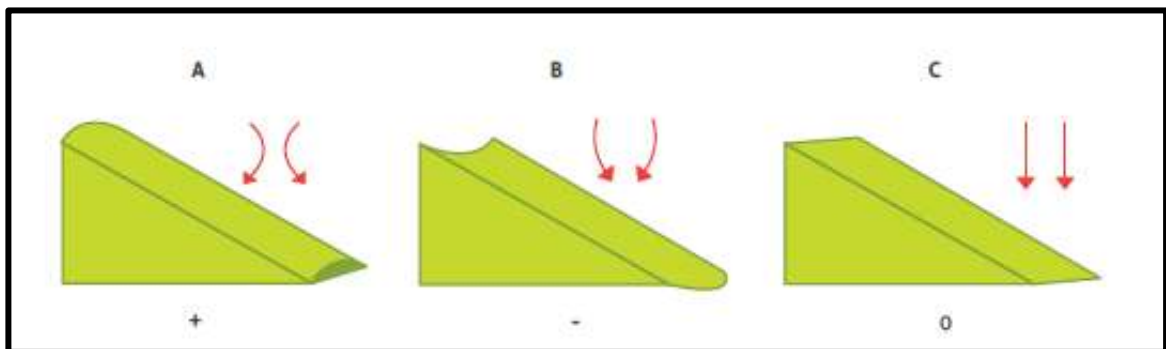


Ilustración 29. Curvatura perpendicular a la dirección de máxima pendiente.

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017).

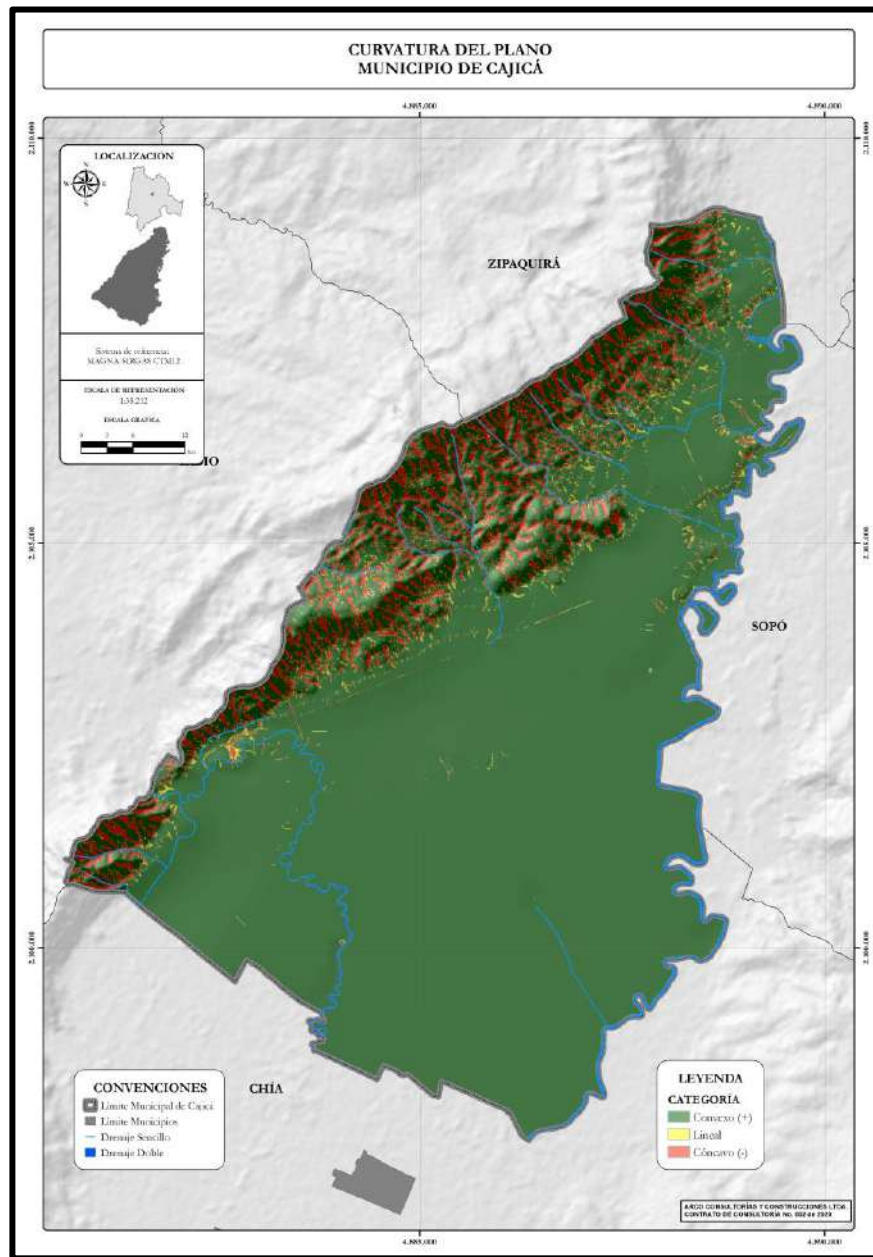
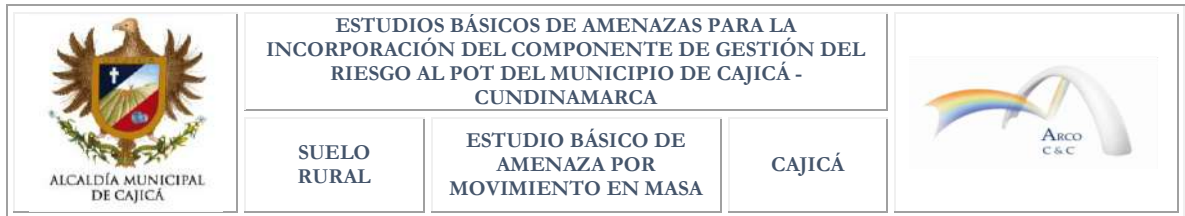


Ilustración 30. Mapa de curvatura para el municipio de Cajicá, Cundinamarca.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).



2.1.4.1.2. Pesos de evidencia (Weight of Evidence, WofE)

El análisis por Pesos de Evidencia evalúa patrones de asociación entre los factores condicionantes (evidencias) y las áreas inestables mediante la asignación de pesos. El peso de cada factor condicionante se calcula aplicando un enfoque bayesiano que considera la probabilidad condicional e incondicional de que ocurra un movimiento en masa (Bonham, 1994, en Servicio Geológico Colombiano, 2017). La probabilidad incondicional (previa) se calcula con los eventos ocurridos, por ende, el modelo es susceptible a cualquier cambio que se derive de este insumo generándose una probabilidad condicionada llamada *posterior* (Bonham, 1994 en Servicio Geológico Colombiano, 2017), esta probabilidad se calcula sumando los pesos de cada factor en una función aditiva.

Los pesos de evidencia se desarrollan bajo la probabilidad de ocurrencia dado que ha pasado el suceso varias veces, en este panorama Van Westen (1993) plantea este fundamento en términos de píxeles para la comodidad de aplicarse en un software GIS: comprendiendo el área de estudio q está compuesta por un número total de píxeles N siendo $N = N_{pix1} + N_{pix2} + N_{pix3} + N_{pix4}$, donde N_{pix1} corresponde a los píxeles con la ocurrencia de un movimiento en masa y la presencia del factor condicionante indicando una significancia muy alta este factor; N_{pix2} : píxeles con ausencia del factor condicionante en un movimiento en masa, indicativo de una significancia alta por efecto por la materialización del fenómeno; N_{pix3} : píxeles con factor condicionante y no ocurrencia del fenómeno, indicando una significancia media por efecto del factor que alguna vez contribuyó al deslizamiento; y N_{pix4} : píxeles con ausencia de movimientos en masa y del factor condicionante, indicativo de una baja significancia.

Teniendo en cuenta la descripción espacial anterior, la función de susceptibilidad por movimientos en masa ($LSI - landslide\ susceptibility\ index$) se calcula para cada píxel mediante la siguiente expresión matemática:

$$LSI = \sum_n^{i=1} W f_i f_{ci}$$

Donde Wf_i corresponde al peso de evidencia factor condicionante i – ésimo con $i = (1, 2, \dots, n)$. la magnitud del peso Wf indica el grado de importancia de las variables en la ocurrencia de los eventos.

En la **Tabla 8**, se presenta la relación deslizamiento y factor condicionante, lo cual permite interpretar y expresar de manera óptima los pesos en pixeles.

Tabla 8. Relación deslizamientos L y factor condicionante W.

W: factor condicionante con potencialidad de deslizamientos				
L: deslizamientos		Presente	Ausente	
	Presente	Npix1	Npix2	Área total deslizada
	Ausente	Npix3	Npix4	Área total no deslizada
		Área total con unidad W	Área total sin unidad W	Área total del mapa

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017).

Considerando la **Ilustración 31**, se establecen las siguientes condiciones:

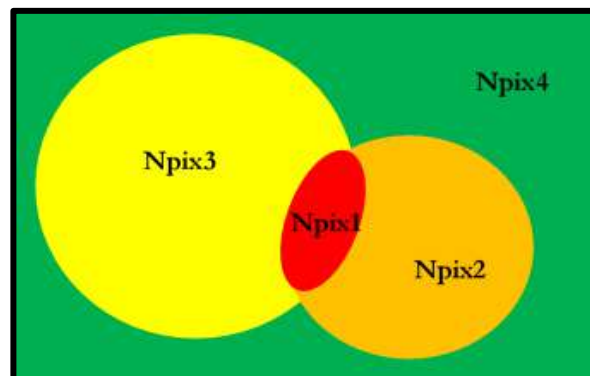


Ilustración 31. Representación gráfica de la relación deslizamiento y factor condicionante.

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017).

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C & C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

- **Npix1** = hay presencia del factor condicionante (Npix3) en el deslizamiento (Npix2). Lo cual es indicativo de una muy alta significancia de ese factor en el deslizamiento.
- **Npix2** = no hay presencia del factor condicionante (Npix3) en el deslizamiento (Npix2). Lo cual es indicativo de una significancia alta por efecto de la presencia del deslizamiento.
- **Npix3** = factor condicionante. Lo cual es indicativo de una significancia media por efecto del factor que alguna vez contribuyó al deslizamiento.
- **Npix4** = no hay deslizamiento ni factor condicionante. Lo cual es indicativo de una significancia baja.

Los pesos se pueden expresar en términos de pixeles como:

- **Peso positivo:**

$$W_j^+ = \frac{\frac{Npix1}{Npix1 + Npix2}}{\frac{Npix3}{Npix3 + Npix4}}$$

Donde, W_j^+ es el peso positivo para cada clase j del factor condicionante i , siendo este un indicativo de la relevancia del factor de la ocurrencia de los procesos gravitacionales. Indica la importancia de la presencia del factor en el deslizamiento de la siguiente manera:

- ✓ $W_j^+ > 0$: Positivo, indica que la presencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento, su magnitud indica el grado de correlación directa o el grado de contribución.
- ✓ $W_j^+ < 0$: Negativo, indica que la presencia del factor contribuye a la ausencia de deslizamiento, su magnitud indica el grado de correlación inversa.

	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

✓ $W_j^+ = 0$: indica que el factor no es relevante.

- **Peso negativo:**

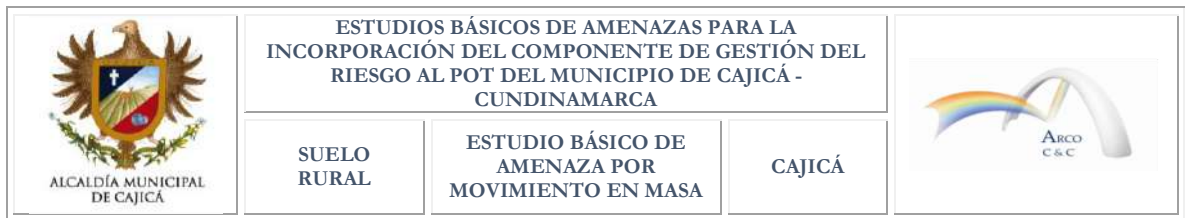
$$W_j^- = \frac{\frac{N_{pix2}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix4}}{N_{pix3} + N_{pix4}}}$$

Donde, W_j^- es el peso negativo y expresa la importancia de la ausencia del factor dentro de la ocurrencia del fenómeno. Indica la importancia de la ausencia del factor en el deslizamiento de la siguiente manera:

- ✓ $W_j^- > 0$: Positivo, indica que la ausencia del factor contribuye a la presencia del deslizamiento.
- ✓ $W_j^- < 0$: Negativo, indica que la ausencia del factor contribuye a la ausencia de deslizamiento.
- ✓ $W_j^- = 0$: indica que el factor no es relevante.

Los pesos de W_j^+ y W_j^- , se deben calcular para cada clase del factor o variable. El contraste o peso final W_f , da una medida de correlación entre el factor condicionante y los movimientos en masa. El peso final, será cero cuando la distribución espacial de los movimientos en masa es independiente del factor considerado, es positivo cuando existe una asociación positiva y negativo cuando existe una asociación negativa. El modelo se define con la siguiente expresión:

$$W_f = W_j^+ - W_j^-$$



El valor de LSI (*Landslide Susceptibility Index*) de cada pixel corresponde a la suma de los pesos finales calculados para la clase a la que pertenece el pixel de cada uno de los factores seleccionados. La siguiente ecuación representa la función final de la susceptibilidad o LSI.

$$LSI = W_f Pendiente + W_f Curvatura + W_f UGS + \dots W_f Uso del suelo$$

2.1.4.1.3. Hipótesis de falla

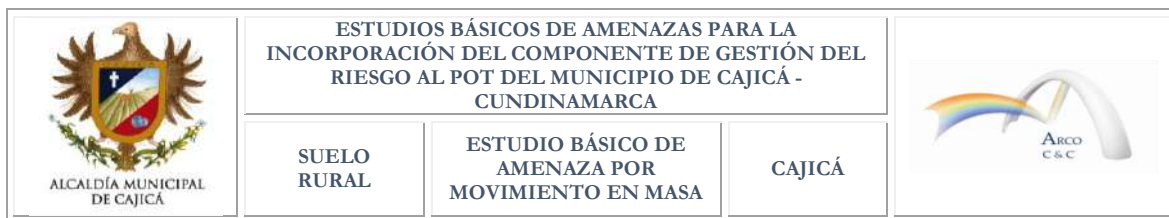
El análisis del aporte de cada factor o combinación de factores en la ocurrencia de un movimiento en masa de un tipo específico está basado en hipótesis definidas a partir del inventario de procesos morfodinámicos, conocimiento del experto y del área de estudio.

El objetivo de la metodología es encontrar la combinación de factores que en la función final de susceptibilidad tengan mayor significancia de pesos, explicando cuáles serían las causas de ocurrencia de un movimiento en masa.

2.1.4.1.4. Variable de agrupamiento

La variable de agrupamiento se define con la existencia de zonas inestables establecidas en el inventario de procesos morfodinámicos (polígonos del inventario) y permite establecer una relación estadística con los factores condicionantes para la comprobación de la hipótesis de falla. Se propone considerar el polígono que representa la totalidad del movimiento en masa. Sin embargo, se puede considerar la variable de agrupamiento con base sólo en las áreas de inicio o sólo en las áreas de depósito, con el fin de establecer de manera diferenciada la susceptibilidad del terreno al inicio de un deslizamiento, o la susceptibilidad de ser afectada por el depósito ante dichos eventos.

En la aplicación del método WofE se puede seleccionar una muestra de entrenamiento con el cual se calculan los pesos de cada factor que definen la función final que representa la susceptibilidad del



área de estudio. Esta muestra depende del número de movimientos en masa que se tengan y puede corresponder al 60 o 70% de los movimientos inventariados (Conforti *et al.*, 2012 en Servicio Geológico Colombiano, 2017); para los fines del presente estudio, se ha seleccionado una muestra de entrenamiento del 70% del inventario deslizamientos.

2.1.4.1.5. Curva de éxito y validación

La evaluación de la calidad de la función final de pesos y de probabilidad planteada se hace a través de la construcción de una curva de éxito o AUC (área bajo la curva), el cual valida la hipótesis planteada sobre los factores que condicionan la ocurrencia movimientos en masa en la zona de estudio, a partir del inventario de procesos morfodinámicos que no fueron ingresados dentro de la modelación, el cual corresponden al 30 % del inventario total.

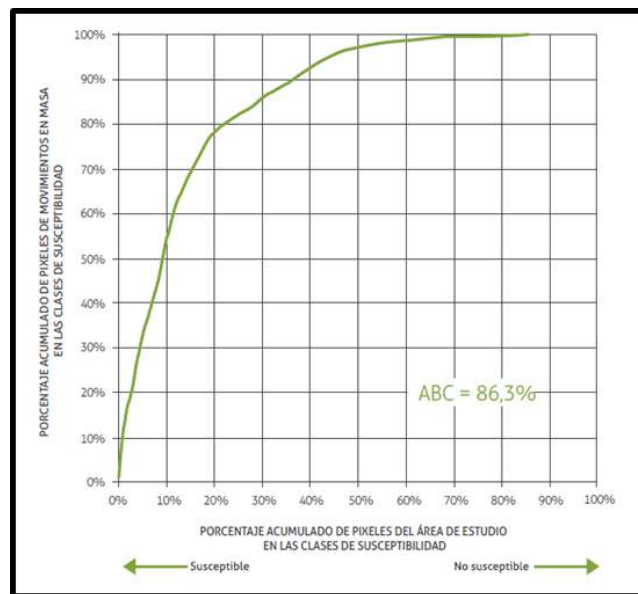
La curva de éxito mide la bondad de ajuste de la función de susceptibilidad a los movimientos en masa inventariados y para su construcción se deben ordenar los valores de la LSI en orden descendente y dividirlos en percentiles de 100 categorías (Dahal *et al.*, 2008, en Servicio Geológico Colombiano, 2017). Cada grupo de 1% se deberá cruzar con la variable de agrupamiento para determinar con cuantos pixeles de la variable tiene relación.

Para la elaboración de la curva de éxito se trazan en el eje X, los grupos percentiles del LSI de menor a mayor cada 1%, de forma que a la izquierda se ubique el percentil 1 (susceptible) y a la derecha el percentil 100 (no susceptible) y en el eje Y, se ubican los valores porcentuales cada 1% de los movimientos en masa correspondientes con el percentil del LSI (Blahut *et al.*, 2010). Esta curva se construye en términos del área total de la zona de estudio y el área total de los movimientos en masa considerados (**Gráfico 4**).

Una vez que la curva está construida se deberá evaluar el área bajo la curva (ABC), para establecer la calidad de ajuste de los datos. Cuando más pronunciada sea la parte inicial de la curva y mayor el ABC, mejor será la capacidad de la función para describir la distribución de los movimientos en masa. Un porcentaje aceptable de ajuste debe ser mayor a 70% (Servicio Geológico Colombiano,

2017). Valores de AUC entre 0,9 y 1, indican un nivel de precisión excelente, mientras que valores entre 0,8 y 0,9 indican que el ajuste es bueno, para valores entre 0,7 y 0,8 el modelo tiene una precisión razonable, entre 0,6 y 0,7 indican un ajuste pobre y aquellos menores a 0,6 indican que el modelo es limitado (Tien Bui *et al.*, 2012).

Gráfico 4. Ejemplo de una curva de éxito.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017).

2.1.4.1.5.1. Categorías de susceptibilidad

Una vez se comprueba que la función de susceptibilidad definida representa las condiciones del área de estudio de forma adecuada y satisfactoria, se establecen las categorías de susceptibilidad y de amenaza con los siguientes criterios tomados de Van Westen (2013 en Servicio Geológico Colombiano, 2017).

La categoría de susceptibilidad alta debe cumplir:

	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

- Tiene la mayor área acumulada de deslizamientos.
- Tiene la mayor densidad de deslizamientos en porcentaje.
- Tiene la mayor densidad de deslizamientos por unidad de área.
- Las áreas de esta categoría deben ser lo más pequeñas posibles y limitarse a aquellas zonas donde se han producido deslizamientos y es más probable que se produzcan en el futuro.

La categoría de susceptibilidad media debe cumplir:

- Son áreas que presentan baja densidad de deslizamientos, aunque eventualmente se pueden presentar.

La categoría de susceptibilidad baja debe cumplir:

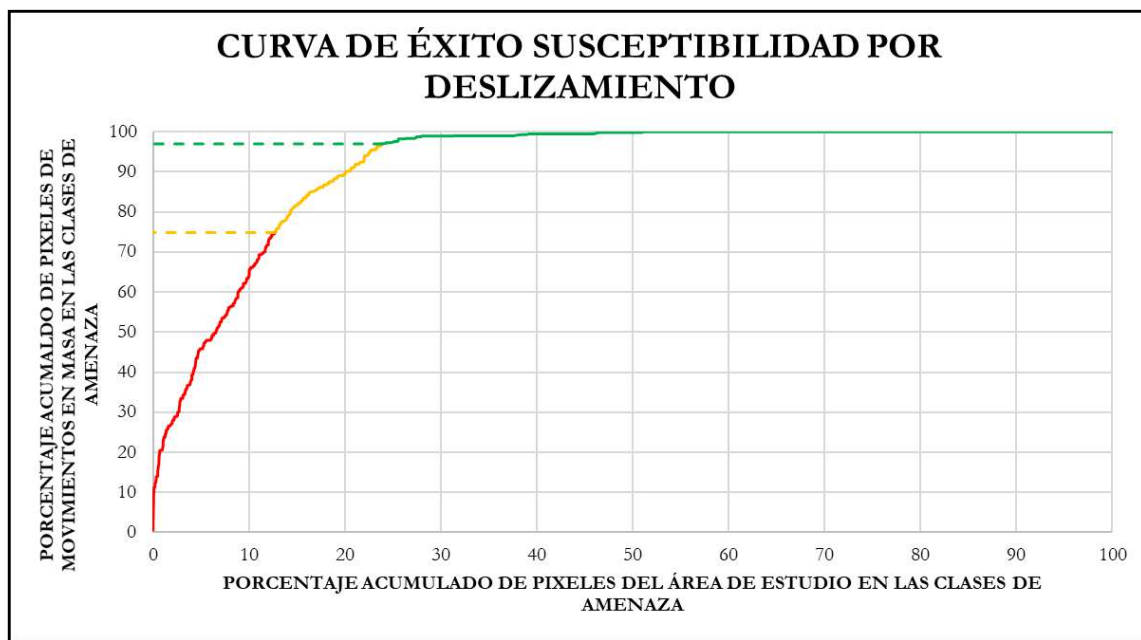
- Son áreas donde se espera una muy baja densidad de ocurrencia de deslizamientos.

Se propone la siguiente categorización para el mapa de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento, en función de la probabilidad de ocurrencia (Van Westen, 2013, en Servicio Geológico Colombiano, 2017):

- **Susceptibilidad alta:** porcentaje de todos los movimientos en masa $>75\%$.
- **Susceptibilidad media:** porcentaje de todos los movimientos en masa hasta máximo 25% .
- **Susceptibilidad baja:** porcentaje de todos los movimientos en masa $<2\%$.

Las diferentes categorías de susceptibilidad para el municipio de Cajicá, con base en la curva de éxito y los criterios anteriores, se presentan en el **Gráfico 5**.

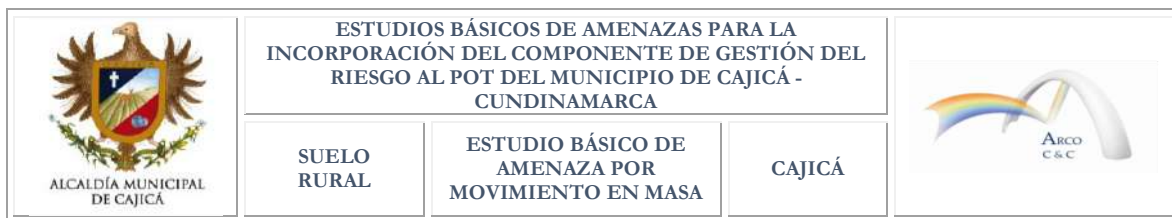
Gráfico 5. Curva de éxito y categorías de susceptibilidad a deslizamientos para el municipio de Cajicá.



Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

2.1.4.2. Caracterización de la amenaza

Para la zonificación de la amenaza se considera como detonante la lluvia, al estimarse la probabilidad condicional de que una precipitación P supere un umbral P_t y que esta última detone un movimiento en masa para un período de observación de un año. Habiéndose calculado la probabilidad temporal de la lluvia y la susceptibilidad final por deslizamientos; asumiendo que el evento es independiente, la amenaza en términos de probabilidad estará dada por el producto y las categorías quedarán establecidas con base en las áreas acumuladas donde ocurran los eventos, estando, en cualquier caso, las áreas de amenaza alta en las zonas donde se hayan acumulado hasta el 75% del área del inventario.



2.1.4.2.1. Probabilidad espacial

La probabilidad espacial está representada por los valores de probabilidad obtenidos del análisis de susceptibilidad. Cada una de estas áreas tiene la probabilidad de que se genere un movimiento en masa, definida por la combinación de los pesos de cada clase y la relación entre el área total de eventos y el área de estudio. Dado que, para el análisis de susceptibilidad por deslizamientos, se ha propuesto considerar la zona de inicio y de depósito en un solo polígono de agrupamiento, se considera el número de píxeles que representa el área total del movimiento en masa.

Para la construcción del mapa de susceptibilidad a deslizamientos, en términos de probabilidad, se considera que cada una de sus celdas presenta una combinación particular entre las clases que componen las diferentes variables o evidencias seleccionadas, conforme a lo anterior, la probabilidad de que en esa celda particular se genere un movimiento en masa, estará dada por la sumatoria de los pesos positivos W_j^+ más la probabilidad a priori dada por la relación entre el área acumulada de deslizamientos y el área de estudio total (Barbieri G y Cambuli P., 2009; Bonham-Carter *et al.*, 1988).

Dado que, mediante esta estimación es posible generar un mapa con los sitios de mayor probabilidad espacial de ocurrencia de un movimiento en masa; deslizamiento, la adición de ambas susceptibilidades puede ser considerado como un mapa que reúne para cada celda la probabilidad de que se genere o se vea afectada por un deslizamiento, considerándose el evento independiente y no excluyente.

La descripción de la metodología comprende conceptos de probabilidad a priori y a posteriori enfocados en tratar las relaciones entre la distribución espacial de las zonas afectadas por deslizamientos y la distribución espacial de los factores condicionantes o parámetros en los deslizamientos, posibilitando calcular el grado de influencia que cada factor tuvo, tiene y tendrá en el desarrollo de eventos de movimiento de ladera. La consideración inicial asume que si una parte A_f del área de interés se encuentra afectada por deslizamientos, la probabilidad a priori de desarrollarse un deslizamiento en la totalidad del área A_t de estudio es:

	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

$$P_f = \frac{A_f}{A_t} \quad (1)$$

La anterior estimación puede variar (crecer o decrecer) dependiendo de las relaciones entre los factores analizados y los deslizamientos, en donde la probabilidad de encontrar uno de los factores en el área de estudio está dada por:

$$P_v = \frac{T_v}{A_t} \quad (2)$$

En donde T_v es el área total ocupada por cierta clase o determinado factor, por ejemplo, la clase de pendiente que se encuentra en el rango de 20-35%.

Para la totalidad del territorio cartografiado, la probabilidad de encontrar un deslizamiento en las áreas descritas por una clase n del parámetro j , es la razón entre la probabilidad de encontrar un deslizamiento dentro del territorio descrito por la clase n del parámetro j y la probabilidad de encontrar un área descrita por la clase n del parámetro j en la totalidad del territorio:

$$P\{A_f|T_v\} = \frac{P(T_v \cap A_f)}{P_v} = \frac{P\{T_v|A_f\}}{P_v} * P_f \quad (3)$$

De manera similar, la probabilidad posterior de encontrar un deslizamiento en áreas no descritas por la clase n del parámetro j es:

$$P\{A_f|\bar{T}_v\} = \frac{P(\bar{T}_v \cap A_f)}{\bar{P}_v} = \frac{P\{\bar{T}_v|A_f\}}{\bar{P}_v} * P_f \quad (4)$$

Lo cual puede denotarse de manera conveniente de la siguiente manera:

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C&C
SUELO RURAL		ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

$$O = \frac{P}{1 - P} \quad (5)$$

Por lo que, en ese orden de ideas, las ecuaciones 3 y 4 pueden ser expresadas como:

$$O\{A_f|T_v\} = \frac{O\{T_v|A_f\}}{O_v} * O_f \quad (6)$$

$$O\{A_f|\bar{T}_v\} = \frac{O\{\bar{T}_v|A_f\}}{\bar{O}_v} * O_f \quad (7)$$

En el método de pesos de evidencia, las ecuaciones 6 y 7 son escritas en términos de logaritmos naturales, es decir:

$$\ln(O_T\{A_f|T_v\}) = W_v^+ + \ln(O_f) \quad (8)$$

$$\ln(O_T\{A_f|\bar{T}_v\}) = W_v^- + \ln(O_f) \quad (9)$$

En donde W_v^+ es el peso positivo asignado cuando la clase n del parámetro j está presente, y W_v^- es el peso negativo asignado cuando la clase n del parámetro j está ausente.

En resumen, los pesos son calculados mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$W^+ = \ln \frac{P\{T_v|A_f\}}{P\{T_v|\bar{A}_f\}} = \ln \left(\frac{\frac{T_v \cap A_f}{A_f}}{\frac{T_v \cap \bar{A}_f}{\bar{A}_f}} \right) = \ln \left(\frac{\frac{\text{Área deslizada en la clase considerada}}{\text{Área total deslizada}}}{\frac{\text{Área estable en la clase considerada}}{\text{Área estable total}}} \right) \quad (10)$$

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C & C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

$$W^- = \ln \frac{P\{\bar{T}_v|A_f\}}{P\{\bar{T}_v|A_f\}} = \ln \left(\frac{\frac{\bar{T}_v \cap A_f}{A_f}}{\frac{\bar{T}_v \cap A_f}{A_f}} \right) = \ln \left(\frac{\frac{\text{Deslizamientos totales en las otras clases}}{\text{Área total deslizada}}}{\frac{\text{Área total estable en las otras clases}}{\text{Área estable total}}} \right) \quad (11)$$

A partir de estas determinaciones, se puede especificar que el peso positivo W^+ es directamente proporcional a la influencia que tiene la clase n del parámetro j en el desarrollo de deslizamientos. Por otro lado, para analizar la influencia de diferentes parámetros o factores en la distribución de deslizamientos en el área, los pesos de cada uno de los parámetros deben ser juntados, como las variables son estadísticamente independientes:

$$\ln(O_T\{A_f|T_{v1}^k \cap T_{v2}^k \cap T_{v3}^k \dots \cap T_{vn}^k\}) = \sum_{i=1}^n W_{vi}^k + \ln O_f \quad (12)$$

En donde k puede tomar signo positivo o negativo dependiendo de la presencia o ausencia del parámetro.

2.1.4.2.2. Probabilidad temporal

Para el municipio se logró construir un registro significativo entre los eventos y la detonante lluvia, permitiendo establecer una adecuada relación lluvia-movimiento en masa, con lo cual es posible estimar la frecuencia de ocurrencia del evento a partir de probabilidades empíricas con los valores críticos de los detonantes que pueden explicar la inestabilidad (enfoque indirecto, Corominas *et al.*, (2013, en Servicio Geológico Colombiano, 2017).

2.1.4.2.2.1. Detonante lluvia

2.1.4.2.2.1.1. Probabilidad de excedencia de umbrales de lluvia

En este análisis se realiza la estimación de la probabilidad de excedencia de un umbral mínimo de lluvia que puede detonar un evento, con base en procesos empíricos, a partir de curvas envolventes con las cuales se define una función lineal que involucra la lluvia diaria y la lluvia antecedente, de acuerdo con lo planteado por Jaiswal y Van Westen (2009); con el fin de establecer probabilidad de excedencia de cada tipo de movimiento en masa.

No siempre que el umbral mínimo es excedido se detona un movimiento en masa, debido a otros factores que influyen en la iniciación de éste (Aleotti y Chowdhury, 1999); por lo tanto, la probabilidad final se calcula como la probabilidad condicional de que se exceda un umbral de lluvia y la probabilidad que ocurra un deslizamiento dada esta condición (Jaiswal y van Westen, 2009). La metodología para el cálculo de la probabilidad temporal a partir de los umbrales de lluvia se presenta en la **Ilustración 32**.

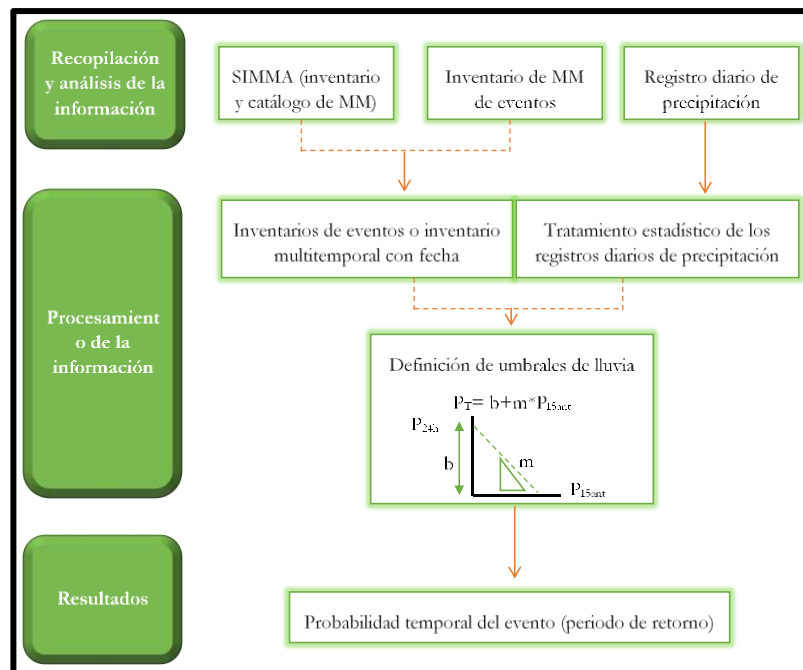


Ilustración 32. Metodología para el cálculo de la probabilidad temporal a partir de umbrales de lluvia.

Fuente: ajustado de Servicio Geológico Colombiano (2017).

Un inventario multitemporal contiene movimientos en masa que fueron detonados en condiciones de lluvia disímiles; por tanto, se establecen umbrales de lluvia que representen el conjunto de datos, para este estudio se han establecido umbrales para lluvia antecedente de 5, 15 y 30 días.

A continuación, se enumeran los pasos para el cálculo de la probabilidad de excedencia:

1. Establecer los registros de inventario de procesos con fecha y localización conocida.
2. Para cada fecha en la que se registró un movimiento en masa se calcula la lluvia antecedente de 5, 15 y 30 días (sin incluir la precipitación del día en que ocurrió).
3. Construir una gráfica en la cual el eje de las abscisas (x) representa la lluvia antecedente (P_{ant}) y en el eje de las ordenadas (y) la precipitación de las 24 horas (P).
4. Si se cuenta con varias estaciones, para cada una se establece una función que represente el umbral de lluvia a partir de los cuales se detona un movimiento en masa. La representación de los umbrales de lluvia se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$P_T = b + m * P_{ant}$$

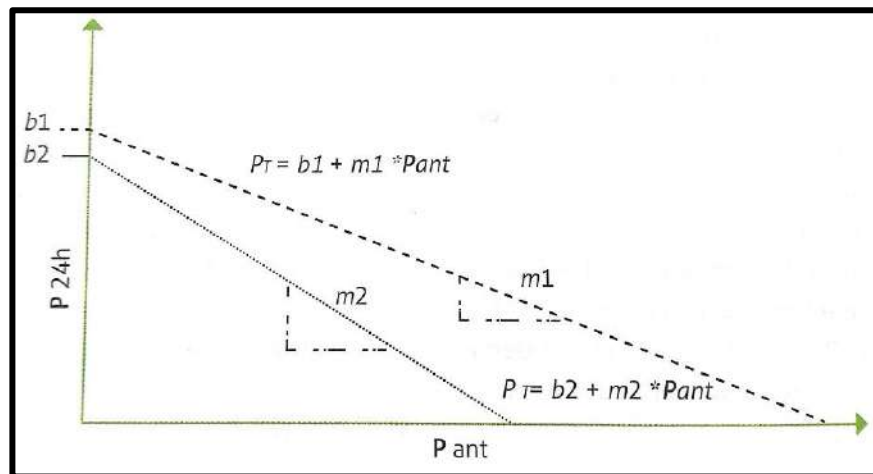


Ilustración 33. Funciones que representan los umbrales de lluvia que detonan un movimiento en masa en un área específica de análisis.

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017).

	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

La probabilidad anual de excedencia se estima como la probabilidad de que un evento exceda una o más veces el umbral de lluvia en un periodo de retorno (**Ilustración 33**). Para simplificar el modelo, se supone que si la cantidad de lluvia en un período dado $P(t)$, excede el umbral de lluvia P_T , entonces la probabilidad que se detone el deslizamiento $P(L)$ es igual a 1, siendo estos valores función de la lluvia diaria $P(t)$ y de la lluvia antecedente $P_{ant}(t)$. Estas cantidades medidas en mm se obtienen de las siguientes ecuaciones:

$$P(t) = f(P(t), P_{ant}(t))$$

$$P[L|P(t) > P_T] = 1 \text{ y } P[L|P(t) \leq P_T] = 0$$

De lo anterior se deduce que:

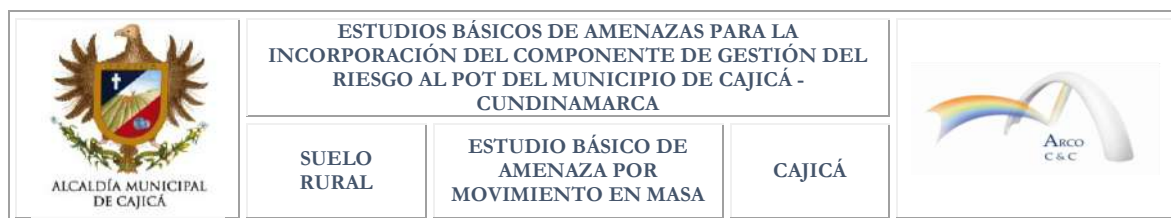
$$P[L] = P[P(t) > P_T]$$

La probabilidad anual de excedencia se determina usando un modelo de probabilidad de Poisson:

$$P[P > P_t] = 1 - e^{(-t \cdot \mu)}$$

Donde:

- t : es el tiempo para el cual se está estimando la probabilidad o.
- μ : intervalo de recurrencia medio del evento.



La probabilidad temporal de que ocurra un movimiento en masa cuando la precipitación supera un umbral P_t puede ser considerada como la adición de la probabilidad para cada uno de los períodos de lluvia antecedente analizados (5, 15 y 30 días), considerando que son eventos mutuamente excluyentes; es decir, no ocurrirán simultáneamente, y que puede ser entendido como la probabilidad de que uno de esos umbrales de lluvia sea superado en un año y que durante este evento, se detone un movimiento en masa; deslizamiento.

2.1.4.2.2.2. Detonante sismo

Dado que, para el área de estudio la construcción de un registro completo de movimientos en masa detonados por sismos no fue posible, toda vez que dicha información para Colombia es muy escasa, la inclusión de esta variable como detonante no fue posible de manera directa, sin embargo, fue tomada en cuenta de manera indirecta bajo el componente de aceleración pico del terreno (PGA), en concordancia con los trabajos de Xu *et al.* (2013) y Xu *et al.* (2012), quienes plantean una metodología para estimar la susceptibilidad del terreno frente a movimientos en masa detonados por sismos, por lo que se ingresó como una variable temática para el cálculo de los pesos de evidencia.

2.1.4.2.2.2.1. Aceleración pico del terreno (PGA)

Esta variable representa un modelo probabilístico bajo el cual se estima el movimiento del terreno en términos de la aceleración horizontal máxima en roca que podría esperarse por la ocurrencia de sismos frecuentes (período de retorno de 475 años). La información de estas aceleraciones en el municipio fue extraída del Mapa Nacional de Amenaza Sísmica.

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA		 ARCO C&C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	

2.1.5. RESULTADOS

2.1.5.1. Susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento y flujo

2.1.5.1.1. Coberturas

La importancia de las coberturas vegetales radica en la protección de los suelos frente a los procesos erosivos al disminuir la escorrentía superficial, pues reduce el movimiento de agua en zonas con pendientes altas. De la misma manera, el sistema radicular, provee soporte a los horizontes del suelo, por lo que su presencia disminuye las probabilidades de deslizamientos y la generación de discontinuidades superficiales.

Tabla 9. Pesos finales para la variable coberturas de la tierra para deslizamientos, aplicando el método WofE en el área rural de Cajicá.

CLASES		ÁREA (Km ²)	Px MM	% MOV	Px CLASE	% CLASE	W+	W-	CONTRASTE (Wf)
112	Tejido urbano discontinuo	4,37	2	0,09	174912	6,25	-4,204	0,064	-4,268
511	Ríos	0,50	1	0,05	19960	0,71	-2,727	0,007	-2,733
232	Pastos arbolados	2,08	16	0,75	83208	2,97	-1,381	0,023	-1,404
231	Pastos limpios	21,56	443	20,69	862324	30,81	-0,398	0,137	-0,535
314	Bosque de galería y ripario	0,52	11	0,51	20960	0,75	-0,377	0,002	-0,379
3221	Arbustal denso	0,21	5	0,23	8232	0,29	-0,231	0,001	-0,231
1421	Áreas culturales	0,01	0	0,00	268	0,01	0,000	0,000	0,000
1422	Áreas deportivas	3,13	0	0,00	125180	4,47	0,000	0,000	0,000
31211	Bosque abierto alto de tierra firme	0,58	0	0,00	23132	0,83	0,000	0,000	0,000
513	Canales	0,01	0	0,00	252	0,01	0,000	0,000	0,000
514	Cuerpos de agua artificiales	0,50	0	0,00	20032	0,72	0,000	0,000	0,000
225	Cultivos confinados	2,94	0	0,00	117416	4,20	0,000	0,000	0,000
223	Cultivos permanentes arbóreos	0,02	0	0,00	852	0,03	0,000	0,000	0,000
3212	Herbazal abierto	0,01	0	0,00	232	0,01	0,000	0,000	0,000

CLASES		ÁREA (Km ²)	Px MM	% MOV	Px CLASE	% CLASE	W+	W-	CONTRASTE (Wf)
32121	Herbazal abierto arenoso	0,29	0	0,00	11520	0,41	0,000	0,000	0,000
321122	Herbazal denso inundable arbolado	0,02	0	0,00	612	0,02	0,000	0,000	0,000
321121	Herbazal denso inundable no arbolado	1,73	0	0,00	69148	2,47	0,000	0,000	0,000
214	Hortalizas	1,60	0	0,00	63852	2,28	0,000	0,000	0,000
142	Instalaciones recreativas	0,56	0	0,00	22396	0,80	0,000	0,000	0,000
512	Lagunas, lagos y ciénagas naturales	0,07	0	0,00	2964	0,11	0,000	0,000	0,000
2122	Maíz	0,50	0	0,00	19900	0,71	0,000	0,000	0,000
245	Mosaico de cultivos y espacios naturales	0,01	0	0,00	424	0,02	0,000	0,000	0,000
244	Mosaico de pastos con espacios naturales	0,01	0	0,00	484	0,02	0,000	0,000	0,000
242	Mosaico de pastos y cultivos	2,18	0	0,00	87264	3,12	0,000	0,000	0,000
125	Obras hidráulicas	0,08	0	0,00	3212	0,11	0,000	0,000	0,000
1321	Otras explotaciones mineras	0,01	0	0,00	504	0,02	0,000	0,000	0,000
1411	Otras zonas verdes urbanas	0,11	0	0,00	4592	0,16	0,000	0,000	0,000
2111	otros cultivos transitorios	1,99	0	0,00	79492	2,84	0,000	0,000	0,000
2151	Papa	0,79	0	0,00	31692	1,13	0,000	0,000	0,000
1222	Red ferroviaria y terrenos asociados	0,01	0	0,00	252	0,01	0,000	0,000	0,000

CLASES		ÁREA (Km²)	Px MM	% MOV	Px CLASE	% CLASE	W+	W-	CONTRASTE (Wf)
1221	Red vial y territorios asociados	1,56	0	0,00	62428	2,23	0,000	0,000	0,000
111	Tejido urbano continuo	6,18	0	0,00	247248	8,83	0,000	0,000	0,000
413	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	0,03	0	0,00	1124	0,04	0,000	0,000	0,000
1212	Zonas comerciales	0,03	0	0,00	1020	0,04	0,000	0,000	0,000
131	Zonas de extracción minera	0,41	0	0,00	16404	0,59	0,000	0,000	0,000
1211	Zonas industriales	1,38	0	0,00	55328	1,98	0,000	0,000	0,000
411	Zonas Pantanosas	0,81	0	0,00	32392	1,16	0,000	0,000	0,000
233	Pastos enmalezados	1,83	122	5,70	73296	2,62	0,778	-0,032	0,811
31111	Bosque denso alto de tierra firme	0,30	21	0,98	11916	0,43	0,836	-0,006	0,841
3231	Vegetación secundaria alta	1,60	121	5,65	63856	2,28	0,908	-0,035	0,943
32122	Herbazal abierto rocoso	0,83	64	2,99	33212	1,19	0,925	-0,018	0,944
1313	Explotación de carbón	0,29	26	1,21	11404	0,41	1,094	-0,008	1,102
315	Plantación forestal	5,17	569	26,58	206840	7,39	1,282	-0,232	1,514
3232	Vegetación secundaria baja	2,58	329	15,37	103280	3,69	1,429	-0,129	1,558
3222	Arbustal abierto	0,17	29	1,35	6920	0,25	1,704	-0,011	1,715
1315	Explotación de materiales de construcción	0,42	382	17,84	16940	0,61	3,406	-0,191	3,596
TOTAL		69,97	2141	100,00	2798876	100,00	-		

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

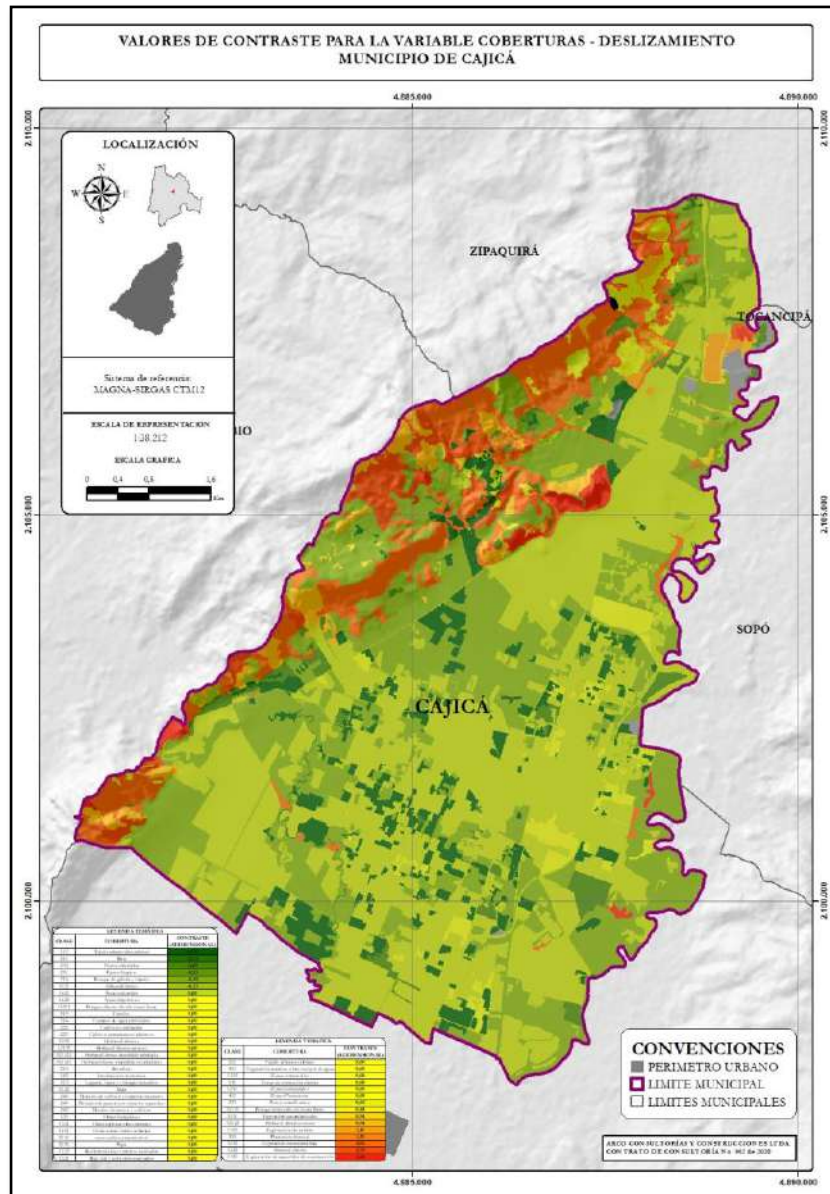
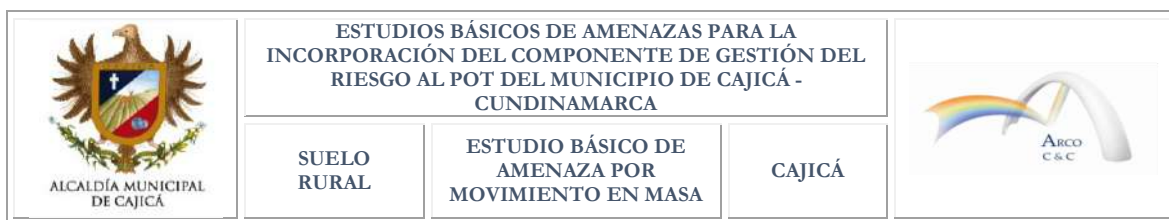


Ilustración 34. Mapa de contrastes o pesos para la variable coberturas de la tierra para deslizamientos, en el municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).



