

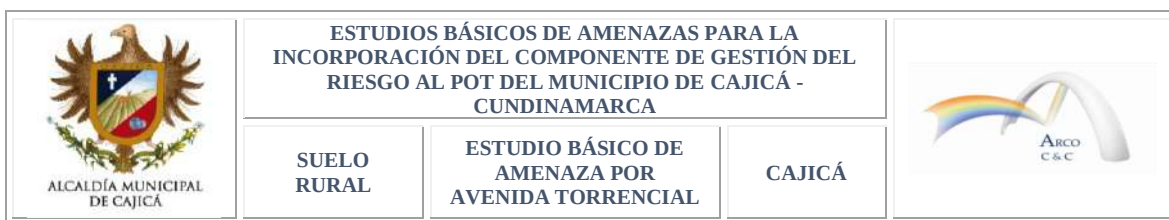
Municipio de Cajicá, Cundinamarca

Capítulo 4

Estudio Básico de Amenaza por Avenidas Torrenciales



2021

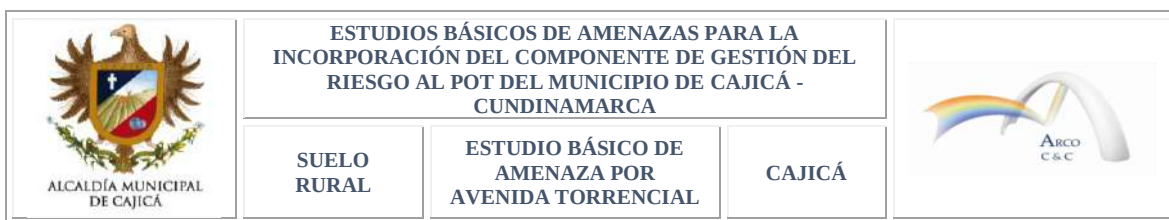


ÍNDICE

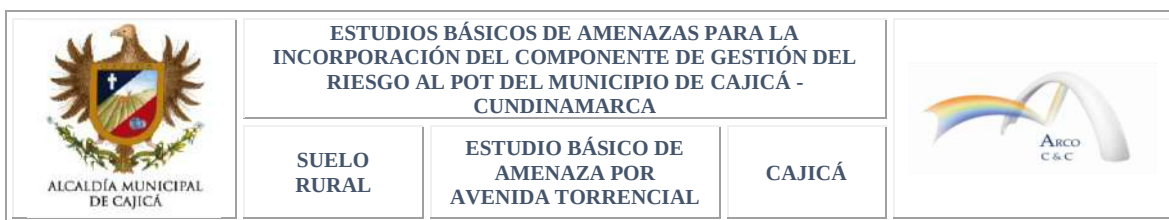
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS.....	14
1.1. Objetivo general	14
1.1.1. Objetivos específicos	14
2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ESTUDIO.....	15
2.1. Área de estudio	16
3. AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES	17
3.1. Fundamento teórico de flujos	19
3.1.1. Hidráulica de fluidos	19
3.1.2. Clasificación reológica de flujos de sedimentos – agua.....	21
3.1.3. Características morfológicas de los depósitos de avenidas torrenciales	31
3.1.4. Características de los flujos de lodo, detritos y escombros	33
3.1.5. Composición de los flujos de lodos, detritos y escombros	34
3.1.6. Características de las cuencas con comportamiento torrencial.....	35
3.1.6.1. Índice de Melton.....	35
3.1.6.2. Rangos de Wilford.....	35
3.1.6.3. Índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET)	36
3.1.6.3.1. Índice Morfométrico (IM)	37
3.1.6.3.2. Índice de Variabilidad (IV)	39
3.1.6.3.2.1. Curvas Duración Caudal.....	40
3.1.6.4. Coeficiente de torrencialidad.....	46
3.1.7. Descripción del modelo hidráulico FLO-2D	46
3.1.7.1. Ecuaciones gobernantes de movimiento del flujo.....	47
3.1.7.2. Obtención del caudal	48
3.1.7.3. Concentración de sólidos (Cv)	50
3.1.7.4. Modelo reológico.....	51
3.1.7.5. Resistencia para el flujo laminar.....	55
3.1.7.6. Manning	55
3.1.7.7. Solución numérica del modelo.....	55

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

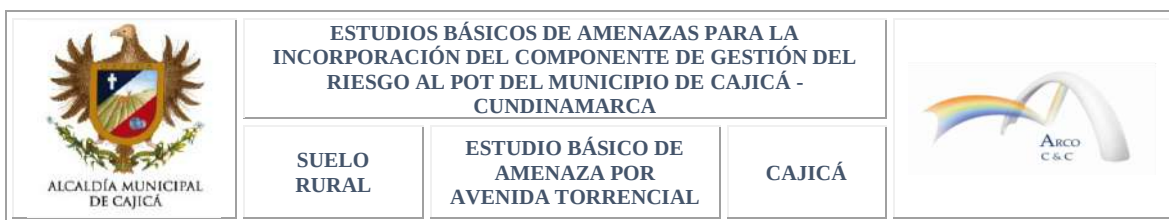
3.1.7.8.	Criterios de Estabilidad	56
3.1.7.9.	Lógica del FLO-2D.....	57
3.1.8.	Potencialidades y limitaciones del modelo matemático	59
3.2.	Metodología	61
3.3.	Caracterización de la amenaza por avenidas torrenciales	65
3.3.1.	Caracterización del fenómeno de estudio	66
3.3.1.1.	Antecedentes Avenidas torrenciales	66
3.3.1.1.1.	Estudio: Plan Municipal de la Gestión del Riesgo (PMGR) (Consortio Consultoría Cajicá, 2019)	75
3.3.1.1.2.	Ajuste del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Rio Bogotá (POMCA, 2019)	76
3.3.1.1.3.	Acuerdo N° 16 de 2014.....	79
3.4.	Caracterización Hidrológica	81
3.4.1.	Modelo de pérdidas (S.C.S)	81
3.4.1.1.	Modelo de transformación (hidrograma unitario S.C.S).....	82
3.5.	Caracterización de las condiciones geológicas y geomorfológicas	84
3.6.	Caracterización de la producción y aportes de sedimentos	88
3.6.1.	Zonificación de la amenaza por erosión	88
3.6.1.1.	Índice de erosividad (Índice de Fournier modificado).....	89
3.6.1.2.	Factor de Erodabilidad (K2).....	93
3.6.1.3.	Factor de longitud de ladera y pendiente (LS).....	99
3.6.1.4.	Factor de cobertura vegetal (C).....	102
3.6.1.5.	Amenaza por erosión (A).....	106
3.6.2.	Zonificación de la amenaza por laderas potencialmente inestables	108
3.6.2.1.	Caracterización del terreno y del proyecto.....	108
3.6.2.1.1.	Caracterización del terreno.....	108
3.6.2.1.2.	Caracterización del proyecto.....	108



3.6.2.1.3.	Metodología y procedimiento	109
3.6.2.1.4.	Recopilación y análisis de la información disponible.....	109
3.6.2.1.4.1.	Investigación del sub-suelo	109
3.6.2.1.4.2.	Exploración de campo	109
3.6.2.1.4.3.	Ensayos de laboratorio.....	111
3.6.2.1.4.4.	Estratigrafía y caracterización geotécnica	118
3.6.2.1.4.4.1.	Estratigrafía	118
3.6.2.1.4.4.2.	Caracterización geotécnica.....	119
3.6.2.1.4.5.	Cálculo de volúmenes de sedimentos.....	129
3.6.2.1.4.5.1.	Determinación de parámetros de las UGS	129
3.6.2.1.4.5.2.	Parámetros de resistencia por UGS.	129
	☐ Espesores de falla	141
	☐ Parámetro ru	141
	☐ Delimitación de modelos digitales de elevación para cada UGS.	141
3.6.2.1.5.	Metodología para evaluar la estabilidad de taludes en 3 dimensiones mediante el software scoops.....	145
3.6.2.1.6.	Evaluación de estabilidad a nivel de microcuenca en 3 dimensiones	147
3.6.2.1.7.	Análisis de resultados	150
3.6.2.1.8.	Conclusiones.....	151
3.6.2.1.9.	Limitaciones.....	153
3.7.	Zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales.....	153
3.7.1.	Cálculo de aportes de sedimentos	153
3.7.2.	Volúmenes de sólidos.....	153
3.7.2.1.	Coeficiente de producción (D).....	154



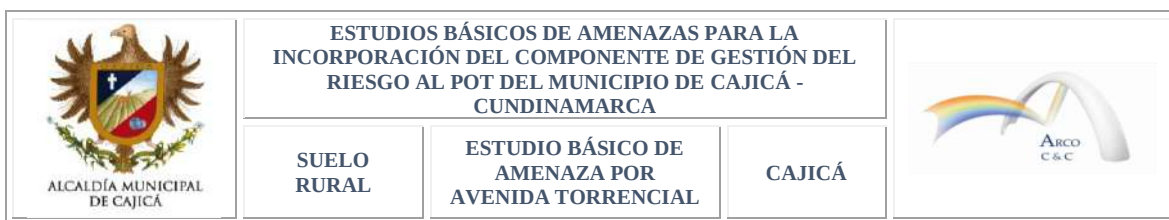
3.7.2.1.1.	Concentración volumétrica	155
3.7.2.2.	Condiciones de torrencialidad	157
3.7.2.2.1.	Wilford.....	158
3.7.2.2.2.	Melton.....	160
3.7.2.2.3.	IVET	161
3.7.2.2.4.	Coeficiente de torrencialidad	164
3.7.2.2.5.	Concentración Volumétrica	166
3.7.2.2.6.	Cuencas con carácter torrencial.....	168
3.7.3.	Hidrogramas líquidos – sólidos	171
3.7.4.	Modelación numérica	176
3.7.4.1.	Pre-procesamiento.....	176
	☐ Definición de la geometría del área de estudio.....	176
	☐ Condiciones de borde o de frontera	177
	☐ Definición de parámetros de estabilidad y convergencia de la solución numérica.....	177
	☐ Definición de parámetros reológicos	178
	Coeficiente de rugosidad en el cauce y en las planicies.....	180
3.7.4.2.	Simulación.....	180
3.7.4.3.	Post – Procesamiento	180
	☐ Escenario de modelación	181
	3.2.1.1.2. Criterio para definir la amenaza por avenidas torrenciales.....	183
3.7.4.4.	Determinación de la intensidad de flujo	184
3.7.4.5.	Determinación del nivel de amenaza	186
3.7.4.6.	Categorización de la Amenaza	189
4.	RESULTADOS	190



5.	CONDICIONES DE TORRENCIALIDAD PARA EL SUELO URBANO, DE EXPANSIÓN Y CENTROS POBLADOS DEL MUNICIPIO DE CAJICA.....	192
6.	VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMATICO.....	193
6.2.	VARIABILIDAD CLIMÁTICA.....	193
6.3.	VARIABILIDAD CLIMÁTICA MENSUAL	193
6.3.1.	VARIABILIDAD CLIMÁTICA INTERANUAL	194
6.3.2.	FENÓMENOS ENOS	195
6.3.3.	OSCILACIÓN MADDEN-JULIAN	201
6.3.4.	OSCILACIÓN CUASI-BIENAL.....	204
6.3.5.	CAMBIO CLIMÁTICO	206
7.	CONCLUSIONES.....	216
8.	DELIMITACIÓN Y ZONIFICACIÓN DE LAS ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y CON CONDICIÓN DE RIESGO.....	218
8.1.	Delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza	218
8.2.	Delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo	222
9.	MEDIDAS DE INTERVENCIÓN ORIENTADAS A ESTABLECER RESTRICCIONES Y CONDICIONAMIENTOS MEDIANTE LA DETERMINACIÓN DE NORMAS URBANÍSTICAS	225
	BIBLIOGRAFÍA.....	230

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

Ilustración 31 Zonificación básica de amenaza por avenidas torrenciales para la zona rural de Cajicá.....	191
Ilustración 32. Zonificación de las áreas con condición de amenaza para el suelo rural del municipio de Cajicá.	221
Ilustración 33. Zonificación de las áreas con condición de riesgo para el suelo rural del municipio de Cajicá	224



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Especificaciones técnicas para la elaboración de estudios básicos de amenaza por Avenidas Torrenciales.....	15
Tabla 2 Clasificación de flujos hiperconcentrados.....	22
Tabla 3 Clasificación según Costa (1988).....	26
Tabla 4 Clasificación según Costa (1988).....	27
Tabla 5 Comportamiento del flujo de lodo como una acción de Cv.....	30
Tabla 6 Identificación de los procesos hidrogeomorfológicos según los parámetros de Melton y la longitud de la cuenca.....	36
Tabla 7 Relaciones para categorías de índices morfométricos.....	38
Tabla 8 Relaciones entre variables para los índices morfométricos y su categorización.....	39
Tabla 9 Caudales diarios medios ajustados distribución Normal.....	41
Tabla 10 Variables explicativas, regresión lineal múltiple ($X_1, \dots, X_5$).....	42
Tabla 11 Coeficientes de regresión ($a_1, \dots, a_5$).....	42
Tabla 12 CDC obtenidas por regresión múltiple (Q_x).....	43
Tabla 13 Clasificación categórica del índice de variabilidad.....	45
Tabla 14 Matriz de decisión de la clasificación de índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales.....	45
Tabla 15 Parámetros de Resistencia para flujo laminar.....	55
Tabla 16 Estaciones pluviométricas y valores del factor R, usados en el presente estudio.....	91
Tabla 17 Códigos de permeabilidad y estructura del suelo en función de su textura.....	94
Tabla 18 Valores empleados para el cálculo del Factor K en relación con la unidad de suelo presente en el municipio.....	96
Tabla 19 Valores del factor de cobertura (factor C).....	102
Tabla 20 Valores del factor de cobertura (factor C).....	103
Tabla 21 Categorización y áreas de participación de la amenaza por erosión para el municipio.....	106
Tabla 22 Sondeos y Apiques por Unidad Geológica.....	110
Tabla 23 Consolidado de ensayos principales por sondeo y apique.....	112
Tabla 24. Clasificación del material del suelo según SUCS.....	119
Tabla 25. Ángulo de Fricción y Cohesión mediante la Metodología de González (1999).....	121
Tabla 26 Consistencia depósitos cohesivos.....	122
Tabla 27 Numero de golpes N para los sondeos realizados.....	122
Tabla 28 Limites de Consistencia y Clasificación SUCS.....	124
Tabla 29. Caracterización Geotécnica detallada por unidad geológica superficial de análisis ...	127
Tabla 30. Parámetros de resistencia mecánica para el área de estudio.....	130
Tabla 31 Rango de factores de seguridad propuestos.....	147
Tabla 32 Parámetros de resistencia mecánica para las cuencas hidrográficas identificadas.....	150
Tabla 33 . Porcentajes de aporte volumétrico de sedimentos al flujo en las diferentes unidades hidrográficas para el suelo rural del municipio de Cajicá.....	156

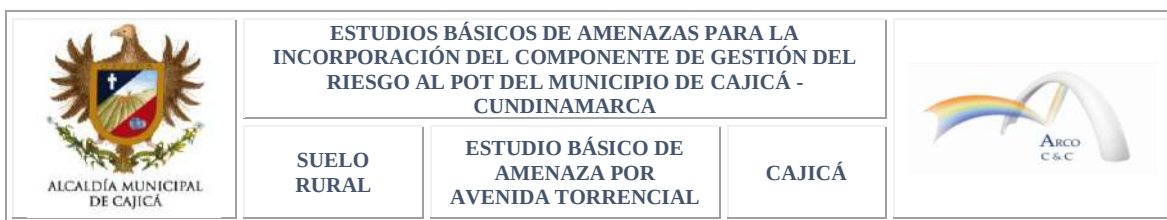
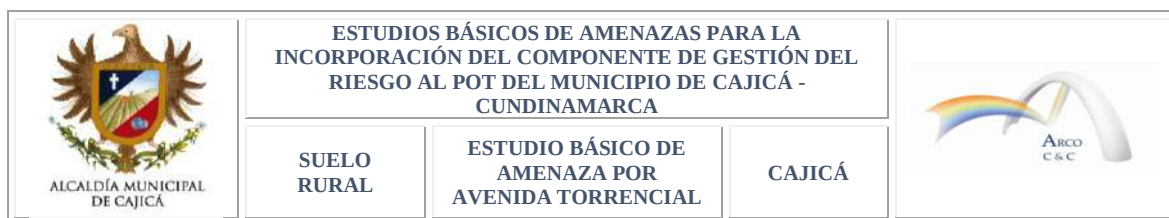


Tabla 34 Índices de torrencialidad para determinar cuencas torrenciales	168
Tabla 35 Variables de control para las simulaciones numéricas	178
Tabla 36. Coeficientes para el cálculo de esfuerzos cortantes y viscosidad en el flujo	179
Tabla 37 Parámetros reológicos para las áreas de estudio	180
Tabla 38 Intensidad para una inundación de aguas con altas concentraciones de sedimento...	184
Tabla 39 Nivel de amenaza por avenidas torrenciales	187
Tabla 40 Categorización de la Amenaza por Avenidas Torrenciales.	189
Tabla 41. Categorización de la Amenaza por Avenidas Torrenciales para el suelo rural de Cajicá	190
Tabla 42. Resumen de las áreas con condición de amenaza.	222
Tabla 43. Resumen de las áreas con condición de riesgo.....	225

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre el esfuerzo cortante (τ) y la tasa de deformación ($\dot{\gamma}$) de los fluidos	21
Figura 2 Clasificación reológica de flujos de sedimentos – agua	25
Figura 3 Clasificación de flujos Según Meunier (1991)	26
Figura 4 Clasificación de flujos según (Coussot, 1997)	28
Figura 5 Clasificación de movimientos en masa sobre taludes como una función de la fracción sólida y el tipo de material	29
Figura 6 Representación idealizada de un brazo de flujos de escombros	32
Figura 7 Composición de una oleada de flujos de escombros	33
Figura 8 Concentración de sedimentos vs. Factores de engrosamiento.....	50
Figura 9 Modelo reológico cuadrático del FLO-2D	53
Figura 10 Descarga del Flujo a través de los elementos de grilla en planta	58
Figura 11 Hidrograma Unitario Triangular del SCS.....	84
Figura 12 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 2.	113
Figura 13 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 3.	114
Figura 14 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 4.	114
Figura 15 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 5.	115
Figura 16 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 7.	115
Figura 17 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 9.	116
Figura 18 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 10.	116
Figura 19 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 11.	117
Figura 20 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 12.	117
Figura 21 Variación de la humedad en los apiques realizados.	118
Figura 22 Carta de Plasticidad de Sondeos y Apiques.	124
Figura 23 Delimitación de UGS a escala urbana con las microcuencas de los diferentes cauces.	

Obsérvese que para cada microcuenca es probable encontrar más de 2 UGS, por lo que se



evalúan de manera independiente por UGS.....	144
Figura 24. Esquema de evaluación de las superficies de falla en 3 dimensiones mediante el software scoops.....	145
Figura 25. Esquema de fuerzas que actúan en una dovela por el método de Bishop simplificado.	146
Figura 26 Vista zonificación de amenazas para las diferentes cuencas en el municipio.	148
Figura 27 Vista zonificación de amenazas para las diferentes cuencas en el municipio.	149
Figura 28 Vista zonificación de amenazas para las diferentes cuencas en el municipio.	149
Figura 29. Coeficientes de producción de sedimentos	154
Figura 30 Hidrogramas líquidos – sólidos para el periodo de retorno 2.33, 25 y 100 años	172
Figura 31. Ubicación de la ZCIT en enero y julio	194
Figura 32. Distribución temporal de los eventos ENSO, índice ONI	195
Figura 33. Celda de circulación de Walker en condiciones neutrales.....	196
Figura 34. Celda de Circulación de Walker, fenómeno de El Niño	196
Figura 35. Alteraciones estacionales (izquierda) e interestacionales (derecha) más probables de la precipitación en la Región Bogotá Cundinamarca, durante la ocurrencia de un fenómeno típico de El Niño	197
Figura 36. Celda de circulación de Walker, fenómeno de La Niña	198
Figura 37. Alteraciones estacionales (izquierda) e interestacionales (derecha) más probables de la precipitación, en la Región Bogotá Cundinamarca, durante la ocurrencia de un fenómeno típico de La Niña	199
Figura 38. Número de eventos y víctimas fatales asociadas a los eventos de avenidas torrenciales en Colombia para el periodo 1920-2018.....	200
Figura 39. Relación relativa exposición a fatalidades dadas las anomalías del índice ONI	201
Figura 40. Sección vertical del comportamiento de la Oscilación Madden-Julian.....	202
Figura 41. Velocidad Potencial a 200hPa promedio de Noviembre a Marzo	203
Figura 42. Perfil vertical de la atmósfera en el ecuador	204
Figura 43. Balance energético global	207
Figura 44. Anomalía de la temperatura global en el período 1886-2017 referenciada al período 1980-2010, según el diversas aproximaciones de procesamiento de las mediciones de la temperatura del aire	208
Figura 45. Mosaico de pronósticos de temperatura en el municipio de Cajicá para los lapsos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100.	209
Figura 46. Mosaico de pronósticos de precipitación en el municipio de Cajicá para los lapsos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100.	211
Figura 47. Tendencia de la precipitación total anual.....	212
Figura 48. Número de días en un año con lluvia mayor a 20mm.....	213
Figura 49. Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos.....	214
Figura 50. Vulnerabilidad integral para (a) los municipios de Cundinamarca.	215

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Grafica del índice de variabilidad para CDC.	40
Gráfica 2. Estadísticas de áreas y porcentajes de ocupación de la amenaza por Avenidas Torrenciales para el suelo rural de Cajicá.....	192

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

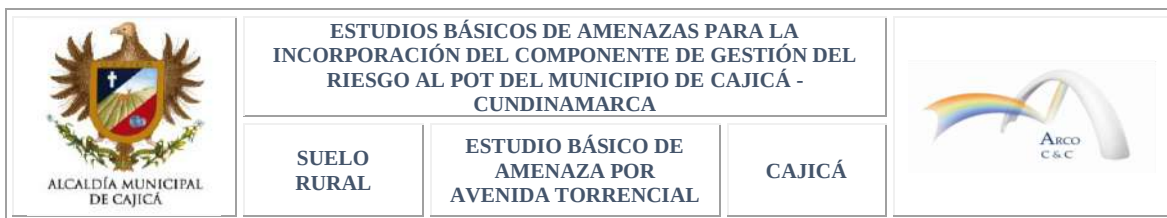
INTRODUCCIÓN

Los municipios en proceso de actualizar el POT, PBOT o EOT, deben cumplir con los requisitos estipulados en la Ley 388 de 1997, garantizando que el territorio posea las condiciones adecuadas tendientes a salvaguardar la integridad física de los habitantes y la infraestructura que allí se encuentra. De esta manera, los municipios que llevan a cabo este proceso, deben realizar los correspondientes estudios básicos de evaluación de amenaza para fenómenos de Movimientos en Masa, Inundación y Avenidas Torrenciales, dando alcance a los principios establecidos en la Ley 1523 de 2012 y reglamentado por el Decreto 1807 de 201 (Compilado en el Decreto 1077 de 2015), en los cuales se establecen las escalas de trabajo y condiciones para llevar a cabo la incorporación de la Gestión del Riesgo en el ordenamiento del territorio.

El presente estudio básico, es desarrollado como medio evaluación de amenaza por movimientos en masa, inundación, avenida torrencial e incendios forestales.

Acorde con las características físicas variables del territorio colombiano y la densificación de los centros urbanos, expansión urbana, suelo suburbano, centros poblados rurales y suelo rural, se hace necesario zonificar las áreas de los municipios expuestas a diferentes tipos de amenazas naturales, con el fin de prevenir amenazas y riesgos naturales, además de identificar las áreas de riesgo para asentamientos humanos y generar insumos para planificar estrategias de manejo de zonas expuestas a amenazas y riesgos. Por tal razón, se establecen los estudios básicos de amenaza por avenidas torrenciales para el suelo rural del municipio de Cajicá, como una acción estratégica en materia del conocimiento y reducción de fenómenos amenazantes en el territorio.

La metodología empleada para la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales para el área rural del municipio de Cajicá corresponde a una modelación bidimensional numérica de diferencias finitas que simula flujos de lodos y escombros, es decir, un flujo de comportamiento no newtoniano al contar con concentraciones de sólidos considerables, todo esto a partir de soluciones de tirantes y velocidades referidos al movimiento de dichos flujos. La simulación consiste en recopilar y organizar información básica existente de las cuencas que integren el área de estudio, definir y calibrar los parámetros requeridos (reológicos, topográficos, porcentajes volumétricos del flujo apelando a hidrogramas líquidos – sólidos y estabilizaciones numéricas) por el modelo hidráulico computacional, el cual se fundamenta dentro de un marco teórico explicado y analizado previamente. El resultado de amenaza corresponderá a la combinación de las velocidades y profundidades para cada uno de los escenarios analizados (periodos de retorno de 2.33, 25 y 100 años).



El presente estudio básico es realizado a escala 1:10.000, 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 el suelo urbano.

Este documento es la recopilación de insumos, procesos y especificaciones mínimas que determinaron las condiciones de amenaza; contempla las especificaciones del estudio, 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 mediante la determinación de normas urbanísticas para las áreas categorizadas en alto y medio.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Realizar el estudio básico y la zonificación de amenaza por avenida torrencial en el suelo rural 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 Esquema de Ordenamiento Territorial, en el marco de la Ley 1523 del 2012, Decreto 1807 de 2014, compilado en el Decreto 1077 de 2015.

1.1.1. Objetivos específicos

- Aplicar las especificaciones mencionadas en el Decreto 1807 de 2014 compilado en el Decreto 1077 de 2015, para la incorporación del tema de Amenazas los Planes de Ordenamiento Territorial.
- Determinar y zonificar las áreas en condición de amenaza por avenidas torrenciales, a partir de la aplicación de un modelo numérico hidráulico computacional FLO 2D, sobre las cuencas condicionadas con comportamiento torrencial, definiendo sus ventajas y limitaciones.
- 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.
- Delimitar y zonificar las áreas en condición de amenaza media y alta en las que se requiere adelantar los estudios detallados.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

- Realizar el informe final con el mapa de zonificación y su correspondiente categorización para el fenómeno de avenidas torrenciales.