De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta los contrastes obtenidos (**Tabla 9**), las coberturas Vegetación Secundaria Baja, Arbustal Abierto y Explotación de materiales de Construcción están asociadas a una mayor frecuencia en la ocurrencia de deslizamiento. De manera contraria, por sus características, las zonas en donde se ubica el tejido urbano o que han sido ocupadas por pastos arbolados, parecen no tener influencia directa frente a la ocurrencia de estos fenómenos; distinto a lo que podría ocurrir ante la modificación de coberturas como pastos, arbustales o bosques.

La distribución de las coberturas en el municipio evidencia una importante presencia de Pastos limpios (30,81%), seguido por Tejido Urbano Continuo (8,83%), Plantación Forestal (7,39%) y Tejido Urbano Discontinuo (6,25%), siendo la primer cobertura la más relevante para la no ocurrencia de movimientos en masa coincidiendo con las zona donde predominan valores de contraste negativo, lo que implica que un cambio o modificación de estas coberturas puede favorecer la ocurrencia de procesos de inestabilidad. (**Ilustración 34**).

2.1.5.1.2. Curvatura de plano

De acuerdo con los rangos obtenidos (**Tabla 10**), las curvaturas lateralmente cóncavas, presentan una correlación positiva con la ocurrencia de deslizamientos. En el caso de las superficies lineales, son indiferentes ante el inicio de deslizamientos (en relación con curvaturas laterales cóncavas), pero de ser modificadas, pueden favorecer la ocurrencia de estos. Estas tres superficies aquí mencionadas (cóncavas, lineales, convexas), se distinguen en tres zonas del municipio claramente, la curvatura más relevante es la convexa, localizada en todo el municipio y destacando su dominio en la zona centro sur del municipio con una cobertura del 87,67%; este valor es relevante, puesto que presenta la menor probabilidad de ocurrencia de deslizamientos. La siguiente curvatura es la cóncava, la cual se presencia en las zonas sur y zonas oeste del municipio; cerros orientales, con una cobertura menor al 10%, finalmente la curvatura lineal se presenta en las zonas centro y norte del municipio, aunque su cobertura es indiferente en relación con las demás (**Ilustración 35**).

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C & C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

Tabla 10. Pesos finales para la variable curvatura de plano para deslizamientos, aplicando el método WofE en el municipio de Cajicá.

CLASES		ÁREA (Km ²)	Px MM	% MOV	Px CLASE	% CLASE	W+	W-	CONTRASTE (Wf)
3	Convexa	61,34	1145	53,48	2453708	87,67	-0,495	1,330	-1,824
2	Lineal	1,77	106	4,95	70624	2,52	0,675	-0,025	0,700
1	Cóncava	6,86	890	41,57	274544	9,81	1,447	-0,434	1,881
TOTAL		69,97	2141	100,00	2798876	100,00	-		

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

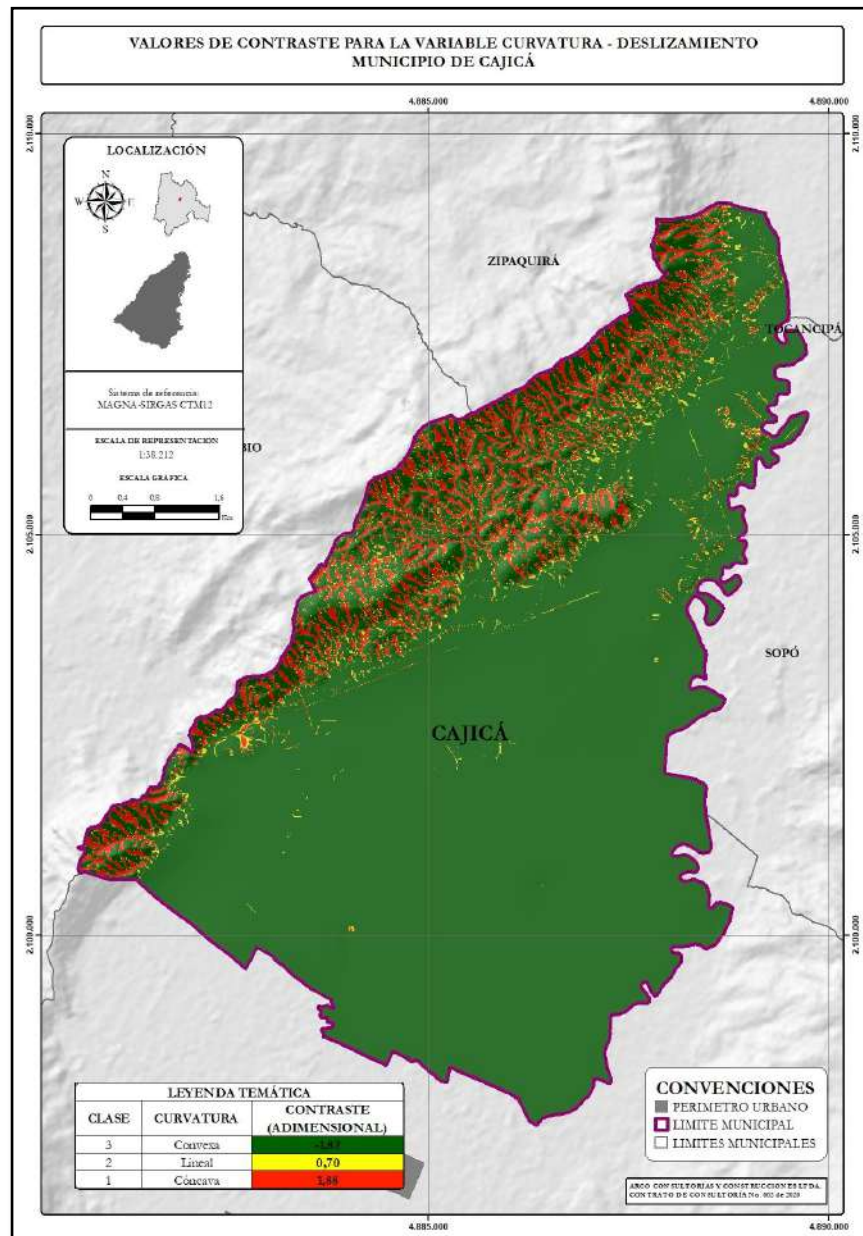


Ilustración 35. Mapa de contrastes o pesos para la variable curvatura de plano para deslizamientos, en el municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

2.1.5.1.3. Pendientes

Siguiendo los resultados para esta variable (**Tabla 11**), cuando la inclinación del terreno se encuentra entre los 30° y los 50° de inclinación, la ocurrencia deslizamientos se ve favorecida, siendo las pendientes >50°, aquellas que presentan una influencia destacada ante el posible inicio de estos fenómenos, no obstante, el porcentaje de área representada por esta pendiente es menor del 1%.

En cuanto a su distribución al interior del municipio, la inclinación <5°; la inclinación predominante en Cajicá (Cobertura del 71,78%), y, por lo tanto, la que exhibe menor correlación con la ocurrencia de movimientos en masa, están concentradas en la mayoría del municipio exceptuando los límites desde el norte hasta el oeste; cerros orientales, dando cobertura a toda la zona urbana del municipio. (**Ilustración 36**).

Por otra parte, es importante notar que la modificación de pendientes en los cerros orientales; límites desde el norte hasta el oeste del municipio, donde es usual encontrar pendientes pronunciadas mayores a 50°, podría favorecer el inicio de deslizamientos.

Tabla 11. Pesos finales para la variable pendientes para deslizamientos, aplicando el método WofE en el municipio de Cajicá.

CLASES		ÁREA (Km²)	Px MM	% MOV	Px CLASE	% CLASE	W+	W-	CONTRASTE (Wf)
1	<5°	50,23	103	4,81	2009032	71,78	-2,703	1,218	-3,921
2	5°-10°	3,67	155	7,24	146720	5,24	0,323	-0,021	0,344
3	10°-15°	3,46	173	8,08	138432	4,95	0,491	-0,034	0,525
4	15°-20°	3,20	208	9,72	127876	4,57	0,755	-0,055	0,811
5	20°-25°	2,62	247	11,54	104636	3,74	1,128	-0,085	1,213
6	25°-30°	2,17	246	11,49	86804	3,10	1,312	-0,091	1,402
7	30°-35°	1,81	242	11,30	72448	2,59	1,477	-0,094	1,570
8	35°-40°	1,43	243	11,35	57376	2,05	1,715	-0,100	1,815
9	40°-45°	0,98	290	13,55	39320	1,40	2,273	-0,131	2,404

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C & C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

CLASES		ÁREA (Km²)	Px MM	% MOV	Px CLASE	% CLASE	W+	W-	CONTRASTE (Wf)
10	45°-50°	0,35	199	9,29	14180	0,51	2,923	-0,093	3,015
11	>50°	0,05	35	1,63	2052	0,07	3,121	-0,016	3,137
TOTAL		69,97	2141	100,00	2798876	100,00	-		

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

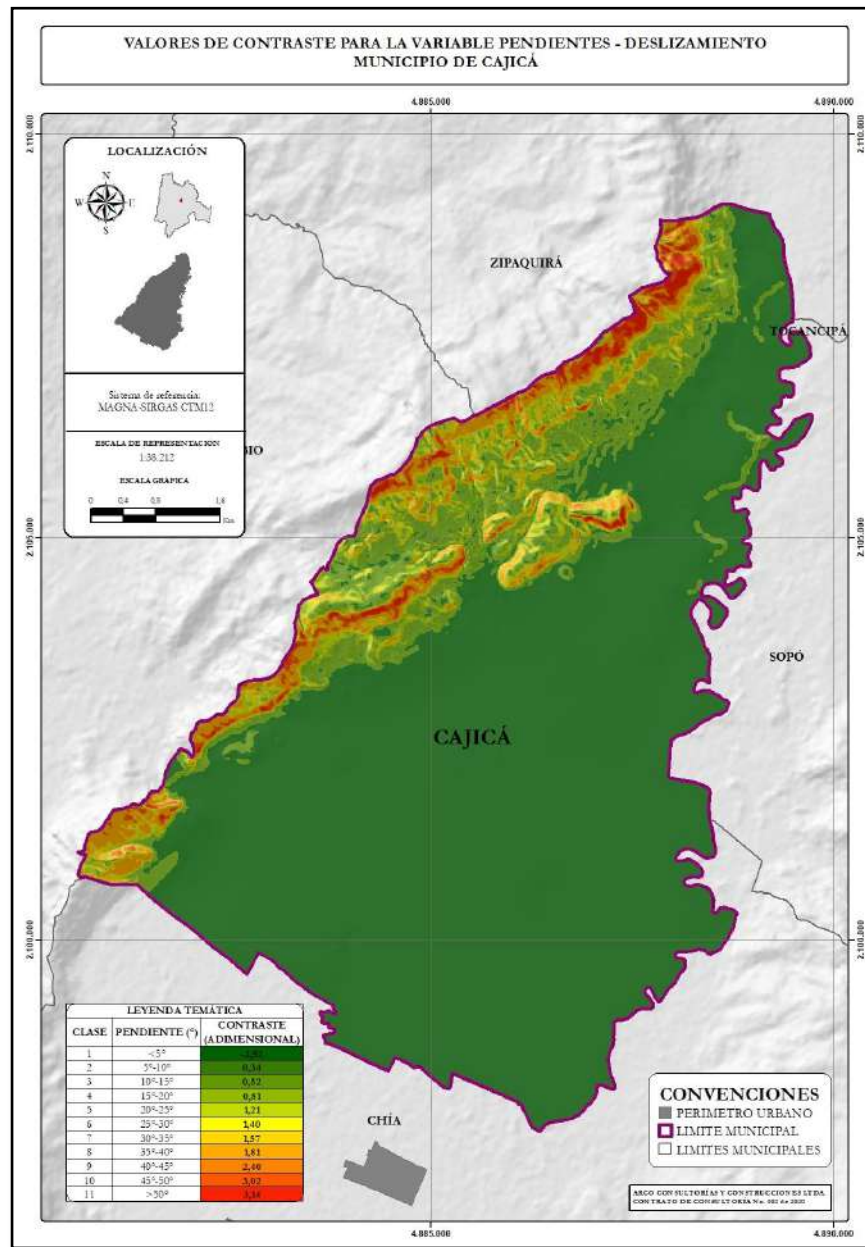


Ilustración 36. Mapa de contrastes o pesos para la variable pendientes para deslizamientos, en el municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

2.1.5.1.4. Elevación del terreno

De acuerdo con los contrastes obtenidos (**Tabla 12**), los rangos de elevación más críticos frente a la ocurrencia de deslizamientos se encuentran entre los 2.600 - 3.000 m.s.n.m, los cuales se concentran las zonas norte y oeste del municipio colindante a los límites municipales. Es destacable que el rango de elevación 2.600 - 2.800 m.s.n.m es el que presenta mayor probabilidad de ocurrencia ante eventos de tipo deslizamiento, anexo, este rango se encuentra relativamente cerca de la zona urbana del municipio de Cajicá.

El rango con menor probabilidad de ocurrencia es 2.500 - 2.600 m.s.n.m, y es el rango con mayor presencia en todo el municipio de Cajicá, con una cobertura de terreno del 75,06%, cubriendo de este modo todo el municipio a excepción de las zonas norte y oeste del municipio; localización de los cerros orientales (**Ilustración 37**).

Tabla 12. Pesos finales para la variable elevación del terreno para deslizamientos, aplicando el método WofE en el municipio de Cajicá.

CLASES	ÁREA (Km ²)	Px MM	% MOV	Px CLASE	% CLASE	W+	W-	CONTRASTE (Wf)
1 2536 - 2600	52,52	336	15,69	2100704	75,06	-1,566	1,220	-2,785
4 3000 - 3200	2,14	50	2,34	85648	3,06	-0,270	0,007	-0,278
3 2800 - 3000	5,21	593	27,70	208232	7,44	1,317	-0,247	1,564
2 2600 - 2800	10,11	1162	54,27	404292	14,44	1,326	-0,627	1,953
TOTAL	69,97	2141	100,00	2798876	100,00	-		

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

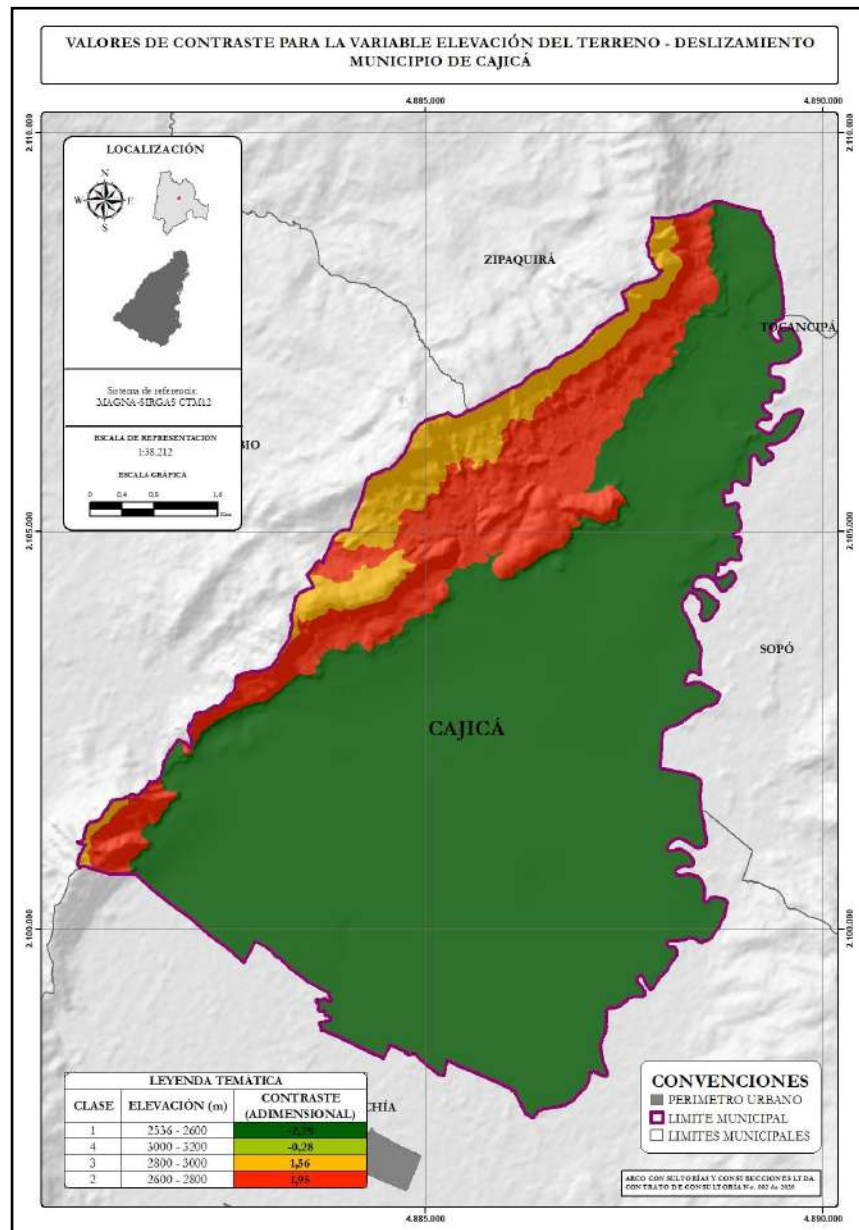


Ilustración 37. Mapa de contrastes o pesos para la variable elevación del terreno para deslizamientos, en el municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA				
SUELO RURAL		ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ		

2.1.5.1.5. Orientación de ladera

De acuerdo con los rangos obtenidos (**Tabla 13**), las laderas con una orientación hacia el suroeste (SW), sureste (SE), noreste (NE), presentan una correlación positiva con la ocurrencia de deslizamientos en el municipio de Cajicá. En consecuencia, la orientación de ladera en los sectores centro y sur del municipio (algunas zonas en el oeste del municipio), *grosso modo*, ayudan al inicio de este tipo de fenómenos en comparación al resto del municipio. Esto es de especial interés, pues las laderas con orientaciones al SW y SE, en conjunto superan el 30% en área del total municipal (**Ilustración 38**).

Tabla 13. Pesos finales para la variable orientación de ladera para deslizamientos, aplicando el método WofE en el municipio de Cajicá.

CLASES		ÁREA (Km²)	Px MM	% MOV	Px CLASE	% CLASE	W+	W-	CONTRASTE (Wf)
9	NW (292.5-337.5)	7,72	31	1,45	308728	11,03	-2,031	0,102	-2,134
8	W (247.5-292.5)	6,23	27	1,26	249180	8,90	-1,955	0,081	-2,036
6	S (157.5-202.5)	13,64	344	16,07	545416	19,49	-0,193	0,042	-0,235
4	E (67.5-112.5)	11,77	320	14,95	470760	16,82	-0,118	0,022	-0,140
2	Plana (-1) N (0-22.5)	5,02	169	7,89	200624	7,17	0,096	-0,008	0,104
3	NE (22.5-67.5)	4,64	200	9,34	185544	6,63	0,343	-0,030	0,373
5	SE (112.5-157.5)	16,28	667	31,15	651248	23,27	0,292	-0,109	0,401
7	SW (202.5-247.5)	4,68	383	17,89	187376	6,69	0,984	-0,128	1,112
TOTAL		69,97	2141	100,00	2798876	100,00	-		

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

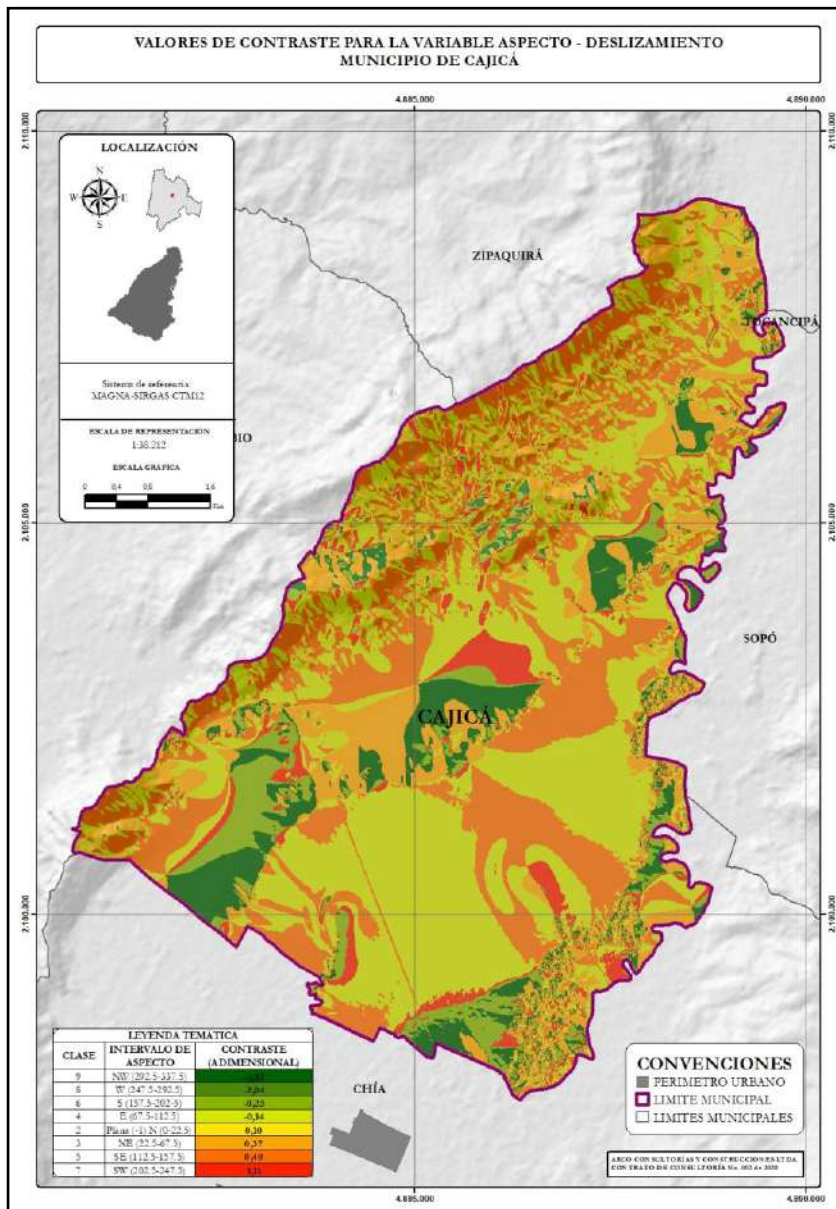


Ilustración 38. Mapa de contrastes o pesos para la variable orientación de ladera para deslizamientos, en el municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

2.1.5.1.6. Aceleración pico del terreno (PGA)

En el área municipal de Cajicá, existe solamente 1 posible intervalo de aceleración pico a nivel de roca, cuando esta aceleración tiene valores entre 0 a 50 cm/s² el cuál presenta un valor del contraste sumamente bajo; negativo, lo que quiere decir que la probabilidad de ocurrencia de un evento tipo deslizamiento es sumamente baja. **(Tabla 14) (Ilustración 39).**

Tabla 14. Pesos finales para la variable aceleración pico del terreno para deslizamientos, aplicando el método WofE en el municipio de Cajicá.