2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ESTUDIO

El estudio básico de amenaza por avenidas torrenciales 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 Avenidas Torrenciales

Especificaciones técnicas para la elaboración de estudios básicos por Avenidas Torrenciales	
Especificación	Descripción
Área de Estudio	Área rural del municipio de Cajicá. El estudio se realiza a escala 1:10.000 lo que condiciona la unidad mínima a cartografiar, en este caso un área de 0,16 ha.
Metodología	La metodología considerada para la determinación de la categorización de áreas con amenaza a este fenómeno se realiza a partir de los análisis de los factores condicionantes y detonantes evidenciados en campo que contribuyen a la generación de la ocurrencia de una avenida torrencial. Posteriormente se estudia las características hidrológicas, morfométricas, geomorfológicas y denudacionales (procesos de erosión laderas potencialmente inestables) que permiten identificar las cuencas con condiciones torrenciales potenciales a la ocurrencia del fenómeno estudiado. Posteriormente, se determinan la variación de los caudales en el tiempo para los drenajes de interés mediante un modelo de lluvia – escorrentía para los tiempos de retorno 2.33, 25 y 100, se calculan las cargas promedio de volúmenes de sedimentos para obtener las propiedades de la matriz del fluido (hidrogramas líquidos – sólidos), se seleccionan los parámetros reológicos del flujo partiendo de los valores teóricos existentes y ajustes realizados para cuencas similares (constantes de la ecuaciones de la viscosidad dinámica y esfuerzos cortantes, y resistencia del flujo laminar si el fluido presenta alta resistencia al movimiento), se determina las constantes de estabilidad del modelo y se genera una solución numérica de diferencias siguiendo el método de conservación de la concentración de sedimento excluyendo el intercambio del material del lecho a través de la implantación del software FLO – 2D para las cuencas susceptibles a dichos procesos. Al final, se realiza una predicción de las condiciones más desfavorables de la ocurrencia de un fluido a partir de las condiciones hidráulicas extremas caracterizados por su velocidad y profundidad para los diferentes tiempos de retorno calculados. Gran parte de las variables contempladas dentro del modelo se obtuvieron siguiendo lineamiento de: (O'Brien & Julien, Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. Proc of the Speciality Conference and delineation of Landslides, Flash Food and Debris Flow Hazard in Utah, 1985), (IDEAM, 2010), (IDEAM, 2013), (Rivas & Soto, 2009) y la normatividad vigente para gestión de riesgo en los planes de ordenamiento territorial. Así mismo se contará con el apoyo de

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

Especificaciones técnicas para la elaboración de estudios básicos por Avenidas Torrenciales	
Especificación	Descripción
	herramientas informáticas.
Insumos	Para la realización del estudio de amenaza se utilizan como insumos: documentos y cartografía suministrada por el municipio, base cartográfica, suelos, cobertura del suelo, geomorfología, morfología, hidrología, erosión y clima realizados por ARCO C&C a escala 1:10.000; perímetro rural tomado del proceso de formulación del POT del municipio; datos meteorológicos de las estaciones presentes dentro del área de estudio. Todo esto, derivado a partir de insumos como: Imagen obtenida mediante el uso de Drone, Cartografía Básica del IGAC, y Modelo digital de elevación, además, de la información adquirida en diferentes entidades y de la recopilada durante el trabajo 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 y UNGRD.
Productos	Como productos, se presentan los mapas de zonificación de amenaza por avenidas torrenciales y el documento técnico realizado para el suelo rural de Cajicá.

Ajustado de: Decreto 1807 de 2014, MVCT.

2.1. Área de estudio

El municipio de Cajicá tiene una extensión de 53 km². Se localiza en el centro del departamento de Cundinamarca, en la provincia de Sabana Centro a 17 km al norte de la capital del país. Limita al norte con el municipio de Zipaquirá, con el municipio de Chía al sur, al oriente con el municipio de Sopó y con el municipio de Tabio por el occidente. Es el tercer municipio más poblado de la provincia después de Zipaquirá y Chía. Está dividido política y administrativamente en 4 veredas, 15 barrios y 22 sectores. Su delimitación y municipios colindantes se observan en la Ilustración 1.

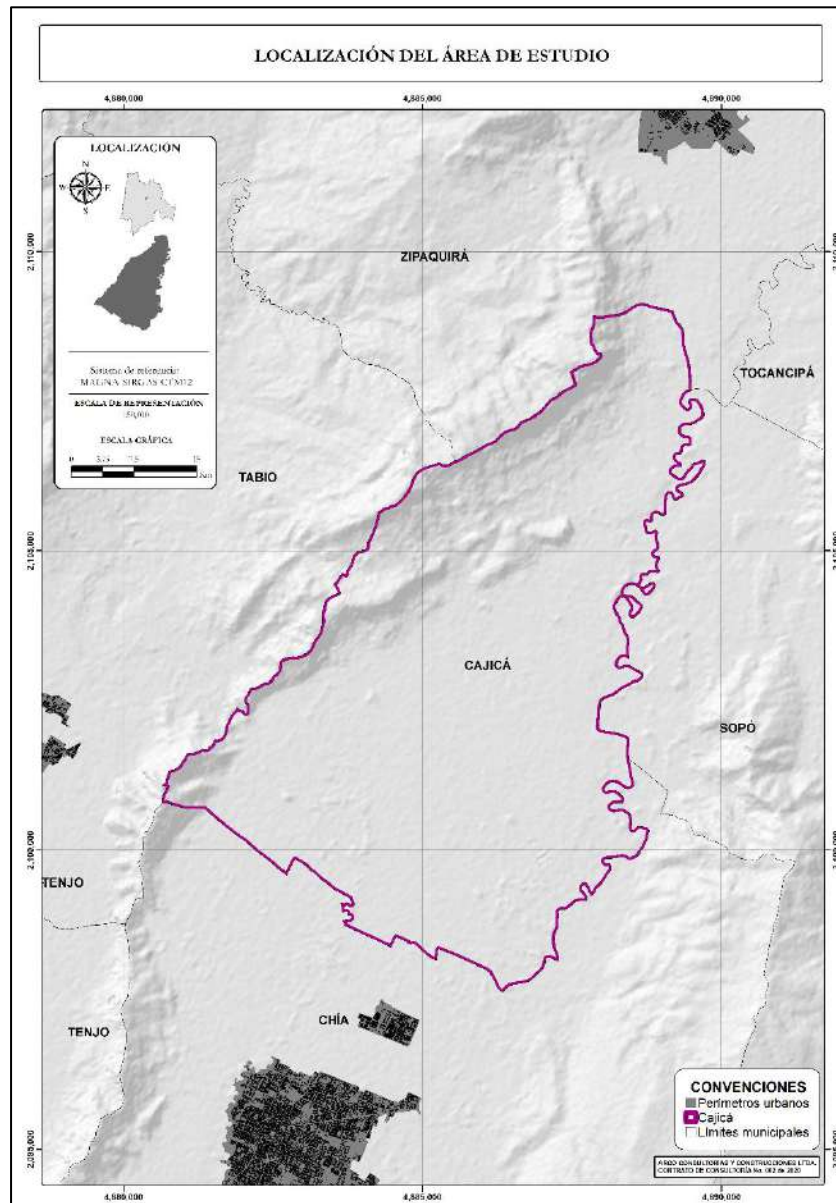
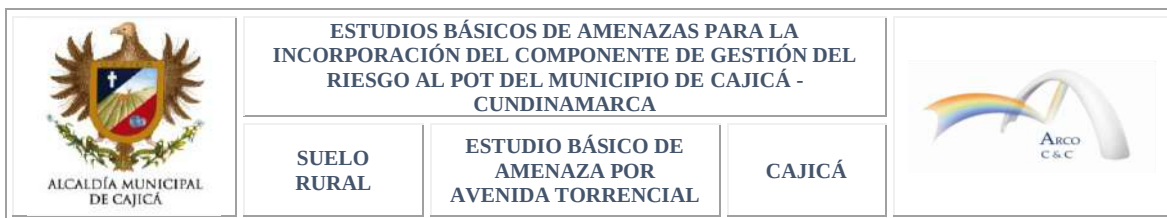


Ilustración 1 Localización geográfica del municipio de Cajicá, Cundinamarca.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

3. AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES

Los desastres vinculados con fenómenos naturales han aumentado significativamente, tanto en



número como en magnitud de los daños causados. Este panorama no ha sido ajeno a Colombia, en gran parte del país han ocurrido afectaciones ocasionadas por fenómenos hidrometeorológicos, retroalimentadas a su vez por el deterioro de las condiciones sociales, económicas, ambientales e institucionales, elementos claves para la generación de desastres socio-naturales.

Las avenidas torrenciales, en ocasiones llamadas crecientes, avalanchas, crecidas, o torrentes, son una amenaza en cuencas de alta montaña, junto con los fenómenos erosivos y los movimientos en masa, y hacen parte de los procesos naturales de denudación de la corteza terrestre. Esto implica que no son susceptibles de total manejo para su mitigación, pero el riesgo que pueden generar si puede ser evitable o reducido.

Una avenida torrencial consiste hidráulicamente en un flujo torrencial caracterizado por contener un alto porcentaje de material sólido (que incrementa considerablemente la viscosidad y densidad del flujo, disminuyendo su velocidad), y cuyo material está compuesto de una matriz fina capaz de soportar sedimento grueso y restos vegetales, recorriendo cauces generalmente de altas rugosidades y pendientes. Estos eventos son impredecibles y ocurren de forma súbita, en periodos de tiempo muy cortos, con largos periodos de retorno para un mismo lugar y con una distribución temporal y espacial errática (Durán, Elízaga, Garzón, Lamas, & Prieto, 2008), (Piedrahíta, 1996).

Este tipo de eventos se presentan cuando se presenta un evento de lluvia de alta intensidad que genera un incremento súbito de caudales en pocas horas, generando la saturación de los materiales de las laderas y facilitando el desprendimiento del suelo, produciéndose de esta manera numerosos desgarres superficiales y deslizamientos. Todo el material desprendido de las laderas del cauce es incorporado al mismo y es transportado inmediatamente aguas abajo o queda inicialmente represado y luego, una vez que se rompe el represamiento, es transportado violentamente de forma repentina (Urrea & Vásquez, 1996), (Rendón, 1997), (Castro, 2007). En otras ocasiones se puede presentar el evento sin un desgarramiento de material previo, contando con partículas sólidas encontradas in situ antes del evento de lluvia detonante.

Una cuenca puede generar una avenida torrencial si presenta potencialidad para el desarrollo de la generación de un fluido con altas concentraciones, características y condiciones que se enumeran a continuación:

- Gradientes topográficos altos y áreas medias, lo que implica rápidos tiempos de concentración y altas velocidades de las corrientes (Caballero & Mejía, 1998).
- Condiciones hidrológicas extremas: Precipitaciones de gran intensidad, concentradas sobre la cuenca o parte importante de ésta. Se debe contar con un aumento del canal

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

capaz de suspender, remover y depositar el material existente o potencial.

- Disponibilidad de sedimento (existencia de gran cantidad de material sólido que drena a la cuenca especialmente a los drenajes de primeros órdenes): debe ser caracterizado por ser fino granular (limos y arcillas) que puedan ser puestos en movimiento por la creciente. Las fuentes de estos materiales pueden ser movimientos en masa o focos de erosión existentes, grupos de movimientos en masa generados durante el mismo evento climático (se debe requerir disposición de material sobre las laderas), material depositado en las vertientes por procesos constructivos, colapso de las márgenes de la vertiente.
- Baja cobertura vegetal que produzca un bajo soporte y estabilización natural de laderas.
- Cambios bruscos en el gradiente de la corriente hídrica, lo que facilita la acumulación de los sedimentos transportados desde la cuenca alta o media. En algunos casos, puede darse acumulación de sedimentos por el ensanchamiento abrupto del cauce mayor o reducción de este. Dichas condiciones se ven caracterizadas por la rugosidad del canal y de sus contracciones.
- Condiciones geomorfológicas: Si los canales presentan conos aluviales con una inclinación suficiente para generar la cantidad de movimiento para remover dicho material, además estos depósitos son relictos de actividades aluviales previas en el drenaje.

3.1. Fundamento teórico de flujos

En este capítulo se presentan algunos conceptos y elementos de análisis de hidráulica torrencial, referentes principalmente al mecanismo y características de los flujos de altas concentraciones, con el fin de dar fundamento teórico al modelo hidráulico computacional empleado.

3.1.1. Hidráulica de fluidos

La hidráulica de los flujos de escombros o hidráulica torrencial hace referencia al estudio de las avenidas torrenciales como un flujo que transporta gran cantidad de sedimento en suspensión y de fondo, que por sus altas concentraciones de sólidos modifica las características del fluido, y por lo tanto, no se considera como flujo uniforme ni permanente, sugiriendo que el fluido debe ser estudiado excluyendo la fase sólida, es decir, que se encuentra gobernado por las ecuaciones de movimiento y de transporte sólido.

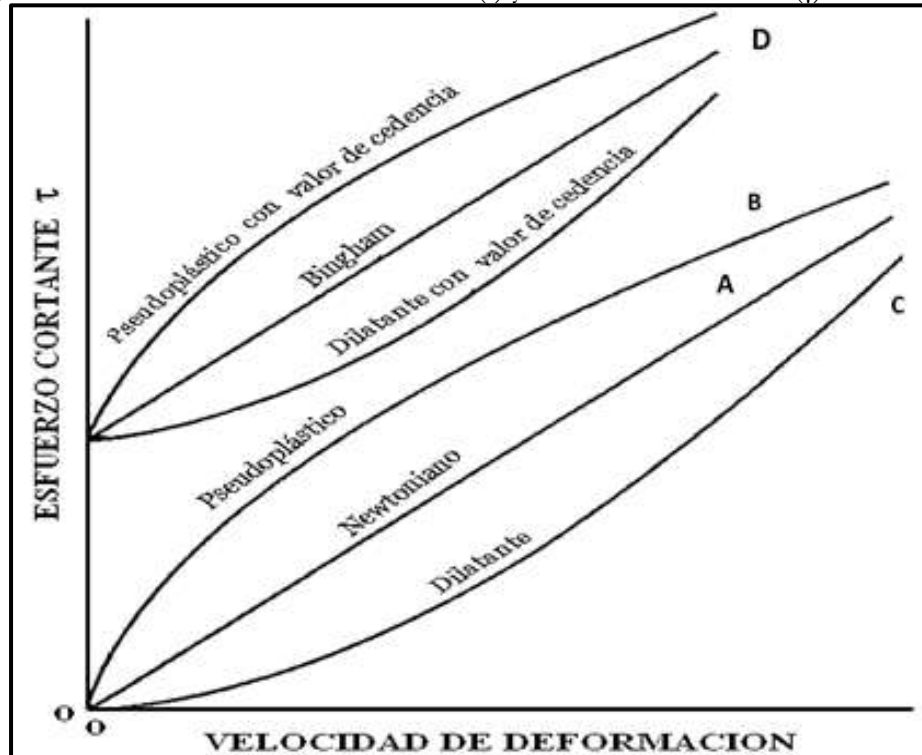
Un fluido es un líquido que se deforma continuamente por los esfuerzos cortantes, la capacidad de fluir hace que el fluido sea incapaz de soportar dichos esfuerzos. En términos generales,

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

aquellos fluidos que presentan nula o pequeña resistencia a ser deformados son llamados fluidos Newtonianos. En tanto, si estos presentan mayor resistencia se llaman fluidos no Newtonianos; un fluido de comportamiento Newtoniano presenta una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación (Figura 1), mientras los fluidos no newtonianos presentan comportamientos diferentes tal como en los casos (b), (c) y (d) (Figura 1), estos se clasifican en función de la concentración de sedimentos que lleva el flujo, como se observa a continuación:

- Fluidos newtonianos: cómo se mencionó anteriormente son aquellos que tienen una relación lineal del esfuerzo cortante y la deformación al corte o gradiente de la velocidad, cuya pendiente de la línea recta es la viscosidad. Dentro de este campo se pueden citar dos conceptos de flujo: laminares y turbulentos, su clasificación depende de la relación del gradiente de velocidad y las fuerzas de inercia, comportamiento que es caracterizado por el número de Reynolds.
- Fluidos Pseudoplásticos: corresponde a aquellos fluidos donde hay menor resistencia al flujo para esfuerzos mayores. Es caracterizado de igual forma por presentar una pendiente progresivamente decreciente del esfuerzo cortante respecto a la tasa del esfuerzo al corte.
- Fluidos dilatantes: Se presentan cuando el flujo posee mayor resistencia para esfuerzos mayores. Es caracterizado de igual forma por presentar una pendiente progresivamente creciente del esfuerzo cortante respecto a la tasa del esfuerzo al corte.
- Fluido viscoplasticos: Este fluido se caracteriza por no fluir al aplicar un esfuerzo de corte muy pequeño, dicho esfuerzo debe exceder un umbral o valor crítico conocido como esfuerzo de cedencia o límite de fluencia para que fluya. Dentro de este grupo se encuentran los fluidos de Bingham.

Figura 1. Relación entre el esfuerzo cortante (τ) y la tasa de deformación ($\dot{\gamma}$) de los fluidos



Fuente: (Castillo, 2006)

Un flujo de mezcla agua-sedimento de origen torrencial, es una mezcla de sedimentos finos y gruesos, con comportamientos visco-plásticos. Sin embargo, la naturaleza mecánica de los flujos hiperconcentrados (fluido mixto) puede variar sustancialmente según la concentración de sedimentos de la mezcla agua – sólido, contenido de arcilla presentes en la mezcla y tamaño de grano que lo compone (distribución granulométrica). Por ejemplo, si el material fino que viaja en suspensión predomina se tendrá un fluido de Bingham, lo que implica que requiere un esfuerzo de cedencia, mientras que, si el material dominante es granular, éste podrá comportarse como un fluido Newtoniano.

3.1.2. Clasificación reológica de flujos de sedimentos – agua

Existen varios criterios de clasificación de los flujos, algunos de ellos se basan en la concentración de sedimentos en la mezcla de estos, otros se basan en el mecanismo detonante responsable de la generación de este, y otros criterios se basan en su comportamiento reológico y cinemático. Algunas de las clasificaciones de flujos hiperconcentrados, además de las ya mencionadas, son las

propuestas por (García, 2006), (Vernes, 1958) (NRC, 1982), (Pierson & Costa, 1987), entre otros. Sin embargo, no ha existido un consenso por parte de los investigadores en el tema en la definición de un único sistema de clasificación: Bradley y McCutcheon (1987) en (García, 2006), hicieron una revisión de las clasificaciones de los flujos hiperconcentrados, resumiéndose en la tabla a continuación:

Fuente	CONCENTRACIÓN EN PORCENTAJE POR PESO (100% POR WT =1.000.000 PPM)									
	23	40	52	63	72	80	87	93	97	100
	CONCENTRACIÓN EN PORCENTAJE POR VOLUMEN (100% POR WT =1.000.000 PPM)									
	10		20	30	40	50	60	70	80	90
Beverage y Culbertson (1694)	Alto	Extremo	Hiperconcentrados				Flujo de Lodos			
Costa (1984)	Inundación		Hiperconcentrados			Flujo de Escombros				
O'Brien y Julien (1985) usando National Research Council (1982)	Inundación		Avenida de lodos		Flujo de lodos		Deslizamiento			
Takahashi (1981)	Flujo de agua			Flujo de escombros o granular					Caídas, deslizamientos, reptación, flujos piroclásticos	
Investigadores Chinos (Fan y Dou, 1981)			Flujo de escombros o de lodos							
		Flujo Hiperconcentrados								
	Carga de sedimentos									
Pierson y Costa (1987)	FLUJO DE CAUCES: Normal: Hiperconcentrados		FLUJO DE BARRO: (Torrentes de escombros, flujo de escombros y de lodos)				FLUJO GRANULAR: Avalanchas de escombros, flujos de tierras, reptación			Rápido Lento

Tabla 2 Clasificación de flujos hiperconcentrados
Fuente: (García, 2006)

La clasificación propuesta por (García, 2006) (Ver Tabla 2) hace una distinción entre los diferentes tipos de flujo usando una matriz bidimensional basada en la velocidad media del flujo y la concentración de sedimentos. Se contempla que la respuesta reológica de una mezcla de agua – sedimentos para una tasa de deformación dada, es gobernada principalmente por la concentración de sedimentos (o contenido de agua), y es afectada en menor proporción por la distribución de tamaños de los sólidos y las propiedades químicas de las partículas.

Para un área geográfica dada, la distribución del tamaño de partículas y las propiedades químicas podría tender a ser más constantes que la concentración de sedimentos, por esta razón la concentración de sedimentos es considerado un parámetro más sensitivo y se eligió cómo la segunda variable para la matriz de clasificación (Figura 1). En el eje horizontal no se muestran

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

números para la concentración de sedimentos excepto para agua pura (0%) y sedimentos secos (100%), debido que los valores exactos dependen de la composición granulométrica y la composición físico – química de las partículas. Las fronteras en la figura de clasificación son sólo aproximadas y también tienen un alto grado de inferencia, debido que las mediciones en campo son muy pocas, entre más registros sean llevados a cabo, las fronteras serán mejor definidas. En este sistema de clasificación según la apariencia del flujo en campo se puede dividir en dos grupos:

Flujo Aparentemente Líquido: Cuando se observa esta condición en campo, dos tipos de flujo con concentraciones relativamente pequeñas de sedimentos son distinguidos en el sistema de clasificación:

1. **Flujo Canalizado (Streamflow):** Definido como el flujo normal de agua con una concentración de sólidos lo suficientemente pequeña para que su comportamiento no sea afectado por la presencia de sedimentos en transporte, este se caracteriza por ser un fluido Newtoniano.
2. **Flujo Hiperconcentrado (Hiperconcentrated Streamflow):** A medida que la concentración de partículas suspendidas aumenta, se alcanza un punto en el cual dichas partículas empiezan a interactuar, cuando la interacción de partículas ocurre el fluido adquiere una resistencia a la cedencia y empieza a comportarse como un fluido no – newtoniano.
3. **Flujo de Fluidos Plásticos:** En este sistema son incluidos dos tipos de flujos con comportamiento plástico:
 - **Flujo de Lodos (Slurry Flow o Mudflow):** A medida que la concentración de sedimentos aumenta en su mezcla, la resistencia a la cedencia se incrementa lentamente hasta se alcanza un punto (frontera B, **Figura 2**) después de este umbral la resistencia incrementa rápidamente; la transición que marca este umbral puede ser identificada por la línea continua de la **Figura 2**, allí se observa que el cambio en la tasa de incremento en la resistencia a la cedencia es más abrupto en mezclas gruesas que en mezclas finas, este incremento puede ser atribuido al principio de fricción interna, y a las fuerzas electroquímicas que aún pueden dominar en las mezclas ricas en arcilla. En este aparte un flujo de lodos se define como una mezcla de agua – sedimentos que tiene la suficiente resistencia a la cedencia para exhibir un comportamiento de flujo plástico en el campo (esto es formar frentes lobulados y pendientes, diques laterales y llevar partículas tamaño grava o bloques en suspensión); como tal la mezcla está saturada, el agua en los poros es atrapada en algún grado por la estructura de los granos, y el índice de

liquidez (en mezclas de grano fino la relación de humedad natural con el límite líquido del sedimento) es mayor que 1.0. Cuando el contenido de limo y arcilla de la mezcla es relativamente alto o si las tasas de corte, el diámetro medio de granos, la densidad de los granos y contenido de agua son relativamente bajos, las fuerzas viscosas pueden dominar el comportamiento del flujo. Bajo esas condiciones el modelo plástico Bingham es elegido frecuentemente como la ecuación constitutiva para predecir el comportamiento del flujo; cuando las fuerzas viscosas dominan al flujo se le conoce como flujo de lodos viscosos (viscous slurry flow). Cuando la viscosidad del fluido en los poros es relativamente baja y las tasas de corte, diámetro medio de granos, densidad y contenido de agua son altas, el efecto dominante de las fuerzas viscosas es reemplazado por fuerzas inerciales donde el momentum es transferido a través de la colisión de partículas; el flujo en el cual éste mecanismo es dominante se conoce como flujo de lodos inercial (inertial slurry flow), en este caso el modelo del fluido dilatante puede ser usado para modelar el comportamiento.

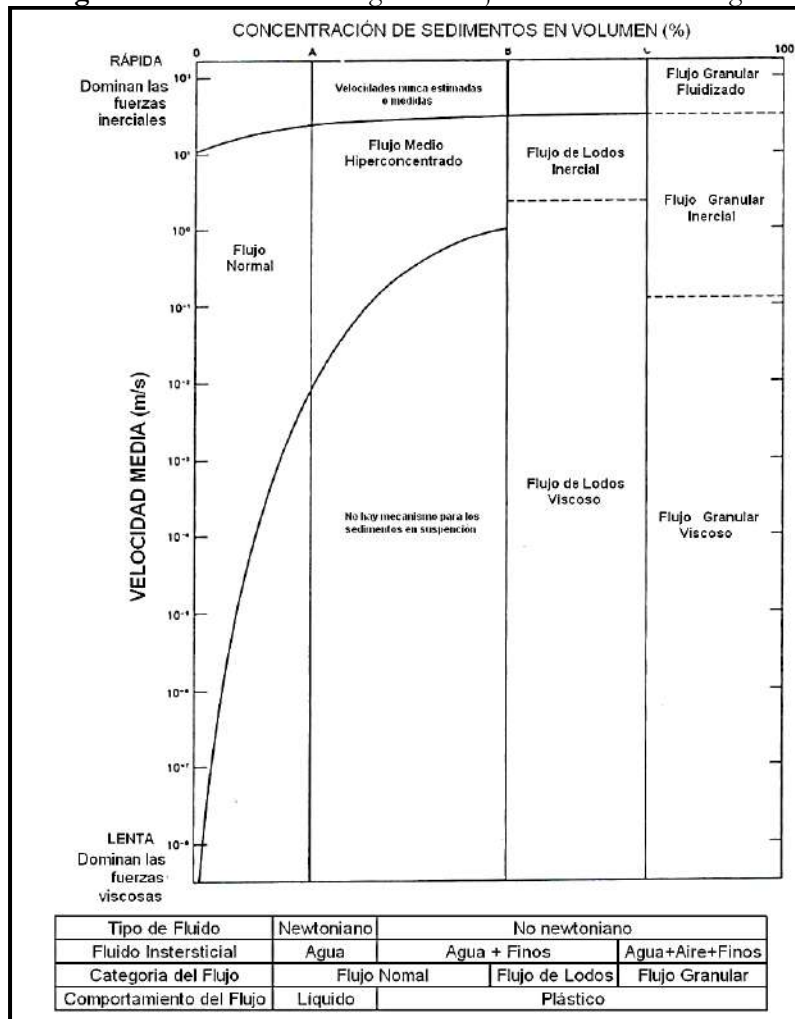
- **Flujo Granular (Granular Flow):** El flujo granular comienza cuando la concentración de sedimentos del material se incrementa hasta el punto donde las presiones de agua de los poros no están más tiempo en exceso de presiones hidrostáticas (Frontera C, **Figura 2**), y el peso total de la masa granular que está fluyendo es soportada por el contacto grano a grano o por colisiones. Un flujo granular se define cuando la concentración de sólidos es alta, la interacción directa entre granos individuales es frecuente y el comportamiento volumétrico es gobernado enormemente por las fuerzas entre partículas, llámense fricción o colisión. Una clasificación general de acuerdo con (Savage, 1984) describe tres clases:

- ✓ **Macroviscoso:** flujo en el cual la concentración de partículas y las tasas de deformación son pequeñas y el fluido intersticial juega un rol importante para determinar la naturaleza viscosa del flujo. (Davies, 1988) consideró que ciertos tipos de flujos de escombros caen en esta categoría de flujos granulares.
- ✓ **Causi – estático:** Se presenta cuando hay suficientes esfuerzos aplicados a la masa granular de manera que las cadenas friccionantes son separadas por lo que la masa empieza a fluir. Esta deformación es lenta y es

mantenida durante un largo periodo de tiempo.

- ✓ **Inercia granular:** Se presenta cuando los esfuerzos de deformación son altos, tal que la transferencia de momentum es predominante que supera la interacción grano a grano. Existen versiones (Bagnold, 1954) (Takahashi, 1981) (Blijenberg, 2007) que consideran que los flujos de escombros son un flujo inercial. Las avalanchas de escombros y los deslizamientos de escombros están definidos en el régimen inercial.

Figura 2 Clasificación reológica de flujos de sedimentos – agua



Fuente: (Pierson & Costa, 1987)

(Meunier, 1991) realiza otra clasificación para el caso de flujos con una alta concentración y con pendientes que va desde los 30% a los 50% marcando el inicio de la formación de las avenidas torrenciales. La hidráulica fluvial como disciplina caería dentro del rango de pendientes naturales menores que el 2%. Importante y práctico es saber que las fórmulas clásicas de hidráulica fluvial podrían ser usadas con buena aproximación hasta una pendiente natural que va desde los 7% al 10% (véase Figura 3).

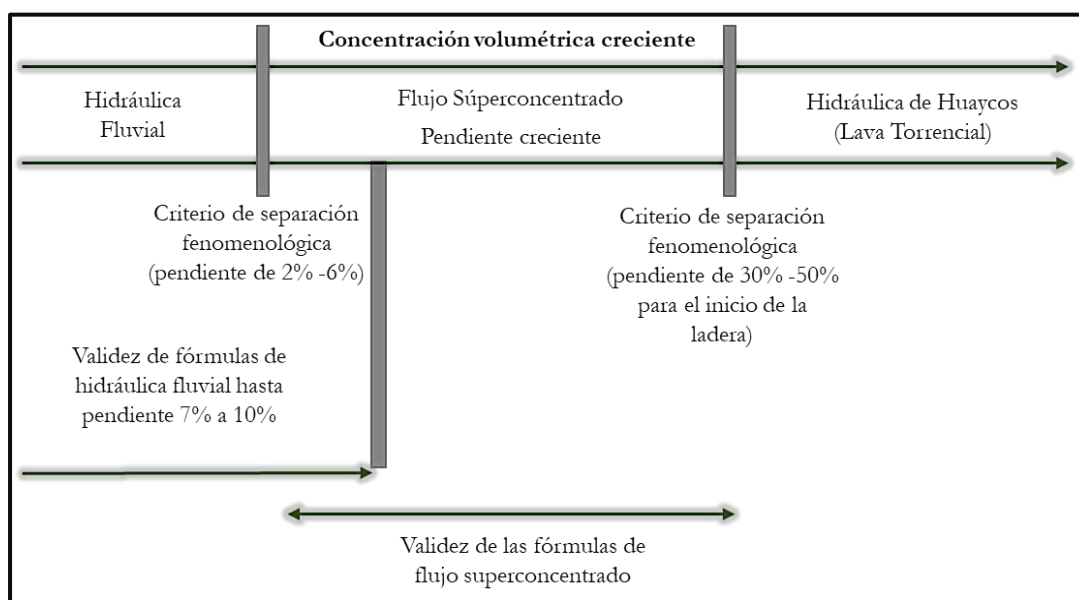


Figura 3 Clasificación de flujos Según Meunier (1991)

Fuente: (Meunier, 1991)

(Costa, 1984) casi al igual que Meunier diferencia 3 tipos de flujo: avenidas de agua (water flood), flujos hiperconcentrados y flujos de detritos (debris flow). Esta tabla es sumamente práctica para identificar estos tipos de flujo tomando en cuenta la concentración. Costa clasifica también los flujos desde el punto de vista reológico: Las fuerzas internas del flujo, la granulometría y el comportamiento laminar o turbulento llegan a ser tomados en cuenta también para caracterizar los diferentes tipos de flujo (véase Tabla 3 y Tabla 4). Las avenidas torrenciales según este autor tienen un comportamiento laminar.

Tabla 3 Clasificación según Costa (1988)

Flujo	Concentración de sedimentos	Densidad de los sólidos (g/cm ³)	(dn/cm ²)	Tipo de Fluido
Avenida de Agua	1-40% en peso 0.4-20% en volumen	1.01-1.33	0-100	Newtoniano

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

Flujo	Concentración de sedimentos	Densidad de los sólidos (g/cm ³)	(dn/cm ²)	Tipo de Fluido
Flujo hiperconcentrado	40-70% en peso 20-47 en volumen	1.33-1.80	100-400	No Newtoniano
Flujo de escombros	70-90% en peso 47-775 en volumen	1.80 -2.30	>400	Viscoplástico

Fuente: (Costa, 1984)

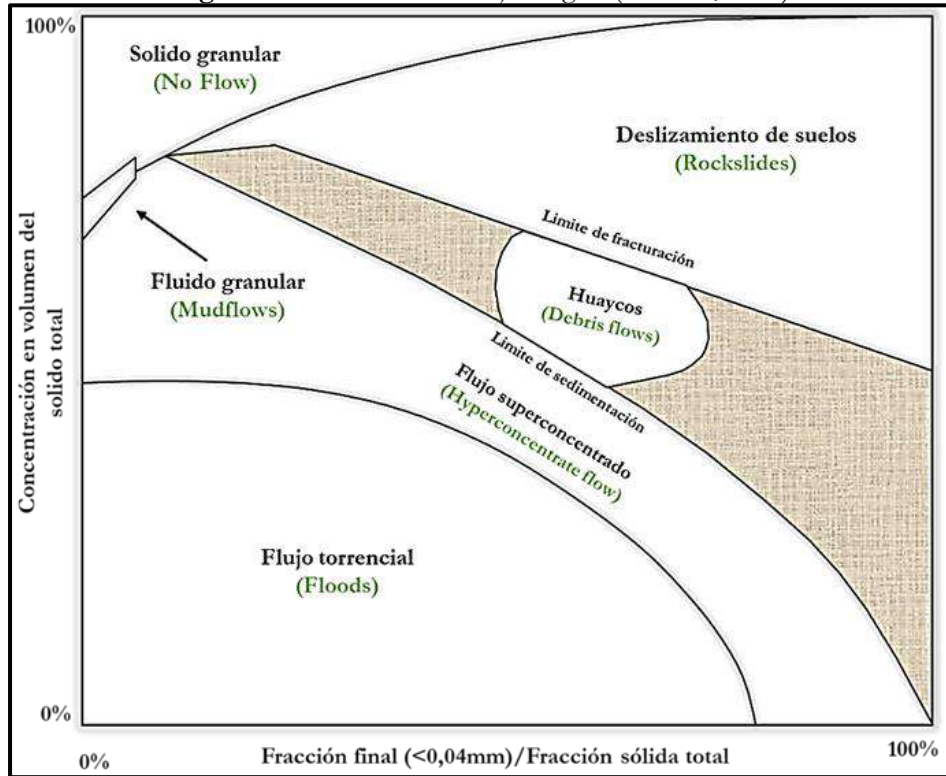
Tabla 4 Clasificación según Costa (1988)

Flujo	Mayor mecanismo de soporte de los sedimentos	Viscosidad (poise)	Perfil de concentración de sedimentos	Tipo de Flujo predominante
Avenida de Agua	Fuerzas electroclástica, turbulencia	0.01-20	No Uniforme	Turbulento
Flujo hiperconcentrado	Empuje, esfuerzo, dispersivo, turbulencia	20-200	No Uniforme a Uniforme	Turbulento a Laminar
Flujo de escombros	Cohesión, empuje, esfuerzo dispersivo, soporte estructural	>> 20	Uniforme	Laminar

Fuente: (Costa, 1984)

El investigador francés (Coussot, 1997) clasifica las avenidas torrenciales utilizando como parámetros la concentración y la granulometría del material sólido (ver Figura 4). El flujo torrencial (flujo hiperconcentrado), así como también los deslizamientos de suelos llegan a ser contemplados dentro de esta clasificación de flujos.

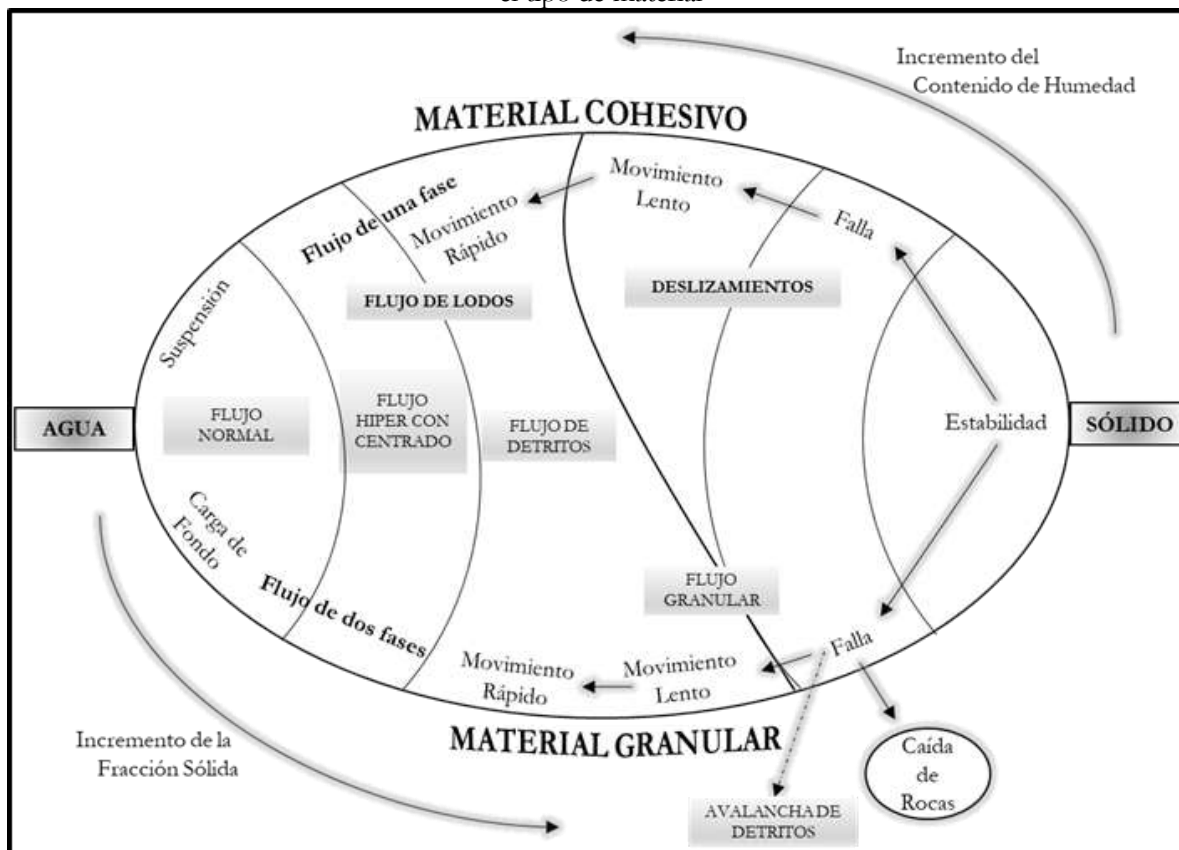
Figura 4 Clasificación de flujos según (Coussot, 1997)



Fuente: (Coussot, 1997)

(Coussot, 1997) colocan a los flujos de detritos en un punto intermedio entre los deslizamientos y los flujos hiperconcentrados (carga de fondo intensa) debido a la transición de características bien definidas como celeridad, naturaleza y tipo de flujo; por ello a partir de un análisis donde comparan características de campo de los principales tipos de flujo y movimientos en masa en taludes de alta pendiente, proponen una clasificación general de movimientos en masa como una función de la fracción sólida y del tipo de material, esta clasificación (Figura 5) se presenta en forma de elipse donde los límites entre los diferentes movimientos en masa siendo sólo conceptuales y cualitativos, de hecho, ellos pueden variar ampliamente dependiendo de la frontera específica, condiciones iniciales y propiedades físicas de los materiales.

Figura 5 Clasificación de movimientos en masa sobre taludes como una función de la fracción sólida y el tipo de material



Fuente: (Coussot, 1997)

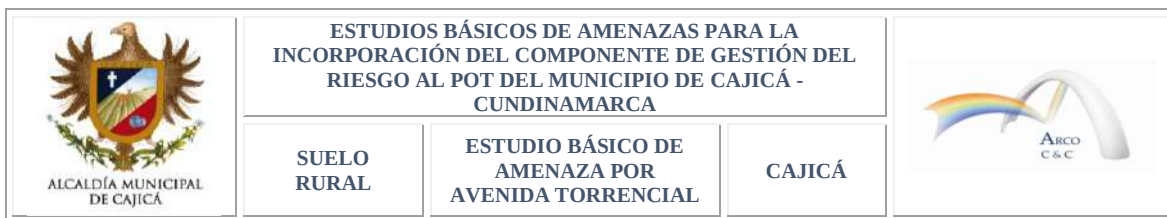
La clasificación de (O'Brien & Julien, 1985) de los flujos hiperconcentrados son clasificados de acuerdo con las propiedades de los fluidos, las cuales, son controladas por las concentraciones de sedimentos, a partir de esto los flujos son clasificados en inundaciones (wáterflood), avenidas de lodos (mudfloods) y deslizamientos (landslides). En el presente documento se ha empleado el sistema de clasificación propuesto por (NRC, 1982), (O'Brien J. , 2006) el cual, clasifica los flujos hiperconcentrados como avenidas de lodos, flujos de lodos y flujos de escombros, como se presenta en la Tabla 5.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

Tabla 5 Comportamiento del flujo de lodo como una acción de Cv.

Descripción del tipo de flujo	Concentración de sedimentos		Características del flujo
	En volumen	En peso	
Deslizamientos	0,65 – 0,80	0,83 – 0,91	No hay flujo; falla por deslizamiento de bloques.
	0,55 – 0,65	0,76 – 0,83	Derrumbe de bloques con deformación interna durante el deslizamiento, movimiento paulatino del terreno antes de fallar.
Flujos de lodo (<i>Mudflow</i>)	0,48 – 0,55	0,72 – 0,7	Flujo evidente; deslizamiento lento sostenido por el flujo de lodo; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo; no se expande en la superficie.
	0,45 – 0,48	0,69 – 0,72	Flujo se extiende sobre la superficie; flujo cohesivo; algo de mezcla.
Avenida de lodo (<i>Mud Flood</i>)	0,40 – 0,45	0,65 – 0,69	El flujo de mezcla fácilmente; muestra las propiedades fluidas en la deformación; distribuido en la superficie horizontal, pero mantiene una superficie fluida inclinada; partículas grandes se depositan (peñones); aparecen ondas, pero se disipan rápidamente.
	0,35 – 0,40	0,59 – 0,65	Deposición marcada de gravas y cantos rodados; se expande casi completamente sobre la superficie líquida con dos fases del fluido; las olas viajan en la superficie.
	0,30 – 0,35	0,54 – 0,59	Separación del agua en la superficie; las olas viajan fácilmente; la mayoría de las arenas y gravas se han sedimentado y se mueven como arrastre de fondo.
	0,20 – 0,30	0,41 – 0,54	Se distinguen claramente las olas y ondas; todas las partículas descansando en el fondo en condición inmóvil.
Inundación de agua	<0,20	<0,41	Inundación de agua con carga suspendida convencional y arrastre de fondo.

Fuente: (O'Brien J., 2006), *Manual FLO-2D*



Los tipos de flujos para el modelamiento FLO-2D son descritos a continuación:

Avenidas de lodos (Mudfloods): Típicamente son hiperconcentraciones de partículas no cohesivas (principalmente arenas). Ellas muestran un comportamiento muy fluido para concentraciones de 20% en volumen hasta 45% del flujo total. Desde el punto de vista hidrodinámico, estos tipos de flujos son turbulentos y la resistencia al flujo depende de las condiciones de rugosidad del canal de flujo. Estos tipos de flujos no son capaces de soportar esfuerzos sin deformarse y no muestran la existencia de esfuerzos de cedencia. Los sedimentos que componen la mezcla se encuentran uniformemente distribuidos a través de la profundidad del flujo, debido que la viscosidad del fluido intersticial reduce la velocidad de sedimentación de las partículas.

Flujos de lodos (Mudflows): Están caracterizados por una concentración suficientemente alta de limos y arcillas (tamaños de sedimentos menores a 0,0625 mm) capaces de cambiar las propiedades de la mezcla de fluido. Estos tipos de flujos tienen un comportamiento altamente viscoso. Basados en resultados de laboratorio, las concentraciones volumétricas de sedimentos de un flujo de lodos los cuales se aproximan a un rango de $45\% < C_v < 55\%$. Este tipo de flujos exhiben altas viscosidades y esfuerzos cortantes, además pueden viajar grandes distancias en zonas poco empinadas a pequeñas velocidades, dejan a su paso depósitos o abanicos de material.

Flujos de escombros (Debris-flows): Son mezclas de materiales granulares (no cohesivos), incluyen cantos y leña, los cuales se mueven como fluidos viscosos. De acuerdo con (Rodine & Johnson, 1976) este tipo de flujos tienen contenidos de arcillas en cantidades menores a las de un flujo de lodos, en estos el intercambio de momento ocurre exclusivamente por el choque entre partículas. Los flujos de escombros son mucho menos fluidos que las avenidas de lodos. La viscosidad de la matriz de fluido es comparativamente menor a la concentración de partículas de sedimentos finos.

3.1.3. Características morfológicas de los depósitos de avenidas torrenciales

Las investigaciones realizadas respecto a los depósitos de flujo de escombros y de revisiones de varios flujos de escombros activos en el resto del mundo, señalan que los típicos flujos son ondas grandes de materiales sólidos y fluidos mezclados, que se transportan firmemente a través de un canal por medio de ondas pequeñas sobrepuestas viajando a altas velocidades.

Cada brazo o lóbulo de un depósito de flujo de escombros comprende un frente, una parte media y otra lateral (ver Figura 6). Los depósitos laterales están a los lados del cauce, o adyacentes al

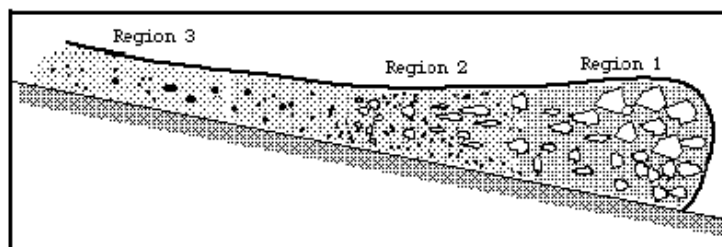
La sección transversal (a) de la Figura 6 muestra un frente en su máxima extensión lateral, correspondiente a la amplitud máxima de la onda. El frente anterior se observa en la sección transversal (b), donde se aprecia los depósitos laterales en el caso que el flujo escombros se detenga. Aguas arriba del canal los depósitos laterales antiguos formados por el frente de la avenida torrencial son ahora sobrellenados por la sucesión de ondas futuras, como se observa en la sección transversal (c). Para el caso de la sección transversal (d), cada frente y onda sucesiva que pasa origina que la superficie del flujo de escombros se eleve y ensanche localmente, definiendo un estrato de escombros en los depósitos laterales.

Figure 1 illustrates the plan and longitudinal sections of a meandering river channel. The plan view shows a meandering channel with 'WAVES' indicated by arrows. The longitudinal section shows the channel bed with 'SHOUL' (shoulder) and 'LOBE' labels. To the right, three cross-sections (a, b, c) show the channel bed profile with 'LATERAL DEPOSITS' and 'MEDIAL DEPOSITS' labeled.

Los depósitos típicos de flujo de escombros contienen piedras grandes que se encuentran espacialmente distribuidos al azar dentro de una fina matriz suelta, formando un estrato del depósito de flujo de escombros. Los estratos sucesivos dentro de los lóbulos formados durante la actividad de flujo de escombros generalmente tienen los granos progresivamente más finos. Algunos depósitos se muestran, con escombros más gruesos en la base y escombros más finos arriba, pero generalmente éste es un resultado de superposición y mezcla parcial de dos o más estratos individuales desplazados sucesivamente. La composición litológica de las piedras en los flujos de escombros es determinada por la composición de rocas disponibles en las áreas de la fuente, de cantos rodados y bloques en el canal principal por donde los escombros fluyen. En el caso que un depósito el cual se encuentra compuesto por estratos sucesivos de la misma litología, si éstos difieren uno de otro, entonces el depósito probablemente sea de origen de flujo de escombros. El perfil característico de una oleada de escombros comprende tres zonas específicas,

como se muestra en la Figura 7.

Figura 7 Composición de una oleada de flujos de escombros



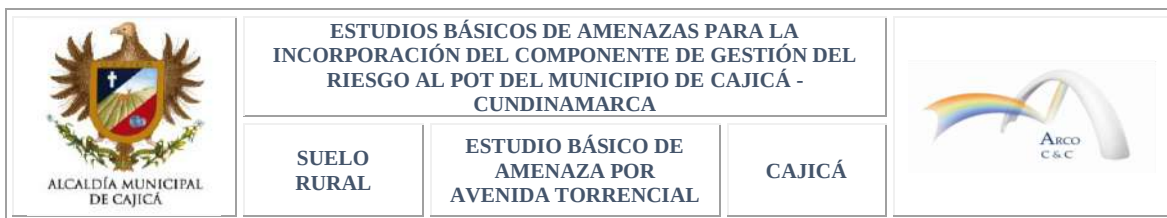
Fuente: (Takahashi, 1981)

La primera región es el frente que está hecho de fragmentos de rocas altamente desordenados que parecen hincharse hacia el exterior. (Takahashi, 1981) sugiere que esta protuberancia es formada porque el frente es cargado con partículas grandes y tiende a bajar la velocidad y aumentar de volumen. La longitud de esta primera región varía de algunos metros a algunas decenas de metros. La altura depende de la pendiente del canal o el abanico en el que los escombros viajan. La segunda región es una región de agua enlodada, altamente turbulenta con guijarros de diversos tamaños cargados adelante. La región final es la región de agua enlodado con arena y guijarros con concentraciones altas de barro.

3.1.4. Características de los flujos de lodo, detritos y escombros

Estas son características típicas de los flujos de detritos obtenidas de algunos registros y que fueron citadas en (Takahashi, 1981).

Las velocidades de los flujos de detritos varían ampliamente debido no solo a las características de los detritos, tales como concentración, distribución de tamaños de grano, sino también por la forma del curso de tránsito (ancho, pendiente, etc.). Las velocidades observadas están entre 0.5 m/s y 20 m/s. Las densidades volumétricas también varían caso a caso, han sido reportadas mediciones desde 1400 Kg/m³ hasta 2530 Kg/m³. Estas densidades son equivalentes a una concentración en volumen de material sólido desde un 25% hasta un 70 u 80%, respectivamente. Aunque los flujos de escombros ocurren en pendientes pronunciadas, es importante notar que este flujo tiene la habilidad de fluir en pendientes muy suaves. Algunas pendientes observadas varían de 2% a 32% (Costa, 1984) y con un rango de ángulos de deposición entre 10° y 14° para flujos abiertos o no confinados y de 8° a 12° para flujos canalizados o confinados.



Este tipo de flujos produce enormes fuerzas de impacto sobre obstáculos en su camino; sin embargo, después de que el flujo sale y se expande sobre un terreno más plano su poder se pierde con rapidez, esto probablemente sugiere que el flujo es tenue y lento en el momento de su detención.

Cuando el flujo se ha establecido, la masa se desplaza sobre el canal natural o sobre uno formado por ella misma, produciendo ruidos intensos debido al choque entre los clastos y de éstos con las paredes del cauce, produciendo en ocasiones chispas por fricción contra los lechos rocosos. En esta etapa, toma la apariencia de concreto fresco, pero al alcanzar el reposo se seca transformándose en un concreto pobre con gran cantidad de grietas de desecación.

La erosividad de los flujos de detritos en el área de origen es severa, se puede ver que en el fondo de la garganta es completamente pulido hasta el lecho rocoso, pero cuando el flujo está totalmente cargado tiene poco efecto erosivo, esto se puede ver en pavimentos de carreteras los cuales no han sido averiados por el paso del flujo.

3.1.5. Composición de los flujos de lodos, detritos y escombros

Muy a menudo los flujos de escombros son relacionados con el concreto fresco. Incluso aunque la apariencia es similar al mortero, la composición de los flujos de escombros varía enormemente debido a que éste es un flujo de múltiples fases de granos desordenados con aire y agua mezclados entre sí. El tamaño de partículas varía desde materiales finos hasta cantos rodados sostenidos (suspendidos) en una matriz viscosa. Por lo tanto, entre los principales componentes tenemos: el agua, la matriz fina (partículas de arcilla) y los granos gruesos. A continuación, mostramos una breve descripción sobre cada uno de ellos.