CLASES		ÁREA (Km ²)	Px MM	% MOV	Px CLASE	% CLASE	W+	W-	CONTRASTE (Wf)
2	0 - 50	69,97	2141	100,00	2798876	100,00	0,000	7,175	-7,175
TOTAL		69,97	2141	100,00	2798876	100,00	-		

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

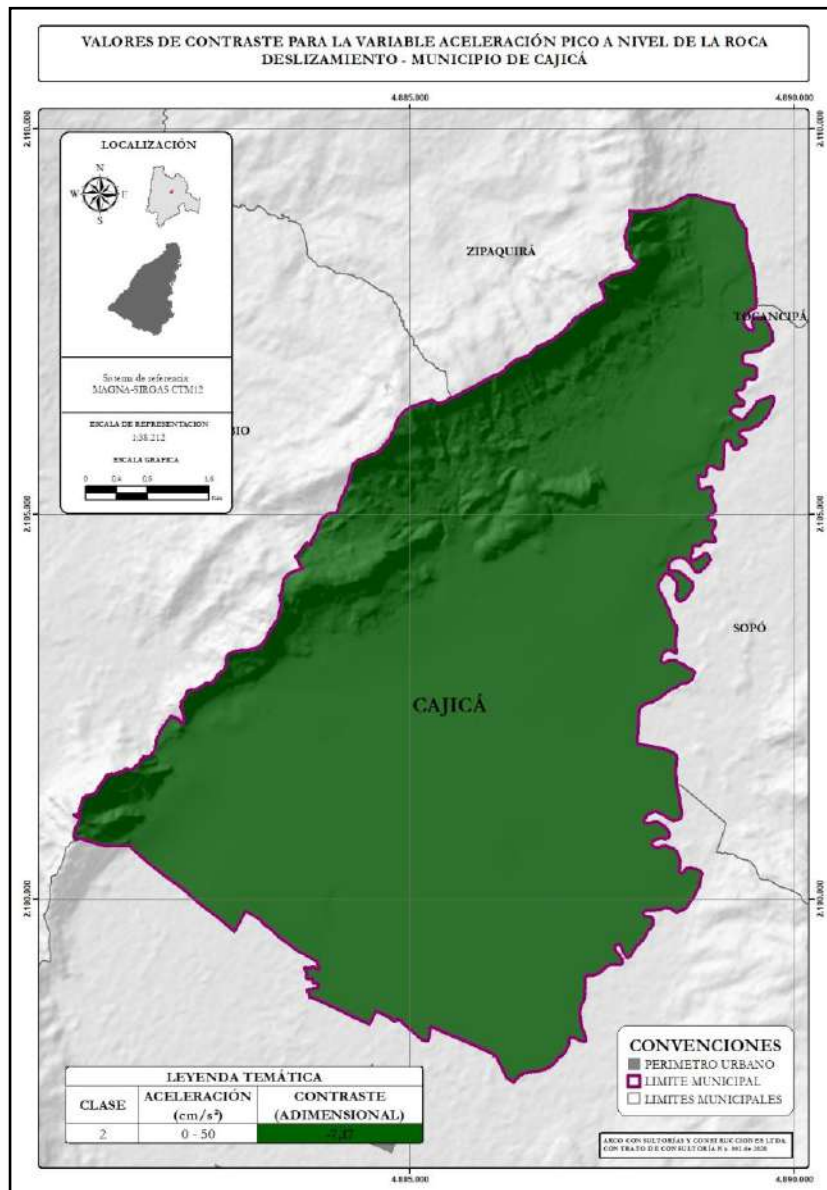


Ilustración 39. Mapa de contrastes o pesos para la variable aceleración pico del terreno para deslizamientos, en el municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

2.1.5.1.7. Unidades geológicas superficiales (UGS)

Los resultados obtenidos para el análisis de contrastes, de acuerdo con los pesos de evidencia para el municipio de Cajicá (**Tabla 15**), muestran que aquellos materiales derivados de las rocas de formaciones de edad cretácica, como es el caso de Conejo, Labor Tierna y Arenisca Dura, que están constituidos por sedimentos de diferentes tamaños de grano (arcillas, limos y arenas), favorecen la ocurrencia de deslizamientos, empero, se debe destacar la unidad geológica Roca dura de la Formación Arenisca Dura, puesto que presenta valores positivos ante la probabilidad de ocurrencia de deslizamiento y la tercer cobertura más alta (9,16%) en el municipio. Este fenómeno también presenta una correlación positiva respecto a los suelos transportados de flujo de detritos (0,06%), sin embargo, la modificación de otros suelos transportados (coluvial y aluvial; Formación Chia) podría provocar el inicio de este tipo de fenómenos.

Tabla 15. Pesos finales para la variable unidades geológicas superficiales (UGS) para deslizamientos, aplicando el método WofE en el municipio de Cajicá.

CLASES		ÁREA (Km ²)	Px MM	% MOV	Px CLASE	% CLASE	W+	W-	CONTRASTE (Wf)
11	Stfs	36,755	2	0,09	1470200	52,53	-6,333	0,745	-7,078
2	Stal	11,462	52	2,43	458492	16,38	-1,909	0,154	-2,064
12	Srfc	0,412	2	0,09	16468	0,59	-1,841	0,005	-1,846
18	Srflt	0,147	3	0,14	5868	0,21	-0,403	0,001	-0,404
7	Rbfg	0,505	13	0,61	20192	0,72	-0,173	0,001	-0,174
10	Stft	4,550	122	5,70	181984	6,50	-0,132	0,009	-0,141
8	Rbfad	0,492	14	0,65	19688	0,70	-0,073	0,000	-0,074
13	Stab	0,062	0	0,00	2492	0,09	0,000	0,000	0,000
14	Srfad	0,449	0	0,00	17944	0,64	0,000	0,000	0,000
15	Stfch	0,122	0	0,00	4876	0,17	0,000	0,000	0,000
16	Srfp	0,231	0	0,00	9224	0,33	0,000	0,000	0,000
4	Rifp	2,069	117	5,46	82752	2,96	0,615	-0,026	0,641
17	Rbflt	0,324	40	1,87	12960	0,46	1,397	-0,014	1,412
1	Stco	1,021	168	7,85	40836	1,46	1,686	-0,067	1,753
5	Rdfad	6,407	792	36,99	256272	9,16	1,399	-0,366	1,765
9	Riflt	1,593	258	12,05	63704	2,28	1,670	-0,105	1,775
6	Rbfc	3,333	516	24,10	133300	4,76	1,625	-0,227	1,852
3	Stf	0,041	42	1,96	1624	0,06	3,546	-0,019	3,565
TOTAL		69,97	2141	100,00	2798876	100,00	-		

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

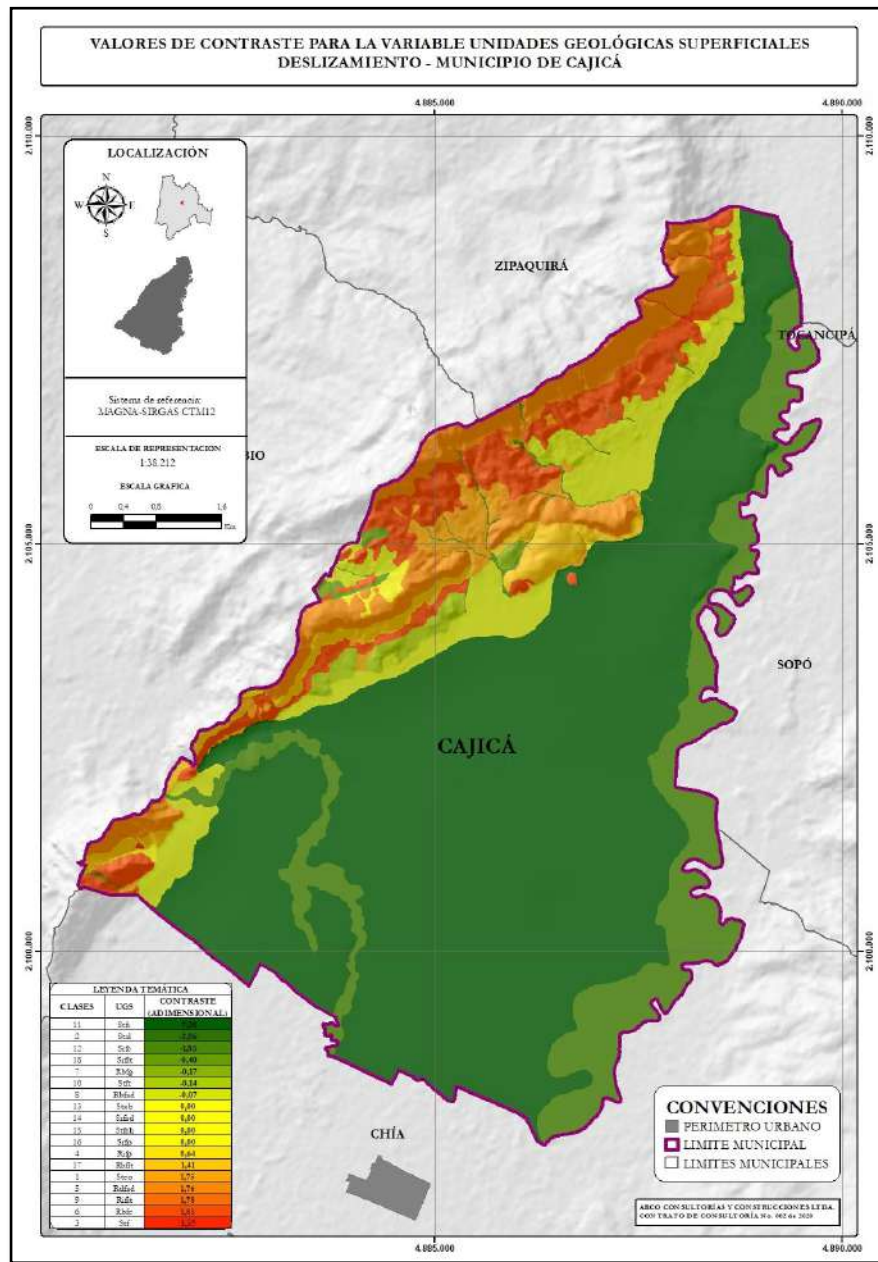
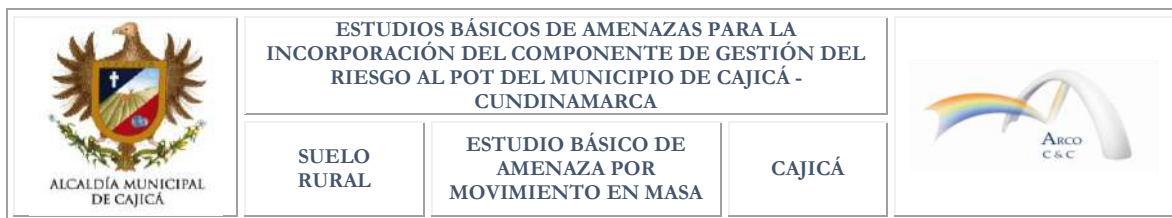


Ilustración 40. Mapa de contrastes o pesos para la variable unidades geológicas superficiales (UGS) para deslizamientos, en el municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).



2.1.5.1.8. Susceptibilidad a movimientos en masa

Para caracterizar de manera apropiada la susceptibilidad por movimientos en masa para el municipio de Cajicá, se tuvieron en cuenta los contrastes de los modelos obtenidos de las variables en peso (W_0/E) correspondientes a coberturas de la tierra, curvatura de plano, pendientes, elevación del terreno, orientación de ladera, aceleración pico del terreno (PGA) y unidades geológicas superficiales (UGS). De acuerdo con esto, se definieron tres clases de susceptibilidad: alta, media y baja (**Ilustración 41**). En el mapa de susceptibilidad resultante para deslizamientos se reconoce áreas categorizadas desde baja a alta; en donde el sector centro, este y sur presenta una susceptibilidad baja, mientras que, en la parte norte y este se presenta la mayor susceptibilidad a la ocurrencia de movimientos en masa (deslizamientos).

2.1.5.1.8.1. Índice de susceptibilidad a movimientos en masa

Una vez se han definido los pesos de las diferentes categorías en cada una de las variables involucradas, se realiza la adición de los pesos finales de las clases que integran cada pixel y el resultado se clasifica en las tres categorías (alta, media y baja) (**Ilustración 41**) en función de los porcentajes de distribución de los eventos del inventario geomorfológico.

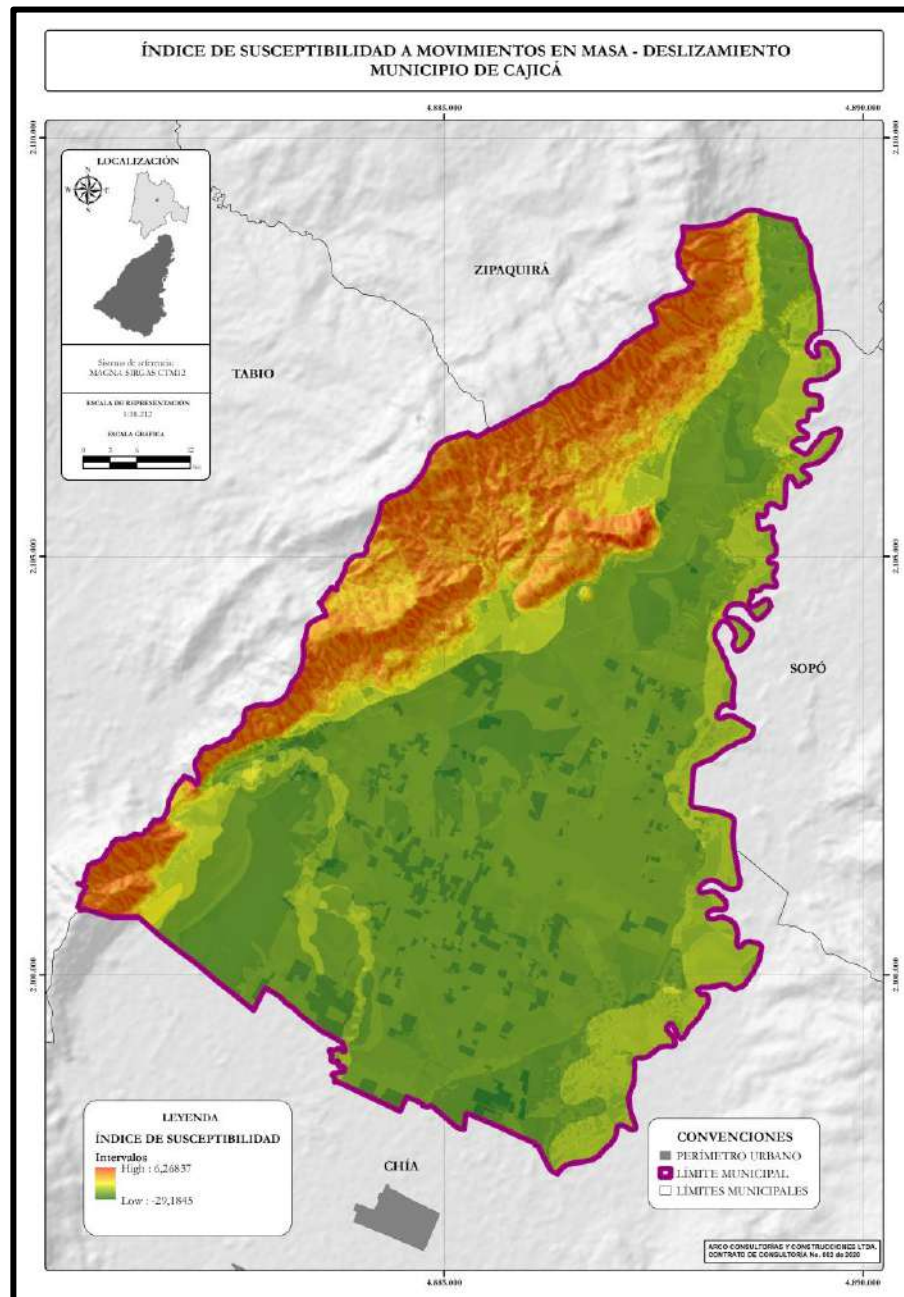


Ilustración 41. Índice de susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C&C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

Susceptibilidad Alta: esta clase de susceptibilidad se relaciona de forma directa con el sustrato rocoso existente, correspondientes a los materiales derivados de rocas cretácicas, con litologías compuestas por con areniscas, arcillolitas y lodolitas. Geomorfológicamente, es posible identificar estructuras asociadas a homoclinales, lomos denudados, lomeríos disectados y conos y lóbulos coluviales y de solifluxión. Estas zonas abarcan pendientes desde los 16° en adelante, incluyendo pendientes abruptas, muy abruptas, escarpadas y muy escarpadas, generalmente cubiertas por pastos limpios y plantaciones forestales.

Susceptibilidad Media: se presentan en zonas con laderas con inclinaciones entre 8° y 30°, en unidades geomorfológicas asociadas a abanicos aluviales y llanuras de inundación, desarrolladas sobre depósitos de flujo torrencial y aluviales cuaternarios, conformados por conglomerados y lodolitas. Estas zonas están cubiertas primordialmente por pastos limpios.

Susceptibilidad Baja: se encuentra en las zonas más bajas del municipio, de topografías planas a inclinadas (hasta 8°), en donde se presentan unidades geomorfológicas de ambientes fluvial y lagunar, litológicamente compuestas predominantemente por rocas finogranulares tales como areniscas y arcillas correspondiente a formaciones cenozoicas como la Formación Sabana, sobre la cual se ha establecido cobertura vegetal del tipo pastos y cultivos.

2.1.5.1.8.2. Probabilidad de zonas susceptibles a movimientos en masa.

De acuerdo con la **Ilustración 42**, las zonas más propensas a movimientos en masa se localizan al norte y oeste del municipio, sobre los cerros orientales, no obstante, se debe destacar que ningún centro poblado se encuentra en la zona de probabilidad media o alta, el centro poblado más cercano y aun así con probabilidad baja de posible riesgo, es el centro poblado Aguanica.

A partir de la distribución de la susceptibilidad a movimientos en masa, es más probable la ocurrencia de un evento de este tipo en aquellas zonas donde se presentan pendientes entre 15 y 30°, desarrolladas sobre rocas (duras, intermedias y blandas), con alto grado de meteorización y los materiales o suelos desarrollados a partir de ellas.

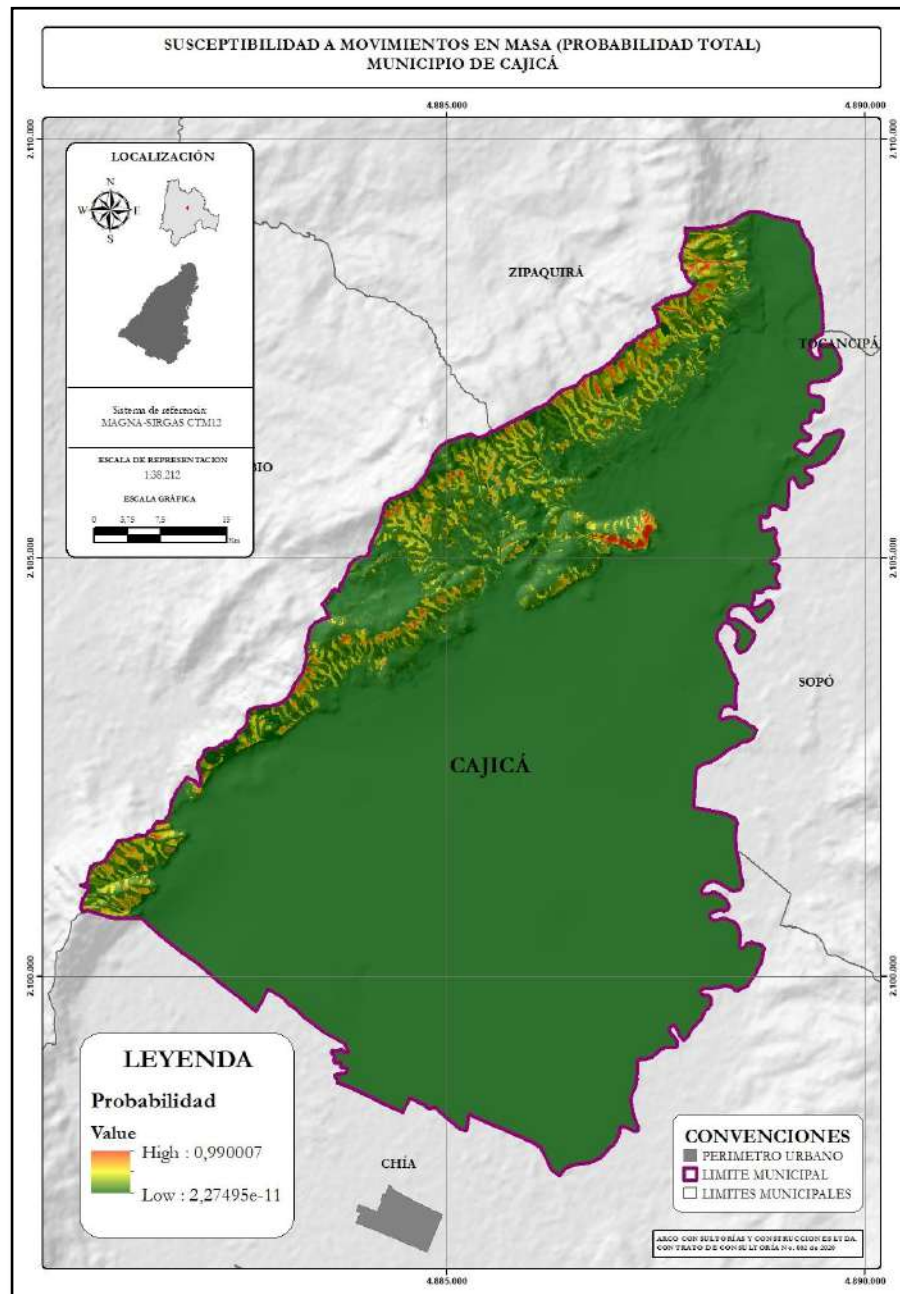
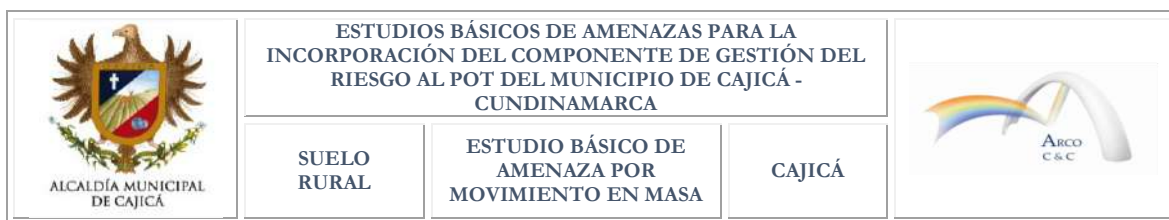


Ilustración 42. Mapa de probabilidad a susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).



2.1.5.2. Detonantes

2.1.5.2.1. Sismo

La inclusión de la variable sismo se llevó a cabo a través del componente aceleración pico del terreno (PGA), el cual fue ingresado como cobertura temática independiente para el cálculo de la susceptibilidad como se explicó anteriormente en el apartado de metodología.

2.1.5.2.2. Lluvia

Para la inclusión de este detonante, se realizó una búsqueda de información proveniente de diferentes fuentes (IDEAM, UNGRD, CAR, DESINVENTAR, SIMMA), con el fin de construir un catálogo de eventos para movimientos en masa ocurridos en el municipio (**Capítulo 2.1.4.1.1**). Dicha información fue tabulada en una tabla donde se reportó para cada evento: el tipo, detonante o causa, descripción, geolocalización, fecha y fuente de información. Para el municipio de Cajicá, se encontró un total de 4 eventos en el casco urbano, entre los cuales se encuentran 3 deslizamientos causados por lluvia y solo una caída en un marco temporal entre el año 2009 y 2012. Debido al bajo número de reportes en la zona de estudio, es necesario recopilar información de municipios periféricos a Cajicá (Sopo, Chía, Zipaquirá, Tabio) con la finalidad de establecer un mejor comportamiento del terreno frente a las precipitaciones para la región, encontrándose 64 eventos de movimientos en masa en un rango de temporalidad comprendido entre los años 2006 hasta el 2019.

Una vez consolidados los reportes estos son espacializados, bien sea mediante sus coordenadas desde la fuente de información consultada o en su defecto, asignando dicho punto a la vereda o referente geográfico registrado. Conforme la localización de las estaciones pluviométricas, se generan polígonos de Thiessen para aquellas, que a la fecha se encuentren activas y, además, su registro abarque el rango temporal de los procesos de inestabilidad, con el fin de definir el área de influencia de cada estación y la distribución de los eventos dentro de éstas (**Tabla 16 e Ilustración 43**).

Tabla 16. Estaciones meteorológicas con cobertura para el municipio de Cajicá, Cundinamarca.

Código	Nombre de la estación	Entidad	Tipo de estación
21201590	ALCO	CAR	Convencional

	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

Código	Nombre de la estación	Entidad	Tipo de estación
21205890	GUANATA	IDEAM	Convencional
21205910	LA COSECHA	IDEAM	Convencional
21201060	PANTANO REDONDO 1	IDEAM	Convencional
21201760	SANTA ISABEL	CAR	Convencional
21206020	SANTILLANA	IDEAM	Convencional
21205920	SUASUQUE	IDEAM	Convencional
21201630	TABIO GRANJA	IDEAM	Convencional

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

No obstante, al utilizar las estaciones pluviométricas reportadas anteriormente, se genera una alta incertidumbre en la estimación de los umbrales debido al reducido número de eventos que se encuentra en el área de influencia de cada una. En consecuencia, se optó por adelantar un proceso de generalización, en el cual se han seleccionado dos estaciones (La Cosecha y Guanata) que abarquen el norte y sur del municipio en función de su geografía, a partir de las cuales se obtendrán los registros de precipitación para los diferentes eventos. La agrupación de las estaciones restantes frente a las dos estaciones seleccionadas sigue el esquema de la siguiente ilustración:

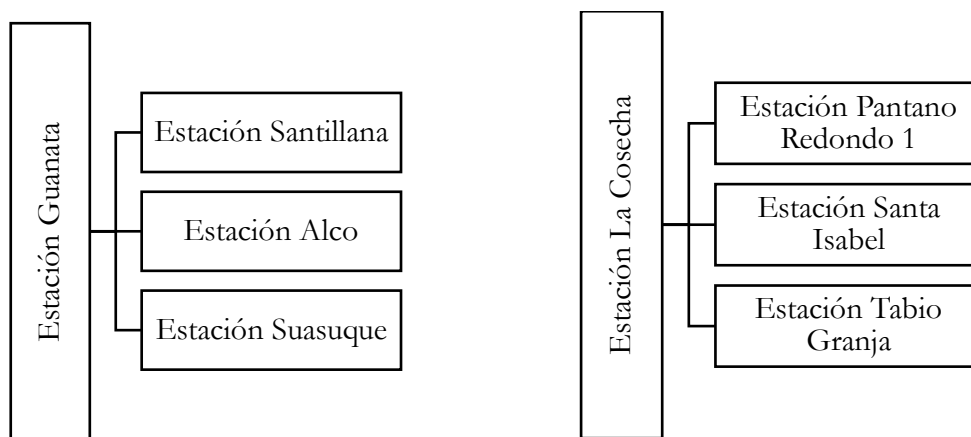


Ilustración 43. Jerarquía de estaciones pluviométricas utilizada para el municipio de Cajicá, Cundinamarca.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

Conforme a lo anterior, los polígonos de Thiessen iniciales se muestran en la **Ilustración 44**, al igual que la agrupación de las áreas de influencia definidas conforme a las dos estaciones seleccionadas para efectos de la definición de los umbrales.

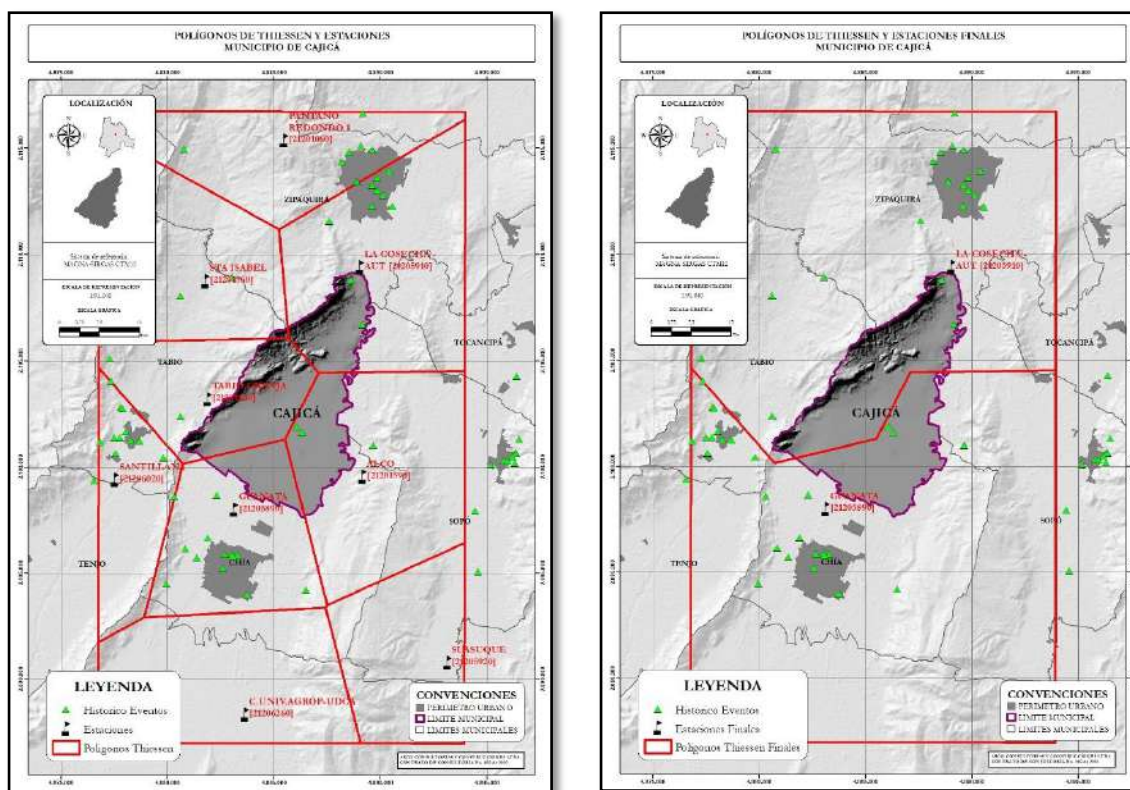


Ilustración 44. Mapa de las estaciones, sus respectivos polígonos de Thiessen y los eventos reportados en el municipio de Cajicá, Cundinamarca, y sus alrededores.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

Considerando la distribución espacial (dentro de los polígonos de Thiessen) y la fecha de los eventos, se realizó una búsqueda en los registros de precipitación diaria en las estaciones definidas (La Cosecha y Guanata), extrayéndose el valor de precipitación en mm para el día del evento, al igual que los valores de precipitación acumulada para los 5, 15 y 30 días anteriores (estos últimos excluyendo el día del evento). Dichos datos son representados en un gráfico de dispersión, donde,

en el eje vertical se muestra la precipitación para la fecha del evento y en el eje horizontal los valores de precipitación acumulada para los 5, 15 y 30 días anteriores.

A partir del gráfico de dispersión, se establece manualmente una envolvente que demarque el extremo inferior de los puntos graficados (Jaiswal y Van Westen, 2009; Chleborad, 2006); es decir, donde la mayoría de los eventos se encuentren por encima de esa recta. La intersección de dicha envolvente con el eje vertical, a partir de la ecuación de la recta $y = mx + b$ proporciona el umbral de lluvias (Pt).

El umbral de lluvia para el acumulado de 5 días anteriores al evento de ocurrencia en la estación de Guanata, se define teniendo un valor de precipitación máxima en un evento de 34,5 mm y una precipitación mínima de 1 mm, en cuanto a los valores establecidos por precipitación acumulada (5 días anteriores a cada evento), se encuentra un valor máximo de 112,5 mm y un valor mínimo de 2,8 mm para este umbral (**Ilustración 45**).

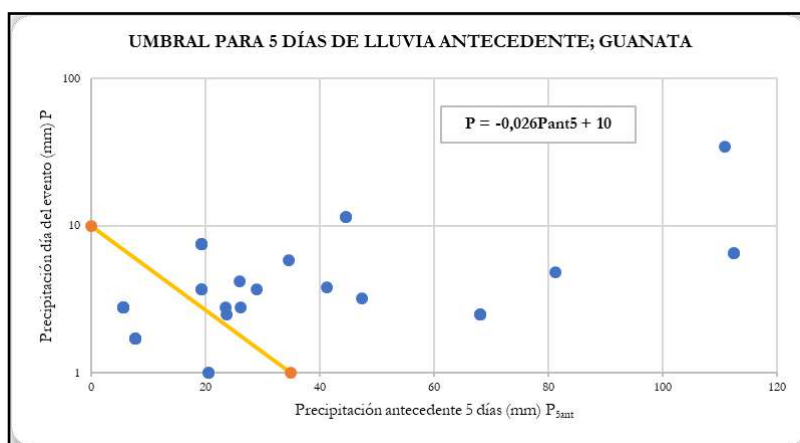


Ilustración 45. Umbral para los 5 días anteriores al evento, estación 21205890 (GUANATA).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

El umbral de lluvia para el acumulado de 15 días anteriores al evento de ocurrencia en la estación de Guanata, se define teniendo un valor de precipitación máxima en un evento de 34,5 mm y una

precipitación mínima de 1 mm, en cuanto a los valores establecidos por precipitación acumulada (15 días anteriores a cada evento), se encuentra un valor máximo de 170,5 mm y un valor mínimo de 13,1 mm para este umbral (**Ilustración 46**).

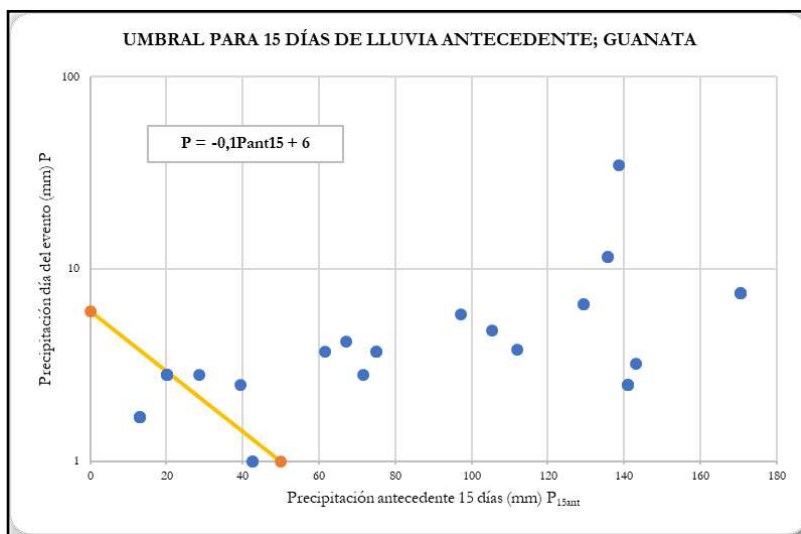


Ilustración 46. Umbral para los 15 días anteriores al evento, estación 21205890 (GUANATA).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

El umbral de lluvia para el acumulado de 30 días anteriores al evento de ocurrencia en la estación de Guanata, se define teniendo un valor de precipitación máxima en un evento de 34,5 mm y una precipitación mínima de 1 mm, en cuanto a los valores establecidos por precipitación acumulada (30 días anteriores a cada evento), se encuentra un valor máximo de 231,3 mm y un valor mínimo de 22,4 mm para este umbral (**Ilustración 47**).

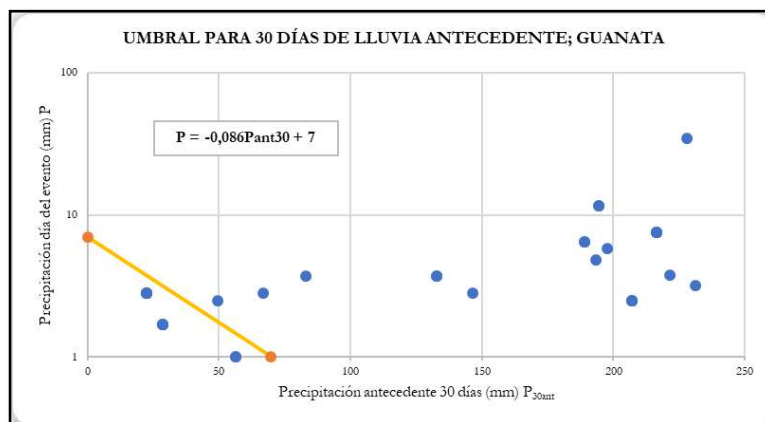


Ilustración 47. Umbral para los 30 días anteriores del evento, estación 21205890 (GUANATA).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

El umbral de lluvia para el acumulado de 5 días anteriores al evento de ocurrencia en la estación de La Cosecha se define teniendo un valor de precipitación máxima en un evento de 40 mm y una precipitación mínima de 1 mm, en cuanto a los valores establecidos por precipitación acumulada (5 días anteriores a cada evento), se encuentra un valor máximo de 71,1 mm y un valor mínimo de 4 mm para este umbral (**Ilustración 48**).

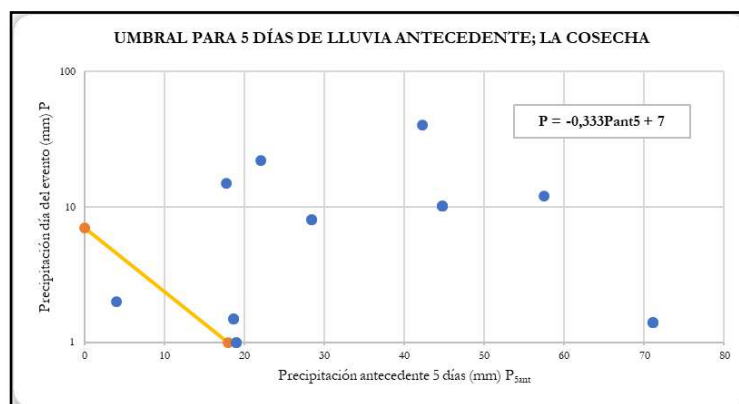


Ilustración 48. Umbral para los 5 días anteriores del evento, estación 21205910 (LA COSECHA).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

El umbral de lluvia para el acumulado de 15 días anteriores al evento de ocurrencia en la estación de La Cosecha se define teniendo un valor de precipitación máxima en un evento de 40 mm y una

precipitación mínima de 1 mm, en cuanto a los valores establecidos por precipitación acumulada (15 días anteriores a cada evento), se encuentra un valor máximo de 170,8 mm y un valor mínimo de 27 mm para este umbral (**Ilustración 49**).

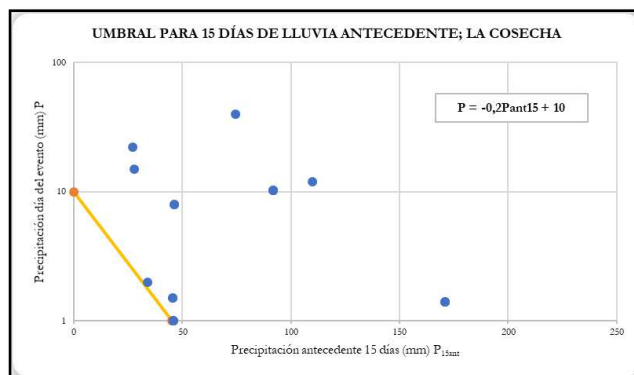


Ilustración 49. Umbral para los 15 días anteriores del evento, estación 21205910 (LA COSECHA).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

El umbral de lluvia para el acumulado de 30 días anteriores al evento de ocurrencia en la estación de La Cosecha se define teniendo un valor de precipitación máxima en un evento de 40 mm y una precipitación mínima de 1 mm, en cuanto a los valores establecidos por precipitación acumulada (30 días anteriores a cada evento), se encuentra un valor máximo de 229,4 mm y un valor mínimo de 55 mm para este umbral (**Ilustración 50**).

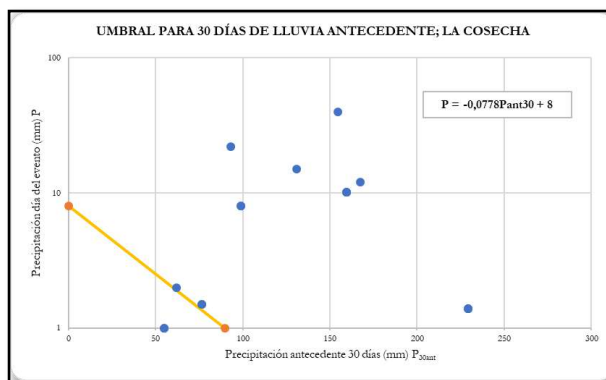


Ilustración 50. Umbral para los 30 días anteriores del evento, estación 21205910 (LA COSECHA).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

Los gráficos para los umbrales de 5, 15 y 30 días precedentes al evento, sólo se construyeron para las estaciones 21205890 (GUANATA) y 21205910 (LA COSECHA), como se definió con anterioridad, abarcando de este modo las áreas de los polígonos de Thiessen de acuerdo con la agrupación definida; debido a que, en las demás estaciones, no se contaban con los datos suficientes de precipitación o en otros casos el número de eventos era insuficiente para el trazo de la envolvente.

Por otra parte, con el fin de estimar la probabilidad de que se supere dicho umbral, se llevó a cabo un conteo del número de veces en que la precipitación diaria P supera de forma sucesiva o continua el umbral P_t a lo largo de todo el registro de lluvias diarias para cada una de las estaciones.

En la **Ilustración 51**, **Ilustración 52** e **Ilustración 53**, se muestra la diferencia entre la lluvia diaria P y el umbral P_t para la estación 21205890 (GUANATA). Por otro lado, en la **Ilustración 54**, **Ilustración 55** e **Ilustración 56**, se encuentran las diferencias entre la lluvia diaria P y el umbral P_t para la estación 21205910 (LA COSECHA). Ambas estaciones muestran valores tanto negativos como positivos, siendo positivos los resultados cuando el umbral es excedido y con un umbral de lluvia antecedente de 5, 10 y 15 días.

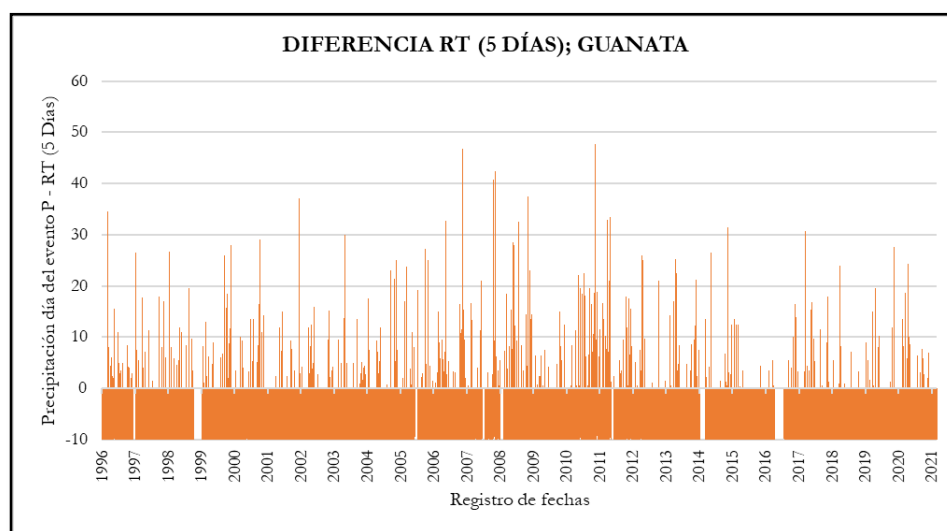


Ilustración 51. Días de precipitación que superan el umbral o P_t , para los 5 días anteriores al evento, estación 21205890 (GUANATA).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

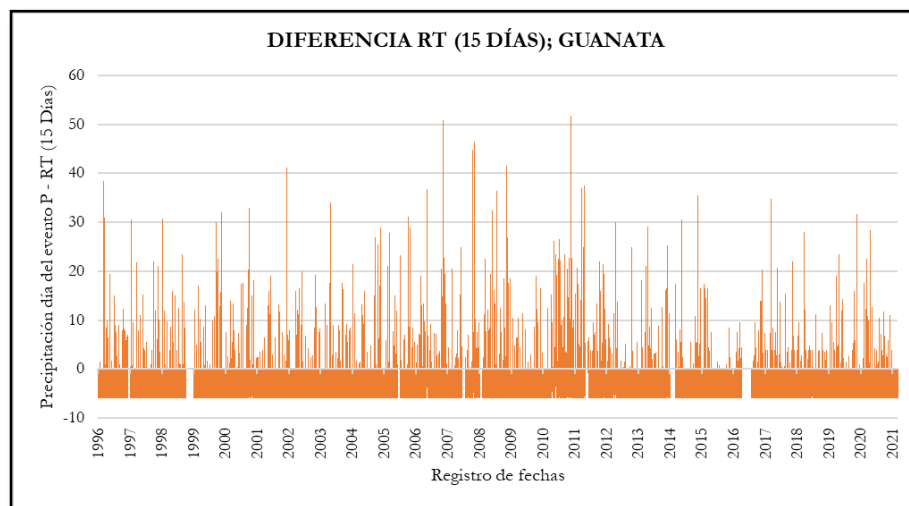


Ilustración 52. Días de precipitación que superan el umbral o P_t , para los 15 días anteriores al evento, estación 21205890 (GUANATA).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

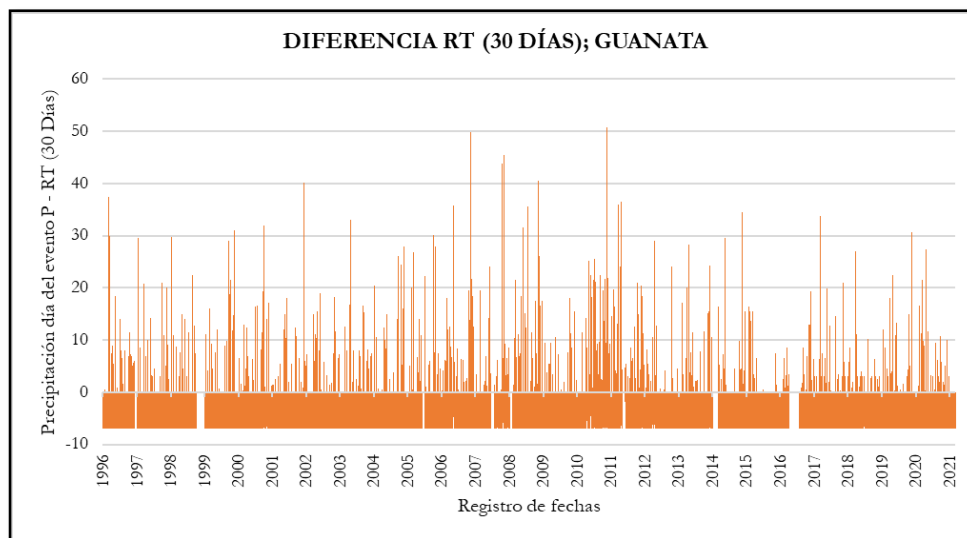


Ilustración 53. Días de precipitación que superan el umbral o P_t , para los 30 días anteriores al evento, estación 21205890 (GUANATA).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

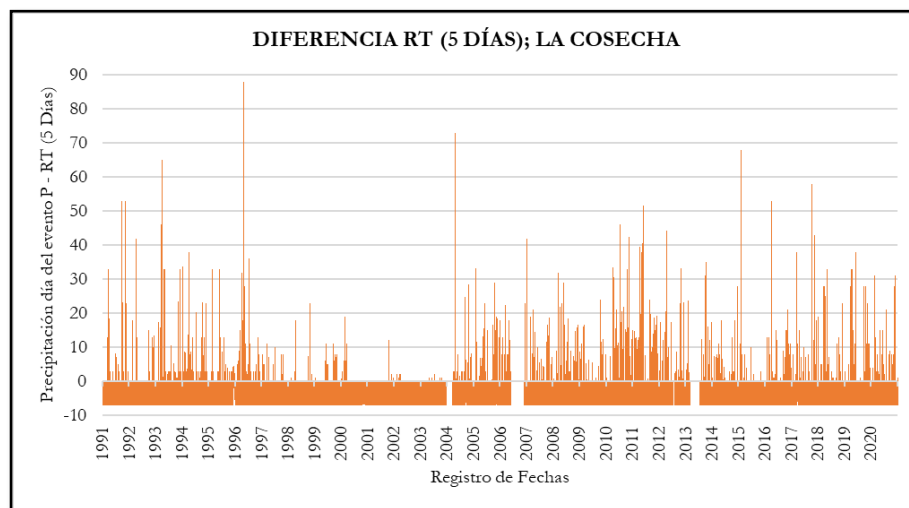


Ilustración 54. Días de precipitación que superan el umbral o P_t para los 5 días anteriores al evento, estación 21205910 (LA COSECHA).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