Agua: como componente, es el principal agente de transporte para los flujos de escombros debido a su propiedad de contener a las partículas gruesas y finas, así como envolver a todo el material que se presente en su camino. La densidad del agua (ρ_w) es muy cercana a 1000 Kg/m³.

Partículas de Arcilla: Las partículas de arcilla se originan de la desintegración física o mecánica de las rocas seguida por una transformación química. Existen varios tipos de arcilla como: caolinitas, illitas, montomorillonitas, etc., asociadas con diferentes combinaciones. La densidad de las partículas de arcilla es aproximadamente a 2650 Kg/m³. La consistencia de la arcilla seca es alta y cuando se encuentra húmeda es baja. La plasticidad del suelo depende del contenido de arcilla; a mayor cantidad de arcilla, mayor será la plasticidad. Por lo tanto, la presencia de gran cantidad de arcilla define a un tipo de flujo de lodo.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

Granos: El grupo de granos incluye varios tipos de partículas consistiendo en mineral inerte y fragmentos de rocas el cual se diferencia apenas por sus tamaños. Estos granos son formados por la desintegración física o mecánica de las rocas, pero conservan la estructura de sus rocas madres. Sus densidades generalmente varían entre los 2650 Kg/m³ y 2750 Kg/m³.

Dependiendo de la fuente de escombros, el flujo podría ser un flujo de lodo con predominante material fino o podría presentarse como fragmentos de rocas dispersos en una matriz de agua y finos.

3.1.6. Características de las cuencas con comportamiento torrencial

3.1.6.1. Índice de Melton

El índice del Melton se usa para diferenciar cuencas, basándose en la dinámica de sedimentos. Es decir, mediante el uso de un modelo digital de elevación, el índice de Melton ayuda a diferenciar entre cuencas capaces de producir flujos de detritos y las cuencas que solo producen crecida sin sedimentos, ya que muestra el potencial de transporte de material.

El índice puede ser calculado mediante la siguiente formula:

$$\text{Índice de Melton} = (H_{max} - H_{min}) * S^{-0.5}$$

Donde H_{max} y H_{min} son la cota de altura máxima y mínima de la microcuenca y S, es el área de la microcuenca.

Cabe resaltar que el índice de Melton debe ser calibrado para condiciones específicas (estudios detallados). Sin embargo, en este estudio los rangos de parámetros fueron aplicados de manera estimativa para las microcuencas de análisis teniendo clara las limitaciones debido a la falta de calibración de estos. Este índice de Melton junto con la longitud de la cuenca permite diferenciar entre cuencas susceptibles a flujos y crecientes de detritos respecto a aquellas susceptibles a inundación, siendo las primeras las que potencialmente experimenten eventos torrenciales. Esta última afirmación se permite considerar que a mayor sea el valor del índice, la zona tiene una mayor tendencia a la generación de eventos más violentos y espontáneos.

3.1.6.2. Rangos de Wilford

Es una clasificación en donde se identifica dos parámetros apropiados para diferenciar la

posibilidad de ocurrencia en una cuenca de flujos de detritos, creciente de detritos e inundaciones, este parámetro corresponde a la longitud de la corriente y al mencionado número de Melton. Los parámetros permiten identificar el tipo de flujo que se presentará en la mayoría de las cuencas.

Los rangos de valores encontrados por (Wilford, Sakals, Innes, & Sidle, 2004) para la identificación de los posibles procesos en el área de las cuencas se presentan en la Figura 6.

Tabla 6 Identificación de los procesos hidrogeomorfológicos según los parámetros de Melton y la longitud de la cuenca.

Variables	Inundaciones	Crecientes de Detritos	Flujo de Detritos
Parámetro de Melton y Longitud de la cuenca	Melton <0,3	Melton 0,3 - 0,6 Melton >0,6 y longitud >2,7 km	Melton >0,6 y Longitud <2,7 km
Parámetro de Melton y Proporción de relieve	Melton <0,3	Melton 0,3 - 0,77 Melton >0,77 y relieve <0,42	Melton >0,77 y relieve >0,42
B3040 y Longitud de la cuenca	Longitud >9 km o si Longitud <9km, entonces B3040<4,5%	B3040 4,5% - 18% y longitud <9km B3040>18% y longitud >2,7 km -9km	B3040> 18% y longitud <2,7 km
Proporción de relieve y Longitud de la cuenca	Relieve <0,15	Relieve 0,15 - 0,35 Relieve >0,35 entonces longitud 2,7 km	Relieve >0,35 y longitud <2,7 km
Parámetro de Melton y B3040	Melton <0,3	Melton 0,3 - 0,64 Melton <0,64 entonces B3040<31,5%	Melton >0,64 B3040>31,5%
Proporción de relieve y B3040	Relieve <0,15	Relieve 0,15 - 0,35 Relieve >0,35 entonces B3040<34%	Relieve >0,35 y B3040> 34%

Fuente: (Wilford, Sakals, Innes, & Sidle, 2004).

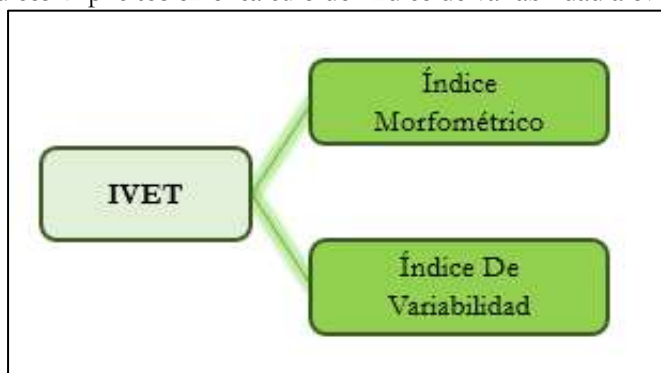
3.1.6.3. Índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET)

El índice en cuestión clasifica las unidades hidrográficas de acuerdo con su mayor o menor tendencia a la presencia de procesos torrenciales, metódicamente el índice se fundamenta en un análisis de las características fisiográficas e hidrológicas de la unidad estudiada, respecto a las

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

cuales define la respuesta rápida y fuerte a lluvias de alta intensidad y corta duración, situación que genera escenarios frecuentes de avenidas torrenciales. El IVET es el resultado de una relación entre los parámetros índice de variabilidad (IV) e índice morfométrico (IM) (Diagrama 1) que se expresa a través de cinco categorías que van desde muy bajas hasta muy altas. Las variables se integran mediante una matriz de decisión.

Diagrama 1 Índices implícitos en el cálculo del índice de variabilidad a eventos torrenciales.



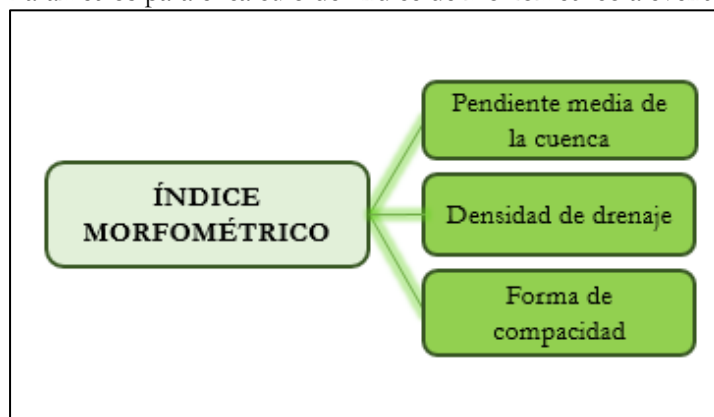
Fuente: (IDEAM, 2013)

A continuación, se realiza una descripción de la definición, método de cálculo y análisis de los resultados de los índices IM y IV basado en el Diagrama 1 que permiten calcular el IVET.

3.1.6.3.1. Índice Morfométrico (IM)

El índice morfométrico define de manera general características particulares que permite evaluar la respuesta de los torrentes, desde lentas hasta muy rápidas a violentas para generar crecidas torrenciales dadas sus características morfométricas de pendiente, densidad de drenaje y forma (ver Diagrama 2). La relación de los parámetros que conforman el índice son indicativos de la forma como se concentra la escorrentía, la oportunidad de infiltración, la velocidad y capacidad de arrastre de sedimentos en una cuenca, la eficiencia y rapidez de la escorrentía y de los sedimentos para salir de la cuenca luego de un evento de precipitación (Rivas & Soto, 2009). La unidad de medida del indicador es cualitativa y se expresa en términos de muy alta, alta, media, baja y muy baja.

Diagrama 2 Parámetros para el cálculo del índice de morfométrico a eventos torrenciales.



Fuente: (IDEAM, 2013)

Una vez se determinan los parámetros morfométricos de la cuenca, el índice IM se obtiene mediante la interpretación de las Tabla 7 y

Tabla 8 . Es decir, se realiza una categorización de las variables morfométricas según la metodología (IDEAM, 2013) (Tabla 7), dicho resultado se integra y se asigna una categoría para IM dada la

Tabla 7 Relaciones para categorías de índices morfométricos.

Índices Morfométricos	CATEGORÍAS				
	1	2	3	4	5
Densidad de drenaje	< 1,5	1,5001 – 2,0	2,001 – 2,5	2,5001 – 3	>3
	Muy Baja	Baja	Moderada	Moderadamente Alta	Alta
Pendiente Media de la cuenca	<12	12,01 – 20	20,01 – 35	35,01 – 50	50,01 – 75
	Baja	Ondulada	Media	Fuerte	Muy Fuerte
Coeficiente de Gravelius	>1,625	1,501 – 1,625	1,376 – 1,500	1,251 – 1,375	1,126 – 1,250
	Oval-Oblonga a Rectangular-Oblonga	Oval-Redonda a Oval-Oblonga		Casi Redonda a Oval-Redonda	

Fuente: (IDEAM, 2013), *Ajustada por Arco Construcciones & Consultorías (2021)*

Tabla 8 Relaciones entre variables para los índices morfométricos y su categorización.

		Pendiente media de la cuenca						
		1	2	3	4	5		
Densidad de drenaje	1	111	121	131	141	151	1	Coeficiente de compacidad
		112	122	132	142	152	2	
		113	123	133	143	153	3	
		114	124	134	144	154	4	
		115	125	135	145	155	5	
	2	211	212	231	241	251	1	
		212	222	232	242	252	2	
		213	223	233	243	253	3	
		214	224	234	244	254	4	
		215	225	235	245	255	5	
	3	311	321	331	341	351	1	
		312	322	332	342	352	2	
		313	323	333	343	353	3	
		314	324	334	344	354	4	
		315	325	335	345	355	5	
	4	411	421	431	441	451	1	
		412	422	432	442	452	2	
		413	423	433	443	453	3	
		414	424	434	444	454	4	
		415	425	435	445	455	5	
	5	511	521	531	541	551	1	
		512	522	532	542	552	2	
		513	523	533	543	553	3	
		514	524	534	544	554	4	
		515	525	535	545	555	5	

	Muy baja
	Baja
	Media
	Alta
	Muy Alta

Fuente: (Rivas & Soto, 2009) (IDEAM, 2013)

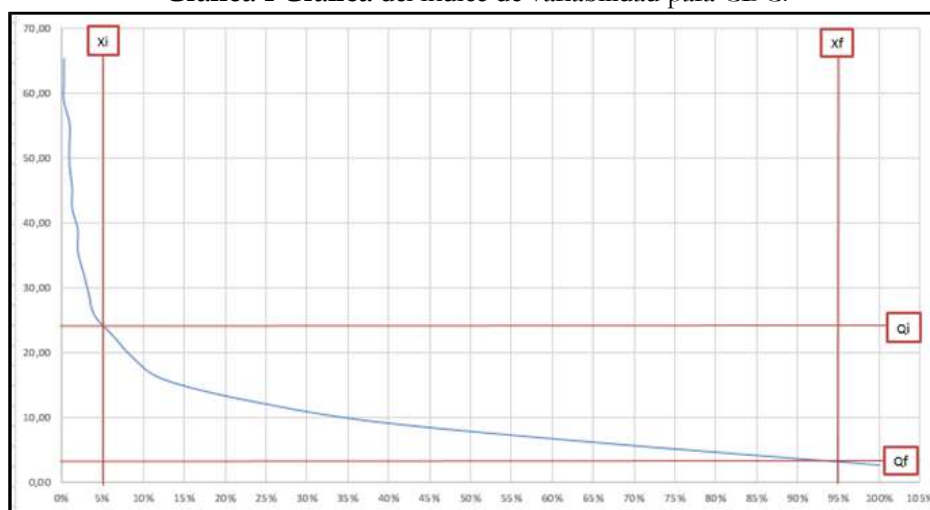
3.1.6.3.2. Índice de Variabilidad (IV)

El índice de variabilidad IV muestra el comportamiento de los caudales en una determinada cuenca definiendo una zona torrencial como aquella que presenta una mayor variabilidad, es decir, donde existen grandes diferencias entre los caudales mínimos y máximos reportados o estimados. Se calcula a través de la siguiente ecuación:

$$IV = \frac{\log Q_i - \log Q_f}{\log X_i - \log X_f}$$

Donde, Q_i y Q_f son los caudales tomados de la curva de duración de caudales y X_i y X_f son los porcentajes de tiempo en que se exceden los caudales Q_i y Q_f . Los valores del caudal se obtienen mediante las curvas duración caudal (CDC) como se evidencia en la Gráfica 1.

Gráfica 1 Grafica del índice de variabilidad para CDC.



Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

Como se observó el cálculo del índice de variabilidad se realiza a través de valores obtenidos de la curva de duración de caudales (CDC); actualmente el municipio no cuenta con instrumentación necesaria para el cálculo directo de dicha curva, ya que no posee registros históricos de caudal en cada uno de los sitios de interés, por lo que se hace necesario la implementación de curvas de duración caudal sintéticas para obtener caudales medios a partir de información hidroclimatológica y morfométrica disponible.

3.1.6.3.2.1. Curvas Duración Caudal

Las curvas de duración caudal (CDC) representan la distribución de ocurrencias de los niveles de los caudales a lo largo de un determinado tiempo. La metodología implementada para la determinación de las CDC de las cuencas no instrumentadas delimitadas para el municipio de Cajicá consiste en la clasificación de cuencas hidrológicamente homogéneas que cuenten con instrumentación de caudales, parámetros con los que por medio de regresión lineal múltiple se

relacionarán con variables explicativas de tipo morfométrico y meteorológico. La ecuación tendrá la forma:

$$Q_x = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5 + a_6$$

Donde los valores de $a_1, \dots, a_5$ son los coeficientes de regresión múltiple, Q_x es la variable ajustada o estimada por la combinación lineal de los valores de $X_1, \dots, X_5$. Se obtendrá una expresión para cada uno de los periodos de ocurrencia de las cuales se evaluará por medio de un ajuste por mínimos cuadrados, tal como es el caso de la correlación simple, si la expresión es adecuada.

Con el objetivo de abarcar toda la zona de estudio se seleccionaron las siguientes estaciones limnimétricas como puntos de control para la delimitación de las cuencas hidrográficas instrumentadas: Puente Vargas [2120734], La Balsa Chía [2120742], Puente Calamar [2120925], Puente La Virginia [2120735], Puente Cacique [2120960] y Antes Acueducto Tabio [2120923]. Para cada una de las estaciones se tomaron los caudales diarios y se ajustaron a la distribución de probabilidad Normal para diferentes periodos de retorno con lo que se permite construir las CDC para diferentes periodos de ocurrencia. En la Tabla 9 se presentan los valores de los caudales ajustados, los cuales serán las variables principales o explicadas (Q_x).

Tabla 9 Caudales diarios medios ajustados distribución Normal.

Cuencas	Caudales reales (m³/s)													
	1	2.33	5	10	15	20	25	50	75	80	85	90	95	100
Antes Acued Tabio	0,01	0,01	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
La Balsa	6,69	12,68	18,01	21,55	23,31	24,47	25,32	27,75	29,06	29,26	29,45	29,63	29,79	29,95
Pte Cacique	0,06	2,36	4,41	5,77	6,45	6,90	7,22	8,16	8,66	8,74	8,81	8,88	8,94	9,00
Pte Calamar	0,38	1,32	2,16	2,72	3,00	3,18	3,31	3,70	3,91	3,94	3,97	3,99	4,02	4,05
Pte La Virginia	0,21	2,02	3,62	4,69	5,22	5,57	5,83	6,56	6,96	7,02	7,07	7,13	7,18	7,22
Pte Vargas	5,51	11,25	16,36	19,75	21,44	22,55	23,36	25,70	26,95	27,15	27,33	27,49	27,65	27,80

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

Las variables explicativas seleccionadas son: X_1 :: Área de la cuenca (km²), X_2 :: Longitud de cauce principal (m), X_3 :: pendiente media (°), X_4 :: Altura media (m) y X_5 :: Precipitación media (mm). En la Tabla 10 se presenta los valores obtenidos para cada una de las cuencas seleccionadas.

Tabla 10 Variables explicativas, regresión lineal múltiple ($X_1, \dots, X_5$).

Cuencas	X1	X2	X3	X4	X5
	ÁREA (km ²)	LON CP (m)	PM (°)	HM (m)	PMA (mm)
Antes Acued Tabio	0,73	2207,64	17,22	2810,20	1,49
La Balsa	2265,12	81003,80	8,90	2677,72	1,98
Pte Cacique	155,03	54788,73	11,68	2872,51	1,98
Pte Calamar	85,16	20637,30	13,46	3013,03	1,75
Pte La Virginia	123,08	59590,91	12,97	2942,74	2,06
Pte Vargas	1553,21	51567,04	9,30	2678,70	2,26

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

Los resultados de los coeficientes de regresión $a_1, \dots, a_5$ para cada variable explicativa se presenta en la Tabla 11, además se presentan los resultados de los coeficientes de correlación múltiple, coeficientes de determinación R^2 , error típico y valor de R^2 ajustado. Se tiene coeficiente de R^2 ajustado desde 0.88 hasta 0.96 con coeficientes de correlación múltiple mayores de 0.97, por lo que se consideran adecuados los resultados.

Tabla 11 Coeficientes de regresión ($a_1, \dots, a_5$).

Coeficientes de regresión $a_1, \dots, a_6$														
	1	2.33	5	10	15	20	25	50	75	80	85	90	95	100
a6	-7,89	3,51	13,75	20,54	23,93	26,15	27,79	32,47	34,98	35,36	35,72	36,06	36,38	36,68
X1	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
X2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
X3	0,09	-0,20	-0,45	-0,62	-0,71	-0,76	-0,80	-0,92	-0,98	-0,99	-1,00	-1,01	-1,01	-1,02
X4	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
X5	2,46	4,42	6,16	7,32	7,89	8,27	8,55	9,34	9,77	9,84	9,90	9,96	10,01	10,06
1*	0.99	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
2*	0.98	0.97	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
3*	0.96	0.92	0.90	0.89	0.89	0.89	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
4*	1.22	3.26	5.28	6.65	7.33	7.77	8.10	9.05	9.56	9.63	9.71	9.77	9.84	9.90

1* Coeficiente de correlación múltiple. 2* Coeficiente de determinación R^2 . 3* R^2 ajustado. 4* Error típico.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

Empleando los coeficientes de regresión $a_1, \dots, a_5$ y las variables dependientes $X_1, \dots, X_5$ de las cuencas instrumentadas (Tabla 12) en la ecuación $Q_x = a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_4 + a_5X_5 + a_6$ se tiene como resultado los siguientes valores de caudales para cada uno de los periodos de

	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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

ocurrencia.

Tabla 12 CDC obtenidas por regresión múltiple (Q_x).

Cuencas	Caudales ajustados regresión múltiple (m³/s)													
	1	2.33	5	10	15	20	25	50	75	80	85	90	95	100
Antes Acued Tabio	0,01	0,01	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
La Balsa	6,69	12,68	18,01	21,55	23,31	24,47	25,32	27,75	29,06	29,26	29,45	29,63	29,79	29,95
Pte Cacique	0,06	2,36	4,41	5,77	6,45	6,90	7,22	8,16	8,66	8,74	8,81	8,88	8,94	9,00
Pte Calamar	0,38	1,32	2,16	2,72	3,00	3,18	3,31	3,70	3,91	3,94	3,97	3,99	4,02	4,05
Pte La Virginia	0,21	2,02	3,62	4,69	5,22	5,57	5,83	6,56	6,96	7,02	7,07	7,13	7,18	7,22
Pte Vargas	5,51	11,25	16,36	19,75	21,44	22,55	23,36	25,70	26,95	27,15	27,33	27,49	27,65	27,80

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

Representando gráficamente las CDC generadas del ajuste a la distribución de probabilidad Normal con los caudales medios diarios y las CDC producto del ajuste de regresión múltiple, se evidencia el ajuste entre las curvas, validando los resultados con los que se ajustarán las cuencas no instrumentadas. A continuación, en la Ilustración 2 se presentan los resultados de las cuencas Pte Vargas, Pte La Virginia, La Balsa y Pte Cacique.

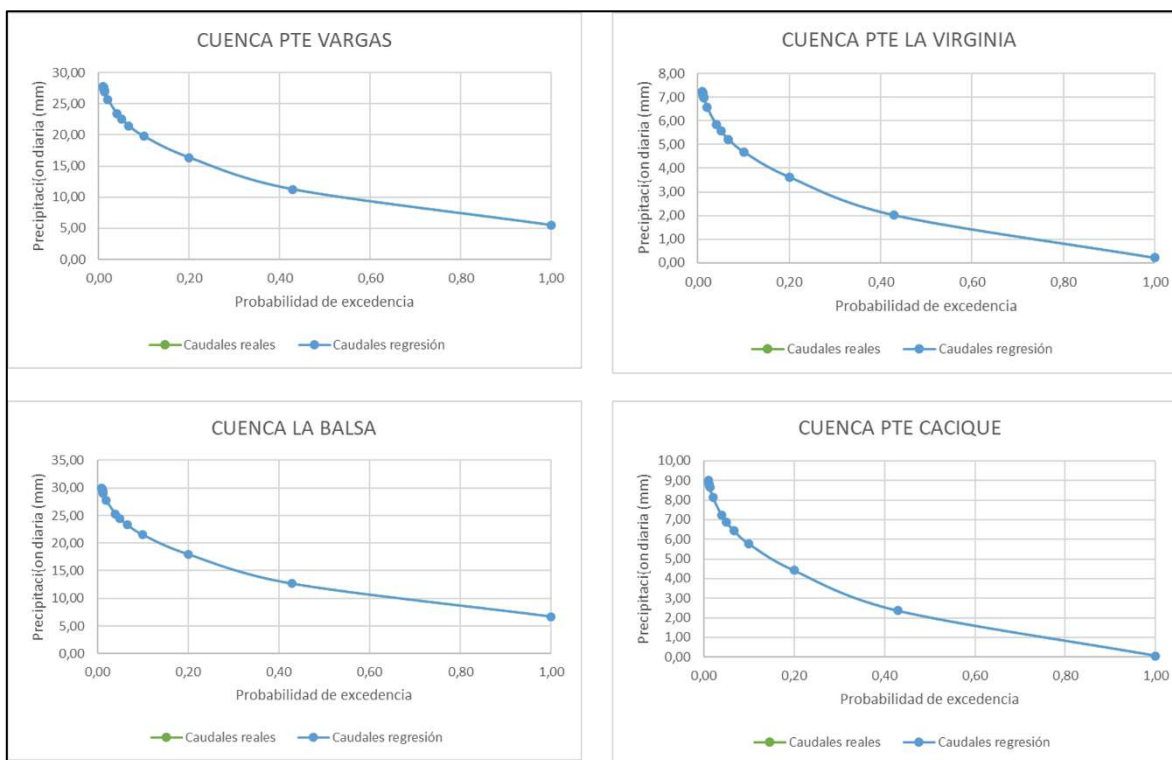


Ilustración 2. CDC ajustadas distribución Normal vs CDC regresión múltiple.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

Se determinan los parámetros de X_1 : Área de la cuenca (km^2), X_2 : Longitud de cauce principal (m), X_3 : Pendiente media ($^\circ$), X_4 : Altura media (m) y X_5 : Precipitación media (mm), para cada cuenca no instrumentada y se remplazan los valores en las siguientes expresiones. Estableciendo de esta manera las CDC para las cuencas de interés.

$$\begin{aligned}
 8 &= -7,8885 \cdot X_1 + 0,0036 \cdot X_2 - 2,41037\text{E-}05 \cdot X_3 + 0,0894 \cdot X_4 + 0,0010 \cdot X_5 + 2,4582 \\
 Q2.33 &= 3,5134 \cdot X_1 + 0,0047 \cdot X_2 - 2,81262\text{E-}05 \cdot X_3 - 0,1984 \cdot X_4 - 0,0024 \cdot X_5 + 4,4183 \\
 Q5 &= 13,7522 \cdot X_1 + 0,0057 \cdot X_2 - 3,17124\text{E-}05 \cdot X_3 - 0,4526 \cdot X_4 - 0,0054 \cdot X_5 + 6,1605 \\
 Q10 &= 20,5444 \cdot X_1 + 0,0064 \cdot X_2 - 3,40914\text{E-}05 \cdot X_3 - 0,6213 \cdot X_4 - 0,0073 \cdot X_5 + 7,3162 \\
 Q15 &= 23,9339 \cdot X_1 + 0,0067 \cdot X_2 - 3,52785\text{E-}05 \cdot X_3 - 0,7054 \cdot X_4 - 0,0083 \cdot X_5 + 7,8929 \\
 Q20 &= 26,1535 \cdot X_1 + 0,0069 \cdot X_2 - 3,6056\text{E-}05 \cdot X_3 - 0,7606 \cdot X_4 - 0,0090 \cdot X_5 + 8,2706 \\
 Q25 &= 27,7875 \cdot X_1 + 0,0071 \cdot X_2 - 3,66283\text{E-}05 \cdot X_3 - 0,8011 \cdot X_4 - 0,0095 \cdot X_5 + 8,5486 \\
 Q50 &= 32,4666 \cdot X_1 + 0,0075 \cdot X_2 - 3,82672\text{E-}05 \cdot X_3 - 0,9173 \cdot X_4 - 0,0108 \cdot X_5 + 9,3448 \\
 Q75 &= 34,9772 \cdot X_1 + 0,0078 \cdot X_2 - 3,91465\text{E-}05 \cdot X_3 - 0,9797 \cdot X_4 - 0,0116 \cdot X_5 + 9,7720 \\
 Q80 &= 35,3638 \cdot X_1 + 0,0078 \cdot X_2 - 3,92819\text{E-}05 \cdot X_3 - 0,9893 \cdot X_4 - 0,0117 \cdot X_5 + 9,8377 \\
 Q85 &= 35,7239 \cdot X_1 + 0,0078 \cdot X_2 - 3,94081\text{E-}05 \cdot X_3 - 0,9982 \cdot X_4 - 0,0118 \cdot X_5 + 9,8990
 \end{aligned}$$

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

$$\begin{aligned}
 Q_{90} &= 36,0608 \cdot X_1 + 0,0079 \cdot X_2 - 3,95261E-05 \cdot X_3 - 1,0066 \cdot X_4 - 0,0119 \cdot X_5 + 9,9563 \\
 Q_{95} &= 36,3772 \cdot X_1 + 0,0079 \cdot X_2 - 3,96369E-05 \cdot X_3 - 1,0144 \cdot X_4 - 0,0120 \cdot X_5 + 10,0102 \\
 Q_{100} &= 36,6753 \cdot X_1 + 0,0079 \cdot X_2 - 3,97413E-05 \cdot X_3 - 1,0218 \cdot X_4 - 0,0121 \cdot X_5 + 10,0609
 \end{aligned}$$

La finalidad de calcular este índice es para ingresar como variable de entrada dentro del cómputo del IVET, por lo tanto se hace necesario realizar una categorización de los valores de la vulnerabilidad obtenida, para ello se debe obtener la pendiente de la curva CDC dada por los puntos (X_i, Q_i) y (X_f, Q_f) , dicho valor se consigue aplicando el arcotangente de la ecuación ya que su clasificación de la categorización de la variable está determinada por el ángulo de la pendiente en grados (Tabla 13).