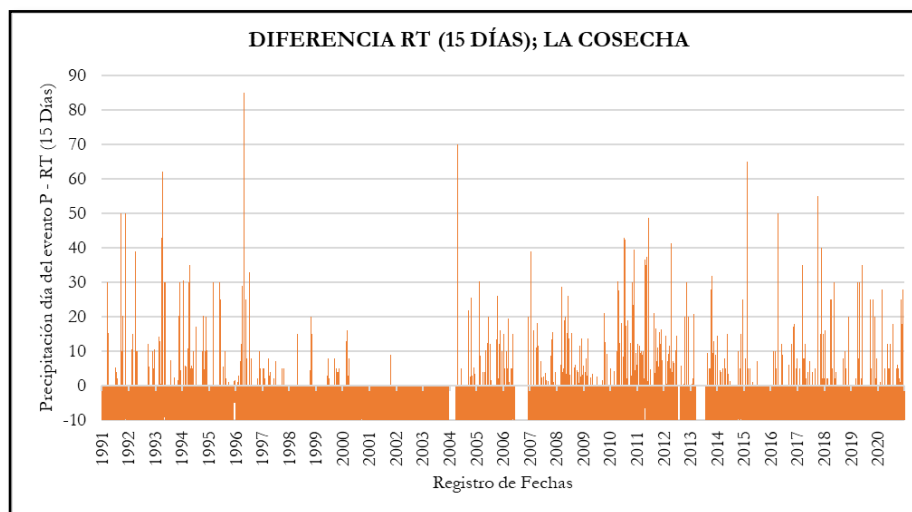


Ilustración 55. Días de precipitación que superan el umbral o P_t para los 15 días anteriores al evento, estación 21205910 (LA COSECHA).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

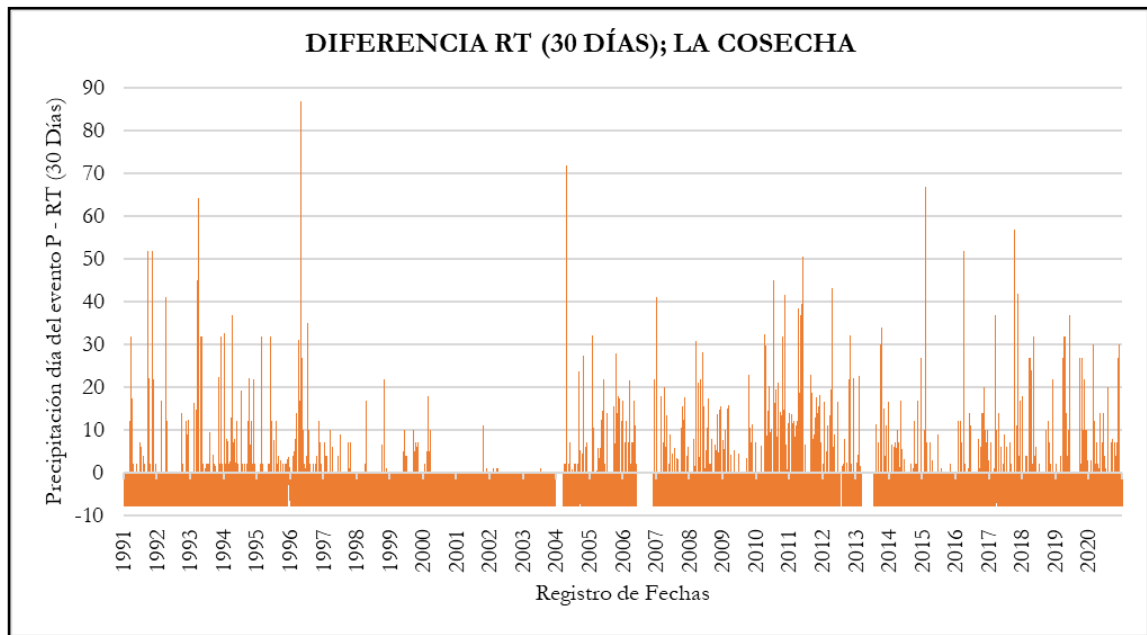


Ilustración 56. Días de precipitación que superan el umbral o P_t , para los 30 días anteriores al evento, estación 21205910 (LA COSECHA).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

Luego se calcula la probabilidad de que se supere dicho umbral para un año, considerando una distribución tipo Poisson a partir de la siguiente ecuación (Jaiswal y Van Westen, 2009):

$$P[P > P_t] = 1 - e^{(-t\mu)}$$

Donde

- t : es el tiempo para el cual se está estimando la probabilidad y que para el presente estudio será un año.
- μ : intervalo de recurrencia medio del evento.

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C & C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

Posteriormente, se busca conocer la probabilidad de que se detone un deslizamiento dado que se supere el umbral P_t ; por lo que se calcula la probabilidad condicional, considerando el número de eventos que se encuentran por encima del umbral presentes en la gráfica de dispersión, dividido en el número de ciclos sucesivos donde la precipitación P fue mayor al umbral P_t (Jaiswal y Van Westen, 2009).

La probabilidad temporal de que ocurra un movimiento en masa cuando la precipitación supere un umbral P_t , corresponde a la adición de las probabilidades para cada uno de los períodos de lluvia antecedente (5, 15 y 30 días) considerando que son eventos mutuamente excluyentes debido a que no pueden ocurrir simultáneamente.

En la **Tabla 17** y **Tabla 18**, se muestra el cálculo de la probabilidad temporal para los 5, 15 y 30 días precedentes al evento, correspondientes a la estación 21205890 (GUANATA) y la estación 21205910 (LA COSECHA) respectivamente; para efectos del cálculo de la amenaza, se suman los valores de las tres probabilidades (5, 15 y 30 días anteriores al evento), obteniéndose los valores con los cuales se calificaron cada uno de los polígonos de Thiessen Finales.

Tabla 17. Probabilidades para los 5,15 y 30 días anteriores al evento, Estación 21205890 (GUANATA).

P _{ant}	Estación	Ecuación Recta	No. Esperado de deslizamientos	No. Veces en que se excede umbral	P[p>pt]	Frecuencia de Deslizamientos	p[L[P>Pt]]	P. temporal P[P>Pt]Xp[L p>pt]
P _{ant5}	GUANATA	P = -0,026P _{ant5} + 10	>1	460	1	15	3,26%	3,26%
P _{ant15}		P = -0,1P _{ant15} + 6	>1	771	1	15	1,95%	1,95%
P _{ant30}		P = -0,086P _{ant30} + 7	>1	671	1	14	2,09%	2,09%
PROBABILIDAD TEMPORAL TOTAL								7,29%

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

Tabla 18. Probabilidades para los 5,15 y 30 días anteriores al evento, Estación 21205910 (LA COSECHA).

P _{ant}	Estación	Ecuación Recta	No. Esperado de deslizamientos	No. Veces en que se excede umbral	P[p>pt]	Frecuencia de Deslizamientos	P[L[P>Pt]]	P. temporal P[P>Pt]Xp[L p>pt]
P _{ant5}	LA COSECHA	P = -0,333P _{ant5} + 7	>1	753	1	9	1,20%	1,20%
P _{ant15}		P = -0,2P _{ant15} + 10	>1	488	1	9	1,84%	1,84%
P _{ant30}		P = -0,0778P _{ant30} + 8	>1	678	1	9	1,33%	1,33%
PROBABILIDAD TEMPORAL TOTAL								4,37%

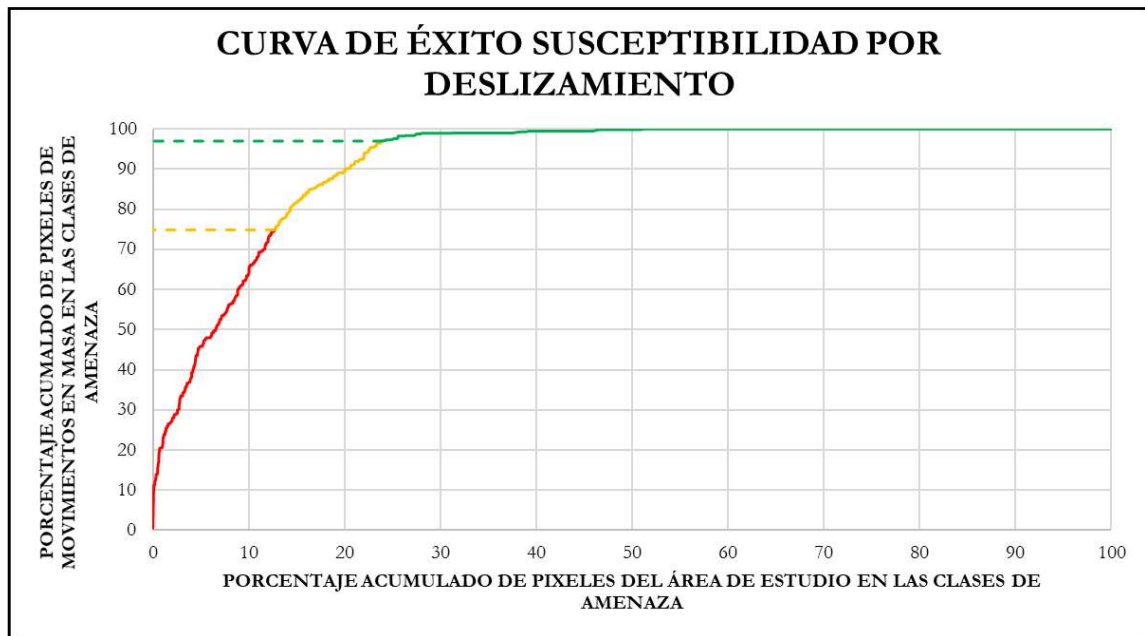
Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

Para el municipio de Cajicá, debido a que sólo fue posible calcular las probabilidades para las estaciones 21205890 (GUANATA) y 21205910 (LA COSECHA); los polígonos de Thiessen de las demás estaciones, se les asignará el valor de la probabilidad temporal de acuerdo con la agrupación establecida previamente.

2.1.5.3. Zonificación de la amenaza por movimientos en masa

Con el fin de generar las tres categorías de amenaza para el área rural del municipio, se construyó la curva de éxito para la estimación de movimientos en masa tipo deslizamiento. Esto se realizó a partir del inventario total, del cual se extrajo una muestra aleatoria correspondiente al 70%, con la cual se estimó el grado de correlación entre las áreas de los eventos y los valores de amenaza de la función; con esto se hizo una clasificación siguiendo los mismos criterios empleados para la susceptibilidad descritos en el apartado 2.1.4.1.5., y se obtuvo el **Gráfico 6**.

Gráfico 6. Curva de éxito y categorías de amenaza total para el área rural del municipio de Cajicá.



Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

Amenaza alta: La categoría de amenaza alta está localizada en los límites norte y límites oeste del municipio, ocupando un 13,16 % del área total, sobre materiales superficiales constituidos por rocas duras de la formación Arenisca Dura, roca blanda de la formación Conejo, roca intermedia de la formación Plaeners y formación Labor Tierna, y suelo transportado coluvial, unidades que tienen asociados gran cantidad de deslizamiento, coberturas de vegetación secundaria o en transición, herbazales, bosque abierto, plantación forestal, pastos y espacios naturales, y curvaturas de plano predominantemente convexas. Además, en el terreno predominan pendientes mayores a 25°.

Los valores esperados de aceleración pico del terreno (PGA) están en el rango entre 0 - 50 cm/s² (PR 475 AÑOS); en laderas con elevaciones usualmente mayores de los 2600 m.s.n.m, orientadas preferencialmente al este, suroeste y noroeste. La probabilidad de que se detone un deslizamiento en el transcurso de un año debido a que una precipitación en 24 horas supere un rango de 7 a 10 mm para una lluvia antecedente de 5, 15 o 30 días, es de 4,37% para la estación La Cosecha.

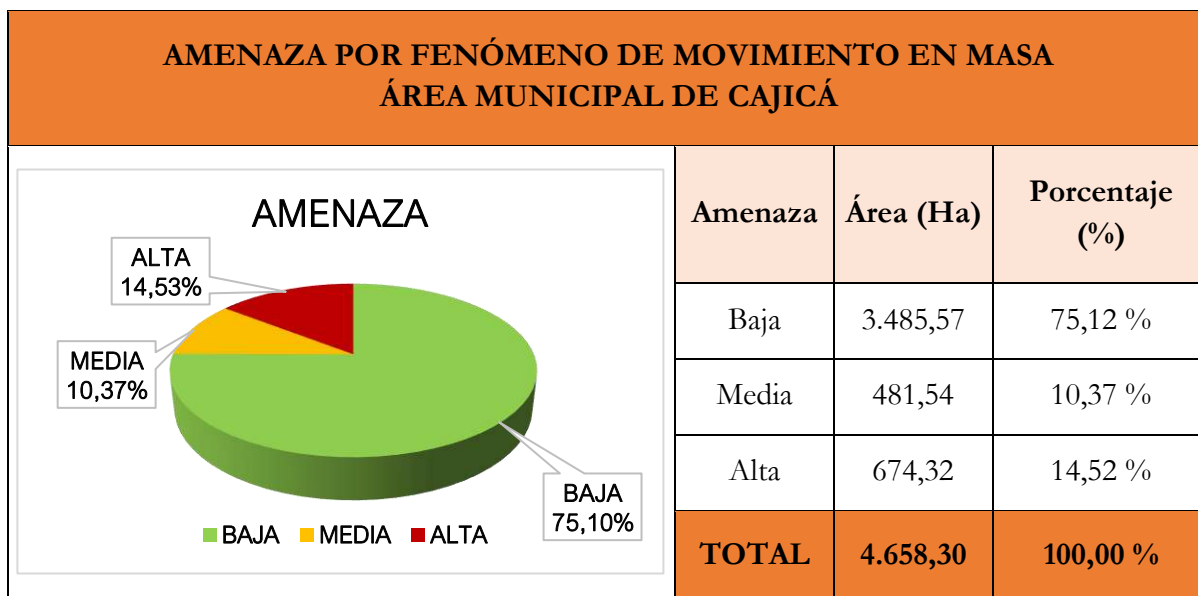
 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C&C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

Amenaza media: Esta categoría de amenaza ocupa el 9,39 % del área de estudio, ocupando el sector norte y central del municipio, en estas zonas se presentan materiales superficiales constituidos por suelos residuales de las diferentes rocas y formaciones adyacentes (Formación Arenisca Dura, Plaeners, Conejo y Labor Tierna); algunas zonas presentan directamente parte de las rocas y formaciones nombradas, además de relacionar también los suelos transportados aluvial, coluvial y lacustre, conformando pendientes moderadamente abruptas entre 10° y 25°, curvaturas de plano cóncavas y convexas (también levemente curvaturas lineales), con coberturas de bosque denso, pastos limpios y vegetación secundaria o en transición. Los valores esperados de aceleración pico del terreno (PGA) están en el rango de 0 - 50 cm/s² (PR 475 años), en laderas con elevaciones entre los 2536 m.s.n.m.

Amenaza baja: Está categoría corresponde con el 77,45 % del área total, ocupando el centro y los extremos sur y este del municipio, en donde se presentan materiales superficiales constituidos por suelos transportados lacustres, suelos transportados aluviales (Formación Sabana), suelo transportado fluvio-torrencial, y rocas intermedias pertenecientes a la formación Labor Tierna levemente, con coberturas de cultivos transitorios, herbazales, mosaico de pastos y cultivos, pastos limpios y tejido urbano continuo, dispuestas en laderas con pendientes menores a 10° orientadas preferencialmente de forma sur, este y sureste, con elevaciones de 2536 a 2600 m.s.n.m en todo el sector; y valores esperados de aceleración pico del terreno (PGA) están en el rango entre 0 - 50 cm/s² (PR 475 AÑOS). Esta categoría no reúne las condiciones necesarias para que se logre detonar un movimiento en masa debido a la concurrencia de una baja probabilidad espacial (susceptibilidad) y temporal (detonante lluvia).

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2022).

Gráfico 7. Estadísticas de áreas y porcentajes de ocupación, amenaza por movimientos en masa en el área rural del municipio de Cajicá.



Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2022).

2.1.6. VALIDACIÓN

Con el fin de validar y verificar el producto final del presente estudio, se lleva a cabo la construcción de una curva de éxito en términos del área total del municipio y el área total de los movimientos en masa considerados (deslizamientos), la cual mide la bondad de ajuste de la función de amenaza obtenida con los eventos del inventario geomorfológico para deslizamientos.

Para el municipio de Cajicá, se construyeron curvas de éxito para estimación y predicción de la amenaza y susceptibilidad calculada, considerándose en el caso de la primera, una muestra de entrenamiento correspondiente al 70% del inventario geomorfológico de eventos para deslizamientos, el 30% de eventos restantes, fue empleado para evaluar el grado de predicción del modelo. Para el presente estudio, se considerará un porcentaje aceptable de ajuste, valores de AUC mayores o iguales al 70% en la curva de éxito en concordancia con el Servicio Geológico Colombiano (2017).

Para evaluar el grado de ajuste entre la función de susceptibilidad estimación generada para deslizamientos, se construyeron curvas de éxito (**Gráfico 8**). Encontrándose que el grado de estimación para deslizamientos alcanzó el 90,61%, por lo que se deduce que el grado de correlación es excelente en eventos de tipo deslizamiento.

Gráfico 8. Área bajo la curva estimación - susceptibilidad deslizamientos.



Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

En el caso de los de las curvas de éxitos para predicción generadas en función de la susceptibilidad para deslizamientos y flujos se encontró que el grado de predicción para deslizamientos alcanzó un 95,26%, lo cual indica un excelente grado de ajuste. (**Gráfico 9**).

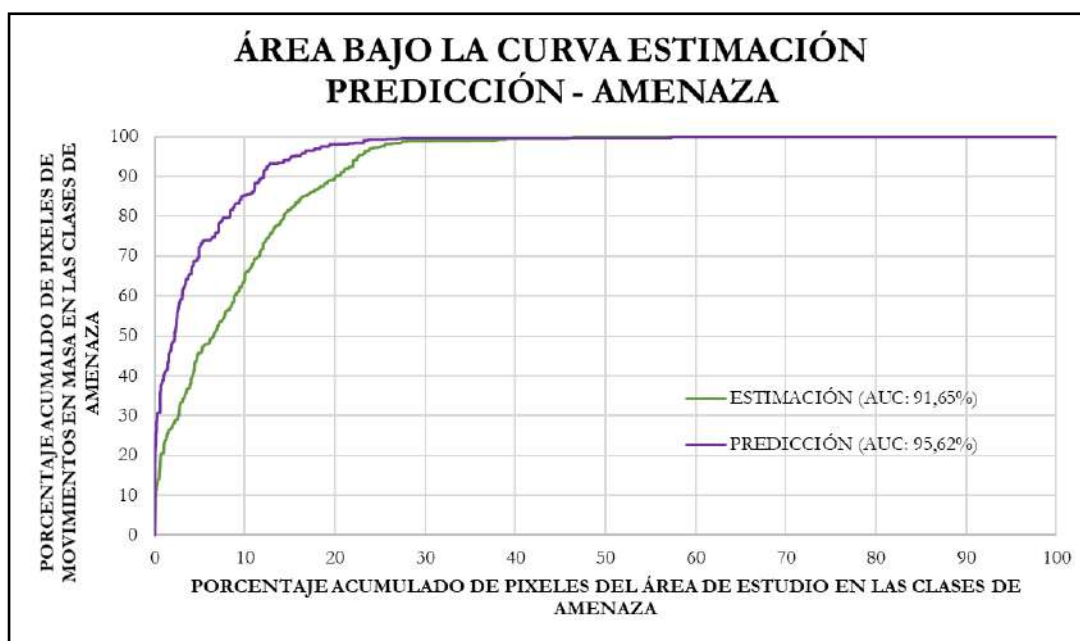
Gráfico 9. Área bajo la curva predicción - susceptibilidad deslizamientos.



Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

Para la amenaza por movimientos en masa, el AUC de estimación para el municipio de Cajicá fue del 91,65%, lo que sugiere que el modelo de amenaza generado presenta una estimación muy razonable y que por ende será considerado como válido. En cuanto a la curva de éxito para predicción de movimientos en masa, se obtuvo un AUC de 95,62%, lo que indica que la estimación del modelo generado para futuros eventos es muy razonable (**Gráfico 10**).

Gráfico 10. Área bajo la curva estimación y predicción – amenaza por movimientos en masa (deslizamientos).

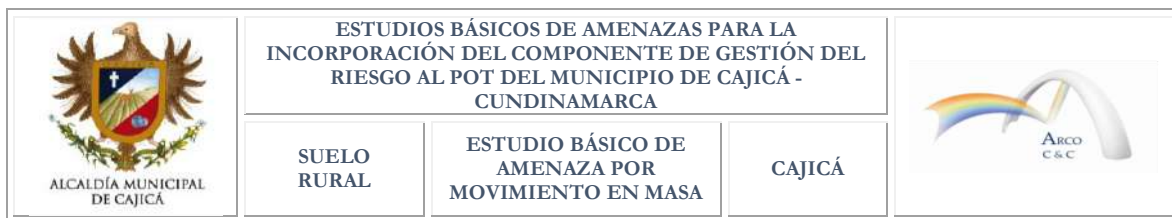


Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

2.1.7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LA ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA PROPUESTA Y LOS RESULTADOS DE LOS POMCA'S DE LAS CUENCA DEL RÍO BOGOTÁ

A continuación, se realiza un comparativo entre el presente estudio y la actualización del plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del Río Bogotá – Resolución 0957 del 02 de abril del 2019, contemplando la metodología y resultados de la zonificación para movimientos en masa.

Ambos estudios se establecen a una escala 1:25.000, sin embargo, el POMCA abarca 27 municipios que hacen parte del área de la cuenca hidrográfica del Río Bogotá, específicamente para el municipio de Cajicá, el POMCA abarca la totalidad de la municipalidad, por lo cual la comparación de los

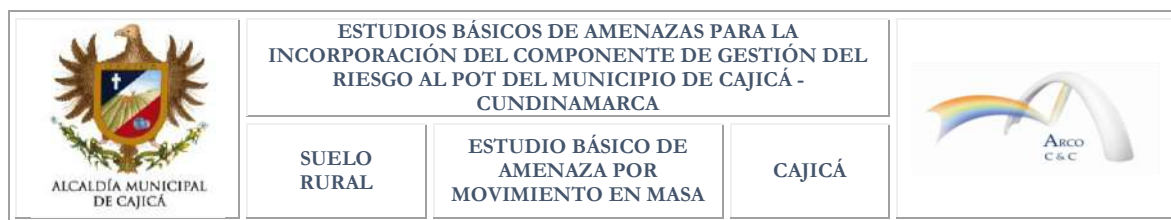


resultados de amenaza por movimientos en masa estará enfocada en general y en el sector del Río Bogotá Tibitoc-Soacha de la cuenca (subcuenca localizada en el municipio de Cajicá).

- **Metodología**

En el POMCA del Río Bogotá, para la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, tuvieron en cuenta el procedimiento sugerido en *La Guía Técnica para la Formulación de los POMCAS; Anexo B de Gestión del Riesgo* y *El Protocolo para la incorporación de la Gestión del Riesgo en los planes de Ordenamiento y Manejo de Cuenas Hidrográficas*, el cual emplea el método estadístico multivariado para la evaluación de variables estipuladas en los diversos escenarios de amenaza, esto se realiza teniendo como objetivo el cálculo de la susceptibilidad por movimiento en masa. Anexo a esto, se implementa el manejo de factores detonantes como lo son la precipitación y sismos con un factor de seguridad para el cálculo de amenaza por movimiento en masa en la zona de estudio. Las variables que son sometidas al método estadístico multivariado para hallar la susceptibilidad son las siguientes:

- Variables Primarias:
 - Localización de movimientos en masa históricos
 - Cobertura y Uso de Suelo
 - Geología
 - Densidad de Fracturamiento
- Variables Secundarias:
 - Geometría y disposición de la superficie del terreno
 - Cota sobre el nivel del mar del punto
 - Pendiente
 - La Orientación de la pendiente
 - La insolación
 - La rugosidad
 - La curvatura
 - La concavidad longitudinal
 - La concavidad transversal
 - Características Morfométricas de la cuenca
 - Longitud de la cuenca
 - Área de la cuenca



- Densidad de drenajes

- Distancia de los deslizamientos a los cauces o vías

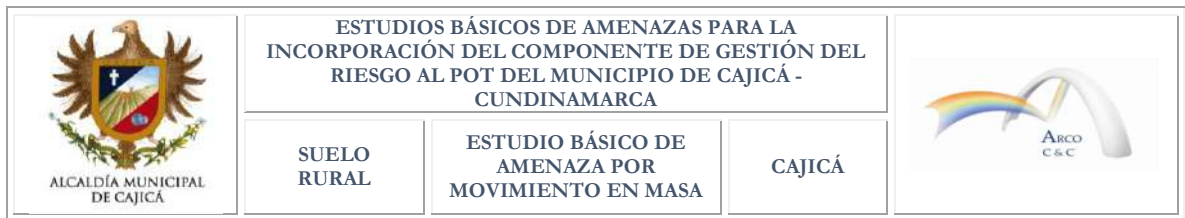
Adicionalmente, se considera el inventario de movimientos en masa, el cual se subdivide en dos partes, el inventario de eventos histórico y el inventario de eventos activos, obtenidos a partir de la revisión de fuentes secundarias (DESINVENTAR, CAR, SIMMA, UNGRD, entre otras). Este inventario contiene el registro de eventos histórico y el registro de eventos activos (definido por geomorfología y control en campo), describe su ubicación por asociación a proximidad de puntos o zonas de referencia como vías, ríos, veredas, entre otros, para los procesos de validación y evaluación del modelo. Igualmente se cuenta con unos factores condicionantes, tales como el Modelo Digital del Terreno, las características geométricas de la ladera (derivadas del DEM), variables categóricas (unidades geológicas, subunidades geomorfológicas y tipo de cobertura) y variables con relación de proximidad, en la cual se calcula la distancia a drenajes, vías, fallamiento local, fallas y lineamientos y canteras. Estos factores, son sometidos a una depuración estadística, asignación de pesos y un álgebra de mapas; resultando en la categorización por susceptibilidad para movimientos en masa.

En cuanto al cálculo de amenaza por movimiento en masa, el POMCA, sintetiza el protocolo teniendo como base tres variables principales que permiten el cálculo, siguiente a estas, se establece la zonificación de amenaza y se valida teniendo en cuenta las áreas dinámicas (por procesos naturales y antrópicos). Finalmente se calcula un valor de incertidumbre del mapa de amenaza por movimiento en masa. Las variables principales para la zonificación por amenaza son las siguientes:

- Parámetros geológicos-geotécnicos:

Es una caracterización profunda de los materiales que se encuentran en la superficie, por medio de la Unidades Geológicas Superficiales (UGS) obtenidas con anterioridad, son evaluadas geológica y geomorfológicamente; esto por medio de control de imágenes remotas y controles de campo. Se realizan muestreo con la finalidad de realizar laboratorios y obtener información específica como:

- Espesor promedio de suelo y depósito para cada UGS
 - Parámetros Geotécnicos
 - Capacidad de carga y descarga de las rocas (Porosidad y Permeabilidad)



- Factores detonantes:

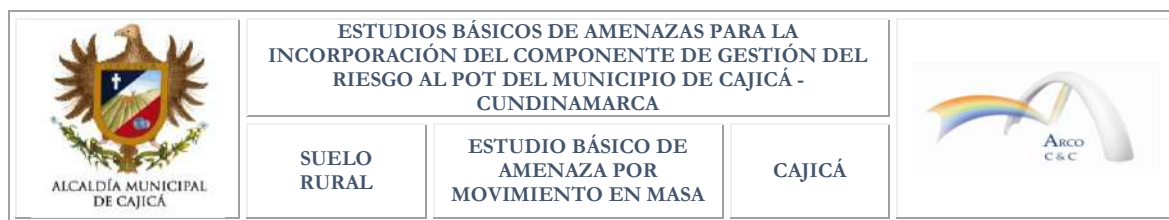
Se determinan los factores detonantes, los cuales, aumentan la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa en la zona de estudio. Partiendo de esto, se establecen dos parámetros los cuales se correlacionan a los eventos de deslizamiento.

- Detonante Lluvias: La correlación buscada relaciona los valores máximos de lluvia registrados en las estaciones hidrometeorológicas de la zona en estudio y los eventos históricos. Anexo a esto, se calcula la infiltración y la posición del nivel freático por medio del modelo de la Guía Metodológica del Servicio Geológico Colombiano-Universidad Nacional, utilizando la información disponible sobre las coberturas y tipos de suelos existentes en la zona.
- Detonante de Aceleración Sísmica: Por medio de información suministrada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la Asociación de Ingeniería Sísmica (AIS), se adquiere la información sobre aceleración sísmica en diferentes zonas. Por medio de la Norma Sismo Resistente, se aplica el factor de ampliación sísmica establecida y se analiza el valor obtenido en las zonas con relación a los eventos históricos recopilados.

- Factor de seguridad en las zonas evaluadas

El estudio del POMCA, de acuerdo con *La Guía Técnica para la Formulación de los POMCAS; Anexo B de Gestión del Riesgo*, utiliza el método de equilibrio límite, aplicando la ecuación de factor de seguridad para el método de bloque deslizante en un talud infinito (Newmark, 1965) y así, determinar cada uno de los escenarios en condiciones saturadas, mojadas, secas con y sin sismo. Finalmente, obtienen 10 escenarios de factor seguridad, y reúnen en un solo escenario las diferentes probabilidades de cada escenario, es decir una probabilidad de falla total.

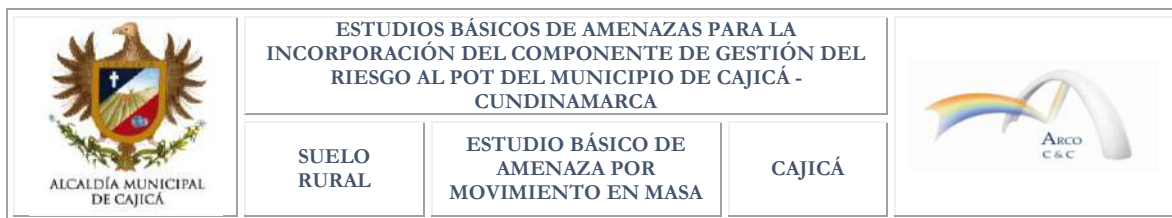
Finalmente, el cálculo de la amenaza se realiza mediante la probabilidad de falla, establecido por *El protocolo de Gestión de Riesgo del POMCA*, por medio del cálculo de medias y desviaciones estándar de los escenarios y factores de seguridad, se obtiene la curva de probabilidad normal, y por medio de esta, se determinan las condiciones de amenaza, las cuales, en el estudio realizado se establecen tres, alta (probabilidad mayor al 75%), media (probabilidad entre el 30% y el 75%) y baja (probabilidad menor al 30%).



Por otro lado, en el presente estudio, realizado por ARCO C&C, la metodología empleada para la zonificación se basa en un modelo de pesos de evidencia, en la cual, la amenaza final calculada, corresponde al producto de la susceptibilidad y la probabilidad temporal de que en el transcurso de un año se supere un umbral de lluvia y que dicha precipitación sea capaz de detonar un movimiento en masa. En primera instancia, se tienen los factores condicionantes, los cuales corresponden con las coberturas, unidades geológicas superficiales (UGS), pendientes, curvatura de la ladera, elevación del terreno y aceleración sísmica a nivel de roca. Estos factores, se les asigna un peso de evidencia, se evalúa el aporte de cada factor o combinación de factores en la ocurrencia de un movimiento en masa, a partir de un inventario geomorfológico de proceso, el cual constituye la variable de agrupamiento. El cálculo de la amenaza se realiza a través del cálculo de probabilidad temporal, mediante umbrales de lluvia por lo que se requiere un catálogo eventos que permita la asociación en la lluvia del evento, y para la lluvia acumulada de los 5, 15 y 30 días antecedentes a la ocurrencia del evento. Finalmente se realiza una validación de calidad a través de una curva de éxito, donde se busca que el área bajo la curva calculada con el 30% del inventario de validación, es decir la muestra del inventario que no fue considerada como variable de agrupamiento, sea igual o mayor al 70% para poder aceptar la validez del modelo de zonificación.

Para la caracterización de la amenaza, ARCO C&C, se considera una probabilidad espacial y una temporal, la primera representada por los valores de probabilidad obtenidos del análisis de susceptibilidad, debido a que cada una de estas áreas tiene la probabilidad de que se genere un movimiento en masa, definida por la combinación de los pesos de cada clase y la relación entre el área total de eventos y el área de estudio y la segunda, consiste en el un registro significativo entre los eventos y el detonante lluvia, permitiendo establecer una adecuada relación lluvia-movimiento en masa, además se considera la aceleración pico del terreno.

De manera general, ambos modelos calculan la amenaza por movimientos en masa usando como base los resultados obtenidos en la susceptibilidad a estos eventos y usando como detonante principal la precipitación, sin embargo, el estudio del POMCA llega a la zonificación final a partir del cálculo del factor de seguridad y en la consultoría ARCO C&C se utiliza el cálculo de probabilidad temporal y espacial. Para el análisis de la susceptibilidad usan factores condicionantes los cuales son sometidos a procesos estadísticos y asignación de pesos de evidencia, los factores condicionantes son esencialmente los mismos sin embargo en el estudio realizado por el POMCA se usan las variables con relación de proximidad que en el presente estudio no se calculan, por otro lado, en el estudio de ARCO C&C se elabora no solo un inventario de eventos de información secundaria y de información de campo, como el que es realizado en el POMCA, si no también se realiza una fotointerpretación detallada.



Cabe señalar que la zonificación producto de este estudio puede llegar a ser más precisa en relación con los resultados del POMCA, toda vez que el nivel de detalle con el cual se generó el inventario de procesos morfodinámicos es lo suficientemente robusto y alcanzó los 169 polígonos, en consecuencia, a pesar de que ambas zonificaciones se requiera el uso de dicho inventario, el número de procesos identificados en el POMCA para el municipio es mucho menor. Por otra parte, la oficina de Gestión del Riesgo, adscrita a Planeación municipal, dispone con un extenso registro de eventos, que representan una base de datos sólida para el proceso de zonificación y que ha sido un insumo fundamental para el cálculo de la amenaza en este estudio a través de la asociación de umbrales de lluvia.

Si bien es cierto que ambas zonificaciones parten de un método estadístico para el cálculo de la susceptibilidad, la mayor divergencia se establece en el cálculo de la amenaza, donde en el POMCA se recurre a métodos de equilibrio limite y condiciones detonantes de lluvia y sismo, no obstante, debido a la considerable variabilidad de los parámetros geomecánicos en los modelos geotécnicos, hay una incertidumbre inherente que no es menor, y ello es reconocido desde la misma literatura. El cálculo de la amenaza que presenta el POMCA, puede ser más adecuado para escalas locales, por ejemplo, unidades de ladera individuales, donde se puede garantizar un control más riguroso sobre los parámetros del modelo.

- **Resultados**

En **Ilustración 58**, se muestran las zonificaciones de amenaza por movimientos en masa para los dos estudios, en la cual se observa, para el municipio de Cajicá, diferencias en la distribución de amenazas, encontrando que para ARCO C&C el porcentaje de zonas con categoría de amenaza alta y media es mayor, relacionada con ángulos de pendientes mayores a 25° en el caso de amenaza alta y 10° en amenaza media, sobre rocas duras, rocas intermedia, rocas blandas y suelos residuales derivados de las mismas, finalmente la amenaza baja se mantiene en zonas de topografía plana a suavemente ondulada y asociada a geoformas fluviales.

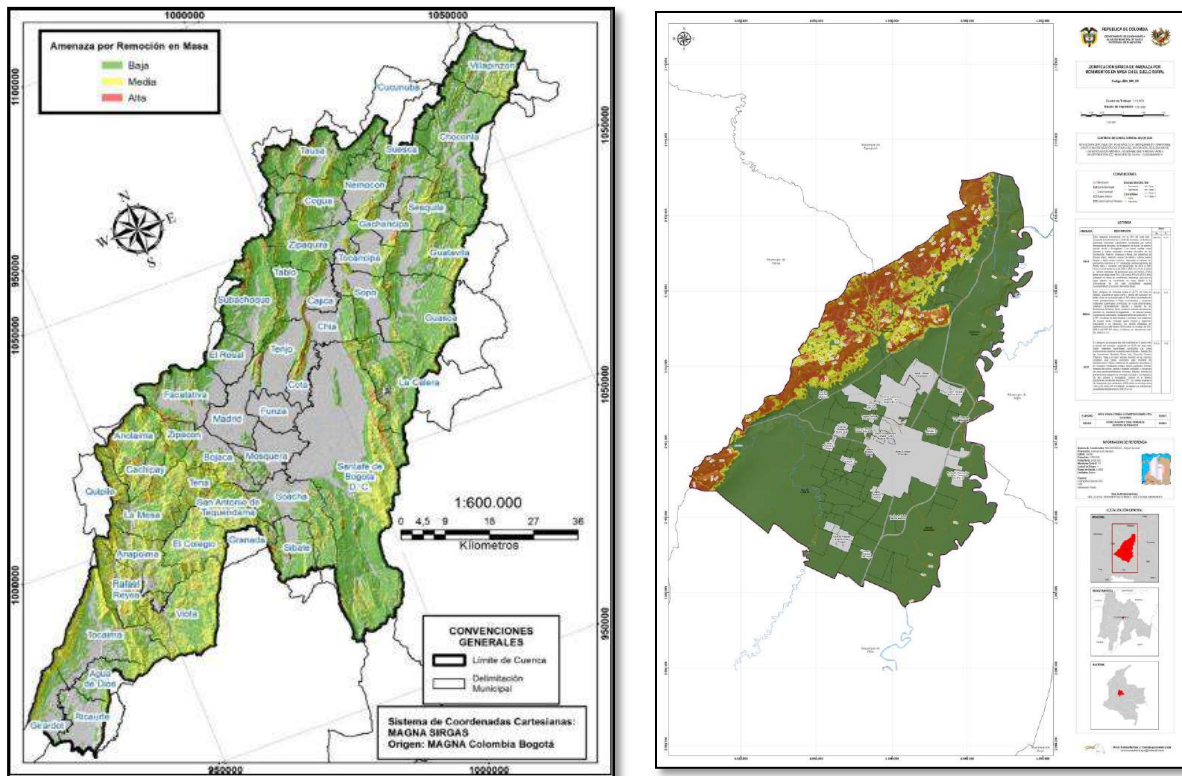


Ilustración 58. Resultados de la zonificación de amenaza por movimientos en masa, por el POMCA; Cuenca Hidrográfica Río Bogotá y Municipio de Cajicá.

Fuente: Corporación Autónoma Regional & Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

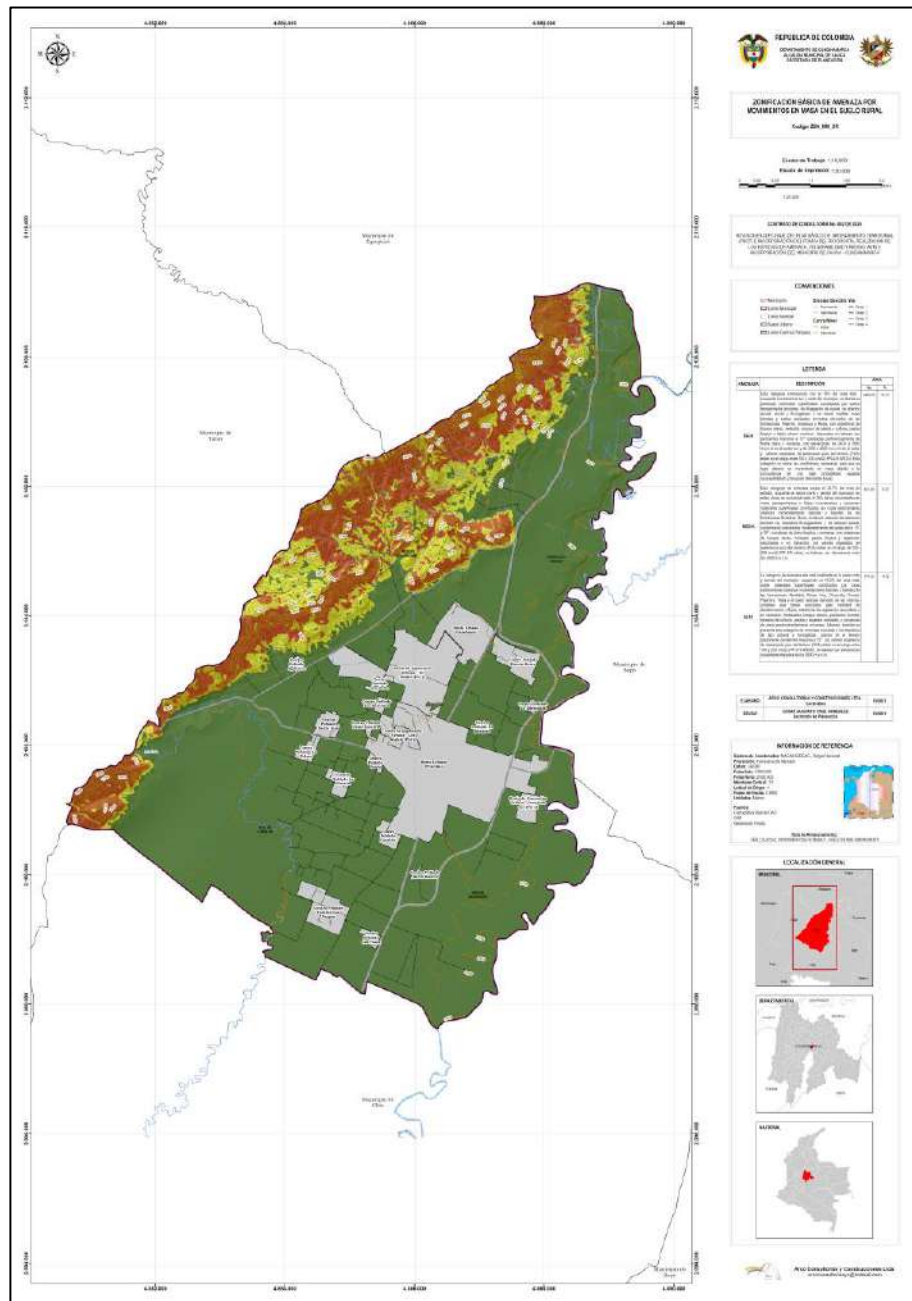
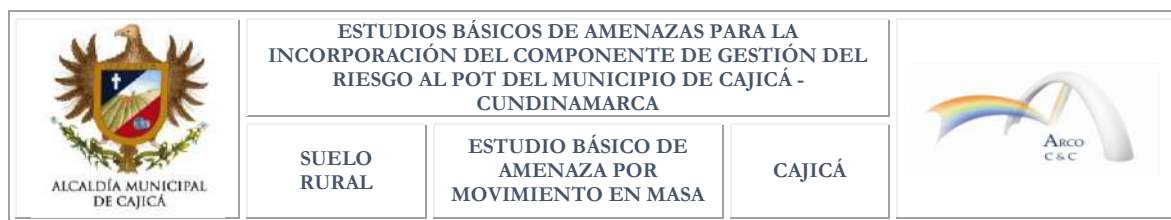


Ilustración 59. Resultados de la zonificación de amenaza por movimientos en masa, por ARCO C&C.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2022).



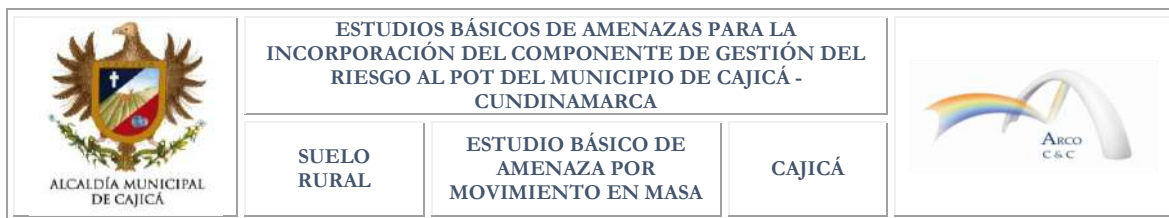
2.1.8. CONCLUSIONES

En el municipio de Cajicá afloran rocas cretácicas, cenozoicas y depósitos del Cuaternario definidas a partir de la memoria explicativa del mapa geológico de las planchas 209 - Zipaquirá y 228 - Bogotá Noreste (Servicio Geológico Colombiano) y del trabajo de campo, las unidades geológicas corresponden principalmente a rocas sedimentarias clásticas, desde areniscas a lodolitas, correspondientes con las formaciones Conejo, Dura, Plaeners, Labor-Tierna, Guaduas, Chía y Sabana. Estructuralmente, se presentan fallas y pliegues con orientación predominante SW-NE.

En el área de estudio se distinguieron las geoformas teniendo en cuenta el origen del terreno, las causas y procesos que dieron forma al paisaje. Así, el ambiente fluvial y lagunar representa el 74,7% presentándose principalmente planicies y deltas lacustres y planos o llanuras de inundación; seguido por las expresiones geomorfológicas de ambiente estructural con 14,2% destacando geoformas asociadas a sierras homoclinales; las geoformas modeladas por la acción combinada de procesos de meteorización enmarcadas dentro del ambiente denudacional ocupan el 9,6%, por último, las geoformas de ambiente antropogénico atañen el 1,5% dentro de las cuales predomina las canteras.

Para el área de estudio se clasificaron los materiales expuestos en superficie, las cuales corresponden a rocas o suelos, siendo predominante las unidades geológicas superficiales representadas por suelos transportados con un 76,6%, seguido por rocas duras con 9,5 %, rocas blandas con 6,6% y rocas intermedias con 5,5% localizadas a lo largo del margen occidental del municipio, por último, se encuentran los suelos residuales con 1,8% del área total.

En el inventario de procesos morfodinámicos en el municipio de Cajicá, se recolectaron una serie de eventos sucesivos a través de los cuales los agentes morfogenéticos, son capaces de modelar las formas de la superficie terrestre, dentro de los cuales se encontraron deslizamientos, erosión, caídas de suelo y avenidas torrenciales; Sin embargo al evaluar el número de eventos reportado en el catálogo, el número es muy reducido (3 deslizamientos y 1 caída de rocas) debido a que la mayor parte de la población del municipio se asienta en una zona plana, mientras que los procesos identificados ocurren hacia la zona montañosa y no habitada del municipio.



Dado que en Cajicá son recurrentes las explotaciones de material de construcción mediante canteras, se ha identificado que en estas son recurrentes los procesos de inestabilidad, por lo cual es necesario que su desarrollo sea de manera técnica para garantizar las condiciones de estabilidad tanto a la explotación como a los predios circundantes.

Los procedimientos metodológicos empleados tienen un alta similitud en cuanto a los diseños de escenarios conformes a los periodos de retorno de precipitación y la inclusión del factor de sismos; sin embargo, a pesar de los fundamentos probabilísticos que trabajan ambos y debido a la disimilitud de las escalas de los objetos de estudio, los datos de las áreas en categoría de amenaza alta y media discrepan, ocupando mayor área en el presente estudio respecto a la zonificación elaborada por el POMCA.

2.1.9. MEDIDAS DE INTERVENCIÓN ORIENTADAS A ESTABLECER RESTRICCIONES CONDICIONAMIENTOS MEDIANTE LA DETERMINACIÓN DE NORMAS URBANÍSTICAS

Las diferentes categorías de amenaza obtenidas en la presente zonificación obedecen a una combinación de variables físicas que denotan la potencial afectación u ocurrencia de un movimiento en masa con base en sus relaciones causales, evaluadas conforme una escala de trabajo y una metodología de carácter probabilístico. Estos eventos como otras amenazas, a pesar de ser eventos naturales pueden ser derivados de procesos de uso y ocupación insostenible del territorio, por ende, es necesario que se establezcan medidas tendientes a su control y planificación.