Tabla 13 Clasificación categórica del índice de variabilidad.

Índice de variabilidad	Vulnerabilidad
$< 10^\circ$	Muy baja
$10.1^\circ - 37^\circ$	Baja
$37.1^\circ - 47^\circ$	Media
$47.1^\circ - 55^\circ$	Alta
$> 55^\circ$	Muy alta

Fuente: IDEAM, 2013

Finalmente, obtenido las categorizaciones de los IV e IM para cada unidad hidrográfica es calculado el IVET, el cual se hace a través de la relación de una matriz de doble decisión que se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14 Matriz de decisión de la clasificación de índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales

ÍNDICE DE VARIABILIDAD	ÍNDICE MORFOMÉTRICO				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Muy baja	Muy baja	Baja	Media	Alta	Alta
Baja	Baja	Media	Media	Alta	Muy alta
Media	Baja	Media	Alta	Alta	Muy alta
Alta	Media	Media	Alta	Muy alta	Muy alta
Muy Alta	Media	Alta	Alta	Muy alta	Muy alta

Fuente: IDEAM, 2013

La aplicación de la matriz de la Tabla 14 indican cuencas con condiciones hidrológicas y morfométricas de carácter torrencial, por lo que sí existe un aporte potencial de sedimento significativo puede generar una avenida torrencial.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

3.1.6.4. Coeficiente de torrencialidad

Define una relación entre el número de cauces de orden uno dentro de una cuenca y el área de esta. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$C_t = \frac{\# \text{Cauces orden 1}}{A}$$

Donde A es el área de la cuenca (Km^2). Es un indicador del grado de la erodabilidad la zona al tener una relación directa con la capacidad de descarga de una unidad hidrográfica debido a que los cursos de primer orden son de génesis erosiva (erosión en surcos y cárcavas), altos valores indican bajos tiempo de concentración, fuertes pendientes y una alta susceptibilidad a los procesos de erosión. Por lo anterior, estos cursos presentan una gran importancia en los procesos de torrencialidad.

3.1.7. Descripción del modelo hidráulico FLO-2D

Los flujos de detritos son movimientos complejos que no pueden representarse por medio de los métodos que se aplican comúnmente para fluidos como el agua. Esto se debe a que la alta concentración volumétrica hace que estos fluidos se comporten como fluidos no-newtonianos, en los que es necesario que actúe un esfuerzo superior a un determinado esfuerzo crítico, para que el fluido se ponga en movimiento (Valderrama, 2006).

El FLO-2D (O'Brien & Julien, Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. Proc of the Speciality Conference and delineation of Landslides, Flash Food and Debris Flow Hazard in Utah, 1985) es un modelo matemático de diferencias finitas en dos dimensiones, es decir, puede simular el comportamiento del flujo, en las dos dimensiones de un plano horizontal empleando una malla de cálculo de celdas cuadradas de lado asignado por el usuario, donde se resuelven las ecuaciones diferenciales fundamentales de conservación de masa (o también de volumen), y conservación de la cantidad de movimiento (Momentum) del comportamiento de flujos de lodos, de detritos e hiperconcentrados. En dicho modelo, se establece que el avance de una onda de creciente es controlado por las características topográficas y por la rugosidad del cauce y de las planicies de inundación o zonas donde el flujo puede ser transitado (la resistencia al flujo).

Adicionalmente, el programa es capaz de delimitar las zonas de amenaza y establecer para ésta, categorías alta, media y baja, de acuerdo con la recurrencia de eventos de caudales extremos o de

lluvias en la cuenca estudiada.

3.1.7.1. Ecuaciones gobernantes de movimiento del flujo

Las ecuaciones que fundamentan el modelo matemático del software son la ecuación de continuidad del flujo y la ecuación de onda dinámica para la cantidad de movimiento, ecuaciones, que definen el movimiento como cuasi-bidimensional, puesto que la ecuación de momentum es resuelta empleando la velocidad promedio del flujo en los bordes de una celda de la malla de cálculo, la cual cuenta con ocho posibles direcciones del flujo: Norte, este, sur, oeste, noreste, sureste, suroeste y noroeste. Las ecuaciones son las siguientes:

En general, la extensión de los flujos de detritos predomina más que su altura en la escala, y la translación predomina sobre la rotación. Es razonable asumir que las ecuaciones de gobierno pueden ser integradas a lo largo de la profundidad. En un sistema de coordenadas fijo (x,y,z) con z en sentido opuesto a la dirección de la gravedad, las ecuaciones de gobierno pueden ser reducidas a las relaciones con la profundidad promedio en el plano x-y.

La ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h v_x}{\partial x} + \frac{\partial h v_y}{\partial y} = i$$

Y las ecuaciones bidimensionales de la cantidad de movimiento o de momentum son:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{v_x}{g} \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{v_y}{g} \frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial v_x}{\partial t}$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{v_y}{g} \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{v_x}{g} \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v_y}{\partial t}$$

Donde:

h= Profundidad del flujo; V_x y V_y son las componentes de la velocidad a profundidad media a lo largo de los ejes coordenados X e Y , t es el tiempo, g la aceleración de la gravedad, S_f es la pendiente de fricción (línea de energía, el cual depende de tres tipos de esfuerzos: un esfuerzo producido por la fricción entre el flujo y las paredes del canal, un esfuerzo inicial de cedencia, y un esfuerzo producido por la viscosidad del flujo), S_o la pendiente del lecho e i es intensidad de la precipitación, $\frac{\partial h}{\partial x}$ termino que involucra la presión en el flujo $\frac{v_x}{g} \frac{\partial v_x}{\partial x}$ es la aceleración conectiva y $\frac{1}{g} \frac{\partial v_x}{\partial t}$ es la aceleración local.

Los excesos de intensidad de lluvia (i) pueden ser diferentes de cero sobre la superficie del flujo los componentes de la pendiente de fricción S_{fx} y S_{fy} se consideran como una función de la pendiente del canal S_{ox} y S_{oy} , el gradiente de presiones y la aceleración convectiva y local.

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K\eta V}{8\gamma_m h^2} + \frac{n^2 V^2}{h^3}$$

Donde τ_y es el esfuerzo cortante de cedencia, γ_m el peso específico de la mezcla de agua y sedimentos, η la viscosidad del flujo (parámetros que caracterizan las condiciones reológicas del flujo), K un parámetro de resistencia para flujo laminar, n el coeficiente de rugosidad de Manning, V la velocidad del flujo y h la profundidad o altura del flujo en cada celda.

Para este tipo de flujos, el peso específico de la mezcla, la viscosidad y el esfuerzo cortante de cedencia, dependen de la concentración de sólidos en proporción del volumen total (o simplemente concentración de sólidos C_v). De acuerdo con los resultados encontrados por (O'Brien & Julien, Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. Proc of the Speciality Conference and delineation of Landslides, Flash Food and Debris Flow Hazard in Utah, 1985); los dos últimos parámetros, se estiman en el modelo, a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\eta &= \alpha_1 e^{B_1 C} \\ \tau_y &= \alpha_2 e^{B_2 C}\end{aligned}$$

El peso específico de la mezcla es calculado de la siguiente forma:

$$\gamma_m = \gamma_l + C_v(\gamma_s + \gamma_l)$$

Siendo γ_l el peso específico del agua y γ_s el peso específico de las partículas sólidas.

3.1.7.2. Obtención del caudal

El volumen total de una mezcla de agua-sedimento en un flujo de lodos puede determinarse mediante la amplificación del volumen de agua por un factor de engrosamiento (BF) (Según lo propuesto por (O'Brien J. , 2006) este factor es representado simplemente como la relación de una unidad volumétrica de una mezcla de agua-sedimentos respecto a la porción volumétrica de agua. Donde el caudal total de un flujo hiperconcentrado puede ser expresado como la suma de la porción líquida y de la porción sólida, el factor de engrosamiento se representa como la relación

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

entre el caudal total y el caudal líquido, o expresado en términos matemáticos:

$$Q_T = Q_w + Q_s$$

$$BF = \frac{Q_T}{Q_w} = \frac{Q_w + Q_s}{Q_w}$$

Donde Q_T (m^3/s) corresponde al caudal de flujo engrosado, Q_w (m^3/s) es el caudal pico de agua clara, y Q_s (m^3/s) es el caudal de sedimentos volumétrico. Por ende, si el factor de engrosamiento corresponde al cociente entre el caudal engrosado y el caudal de agua clara, éste se puede representar como:

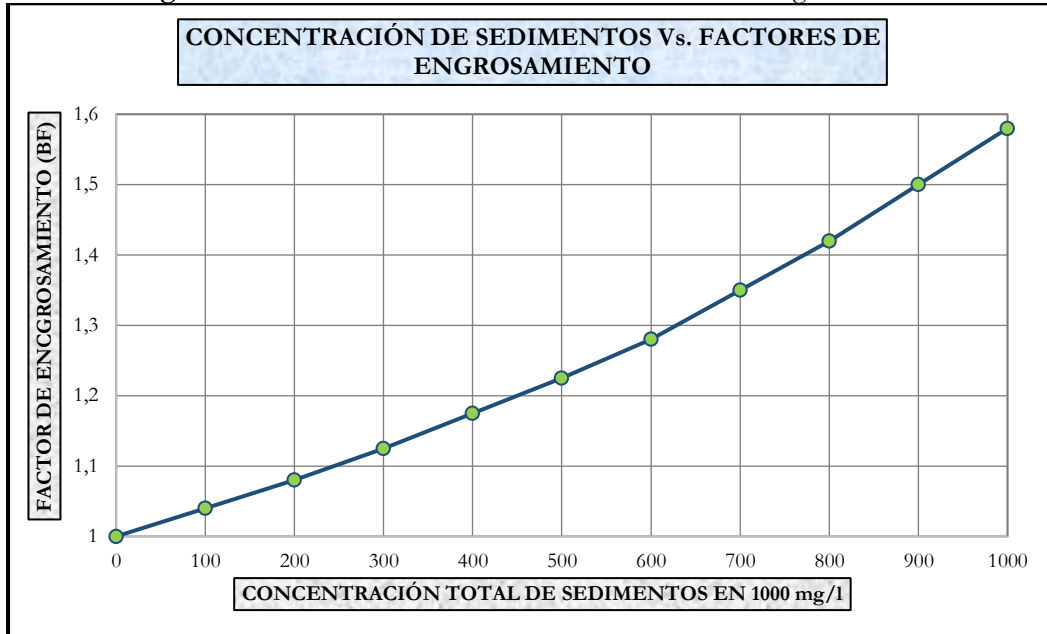
$$Q_T = BF * Q_w$$

Según (O'Brien & Julien, Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. Proc of the Speciality Conference and delineation of Landslides, Flash Food and Debris Flow Hazard in Utah, 1985), el factor de engrosamiento (BF) puede ser calculado en función de la concentración volumétrica de sedimentos en el flujo mediante la expresión.

$$BF = \left(\frac{1}{1 - C_v} \right)$$

Donde BF es el factor de engrosamiento (Bulking factor). Según O'Brien un BF de 2 corresponde a una concentración de sedimentos por volumen de 50%, y una concentración de sedimentos de 7%, la cual corresponde a la carga transportada por arrastre y en suspensión de un cauce convencional, se tiene un BF de 1,075, indicando que el volumen de la creciente es un 1,75% mayor que el volumen transportado por una creciente de agua clara. En la Figura 8 se muestra el aumento del factor de engrosamiento en función de concentraciones de sedimentos.

Figura 8 Concentración de sedimentos vs. Factores de engrosamiento



Fuente: (Niño, 2015)

La aplicación de esta ecuación de factor de engrosamiento depende únicamente de la concentración volumétrica de sedimentos y no considera sus propiedades.

3.1.7.3. Concentración de sólidos (C_v)

La concentración de sólidos (C_v), se define como la relación existente entre el volumen de sedimentos, y el volumen total (que resulta de la suma del volumen de sólidos, y el volumen líquido), es decir, si se tiene un caudal sólido dado (Q_s) y un caudal total (Q_t), la concentración de sólidos sería:

$$c = \frac{Q_s}{Q_t}$$

Y el caudal total, en función del caudal líquido (Q_l), será:

$$Q_t = Q_l + Q_s$$

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

O lo que es lo mismo:

$$Q_{\tau} = Q_l + cQ_{\tau}$$

Una aproximación de la onda difusiva para las ecuaciones de movimiento se define despreciando la última de las tres componentes de aceleración. De igual manera, a partir de la ecuación de momento, se obtiene una representación de la onda cinemática eliminando el término gradiente de presión. La opción de seleccionar la onda difusiva o la onda dinámica está disponible en el programa FLO-2D. (O'Brien & Julien, Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. Proc of the Speciality Conference and delineation of Landslides, Flash Food and Debris Flow Hazard in Utah, 1985) .

3.1.7.4. Modelo reológico

Como se planteó anteriormente el comportamiento reológico de los flujos de sedimentos hiperconcentrados envuelve la interacción de varios procesos físicos complejos. El comportamiento no Newtoniano es controlado en parte por la cohesión entre los sedimentos finos de partículas. Esta cohesión contribuye al esfuerzo de cedencia τ_y que debe ser sobrepasado por un esfuerzo aplicado a fin de iniciar el movimiento del fluido. (O'Brien & Julien, Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. Proc of the Speciality Conference and delineation of Landslides, Flash Food and Debris Flow Hazard in Utah, 1985).

Otros procesos físicos que son considerados son: los esfuerzos de corte viscosos, el esfuerzo de corte debido a la turbulencia y los esfuerzos dispersivos debido a la colisión de los clastos. El esfuerzo de corte total en flujos de sedimentos hiperconcentrados, incluyendo flujos de detritos, puede ser calculado como la suma de cinco componentes del esfuerzo de corte:

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d$$

Donde:

τ_c = Esfuerzo de fluencia

τ_{mc} = Esfuerzo de corte Mohr - Coulomb

τ_v = Esfuerzo cortante viscoso

τ_t = Esfuerzo cortante turbulento

τ_d = Esfuerzo cortante dispersivo

La ecuación anterior puede ser expresada en términos de tasas de deformación $\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)$, con el modelo reológico cuadrático desarrollado por O'Brien et Al (1985):

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right) + C \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2$$

Donde:

$$\tau_y = \tau_c + \tau_{mc}$$

$\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)$ = Gradiente de velocidad

η = Viscosidad dinámica

C = Coeficiente del esfuerzo cortante inercial

τ_y = Esfuerzo de cedencia

$$C \propto l^2 \propto a \propto d^2$$

En estas ecuaciones η es la viscosidad dinámica de la mezcla; τ_c es el esfuerzo de fluencia cohesivo; τ_m es el esfuerzo de corte de Mohr-Coulomb donde $\tau_{mc} = p_s \tan \phi$ dependen de la presión intergranular p_s y del ángulo de reposo ϕ del material; C denota el coeficiente de esfuerzos cortantes inerciales, el cual depende de la densidad de masa de la mezcla p_m , de la longitud de Prandtl l_m , del tamaño del sedimento d_s , de la concentración volumétrica de sedimentos C_v , y de la densidad de masa del sedimento p_s . La longitud l_m es usualmente dada como una función de la distancia desde el borde “y” y la constante de von Karman “k”. Como una primera aproximación esta aproximación puede ser determinada por $l_m = kh$, donde h es la profundidad del flujo y k=0.4. El coeficiente a_i propuesto por Takahashi es de 0.01. Bagnold definió la concentración de sedimento lineal λ como:

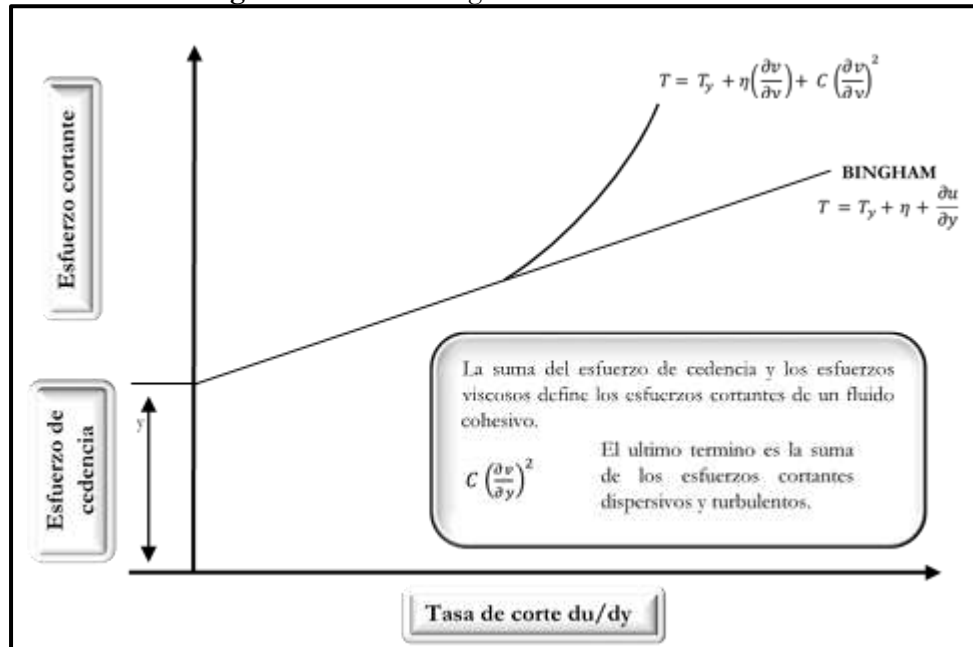
$$\frac{1}{\lambda} = \left[\left(\frac{C_m}{C_v} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]$$

En el cual la concentración máxima de partículas de sedimento C_m es aproximadamente 0.615.

Los primeros de los dos términos de esfuerzos en la ecuación de esfuerzos cortantes son referidos a los esfuerzos cortantes de Bingham y representa los esfuerzos de resistencia internos del fluido Bingham (ver Figura 9). La suma del esfuerzo de cedencia y los esfuerzos viscosos define los

esfuerzos cortantes de un fluido cohesivo, de sedimento hiperconcentrado en un régimen de flujo viscoso. El último término es la suma de los esfuerzos cortantes dispersivos y turbulentos, el cual es una función del cuadrado de la gradiente de velocidad. La representación gráfica del modelo cuadrático del FLO-2D se puede observar en la Figura 9.

Figura 9 Modelo reológico cuadrático del FLO-2D



Fuente: Adaptado de (Kaliser, Mccarter, Pack, & Newman)

Un modelo de flujos de lodo que incorpora solo los esfuerzos de Bingham e ignora los esfuerzos inerciales asume que la simulación de flujos de lodo es viscosa. Esta suposición no es generalmente aplicable porque todas las inundaciones de lodo (mud floods) y algunos flujos de lodo (mudflows), son turbulentos con velocidades tal como 8 m/s. Incluso flujos de lodo con

concentraciones hasta 40% por volumen pueden ser turbulentos (O'Brien, Julien, & Fullerton, 1993). Dependiendo de las propiedades de la matriz fluida, la viscosidad y esfuerzos de cedencia en altas concentraciones de sedimento pueden todavía ser relativamente bajos comparados a esfuerzos turbulentos asociados a altas velocidades. Si el flujo es controlado principalmente por esfuerzos viscosos, resultarán velocidades inferiores. Inversamente, si la viscosidad y el esfuerzo de cedencia son pequeños, los esfuerzos turbulentos dominarán y las velocidades serán superiores.

De la ecuación del modelo reológico cuadrático desarrollado por (O'Brien & Julien, Physical

	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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. Proc of the Speciality Conference and delineation of Landslides, Flash Food and Debris Flow Hazard in Utah, 1985), (Julien & Lan, 1991) propusieron una formulación adimensional del modelo reológico cuadrático como sigue:

$$\tau^* = 1 + (1 + T_d^*) a_i \partial_v^*$$

En donde los tres parámetros adimensionales τ^* , ∂_v^* y T_d^* son definidos como:

$$\tau^* = \frac{\tau - \tau_y}{\eta \frac{\partial u}{\partial y}}$$

1. Esfuerzo cortante en exceso adimensional Si $\tau^*=1$, la mezcla se comporta como un fluido del tipo Bingham.

$$\partial_v^* = \frac{\rho_s \lambda^2 d_s^2}{\eta} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

2. Tasa dispersivo-viscoso adimensional, si ∂_v^* es grande, el flujo será dispersivo; si ∂_v^* es pequeño será viscoso.

$$T_d^* = \frac{\rho_m l_m^2}{a_i \rho_s \lambda^2 d_s^2}$$

3. Tasa turbulento-dispersivo, si T_d^* es grande el flujo será turbulento; si T_d^* es pequeño será dispersivo.

Para relacionar los parámetros adimensionales a la clasificación de flujos de sedimento hiperconcentrados, las siguientes líneas son sugeridas:

- 1) Las avenidas de lodo (Mud Flood) ocurren cuando los esfuerzos cortantes turbulentos son dominantes, dados para $D_v^* > 400$ y $T_d^* > 1$.
- 2) Los flujos de lodo (Mudflow) ocurren cuando los esfuerzos de cedencia y viscosos son dominantes, dados por $D_v^* < 30$.
- 3) Los flujos de escombros (Debris flow) o flujos granulares ocurren cuando los esfuerzos dispersivos son dominantes, dados por $D_v^* > 400$ y $T_d^* < 1$.

Un régimen de transición existe en el rango de los parámetros $30 < D_v^* < 400$.

3.1.7.5. Resistencia para el flujo laminar

Corresponde a la relación del esfuerzo cortante integrado en la profundidad y está escrito en función de los términos de pendiente no dimensionales y se utiliza cuando se presentan altas viscosidades y flujos laminares y transicionales donde la turbulencia pasa a un segundo, es allí cuando el factor K presenta relevancia y se obtiene aplicando la Tabla 15 en la cual presentan los rangos de K en función de la superficie.

Tabla 15 Parámetros de Resistencia para flujo laminar

PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL FLUJO LAMINAR	
SUPERFICIE	RANGO DE K
Concreto/asfalto	24 – 108
Arena escasa	30 – 120
Superficie gradual	90 – 400
Arcilla escasa – suelo de marga erosionada	100 - 500
Poca vegetación	1.000 – 4.000
Hierba corta de pradera	3.000 – 10.000
Césped de hierba añil	7.000 – 50.000

Fuente: (O'Brien, Julien, & Fullerton, 1993)

3.1.7.6. Manning

Es un factor usado en las fórmulas de Chezy, Darcy-Weisbach, Hazen-Williams, Kutter, Manning, con el fin de calcular la velocidad promedio con la que el agua fluye en un conducto o canal. Dado que es un parámetro que determina el grado de resistencia que ofrecen las paredes y fondo del canal al flujo del fluido, éste representa el efecto de la rugosidad del material confinante en las pérdidas de energía del agua es decir que, mientras más áspera o rugosa sean las paredes y fondo del canal, más dificultad tendrá el agua para desplazarse.

3.1.7.7. Solución numérica del modelo

La forma diferencial de las ecuaciones de continuidad y de momentum en el modelo FLO-2D es resuelto mediante un esquema central de diferencias finitas. Además, el modelo emplea para el cálculo de la velocidad la ecuación de onda difusiva o la ecuación de onda dinámica.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

En métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales parciales, los cálculos se llevan a cabo en una malla localizada en plano x-t. La malla x-t es una red de puntos definida al tomar incrementos de distancia de longitud Δx e incrementos de tiempo de duración Δt . Los esquemas numéricos transforman las ecuaciones diferenciales parciales en un conjunto de ecuaciones algebraicas de diferencias finitas.

Para la solución del método de diferencias finitas, el FLO-2D emplea un esquema explícito, que consiste en un bosquejo simple que requiere de valores pequeños de Δx y Δt para la convergencia del procedimiento numérico.

3.1.7.8. Criterios de Estabilidad

Para la estabilidad numérica de los cálculos, una condición necesaria pero no suficiente para la estabilidad de un esquema explícito es la condición de Courant-Friedrich-Lewy (CFL). El paso de tiempo Δt es limitado por:

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{(v + c)}$$

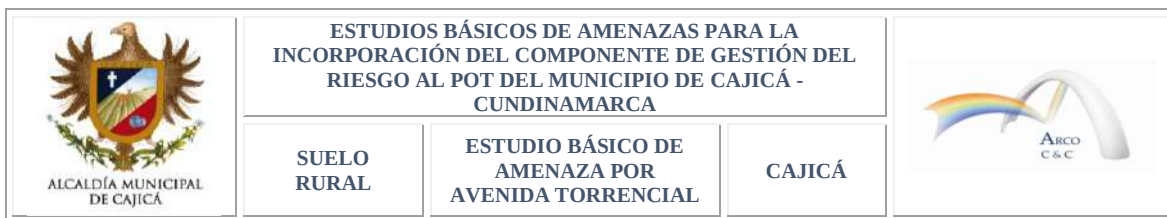
Dónde: C es el número de Courant ($0.3 \leq C \leq 1.0$); Δx es el ancho del elemento de la malla cuadrada; v es la velocidad promedio de la selección transversal calculada, y c es la celeridad de la onda calculada.

Para el tránsito de onda dinámica, otro criterio de estabilidad numérica aplicado en el modelo es el de Ponce y Theurer (1982). Este criterio está en función de la pendiente del lecho, la descarga y el tamaño del elemento de grilla. El paso de tiempo es limitado por:

$$\Delta t < \frac{S_o S_o \Delta x^2}{q_o}$$

Donde q_o es la descarga unitaria, S_o es la pendiente del lecho y ζ es un coeficiente empírico (Ponce & Theurer, 1982).

Los pasos de tiempo Δt generalmente varían de 0.1 segundo a 60 segundos. El modelo comienza con un paso de tiempo mínimo y lo aumenta hasta que uno de los criterios de estabilidad numérica sea excedido, entonces el paso de tiempo es disminuido. Si los criterios de estabilidad continúan siendo excedidos, el paso de tiempo es disminuido hasta que el paso de tiempo mínimo sea



alcanzado. Los pasos de tiempo son una función de la descarga del flujo para un elemento de grilla y de su tamaño.

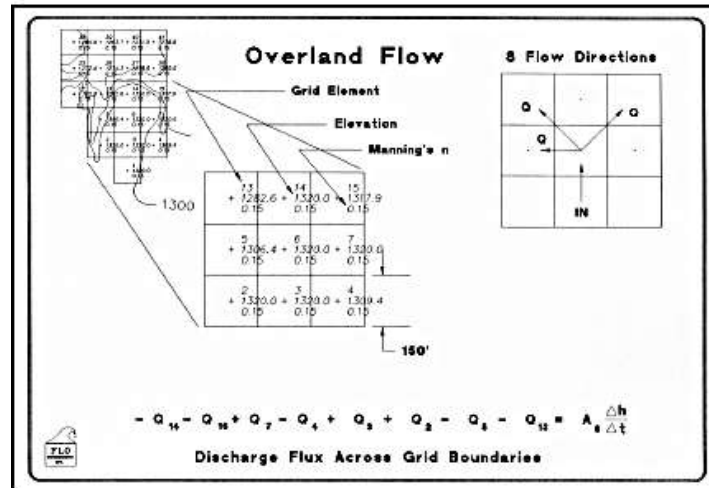
3.1.7.9. Lógica del FLO-2D

La topografía de la superficie se discretiza en una malla formada por celdas o elementos cuadrados de tamaño uniforme para toda el área de estudio y a cada elemento se le asigna una posición en la malla, una elevación o cota de terreno, un coeficiente de rugosidad (n de Manning) y factores de reducción del flujo que atraviesa la celda. El procedimiento computacional para flujos superficiales involucra el cálculo de la descarga a través de cada una de las fronteras en las ocho direcciones del flujo. Las direcciones de flujo incluyen las cuatro direcciones de la brújula y las cuatro direcciones diagonales, como se muestra en el esquema en planta de la Figura 10.

El cálculo hidráulico de cada elemento de grilla empieza con una estimación de la profundidad del flujo en la frontera del elemento de grilla. La profundidad estimada del flujo es un promedio de las profundidades de flujo en los dos elementos de grilla que comparten descarga en una de las ocho instrucciones. Los otros parámetros hidráulicos son también promediados para computar la velocidad de flujo incluyendo resistencia de flujo (n de Manning), área del de flujo, pendiente, elevación de la superficie de agua y perímetro mojado.

El FLO-2D soluciona ya sea la ecuación de onda difusiva o la ecuación de onda dinámica completa para computar la velocidad. La ecuación de Manning es luego aplicada en una dirección usando el promedio de la pendiente de la superficie de agua para calcular la velocidad. Si la ecuación de onda difusiva es seleccionada, la velocidad es entonces calculada para todas las ocho direcciones del flujo en cada elemento de grilla. Si la opción de onda dinámica completa es aplicada, la velocidad de onda difusiva calculada es utilizada como primera aproximación en el método de segundo orden de Newton-Raphson de tangentes para determinar las raíces de la ecuación de onda dinámica completa, el cual es una ecuación diferencial parcial de segundo orden, no lineal.

Figura 10 Descarga del Flujo a través de los elementos de grilla en planta



Fuente: (O'Brien, Julien, & Fullerton, 1993)

El algoritmo de solución incorpora los siguientes pasos donde cada elemento de grilla posee un único valor de rugosidad, elevación y profundidad del flujo:

1. El promedio de los valores de rugosidad y geometría del flujo entre dos elementos de grilla son calculados.
2. La profundidad del flujo “d” para el cálculo de la velocidad a través de la frontera de grilla para el siguiente paso de tiempo (i+1) es estimado de los pasos de tiempo previos i usando una función lineal (el promedio de la profundidad del flujo entre dos elementos).

$$d_x^{i-1} = d_x^i + d_{x+1}^i$$

3. La velocidad es calculada usando la ecuación de onda difusiva como primera aproximación. La única variable no conocida en la ecuación de onda difusiva es la velocidad.
4. Si la ecuación de onda dinámica completa es seleccionada por el usuario, la velocidad de onda difusiva prevista para ese paso de tiempo es usado como un dato inicial en la solución de Newton-Raphson. Se hace nota que para flujos de sedimentos hiperconcentrados, como flujos de lodo y escombros, el cálculo de la velocidad incluye los términos adicionales de viscosidad y esfuerzo de cedencia.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

- La descarga Q a través de la frontera de la planicie de inundación (o entre dos elementos de canal) es calculado multiplicando la velocidad por el área transversal del flujo.
- El incremento de descarga para el paso de tiempo a través de las 8 fronteras es sumado, como se expresa mediante la siguiente ecuación.

$$\Delta Q_x^{i+1} = Q_n + Q_e + Q_s + Q_w + Q_{ne} + Q_{se} + Q_{sw} + Q_{nw}$$

- La variación en volumen es distribuida sobre el área de almacenamiento disponible dentro del elemento de grilla o canal para determinar el incremento en la profundidad del flujo.

$$\Delta d_x^{i+1} = \frac{\Delta Q_x^{i+1}}{A}$$

Donde ΔQ_x es el delta de la descarga en las ocho direcciones de la planicie de inundación para el elemento de grilla y para el paso de tiempo Δt entre el tiempo i e $i + 1$.

- El criterio de estabilidad numérica es luego chequeado para la nueva profundidad del flujo del elemento de grilla. Si cualquier criterio de estabilidad es excedido, el tiempo de simulación es reseteado para el tiempo previo y el incremento del paso del tiempo es reducido.
- La simulación prosigue incrementándose el paso de tiempo hasta que el criterio de estabilidad sea excedido.

3.1.8. Potencialidades y limitaciones del modelo matemático

- El FLO-2D es un modelo bidimensional capaz de simular el comportamiento del flujo sobre una determinada superficie horizontal, teniendo en cuenta las características topográficas de la zona de estudio, y las características del flujo, entre las cuales se puede resaltar, el cambio en las concentraciones de sólidos en proporción del volumen total, así mismo como los cambio en la densidad y de la viscosidad del flujo.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

- El software simula el comportamiento del flujo, en un régimen de flujo no permanente y variado, lo que implica, que es capaz de reproducir el comportamiento de una onda de creciente tanto de agua, como de agua y sedimentos (flujos hiperconcentrados, de lodos y de detritos).
- A su vez, el FLO-2D puede analizar matemáticamente el comportamiento de estructuras como diques, puentes, vías y canales.
- Como limitantes, este software, presenta un fondo fijo (es decir, la altura topográfica de cada celda es constante), de manera que no se puede considerar el efecto de socavación que se puede producir en estos fenómenos tanto en el cauce como en las planicies de inundación.
- La precisión en los resultados radica en la calidad de la información, especialmente en la topografía, dado que el software genera una malla de cálculo interpolando, para celdas cuadradas los niveles de elevación del terreno. De igual forma, la precisión depende del tamaño de la celda empleado, es decir, mientras menor sea este, más precisos son los resultados. Pero implica mayores tiempos computacionales.
- Una de las limitaciones del modelo es que falla para describir la viscosidad de muchos fluidos no newtonianos en regiones de muy baja o muy alta tasa de deformación (gradiente de velocidad).
- Requiere cálculos temporales y espaciales, lo que implica un alto consumo computacional y de tiempo.
- Asume presión hidrostática única, ya que no tiene en cuenta drenajes alterno, simplemente la dinámica del cauce a modelar.
- No hace cálculos para onda de choque, lo que implica que cambios drásticos en la velocidad y profundidad no se calcula, y en muchos casos los cambios drásticos en estas variables implican la no convergencia en la solución numérica y por ende no se obtiene la modelación.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

3.2. Metodología

Según el decreto 1077 del 2015 los estudios básicos por avenidas torrenciales deben contener las siguientes especificaciones mínimas: cauces presentes o con confluencia en el municipio que por sus condiciones topográficas puedan tener un comportamiento torrencial, utilizando como insumos la geomorfología, hidrología, hidráulica, los ciclos de sedimentos y los detonantes como precipitaciones o movimientos en masa. Sin embargo, en el decreto se desconoce la forma de generación y ocurrencia del fenómeno, es decir, estos sucesos naturales pueden generarse en un punto cualquiera dentro de una cuenca hidrográfica y transitar hasta depositarse en un sector con condiciones que favorecen esta última etapa del evento natural, por lo que limitar el análisis torrencial a un perímetro rural conlleva a desconocer posibles áreas de generación o iniciación de un evento torrencial por fuera del mismo, que representa una amenaza potencial para el municipio. En contraste anteriormente expuesto se establece la necesidad de evaluar el fenómeno a nivel hidrográfico y no urbano, teniendo presente las corrientes hídricas que afecta de manera directa a la zona de estudio.

Para cumplir con el decreto y conociendo la naturaleza y comportamiento del fenómeno se procede a proponer la siguiente metodología para la zonificación:

1. Caracterización de la amenaza por avenidas torrenciales

- ✓ **Caracterización del fenómeno de estudio:** se define a partir de la recopilación de la información relacionada con la ocurrencia de avenidas torrenciales por medio de fuentes documentales, estudios, ortoimágenes, datos históricos y lo evidenciado en campo. Además de relacionar rasgos que puede condicionar o detonar la ocurrencia de futuros eventos.
- ✓ **Caracterización hidrológica:** esta caracterización es realizada a partir del cálculo de una serie de parámetros propios de las unidades hidrográficas definidas, posteriormente se calcula para cada uno de los hidrogramas líquidos a partir del método unitario del SCS.
- ✓ **Caracterización geológica y geomorfológica:** características físicas y condiciones actuales del estado de la roca en donde se trata de hacer una caracterización de la discontinuidad del macizo rocoso, su grado de meteorización y erosión como indicativos de la resistencia a los procesos denudacionales.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

Mientras que el componente geomorfológico da indicios de los procesos denudativos y especialmente los rasgos asociados a la actividad fluvial que permiten apoyar o confrontar la evidencia o ausencia del fenómeno estudiado.

- ✓ **Caracterización de la producción de los aportes de sedimentos:** en este ítem se realiza la caracterización de los procesos de erosión y movimientos en masa para las unidades hidrográficas objeto de estudio, a partir de la evaluación de la amenaza por erosión y laderas potencialmente inestable, estos insumos permitirán realizar cálculos de las concentraciones volumétricas por hoyo, los cuales son ingresados dentro de los hidrogramas líquidos – sólidos que corresponde a un input dentro del modelo numérico. La caracterización de la erosión es hallada a partir de la aplicación de la ecuación de pérdida de suelo universal modificado (MUSLE), la cual contempla los factores de erodabilidad, erosividad, protección de la cobertura vegetal y longitud y pendiente de la ladera, factores que permiten evaluar los diferentes grados de erosión que se pueden llegar a presentar en una zona en específico como consecuencia de agentes hídricos. La evaluación de los procesos de movimientos en masa se genera a partir de la evaluación del factor de seguridad aplicado para fallas de tipo rotacionales

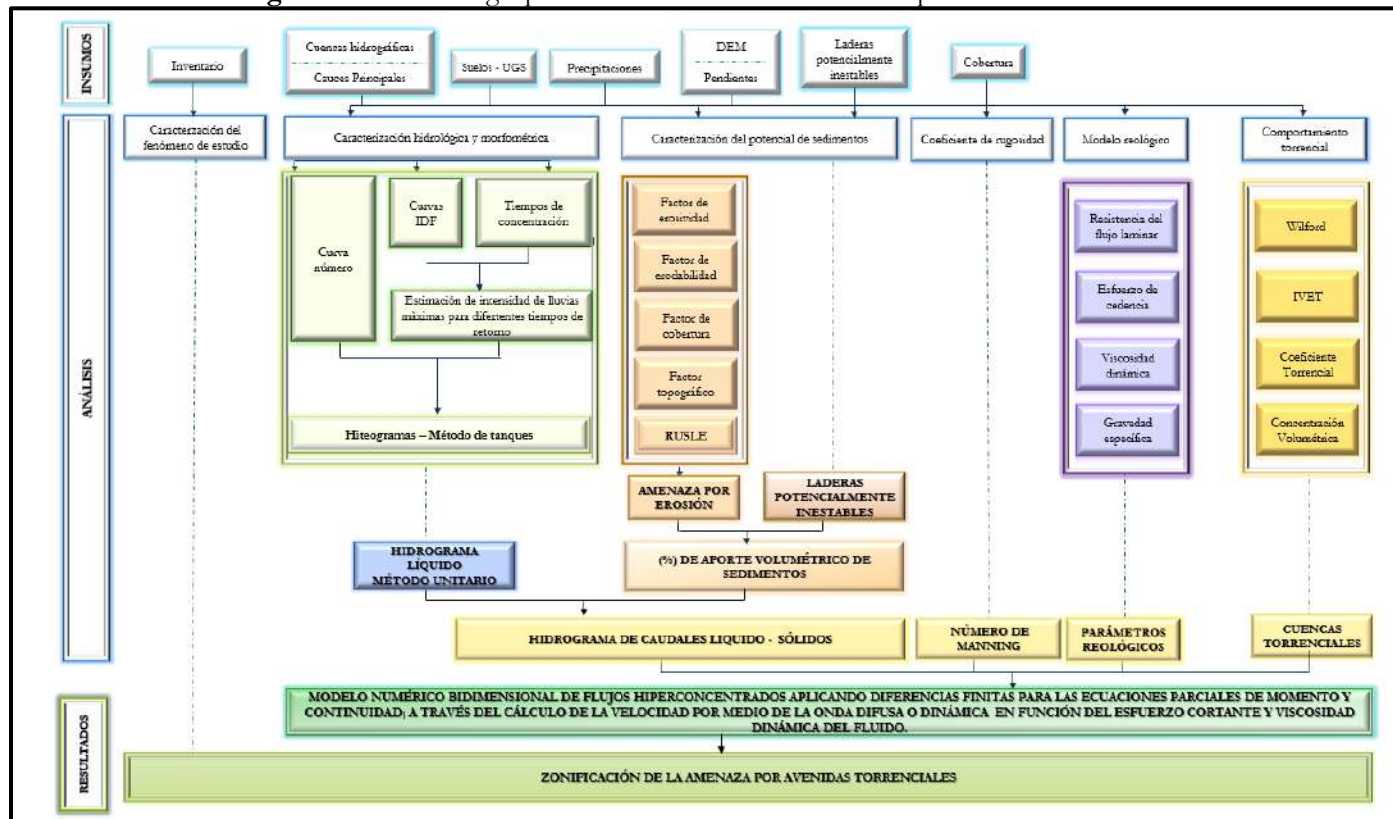
2. Zonificación de la amenaza

- ✓ **Cálculo de los aportes de sedimentos:** La determinación del cálculo de aportes de sedimentos para las unidades hidrográficas, se realiza a través de la obtención de los volúmenes sólidos generados por los procesos de erosión y laderas potencialmente inestables (definidos en el capítulo de la caracterización de la producción de los aportes de sedimentos), posteriormente se realiza un ajuste a dicho valor, aplicando el coeficiente de producción para determinar el volumen de material de lavado que llega al cauce principal. Por último, se hace una relación de los volúmenes sólidos ajustados y los caudales picos obtenidos dentro de la caracterización hidrológica con el fin de obtener la concentración volumétrica que permiten la posterior elaboración de los hidrogramas líquidos – sólidos correspondientes a las condiciones de borde aguas arriba dentro del modelo numérico.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

- ✓ **Condiciones de torrencialidad:** Corresponde al proceso de discriminación de las unidades hidrográficas basado en características que permitan identificar el comportamiento torrencial, las cuales son ingresadas dentro del modelo numérico para su respectiva simulación. Las características de torrencialidad se obtiene a partir del análisis de los parámetros de: IVET, Wilford, coeficiente de torrencialidad y la clasificación según su concentración volumétrica obtenida dentro del cálculo de aportes de sedimentos.
- ✓ **Obtención de los Hidrogramas líquidos – sólidos:** en este paso se genera el hidrograma total del flujo torrencial, a partir de la hidrógrafa de flujo de agua el cual es multiplicando por un factor que va en función de la concentración volumétrica de los sedimentos (C_v), dicho hidrograma se calcula conociendo el caudal pico de la descarga y conociendo el volumen de sedimentos disponibles en la cuenca (concentración promedio para una hidrógrafa).
- ✓ **Modelación numérica:** Basados en el marco teórico se define los parámetros de pre- proceso, proceso y pos-proceso del modelo bidimensional para la simulación de flujo hiperconcentrado de lodo y detritos; para ello se define la geometría de estudio, las condiciones de frontera a partir de los hidrogramas líquidos – sólidos, los parámetros reológicos, los criterios de estabilidad para la convergencia numérica y coeficiente de rugosidad. Parámetros que son ingresados al software FLO – 2D y como resultado obtenemos una malla de velocidades y tirantes del flujo simulado.
- ✓ **Determinación de la amenaza:** En este análisis, se establecen las zonas de amenaza por avenidas torrenciales de los cauces que afectan directa o indirectamente el área de estudio. Allí se integran los diferentes escenarios de modelación empleados a partir de su intensidad, la cual, se obtiene de los valores de tirantes y velocidades del fluido simulado, que al ser combinadas con la probabilidad de ocurrencia permite realizar la categorización de la amenaza del fenómeno de estudiado.

Diagrama 3 Metodología para la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales



Fuente: Arco Consultorías & 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

3.3. Caracterización de la amenaza por avenidas torrenciales

Para este capítulo se realizan las siguientes actividades:

1. Caracterización del fenómeno de estudio: Se define a partir de la recopilación de la información relacionada con la ocurrencia de avenidas torrenciales por medio de fuentes documentales, estudios, orto imágenes y datos históricos.
2. Caracterización hidrológica y morfométrica: Dicha caracterización se realiza mediante el cálculo de los rangos de Wilford e Índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET).
 - a. Determinación de los rangos de Wilford categorizados en función del índice de Melton: Se utiliza como variable de análisis, ya que permite ver la tendencia de una cuenca a presentar flujos concentrados. Sin embargo, no se encuentra incorporada dentro de la modelación ya que contempla los insumos intermedios que hacen parte del cálculo del IVET, variable que ingresa dentro del modelo.
 - b. Cálculo del índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales: Se usa como indicativo de la torrencialidad de las microcuencas hidrográficas identificadas y caracterizadas dentro de la zona de estudio, ya que relaciona las condiciones hidrológicas y topográficas a partir de los índices de variabilidad, la cual es determinado por las curvas de duración caudal estimado; y el índice morfométrico, que contempla los aspectos de forma de la cuenca, densidad del drenaje y pendiente.
3. Caracterización de las condiciones geomorfológicas: Se realiza un análisis de para definir geoformas susceptibles a que detonen, transite o deposite material torrencial dada su condición morfogenética y temporalidad relativa.
4. Caracterización de los procesos que aportan sedimentos: Se realiza el cálculo de la amenaza a los procesos erosionales mediante la aplicación de la ecuación de pérdida de suelo universal (USLE) modificado, la cual contempla los factores de erodabilidad, erosividad, protección de la cobertura vegetal y longitud y pendiente de la ladera.
5. Caracterización de los factores detonantes: Se integra la zonificación de movimientos en masa elaborado por la consultaría como variable de detonación. La no inclusión de la precipitación dentro de esta caracterización se debe a que esta variable se integra dentro de la caracterización hidrológica e incluirla generaría una correlación entre las variables

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

del modelo, que, aunque sea heurístico aumentaría la incertidumbre del resultado de la zonificación al integrar una misma variable dos veces o más dentro del modelo.

La metodología para la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales es fundamentada en los requerimientos de la norma 1708 del 2014 y principalmente en el documento “Enfoque conceptual y metodológico para determinar la vulnerabilidad de fuentes abastecedoras de acueductos” (IDEAM, 2011)

3.3.1. Caracterización del fenómeno de estudio

Una avenida torrencial es definida como un evento hidrometeorológico súbito, dada la creciente de un canal y acompañado de grandes volúmenes de material sólido como detritos y materia vegetal. Los drenajes que son potencialmente torrenciales cuentan con un alta pendiente, condición que implica una alta energía potencial en los cauces y facilita el arrastre de fragmentos sólidos grandes, los cuales son transportados hasta la zona de depósito de los ríos, una vez la pendiente se suaviza y se pierde capacidad de arrastre de dichos sedimentos.

Además del alta pendiente de los cauces torrenciales, es imprescindible que, al presentarse eventos extremos de lluvias o procesos volcánicos, se cuente con material disponible para ser arrastrado aguas abajo, por lo cual las cuencas que tienen depósitos no litificados, suelos fácilmente erosionables y/o macizos rocosos muy fracturados en cercanías del cauce principal, son más proclives a presentar avenidas torrenciales.

Este tipo de flujos o movimientos en masa (no existe consenso respecto a esta terminología) es caracterizado por contar con altas velocidades y largas trayectorias, implicando elevados impactos potenciales al materializarse esta amenaza sobre regiones con asentamientos humanos. Por su génesis, las avenidas torrenciales transportan material de diversos tamaños y angularidades que pueden producir efectos catastróficos en su desembocadura, acompañado del muy corto tiempo de respuesta ante estos eventos.

3.3.1.1. Antecedentes Avenidas torrenciales

Respecto al municipio de Cajicá, dentro de la revisión de puntos potencialmente críticos ante la ocurrencia de procesos degradativos, principalmente sobre la cadena montañosa ubicada en el margen occidental del municipio, se encontró una microcuenca ubicada en la vereda Chuntame (Ilustración 3), dentro de una plantación de eucalipto, un pequeño drenaje intermitente de orden

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

1 con depósitos de carácter torrencial, sugiriendo la materialización de una avenida torrencial en el sector e implicando la amenaza potencial para la población del territorio.

Para entender la génesis de este evento, junto con la posible correlación de las características de la cuenca con las demás presentes en el municipio, se hace imprescindible establecer las propiedades geológicas, geomorfológicas, del uso del suelo y climáticas de la región de estudio, como medida de identificación de riesgos.

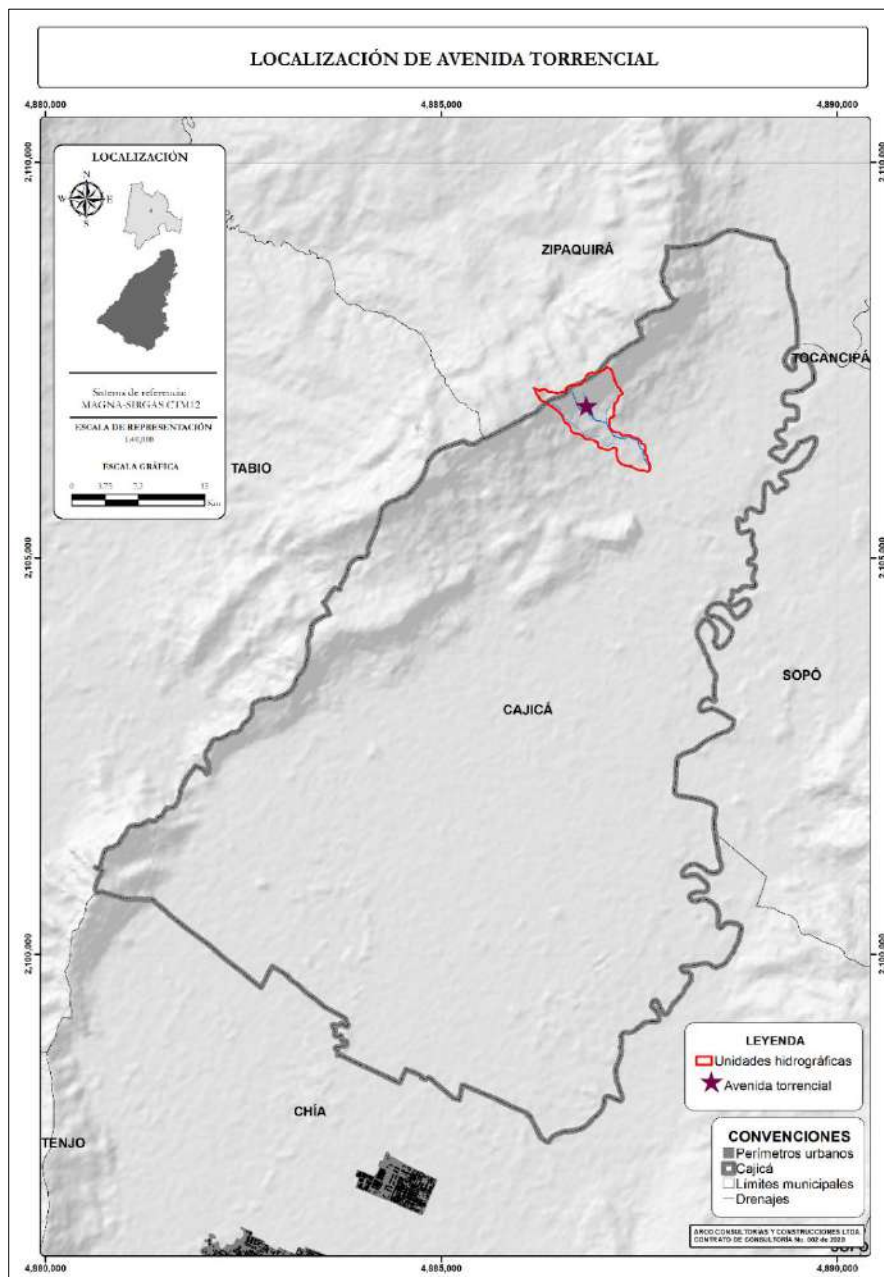


Ilustración 3 Localización de avenida torrencial
Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

Además de la localización del depósito torrencial, es importante entender la morfología del mismo en la cuenca, debido a que las evidencias que dejan este tipo de eventos son bastante características. La Ilustración 4 muestra la zona de detonación, tránsito y depósito del mismo.