Considerando lo anterior, y atendiendo los principios de precaución y sostenibilidad ambiental emanados de la Ley 1523 de 2012, se recomienda que las áreas destinadas a la producción de alimentos, donde se den actividades agrícolas o pecuarias y que bajo la presente zonificación coincidan total o parcialmente con áreas categorizadas como de amenaza alta, deberán ser desarrolladas estableciendo políticas públicas e incorporando o propendiendo a prácticas y técnicas tendientes a la reducción y control de los factores condicionantes y detonantes de la inestabilidad del terreno.

A continuación, se establecen otras medidas de manejo especial para las zonas calificadas como de amenaza alta y media en los suelos rurales no suburbanos:

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C & C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

- Usar los suelos de acuerdo con sus condiciones y factores constitutivos de tal forma que se mantenga su integridad física y su capacidad productora, de acuerdo con la clasificación agrológica IGAC y con las recomendaciones señaladas para cada clase del suelo.
- Proteger el terreno mediante técnicas adecuadas de cultivos, manejo de suelos y actividad pecuaria, que eviten la salinización, compactación, erosión, contaminación o revenimiento y, en general, la pérdida o degradación de los suelos.
- Evitar los desarrollos urbanísticos en las áreas declaradas de protección y conservación.
- Para la construcción de edificaciones, infraestructura convencional de apoyo a los procesos productivos o infraestructura de: servicios públicos, equipamientos comunales, educativos y/o recreacionales, se deberán realizar los estudios técnicos detallados, en los cuales se establezcan las propiedades mecánicas e hidrogeológicas particulares del sitio, que permitan determinar con la certeza suficiente el grado de amenaza y las medidas de intervención requeridas tendientes a mitigar el nivel de riesgo esperado. Hasta tanto no se realicen los estudios detallados y las obras de mitigación a que haya lugar, no podrán ser objeto de licenciamiento.
- Se recomienda que los equipamientos que se encuentren en zonas con condición de riesgo sean objeto de elaboración de estudios de detalle, con fin el estimar con mayor certeza el nivel de riesgo en estas áreas, tendientes a plantear medidas estructurales que disminuyan el nivel de riesgo o amenaza.
- Las zonas en las que se ejecuten proyectos de vivienda, localizadas en las laderas del suelo rural deberán adelantar una investigación del subsuelo detallada, para proyectar los diseños de cimentación y estructuras, teniendo en cuenta la variabilidad espacial tanto vertical como lateral de las propiedades mecánicas, las condiciones hidrológicas del suelo y la génesis de los diferentes materiales, que ante la imposición o reducción de las cargas por la construcción misma o por el flujo de agua asociado a obras de drenaje inadecuado o las aguas de infiltración, pueden someter el suelo a una trayectoria de esfuerzos que eventualmente llevarían el material a la falla.
- En uso agropecuario se deben implementar prácticas de agricultura orgánica, rotación de praderas y manejo de las aguas de escorrentía, encaminadas a prevenir la erosión del suelo.

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C&C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

- En los terrenos con pendientes mayores a 45° (100%) se recomienda la preservación y protección de la cobertura boscosa nativa con el fin de aportar soporte radicular a los materiales superficiales de las laderas y favorecer las condiciones de estabilidad.
- Con el fin de controlar los procesos de erosión superficial y la eventual movilización de los materiales térreos en los taludes viales o cortes de ladera, se recomienda el establecimiento de coberturas vegetales como medida de control. Así mismo, en la parte alta, media y baja de las cuencas se debe proteger y preservar los corredores de vegetación nativa que se encuentran en las riberas de los cauces, como también los canales hídricos que recorran predios privados.
- Las zonas rurales con condición de amenaza tienen restricciones de usos, densidades, ocupación y edificabilidad y podrán desarrollarse bajo el régimen de usos y normas urbanísticas establecidas en el municipio, sólo si demuestren que el riesgo asociado al fenómeno amenazante es mitigable, a partir de los resultados de los estudios de detalle, que determinen la reducción del riesgo para los futuros desarrollos urbanísticos.
- La intervención de terrenos con pendientes entre 25° y 45°, deberán realizar los estudios técnicos detallados que garanticen el adecuado manejo de las pendientes, estableciendo las medidas de mitigación en cuanto a estabilización de taludes y manejo de drenajes que en épocas de intensas precipitaciones pueden llegar a afectar dichas laderas generando inestabilidades en el terreno.
- Los desarrollos de edificaciones en áreas en condición de amenaza deberán cumplir con lo establecido en el código de sismo-resistencia o la norma que lo modifique, adicione y/o sustituya acorde con el tipo de edificación y el grado de amenaza sísmica definido para el municipio.
- Evitar los desarrollos urbanísticos e intervenciones en el terreno destinadas a las actividades agropecuarias o agrícolas sobre las áreas con pendientes superiores a 45°.
- En las zonas con procesos de inestabilidad activos o latentes, cuya magnitud y zona de afectación pueda involucrar directa o indirectamente viviendas, infraestructura vial, líneas vitales o cursos de agua, es necesario adelantar un monitoreo periódico y/o los estudios técnicos específicos con la intención de prevenir eventuales afectaciones.

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA		 ARCO C&C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	

- En la parte alta de las cuencas categorizadas con amenaza alta, es recomendable adelantar inspecciones técnicas que permitan monitorear la estabilidad de estas áreas con el fin de implementar y articular un Sistema de Alerta Temprana SAT.
- Toda actividad productiva en suelo rural que requiera infraestructura productiva tales como galpones o invernaderos, bien sea provisionales o permanentes, deben de hacer manejo adecuado y tecnificado de las aguas, y adelantar las medidas preventivas encaminadas al uso sostenible y ambientalmente responsable del territorio, en procura de evitar la materialización de escenarios de riesgo asociados a estas actividades productivas.

2.1.10. DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y CONDICIÓN DE RIESGO

2.1.10.1. Delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza

Conforme a lo señalado en el Decreto 1807 de 2014 (compilado en el Decreto 1077 de 2015), las áreas con condición de amenaza se definen bajo los siguientes lineamientos:

*“**Áreas con condición de amenaza**, son las zonas o áreas del territorio municipal zonificadas como de amenaza alta y media en las que se establezca en la revisión o expedición de un nuevo POT, la necesidad de clasificarlas como suelo urbano, de expansión urbana, rural suburbano o centros poblados rurales para permitir su desarrollo.” (Decreto 1077 de 2015, art 2.2.2.1.3.1.3, Parágrafo 1).*

“Con fundamento en la delimitación y zonificación de amenazas, se delimitan y zonifican aquellas áreas sin ocupar del suelo urbano, de expansión urbana, rural suburbano o centros poblados rurales en las que en la revisión o en la expedición de un nuevo POT se proponga su desarrollo.”

La identificación de estas áreas se realizará a partir del análisis de las áreas zonificadas como de amenaza alta y media, sin ocupar en los estudios básicos con aquellas que se consideren como objeto de desarrollo. En todo caso, el desarrollo de las zonas de amenaza media y alta sin ocupar quedará sujeto a los resultados de los estudios detallados.

Con esta información se elabora el mapa con la delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza y se establecen los criterios para la caracterización y delimitación de las unidades de análisis en las áreas que serán objeto de estudios detallados.” (Decreto 1077 de 2015, art 2.2.2.1.3.2.1.4).

El proceso metodológico empleado para la delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza es:

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C&C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

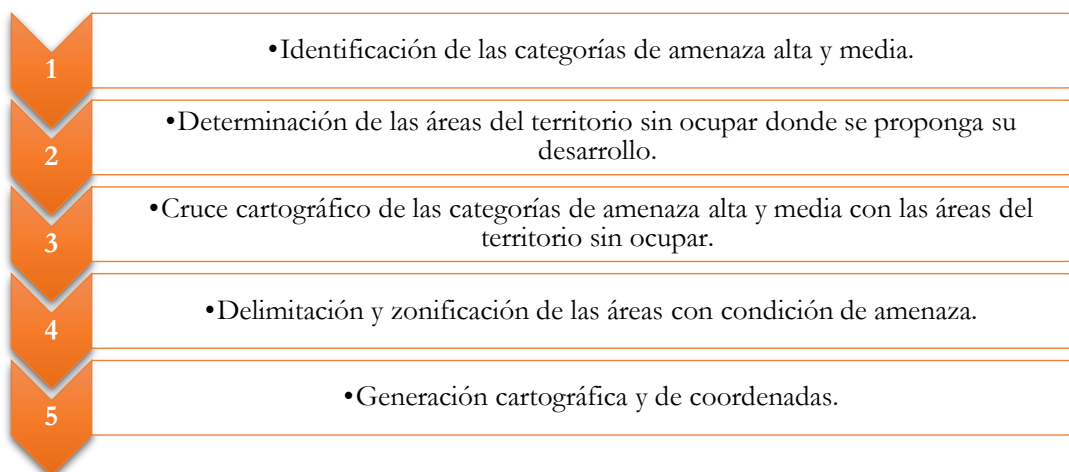


Ilustración 60. Proceso metodológico empleado para la delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

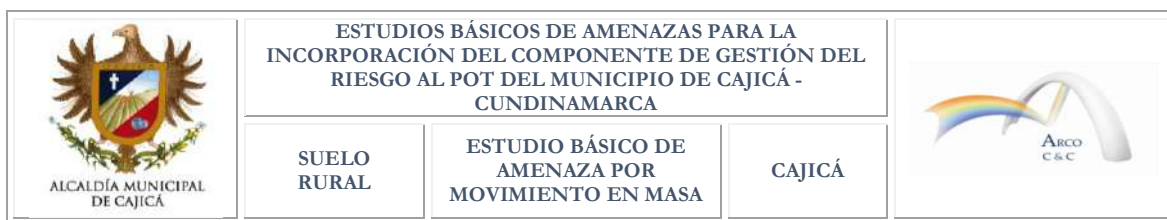
 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
SUELO RURAL		ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

1. Se identifican las categorías de amenaza MEDIA y ALTA resultado de la ZONIFICACIÓN BÁSICA DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA.
2. Se determinan las áreas del territorio sin ocupar del suelo urbano, de expansión urbana, rural suburbano o centros poblados rurales en los que se proponga su nuevo desarrollo; en el caso del suelo rural obedecen a aquellas áreas del territorio propuestas en el ordenamiento como suelo rural suburbano *“con la definición de la unidad mínima de actuación y el señalamiento de los índices máximos de ocupación y construcción, los tratamientos y usos principales, compatibles, condicionados y prohibidos.”* (Decreto 1077 de 2015, art. 2.2.2.2.1.4).
3. Se realiza el cruce cartográfico mediante el uso de sistemas de información geográfica, teniendo en cuenta las categorías de amenaza alta y media junto con las áreas del territorio sin ocupar identificadas en el paso anterior.
4. Se delimitan y zonifican las áreas con condición de amenaza, denominando los diferentes polígonos producto del cruce cartográfico con un código único (ID_POL); así mismo, se delimitan mediante vértices con coordenadas y se identifican con un código único (ID_COORD); esta información cartográfica se encuentra en formato feature class de ESRI en la geodatabase de movimientos en masa (MM_SR.gdb) y listado de coordenadas por polígono en formato Excel.
5. Se representan cartográficamente los polígonos producto del paso anterior, en primera instancia mediante un plano general donde se identifiquen todos los polígonos de las áreas con condición de amenaza **“Plano DYZ_CA_MM_SR” (Ilustración 61)**. Adicionalmente, se generan los planos específicos para todos los polígonos donde se incorporan las coordenadas de cada vértice **“DYZ_CA_MM_SR”**.

“Con esta información se elabora el mapa con la delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza y se establecen los criterios para la caracterización y delimitación de las unidades de análisis en las áreas que sean objeto de estudios detallados.” (Decreto 1077 de 2015, art 2.2.2.1.3.2.1.4).



Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2022).



En cuanto al resumen del total de polígonos y sus áreas:

Tabla 19. Resumen de las áreas con condición de amenaza por movimientos en masa en el suelo rural del municipio de Cajicá, Cundinamarca.

No. total de polígonos	Área del territorio (ha)	Porcentaje del área total (%)
7	20,51	0,442%

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2022).

Los 7 polígonos de áreas con condición de amenaza por movimientos en masa representan 20,51 hectáreas, lo cual corresponde a un 0,442% del área total del suelo rural; éstos serán las áreas objeto de estudios detallados que permitan categorizar el riesgo (Artículo 2.2.2.1.3.2.1.5 del Decreto 1077 de 2017).

2.1.10.2. Delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo

Conforme a lo señalado en el Decreto 1807 de 2014 (compilado en el Decreto 1077 de 2015), las áreas con condición de riesgo se definen bajo los siguientes lineamientos:

“Áreas con condición de riesgo, corresponden a las zonas o áreas del territorio municipal clasificadas como de amenaza alta que estén urbanizadas, ocupadas o edificadas, así como en las que se encuentren elementos del sistema vial, equipamientos (salud, educación, otros) e infraestructura de servicios públicos.” (Decreto 1077 de 2015, art 2.2.2.1.3.1.3, Parágrafo 1).

“Con fundamento en la delimitación y zonificación de amenazas, se delimitan y zonifican las áreas con condición de riesgo, a fin de priorizar las áreas en las cuales se deben realizar estudios detallados.

La identificación de las áreas con condición de riesgo se realizará a partir del análisis de las áreas zonificadas como de amenaza alta en los estudios básicos, con la información cartográfica (predial o catastral, entre otras) disponible que permita identificar la existencia de elementos expuestos, de áreas urbanizadas, ocupadas o edificadas, así como de aquellas en las que se encuentren edificaciones indispensables y líneas vitales.” (Decreto 1077 de 2015, art 2.2.2.1.3.2.1.5).

El proceso metodológico empleado para la delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo es:

 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C & C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA	CAJICÁ	

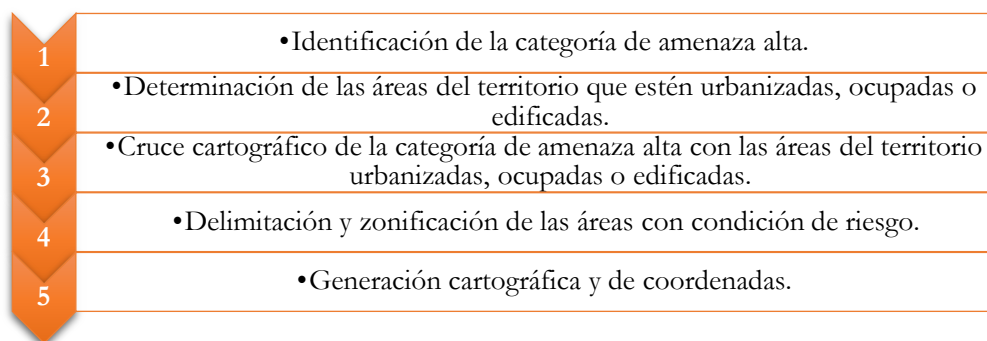
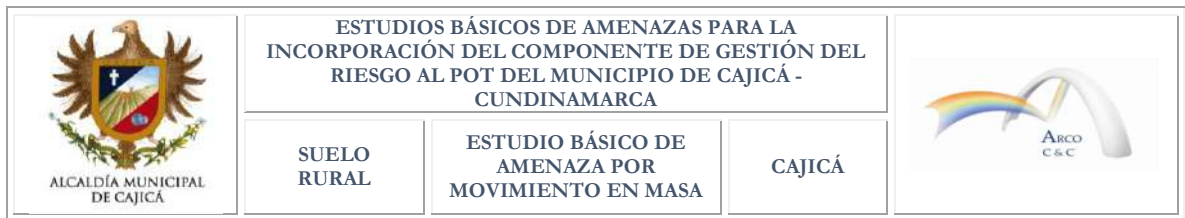


Ilustración 62. Proceso metodológico empleado para la delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

1. Se identifican la categoría de amenaza ALTA resultado de la ZONIFICACIÓN BÁSICA DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA.
2. Se determinan las áreas del territorio que estén urbanizadas, ocupadas o edificadas, en el caso del suelo rural obedecen a aquellas áreas del territorio que en el ordenamiento territorial estén clasificadas como elementos del sistema vial, equipamientos e infraestructura de servicios públicos (*Decreto 1077 de 2015, art 2.2.2.1.3.1.3, Parágrafo 1*).
3. Se realiza el cruce cartográfico mediante el uso de sistemas de información geográfica, teniendo en cuenta la categoría de amenaza alta junto con las áreas del territorio urbanizadas, ocupadas o edificadas identificadas en el paso anterior.
4. Se delimitan y zonifican las áreas con condición de riesgo, denominando los diferentes polígonos producto del cruce cartográfico con un código único (ID_POL); así mismo, se delimitan mediante vértices con coordenadas y se identifican con un código único (ID_COORD); esta información cartográfica se encuentra en formato feature class de ESRI en la geodatabase de movimientos en masa (MM_SR.gdb) y listado de coordenadas por polígono en formato Excel.
5. Se representan cartográficamente los polígonos producto del paso anterior, en primera instancia mediante un plano general donde se identifiquen todos los polígonos de las áreas con condición de riesgo **“Plano DYZ_CR_MM_SR” (Ilustración 63)**. Adicionalmente, se generan los planos específicos para todos los polígonos donde se incorporan las coordenadas de cada vértice **“DYZ_CR_MM_SR”**.



“Con esta información se elabora el mapa con la delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo y se establecen los criterios para la caracterización y delimitación de las unidades de análisis que dependen del fenómeno a estudiar y la priorización para la realización de los estudios detallados que permitirán categorizar el riesgo.” (Decreto 1077 de 2015, art 2.2.2.1.3.2.1.5).

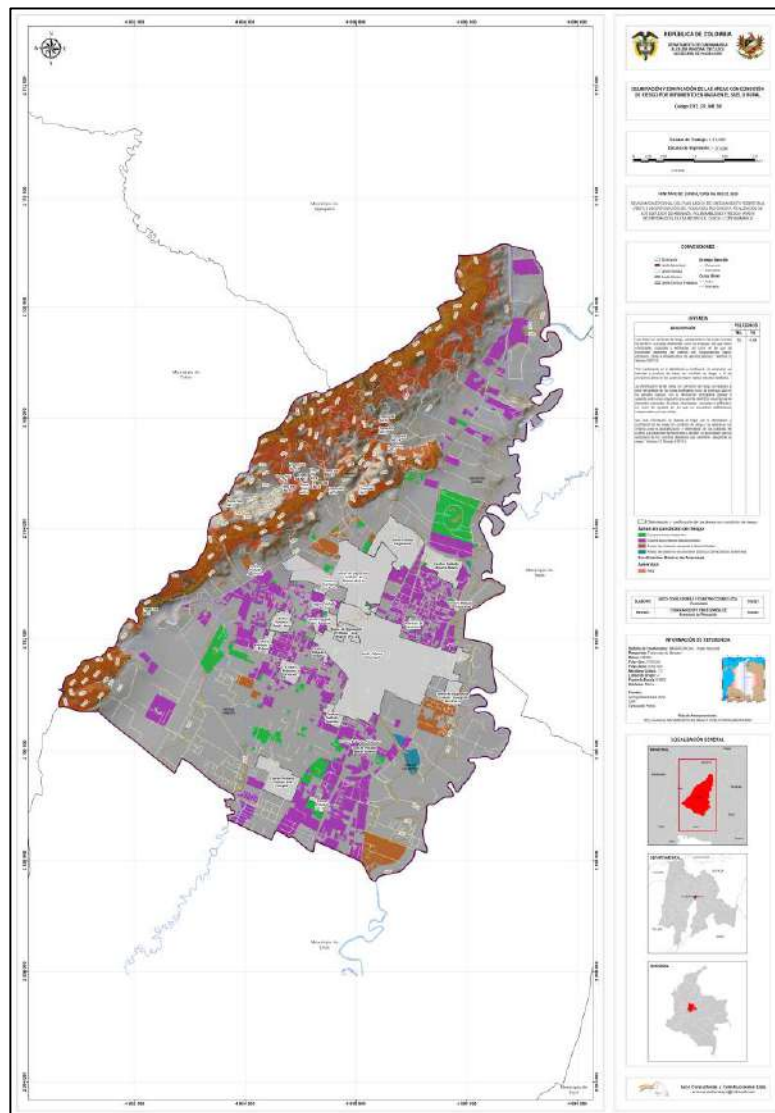
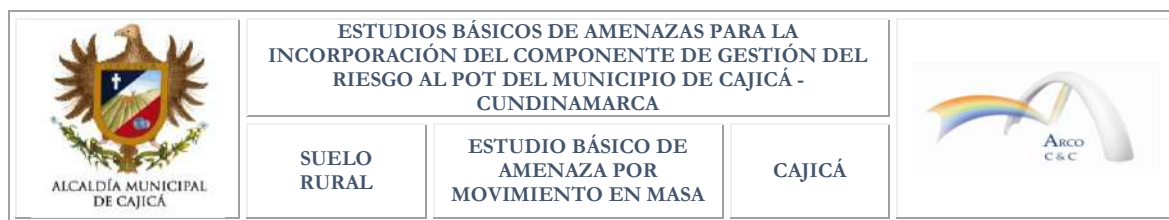


Ilustración 63. Delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo por movimientos en masa en el suelo rural del municipio de Cajicá, Cundinamarca.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2022).



En cuanto al resumen del total de polígonos y sus áreas:

Tabla 20. Resumen de las áreas con condición de riesgo por movimientos en masa en el suelo rural del municipio de Cajicá, Cundinamarca.

	No. total de polígonos	Área del territorio (ha)	Porcentaje del área total (%)
Sistema vial	16	4.44	0.096%

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

Para los predios de la base catastral del IGAC, no se identificaron predios en condición de riesgo por fenómeno de movimiento en masa. Anexo a esto, del sistema vial de la base cartográfica se identificó un total de 16 polígonos de áreas con condición de riesgo, que equivalen a un total de 4.44 ha, correspondientes al 0.096% del área rural de Cajicá. Éstos serán las áreas objeto de estudios detallados que permitan categorizar el riesgo (Artículo 2.2.2.1.3.2.1.5 del Decreto 1077 de 2017).

2.1.11. REFERENCIAS

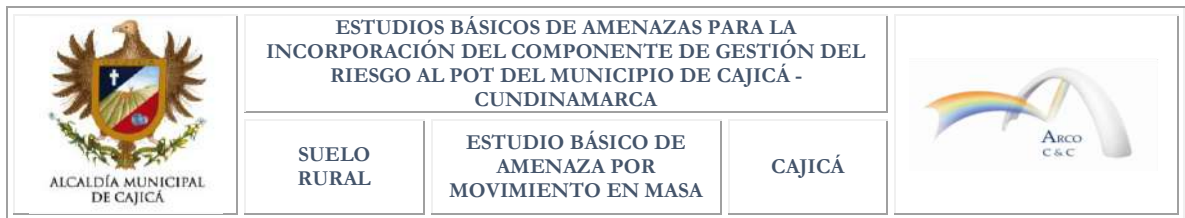
Barbieri G., y P. Cambuli. (2009). The weight of evidence statistical method in landslide susceptibility mapping of the Rio Pardu Valley (Sardinia, Italy). 18th World IMACS /MODISM Congress. Australia. 13-17.

Bonham-Carter G., F., Agterberg F., and Wright D. (1998). Integration of Geological Datasets for Gold Exploration in Nova Scotia. Mineral Resources Division, Geological Survey of Canada. Canada. No. 18988. Vol 54. 1585-1592.

Conforti, M., Robustelli, G., Muto, F., y Critelli, S. (2012). Application and validation of bivariate GIS-based landslide susceptibility assessment for the Vitraio river catchment (Calabria, south Italy). Natural Hazards, 61(1), 127-141.

Jaiswal P. and Van Westen J. (2009). Estimating temporal probability for landslide initiation along transportation routes based on rainfall thresholds. Science Direct. Geomorphology. 96-105.

Servicio Geológico Colombiano (2017). Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25.000. Bogotá. Colombia.



Xu C., Xu X., Hsi Lee Y., Tan X., Yu G., Dai F. (2012). The 2010 Yushu earthquake triggered landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence modelling. Environmental Earth Science. (66), 1603-1616. DOI 10.1007/s12665-012-1624.

Xu C., Xu X., Yao Q., y Wang Y. (2013). GIS-based bivariate statistical modelling for earthquake triggered landslides susceptibility mapping related to the 2008 Wechuan earthquake, China. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. Vol 46, 221-236.