Ilustración 4 Delimitación de una avenida torrencial y subdivisión de sus evidencias morfológicas

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

En la zona de detonación del evento se encuentra la región de mayores pendientes y régimen de humedad mayor, donde inicia el arrastre de material de la ladera de la montaña pendiente abajo. La zona de tránsito hace alusión a la parte del cauce colmatado de sedimentos donde se ha movilizado el material incorporado al drenaje aguas arriba. Finalmente, la zona de depósito es aquella región donde se suaviza la pendiente del canal y pierde caudal, generando el asentamiento del material particulado en forma de abanico.

Para entender la génesis de este evento, junto con la posible correlación de las características de la cuenca con las demás presentes en el municipio, se hace necesario establecer las propiedades geológicas, geomorfológicas, del uso del suelo y climáticas de la región de estudio, como medida de identificación de riesgos.

Dentro de los factores geológicos dominantes en la ladera occidental del municipio de Cajicá, esta se compone principalmente de intercalaciones entre areniscas y lodolitas pertenecientes al Grupo

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

Guadalupe (formaciones Labor y Tierna, Plaeners y Arenisca Dura) y a la Formación Chipaque. Las arenitas más competentes repercuten en altas pendientes y un fuerte gradiente altitudinal en algunos sectores de la cadena montañosa. En adición a esto, sobre el lecho rocoso, en el cauce torrencial, se encuentra un depósito no litificado que cubre la formación geológica infrayacente, como se observa en la Ilustración 5.



Ilustración 5 Unidades observables en el cauce torrencial

Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda., (2021).

Es posible observarse a su vez, el material vegetal residual del proceso de deforestación masivo presente en la cuenca para el planteamiento de eucalipto, plantación predominante en el terreno evaluado.

Respecto a su geomorfología, la dirección de buzamiento de las formaciones sedimentarias hacia el oriente (Servicio Geológico Colombiano, 2015) y las altas pendientes sugieren la presencia de la unidad geomorfológica “ladera de pendiente estructural” perteneciente al ambiente estructural. No obstante, hay evidencias del ambiente denudacional sobre la cuenca en cuestión al apreciarse la existencia de material no consolidado en el canal (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			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	



Ilustración 6 Canal intermitente y unidades denudacionales asociadas

Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda., (2021).

En adición a esto, los bordes del canal intermitente (Ilustración 7) exhiben un depósito matrisoportado, con una mala selección de clastos, sin imbricación u orientación preferencial de los mismos, alta angularidad y una matriz limosa. Teniendo en cuenta el alta pendiente, lo cual condiciona la formación de coluviones, y la falta de redondeamiento que sugeriría un ambiente fluvial, se concluye que el depósito sobre el que se sitúa el cauce torrencial es de origen glaciar.

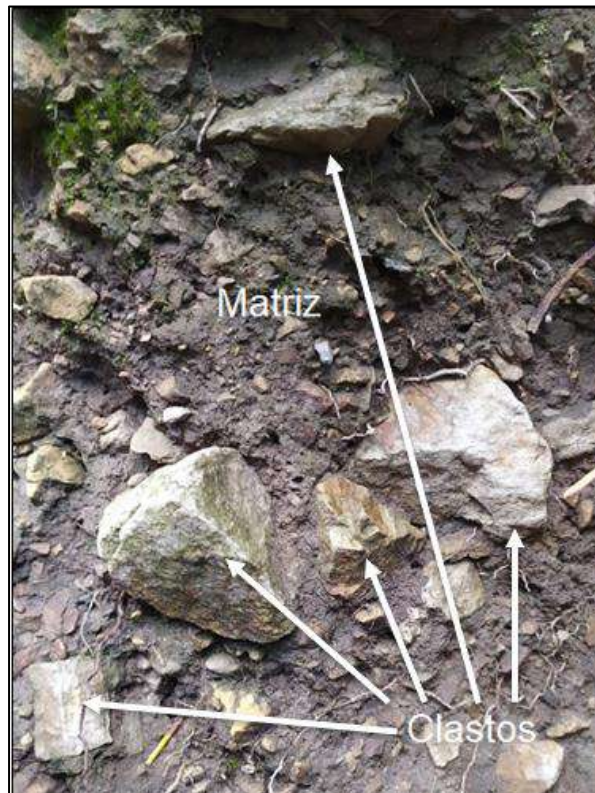


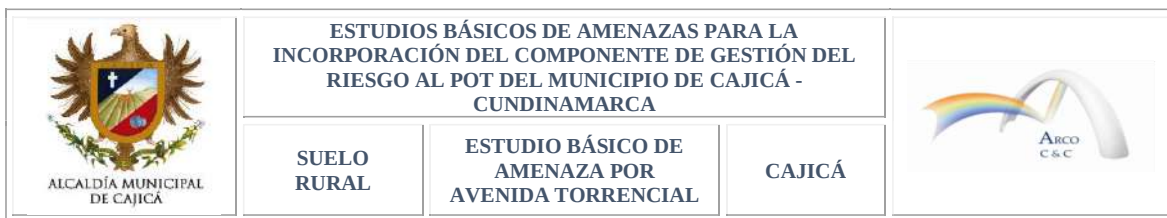
Ilustración 7. Perfil de un flanco del cauce torrencial
Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda., (2021).

Existe a su vez desarrollo de suelo, principalmente enriquecido de materia orgánica (horizontes “O” y probablemente “A”) y de baja evolución por el alta pendiente que favorece los procesos erosivos superficiales.

A partir de los aspectos intrínsecos del terreno descritos, se concluye que las altas pendientes y la presencia de depósitos no litificados asociados al cauce, favorecen la ocurrencia de eventos torrenciales cuando se presentan volúmenes de precipitación extremos que generen caudales suficientes para transportar el material a disposición en el cauce aguas abajo.

Las avenidas torrenciales pueden ser detonadas principalmente por acción de fuertes y/o largas lluvias, y por efectos volcánicos. A pesar de esto, sismos o acciones antrópicas pueden propiciar a su vez el desencadenamiento de estos procesos degradativos al generar desestabilización de laderas y aportar material sólido a los cauces.

Al analizar la distribución temporal de avenidas torrenciales en los Andes colombianos, se ha establecido una clara correlación entre la frecuencia de estos eventos con la ocurrencia del



fenómeno de variabilidad climática “El Niño Oscilación del Sur” en su fase fría o La Niña (Aristizábal, Arango Carmona, & García López, 2020). Es importante recalcar que esta anomalía atmosférica repercute, en la zona cordillerana, en un aumento considerable de los volúmenes de precipitación promedio e incrementa, por tanto, la presencia de lluvias extremas que propician avenidas torrenciales, movimientos en masa, deslizamientos, flujos e inundaciones en el territorio.

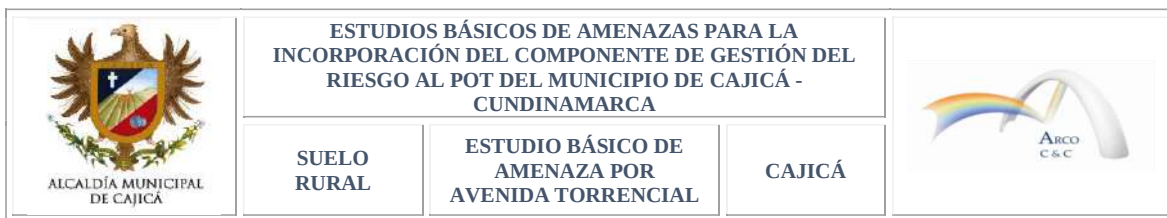
La región evaluada cuenta con promedios de precipitación anuales del orden de los 800mm, contando con sus valores máximos en los meses de marzo-abril y octubre-noviembre en respuesta al doble paso de la Zona de Confluencia Intertropical sobre el territorio colombiano. Ante la ocurrencia del ENSO en su fase La Niña de 2010-2011, en el mes de abril, por ejemplo, se registraron más de 250mm de lluvias con una precipitación diaria máxima del orden de los 43mm, siendo estos valores significativamente altos y peligrosos al sobrepasar el agua que puede almacenar el suelo sin romperse su tensión superficial y desencadenar procesos erosivos.

El grado de amenaza sísmica para el municipio de Cajicá fue determinada por el Servicio Geológico Colombiano como una amenaza media, implicando que existen algunas probabilidades de presentarse eventos sísmicos en la región. No obstante, teniendo en cuenta que la microcuenca evaluada es de carácter intermitente, los posibles sismos que se presenten en la región tendrían que venir acompañados de fuertes lluvias para producir avenidas torrenciales. Por tanto, los sismos pueden funcionar como mecanismos de retroalimentación del fenómeno al aportar potencialmente debilitamiento y desprendimiento de material al cauce, pero no como un factor detonante de avenidas torrenciales por sí mismo.

Respecto a los procesos volcánicos, aunque se han encontrado depósitos de esta naturaleza en el altiplano cundiboyacense, principalmente de caídas de cenizas y procesos efusivos (no comprobados) en el cenozoico (Vergara, De la Espriella, & Cortés, 2006), no se encuentran estructuras volcánicas cercanas que puedan favorecer la ocurrencia de avenidas torrenciales asociadas a este tipo de procesos.

Además de los procesos geológicos y atmosféricos que puedan generar procesos degradativos, la intervención humana también puede jugar un papel preponderante en la ocurrencia de las avenidas torrenciales. La rotura de embalses, la deforestación y el incremento de la temperatura por la emisión de gases de efecto invernadero son los principales mecanismos propiciadores de incrementos repentinos en caudales y la pérdida de resistencia del suelo, factores que favorecen la ocurrencia de procesos degradativos.

Dentro de lo evaluado en el trabajo de campo, hay una extensa deforestación de flora nativa para establecer diferentes actividades productivas. En las inmediaciones del cauce torrencial, hay un



reemplazamiento total de vegetación propia de la región por cultivos de eucalipto, generando la pérdida de la resistencia del suelo y facilitando la desestabilización del mismo alrededor del drenaje. Por tanto, los procesos antrópicos también favorecen la detonación de eventos amenazantes en el territorio.

Las cuencas pertenecientes al municipio de Cajicá, en el margen occidental del municipio, cuentan en general con pendientes altas, representando terrenos escarpados y muy escarpados que favorecen la ocurrencia de eventos torrenciales en las mismas.

En cuanto a las condiciones climáticas, la precipitación, temperatura y humedad relativa promedio tienen un comportamiento similar en la parte alta de las cuencas de la región, sugiriendo un relativo bajo contraste en el comportamiento hidrológico en los drenajes del territorio.

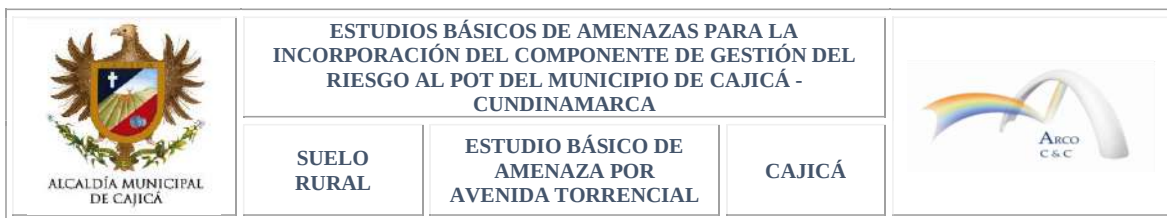
La gran mayoría de cabeceras de las diferentes unidades hidrográficas de Cajicá cuentan con precipitaciones promedio del orden de los 900mm anuales. No obstante, las microcuencas ubicadas al norte del municipio cuentan con un leve descenso en los volúmenes anuales de lluvias.

En principio, todos los drenajes principales podrían contar con eventos torrenciales, debido a sus condiciones hidrológicas similares y al antecedente de avenida torrencial documentado. No obstante, es necesaria la presencia de material no consolidado para que pueda ser potencialmente arrastrado por una corriente superficial ante la presencia de una precipitación extrema, como es el caso del cauce torrencial evaluado, el cual cuenta con un depósito glaciar asociado que brinda sedimentos y clastos de diversos tamaños al cauce.

En adición a esto, debido a las condiciones climáticas de baja humedad en la región, es necesario contar con eventos de lluvias extremos y/o de larga duración para generar un caudal suficiente para arrastrar material de gran tamaño y desencadenar una avenida torrencial. Estas precipitaciones de alta intensidad se presentan con mayor probabilidad en los periodos de tiempo de ocurrencia del Fenómeno de La Niña, aunque existen otros procesos atmosféricos de variabilidad climática como la Oscilación Cuasi-Bienal y la Oscilación Madden-Julian que aumenta la nubosidad en el territorio colombiano y genera anomalías positivas de lluvias en la zona.

Por último, y debido a la baja pendiente y morfología suavizada del casco urbano y sus alrededores, no es posible que se presenten avenidas torrenciales en la cabecera municipal, razón por la cual la zona de estudio de este fenómeno se restringe a las cuencas de alta montaña localizadas en el margen occidental de Cajicá.

Con el fin de construir el mapa de amenaza por avenidas torrenciales para el área rural del municipio de Cajicá a escala 1: 10.000, se consultan estudios realizados con antelación en el área,



a fin de establecer un marco de referencia para el estudio actual, como lo son los estudios del Plan Municipal de la Gestión del Riesgo (PMGR) realizado por el Consorcio Consultoría Cajicá de donde se disponen zonificaciones realizadas en el Acuerdo N° 16 de 2014 y el POMCA del Río Bogotá.

3.3.1.1.1. Estudio: Plan Municipal de la Gestión del Riesgo (PMGR) (Consorcio Consultoría Cajicá, 2019)

La zonificación de amenazas por avenidas torrenciales dentro del Plan Municipal de la Gestión del Riesgo (PMGR) realizado por el Consorcio Consultoría Cajicá se elaboró a partir del POMCA del Río Bogotá (CAR, 2018) y el Acuerdo N° 16 de 2014 con los que se apoyan las actividades de planificación municipal dentro del plan básico de ordenamiento. Dentro del documento se disponen una serie de lineamientos de los requerimientos en los estudios detallados de amenaza y riesgo por procesos de avenidas torrenciales de donde se establecen tres fases: 1) Fase 1: Definición de los sitios críticos ubicados dentro de las zonas con condición de alta amenaza y alto riesgo, por lo se considera una fase de trabajo de campo que incluya una inspección geológico-geotécnica y de fuentes hídricas complementado con una fase de revisión de información secundaria (fotointerpretación, cartografía base, captura de fotografías aéreas, topobatimetría, bases de datos de eventos; entre otras). 2) Fase 2: Exploración e investigación geotécnica, con el objetivo de caracterizar las variables requeridas en los sitios críticos previamente establecidos. Así mismo, es necesario aplicar las metodologías que permitirán procesar la información obtenida en campo orientadas a la producción de los resultados. 3) Fase 3: Diseños de obras necesarias para el control y protección de los sectores afectados por las amenazas y riesgos de avenidas torrenciales. En esta tercera fase se realizarán modelaciones hidráulicas, hidrológicas y geotécnicas según sea el caso.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

Nivel de amenaza	Criterio
Baja	$H < 0.4m$ ó $v < 0.4m/s$
Media	$h < 1.0m$ y $v = 0.4 - 1.5m/s$
Alta	$h > 1.0m$ ó $v > 1.5m/s$

Ilustración 8 Criterios la profundidad de la masa de agua o la velocidad del flujo torrencial.

Fuente: PMGR Cajicá. Consorcio Consultoría Cajicá 2019

Para el fenómeno de avenidas torrenciales, se recomienda tomar como criterios la profundidad de la masa de agua o la velocidad del flujo torrencial, lo cual definiría las siguientes categorizaciones de la amenaza en el corto y largo plazo.

3.3.1.1.2. Ajuste del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Bogotá (POMCA, 2019)

Dentro del documento del Ajuste del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Bogotá (POMCA, 2019) en el Volumen V – Gestión del Riesgo se definen las metodologías para la determinación de la susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales. Los análisis se realizan de acuerdo con el Protocolo para la Incorporación de la Gestión del Riesgo en los POMCA (MINAMBIENTE, 2014) que establece en primer lugar un análisis y caracterización de eventos torrenciales que han ocurrido, la generación de un mapa de vulnerabilidad por eventos torrenciales IVET, de acuerdo con la metodología del IDEAM (que en realidad más que un mapa de vulnerabilidad corresponde a uno de susceptibilidad de las cuencas a sufrir eventos torrenciales), se realiza un análisis geomorfológico para identificar las unidades relacionadas con eventos torrenciales, se efectúa un análisis de susceptibilidad y finalmente se realiza el análisis de amenaza en las áreas previamente identificadas como críticas. Teniendo en cuenta que dos de los factores más importantes para evaluar la amenaza son la recurrencia de los eventos y las características morfológicas que dan idea de lo reciente o antiguo de los flujos, la base de datos de eventos históricos debe ser lo suficientemente amplia para que permita realizar un análisis de esta naturaleza. Sin embargo, el número de avenidas torrenciales identificado en la cuenca es muy bajo y por lo tanto puede resultar inapropiada la calificación de los niveles de amenaza

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

exclusivamente con tales criterios. Se optó como método alternativo evaluar, mediante modelación hidráulica simplificada la posible altura y velocidad del flujo para diferentes periodos de retorno y con estos parámetros calcular el ancho de influencia del flujo. Se encontró que la cuenca presenta en su gran mayoría condiciones de torrencialidad alta que por las características de velocidad y altura del flujo pueden generar muertes y daños graves en las zonas de influencia. Estos anchos de influencia en la zona de alta pendiente están enmarcados por el mismo cauce del río, pero en las zonas de entrega se amplían considerablemente y conforman abanicos y otras geoformas que se pueden identificar a partir de los análisis geomorfológicos.

La metodología establecida para la evaluación de la Amenaza por avenidas torrenciales se realiza con base en el Protocolo para la incorporación de la Gestión del Riesgo en los POMCA, (MINAMBIENTE, 2014). En primer lugar, comprende la evaluación de la susceptibilidad a partir de la caracterización geomorfológica y el análisis de eventos históricos, con lo cual se determinan las zonas críticas para las cuales se debe realizar posteriormente la evaluación de amenaza.

Las zonas críticas se deben identificar con base en los siguientes criterios que en general hacen parte de la evaluación de susceptibilidad:

- Identificación las unidades geomorfológicas relacionadas con procesos de avenidas torrenciales.
- Evaluación de la amenaza en zonas identificadas como de susceptibilidad media, alta y muy alta en el IVET.
- Identificación y delimitación de zonas donde han ocurrido eventos de avenidas torrenciales.

Una vez identificadas las áreas críticas o susceptibles se hace la definición de las categorías de amenaza con base en los siguientes criterios:

- **Amenaza Torrencial Alta:** zonas identificadas con actividad reciente y con evidencias históricas claras (más de un evento histórico identificado) e indicadores cronológicos en la categoría de reciente de acuerdo con la clasificación de (Parra, Viana, & González, 1995), la cual se basa fundamentalmente en características de la cobertura de los depósitos observados en campo.
- **Amenaza Torrencial Media:** zonas con actividad torrencial que cumplen al menos uno de los siguientes aspectos: evidencias de evidencias históricas de al menos una avenida torrencial; elevación insuficiente por encima del canal torrencial de acuerdo con las

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

características de la cuenca , principalmente del área de drenaje (en general diferencias de elevaciones menores a 1,5 m) aguas abajo del punto de avulsión potencial (disminución brusca de la sección, puentes o tuberías de poca sección que pueden ser obstruidos por el material arrastrado). Indicadores cronológicos en la categoría de maduro, de acuerdo con la clasificación de (Parra, Viana, & González, 1995).

- **Amenaza Torrencial Baja:** Áreas torrenciales identificadas por fotointerpretación (a la escala de trabajo o mayores), las cuales no pueden ser identificadas dentro de las categorías anteriores (zonas alejadas de los canales torrenciales y sin evidencias claras de eventos históricos y sus afectaciones). Indicadores cronológicos en la categoría de antiguo, de acuerdo con la clasificación de (Parra, Viana, & González, 1995).

Dentro de las zonificaciones dispuestas por el POMCA en la Ilustración 9 se presenta el mapa de amenaza por avenidas torrenciales del municipio de Cajicá donde se evidencia grados de amenaza alta y media sobre las principales corrientes del río Bogotá y río Frio.

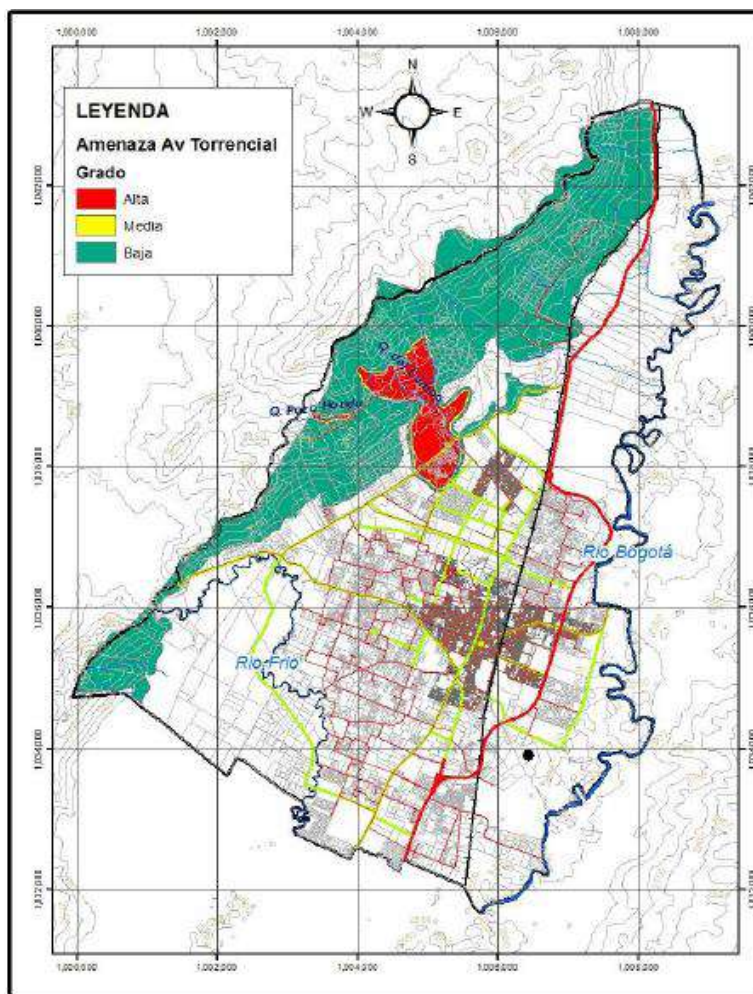


Ilustración 9 Mapa de amenaza por avenidas torrenciales.
Fuente: POMCA Río Bogotá. (CAR, 2018).

3.3.1.1.3. Acuerdo N° 16 de 2014

La zonificación de amenazas por avenidas torrenciales dispuesta en el Acuerdo N° 16 de 2014 “POR EL CUAL SE ADOPTA LA REVISIÓN GENERAL DEL PLAN BÁSICO DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ ADOPTADO MEDIANTE EL ACUERDO NÚMERO 08 DE 2000 Y MODIFICADO POR LOS ACUERDOS MUNICIPALES 009 DE 2002, 007 de 200, 21 de 2008”, dispone el siguiente mapa de amenaza por avenidas torrenciales para el municipio de Cajicá. Se tiene condiciones de

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

amenaza sobre el Río Bogotá en la zona norte y sobre la zona occidental de la Vereda Fugua en el Río Frio.

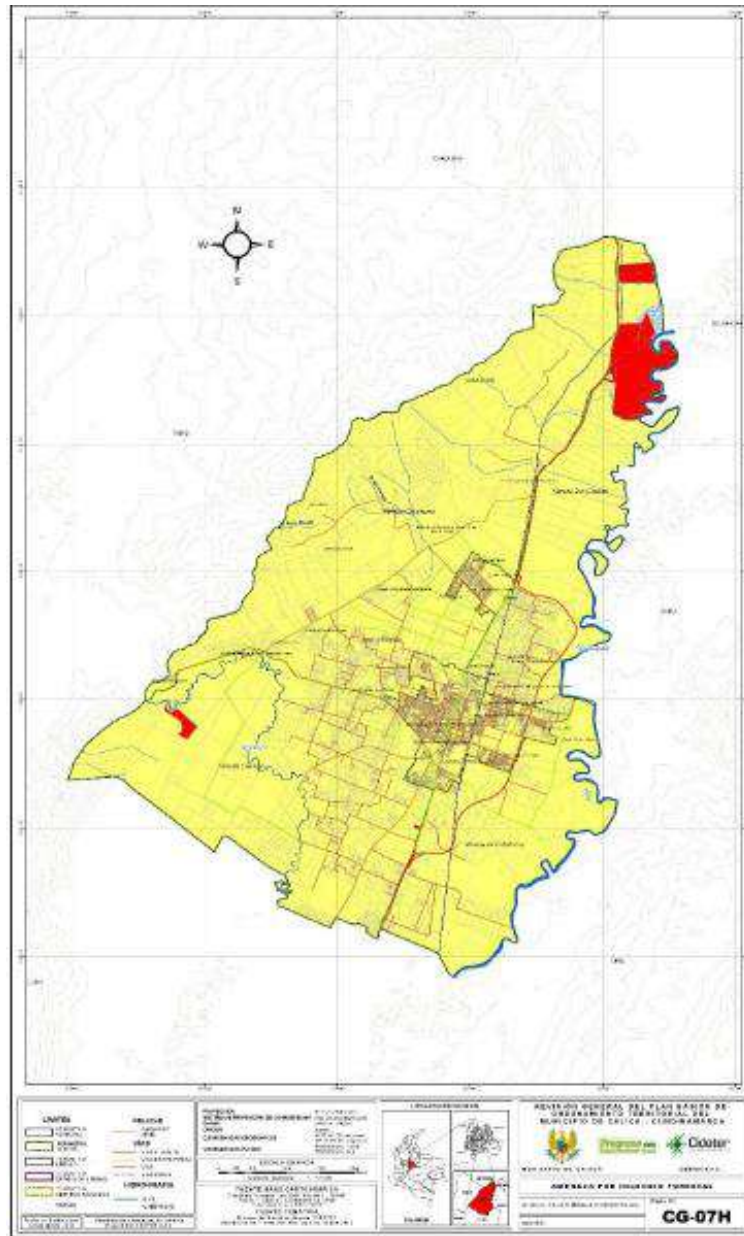


Ilustración 10 Mapa de amenaza por avenidas torrenciales.

Fuente: PBOT Cajicá-Acuerdo N°16 de 2014.

3.4. Caracterización Hidrológica

Mediante la aplicación del modelo del software gratuito HEC-HMS y con los parámetros correspondientes a: área de drenaje, curva número, tiempo de retardo el cual se calculó con base en el tiempo de concentración por medio de los métodos escogido para cada escenario y los datos de lluvia máxima, se configuró el modelo de cuenca, además dado que el software permite el ingreso de los datos de serie de tiempo se realizó el modelo meteorológico, con el fin de calcular la estimación de caudales máximos de las crecientes producidas por las cuencas hidrográficas mayores para periodos de retorno entre 2.33, 10, 15, 50 y 100 años.

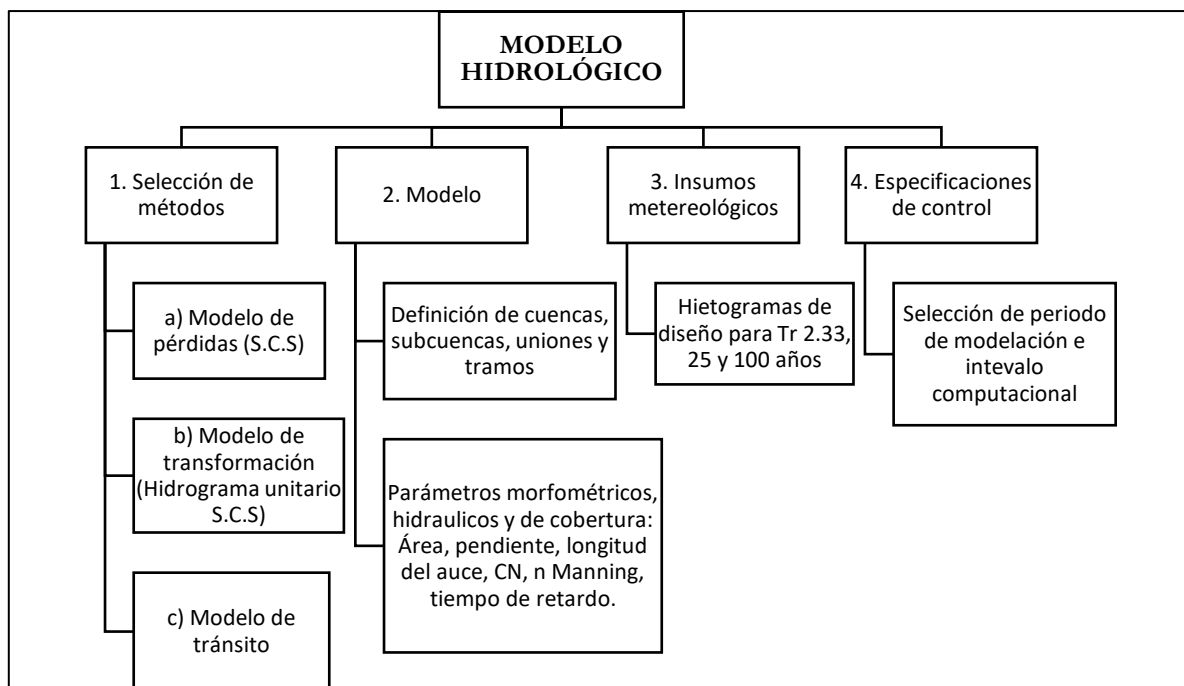


Ilustración 11 Modelo hidrológico HEC-HMS.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

3.4.1. Modelo de pérdidas (S.C.S)

La precipitación efectiva es la precipitación que se convierte en escorrentía directa, por lo tanto, es importante calcular las abstracciones de una tormenta, las cuales incluyen la intercepción, la detención superficial y la infiltración propiamente dicha.

	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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

El método implementado se denomina “Número de Curva”, propuesto por el SCS; en este método, la profundidad de escorrentía (es decir, la profundidad efectiva de precipitación) es una función de la profundidad total de precipitación y de un parámetro de abstracción referido al número de curva de escorrentía, denominado número de curva o CN. El número de curva varía en un rango de 1 a 100, existiendo una función de las siguientes propiedades productoras de escorrentía de la cuenca hidrográficas: i) tipo de suelo hidrológico, ii) utilización y tratamiento del suelo, iii) condiciones de la superficie del terreno, y (iv) condición de humedad antecedente del suelo. (INVIAS, 2009).

El valor CN corresponde con el número de curva de la metodología del Soil Conservation Service, de acuerdo con el tipo de cobertura vegetal del suelo, y la geología del suelo en la zona de estudio.

De acuerdo con lo anterior, se utilizó un CN de 74 correspondiente a pastos en condiciones óptimas de grupo hidrológico C.

La lluvia efectiva que causa escorrentía superficial, y la magnitud de las abstracciones de una tormenta, se pueden obtener por el método del Soil Conservation Service, a partir de las siguientes relaciones empíricas:

$$Q = \frac{(P - 0.2 S)^2}{P - 0.8 S}$$

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

Donde Q es la escorrentía total acumulada, pulgadas, P es la precipitación total del evento, pulgadas. S es la infiltración o retención potenciales máxima, pulgadas y CN es la curva número de curva.

3.4.1.1. Modelo de transformación (hidrograma unitario S.C.S)

En términos generales, un hidrograma unitario es la función de respuesta de pulso unitario para un sistema lineal, y se define como el hidrograma de escorrentía directa resultante de una unidad de exceso de lluvia (precipitación efectiva) generado uniformemente sobre el área de drenaje a una tasa constante a lo largo de una duración efectiva (Ven Te Chow, 1994). Las suposiciones del modelo son: i) El exceso de precipitación tiene una intensidad constante dentro de la duración efectiva, ii) El exceso de precipitación está fuertemente distribuido a través de toda el área de

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

drenaje, iii) el tiempo base, del hidrograma unitario resultante de un exceso de lluvia de una duración dada, es constante, iv) las ordenadas de todos los hidrogramas son directamente proporcionales a la cantidad de escorrentía directa, y v) el hidrograma resultante de un exceso de lluvia dado refleja las características no cambiantes de una cuenca.

El SCS propuso un hidrograma sintético triangular cuya geometría se define con el área y el tiempo de concentración de la cuenca, así:

$$Q_p = 0.2083 \frac{A}{t_p} E$$

Donde A es el área de la cuenca en Km², E es la escorrentía unitaria, 1mm y t_p el tiempo al pico medio desde el comienzo del hidrograma, el cual se obtiene con la expresión:

$$t_p = \frac{d}{2} + t_l = \frac{d}{2} + 0.6 * t_c$$

Donde t_l es el tiempo rezagado de la cuenca que corresponde a una fracción (60%) del tiempo de concentración t_c y d es la duración de exceso de precipitación unitaria.

Para finalizar la descripción geométrica del hidrograma, el ancho de la base se define como:

$$T_{bt} \frac{8}{3} t_p$$

Dada la carencia de cuencas instrumentadas en la zona plana del área de estudio, se evidenció la necesidad de implementar modelos de transformación de precipitación en escorrentía directa; con estos métodos, en los que se requieren datos históricos de lluvia de corta duración y que se aplican a una cuenca hidrográfica, se calcula el caudal máximo de escorrentía superficial.

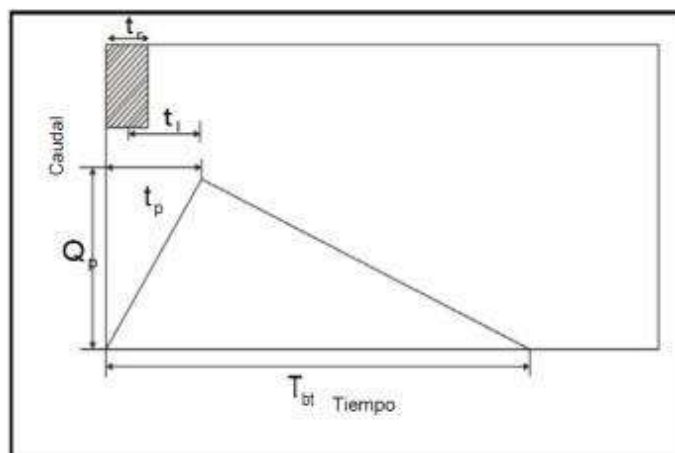


Figura 11 Hidrograma Unitario Triangular del SCS
Fuente: Valentín (2005)

Existen dos métodos ampliamente utilizados y la selección de ellos depende del área de drenaje de la cuenca. Así, para cuencas con área menor a 2,5 km² se utiliza el método racional y para cuencas con área mayor se utilizan modelos del hidrograma de escorrentía directa (INVIAS, 2009), o el hidrograma unitario del SCS.

3.5. Caracterización de las condiciones geológicas y geomorfológicas

En el municipio de Cajicá afloran la Formación Conejo, cuya edad se determinó entre Cenomaniano Superior – Coniaciano Inferior y está conformada por bancos de arenitas intercaladas con lodolitas grises. De igual forma aflora el Grupo Guadalupe, más exactamente las Formaciones Plaeners, Labor y Tierna y Arenisca Dura. El Grupo Guadalupe tiene una edad de Campaniano – Maastrichtiano. Además de las unidades geológicas de edad cretácica que afloran al occidente, se encuentran unidades cuaternarias que conforman en su mayoría la geología del municipio que se observan en la Ilustración 12.

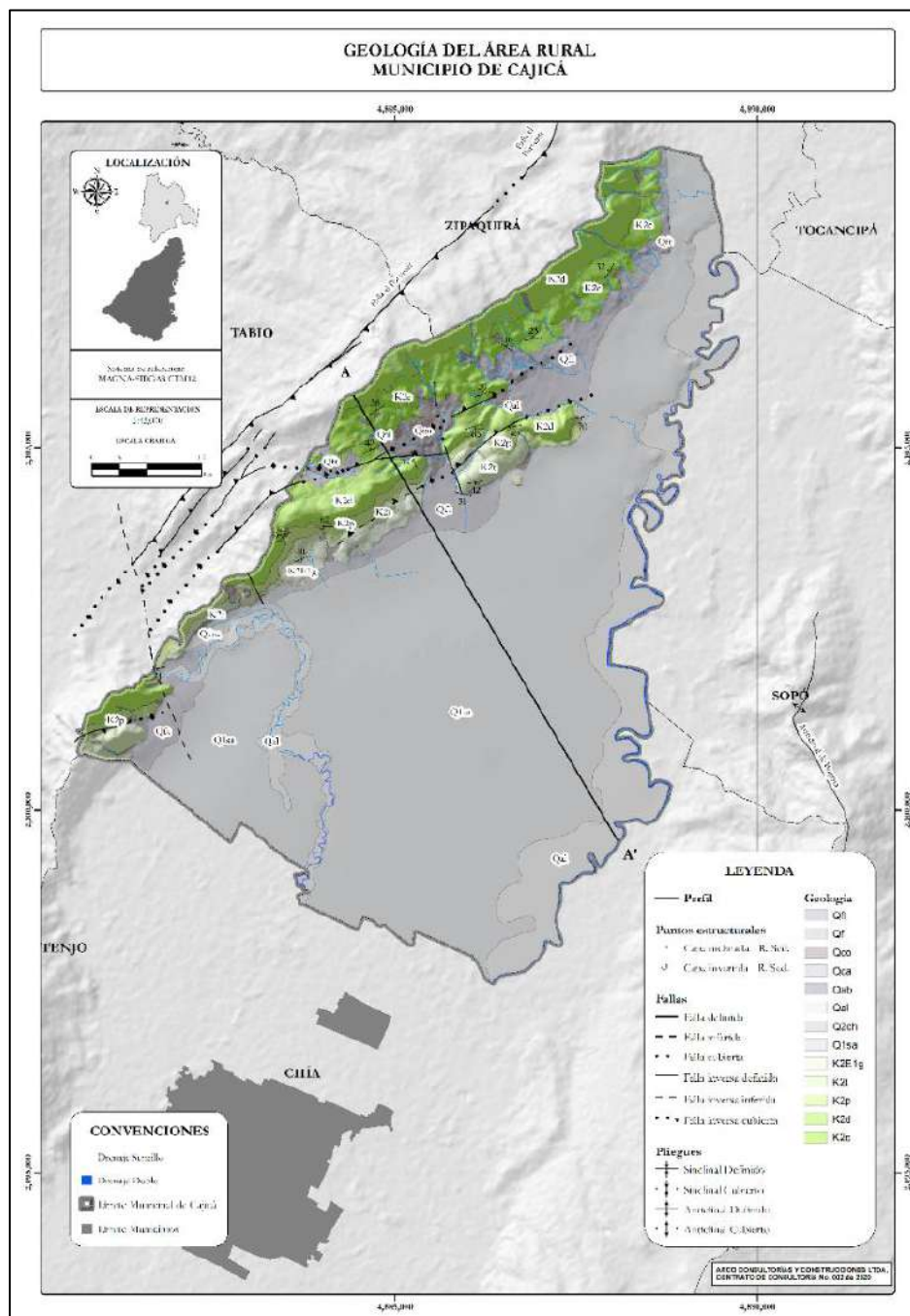
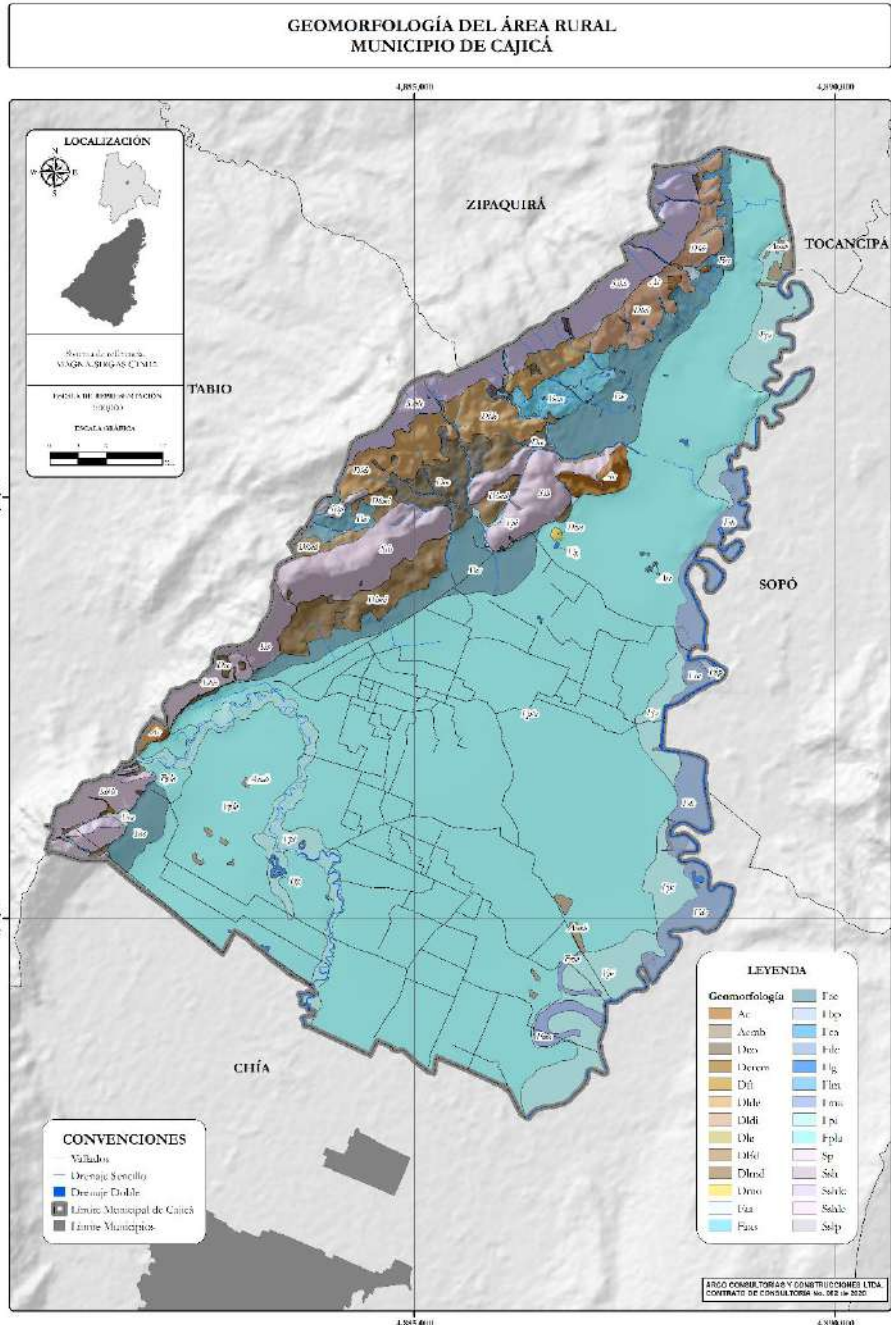


Ilustración 12 Mapa geológico suelo rural del municipio de Cajicá, Cundinamarca
Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda. (2021)

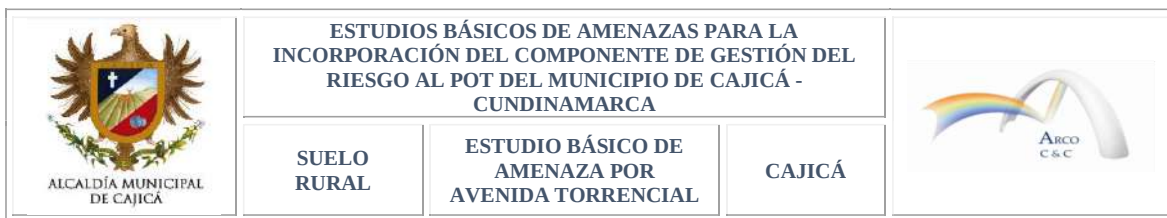
 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

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. En cuanto a su distribución en el inventario geomorfológico, se evidencia que la mayoría de los eventos morfodinámicos se encuentran localizados en los límites norte y oeste del municipio sobre los cerros occidentales. No obstante, algunos pocos se localizan en las zonas planas del municipio (sureste 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.

La localización de la mayoría de los eventos de tipo deslizamiento se encuentran sobre los cerros occidentales 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.



Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda. (2021)



3.6. Caracterización de la producción y aportes de sedimentos

El aumento de carga de sedimentos dentro de una cuenca torrencial puede generar la ocurrencia de una avenida torrencial, es por lo anterior que en este capítulo se realizará un análisis de dichos procesos para identificar cuencas torrenciales con aporte de materiales significantes que permitan generar condiciones para la ocurrencia de avenidas torrenciales. Los aportes de sedimentos son originados principalmente por los procesos denudacionales presentes dentro del área de estudio, asumiendo la no existencia de factores antrópicos, se consideran dos procesos fundamentales: erosión y movimientos en masa. Dado lo anterior, se considera dentro de este apartado la realización de una zonificación de los procesos de erosión y de laderas potencialmente inestables.

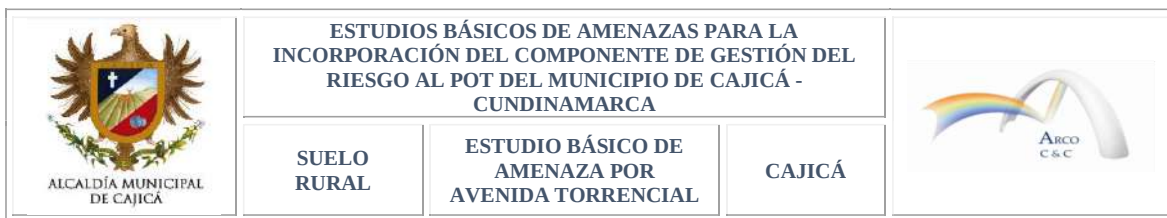
Considerando la forma en que se desarrolla el fenómeno, que no respeta fronteras geopolíticas, si no naturales, más exactamente bajo la influencia de las cuencas hidrográficas, el análisis de avenidas torrenciales no se debe limitar al perímetro del municipio. Por ende, el área de trabajo para este capítulo corresponde a las unidades hidrográficas de las corrientes hídricas que afecta de manera directa al territorio comprendido por el municipio de Cajicá. Por lo anterior, los insumos cartográficos y espaciales generados para la ejecución del modelo numérico se realizan de la siguiente forma: los insumos básicos y temáticos dentro del suelo rural se realizan a la escala 1:10.000 cumpliendo la normatividad vigente, pero dicha información se extiende o se complementa con escalas menores para abarcar las unidades hidrográficas objeto de estudio, de forma tal que se concilia con los requerimientos normativos y la información disponibles. Estos insumos se efectúan para las temáticas de amenaza por erosión (con los insumos de erodabilidad, longitud y pendiente de la ladera que se derivan del DEM, factor de cobertura vegetal que se obtiene del temático de coberturas) y movimientos en masa (que se obtiene de los insumos de UGI y DEM).

3.6.1. Zonificación de la amenaza por erosión

El presente estudio, realiza la metodología de estimación de amenaza a la erosión del área siguiendo la filosofía de Saldarriaga (2003). Es decir, usando el álgebra de mapas en donde los diferentes factores son representados por valores y se integran mediante una operación espacial dada por la siguiente fórmula:

$$A = IFm * K * LS * C$$

Donde, A es el promedio de pérdida de suelo en ton/ha*año, IFm corresponde al índice de Fournier que representa el factor de erosividad de las precipitaciones dadas en



$[(MJ/ha) \cdot (mm/año)]$, K es el factor de la erodabilidad del suelo (ton/MJ*mm), LS es el factor topográfico que relaciona la longitud y pendiente de una ladera y C es el factor de cobertura del suelo, estas tres últimas son adimensionales.

La aplicación de este modelo desde el punto de vista del ciclo de erosión se realiza para identificación de las zonas con erosión neta; es decir, las áreas asociadas a zonas de transporte y depósito son excluidas dentro de este análisis, ya que al ser un prototipo estático de la realidad no tienen en cuenta las variaciones espacio - temporales que puedan experimentar los factores.

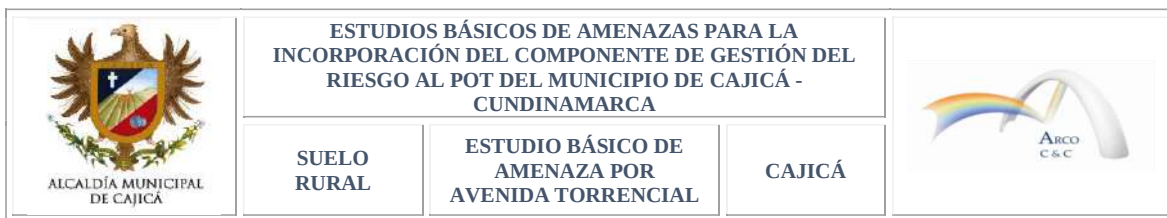
3.6.1.1. Índice de erosividad (Índice de Fournier modificado)

El factor de erosividad es la cuantificación del poder o potencial erosivo que tienen las gotas de lluvia al impactar en el suelo con una intensidad suficiente para romper los agregados superficiales convirtiéndolos de esta manera en partículas transportables. Dicho proceso se cuantifica mediante la relación entre su energía cinética y la intensidad de una tormenta de duración de 30 minutos. Es decir, a mayor lluvia se presenta un mayor potencial erosivo, pese a que estas presenten una baja correlación. Wischmeier y Smith (1978), concluyen que el poder erosivo dado por la energía potencial de las gotas de lluvia se encuentra en función del tamaño, velocidad, forma, intensidad y distribución; las cuales, se asocian a los parámetros de duración de la tormenta y la velocidad del viento.

De acuerdo con Arnoldus H., 1977 el factor de erosividad R del SCS de los EE.UU es determinado tradicionalmente en el cálculo de la energía cinética para cada periodo de lluvia de una tormenta por intensidad en ese rango de tiempo; luego, esto es sumado y multiplicado por la intensidad máxima en 30 minutos. Repitiendo este proceso durante un determinado número de años se obtiene el valor promedio anual y el mismo se establece como el valor de R (EI₃₀) (Wischmeier y Smith, 1978).

De este modo, Ramírez, 2006, establece la ecuación para hallar el valor del factor R (EI₃₀) en su estudio “Evaluación del riesgo por erosión potencial de la zona cafetera del departamento de Caldas, Colombia”, para el estudio presente se empleará este modelo debido a la disponibilidad de datos y la localización de la zona de estudio, y se determina por la siguiente ecuación:

$$EI_{30} = \sum_{12}^1 30,4(IMF) + 28,3$$



Donde, $EI_{30} = R$ =Factor de Erosividad ($MJ*mm*Ha^{-1}$); IMF = índice de Fournier Modificado por Arnoldus (Promedio Mensual). Los demás coeficientes establecidos son valores para la región trabajada, en este caso, Colombia.

Como se evidencia con anterioridad, este modelo plantea el manejo de diferentes índices que relacionan este parámetro (Fournier, 1973; Wishmeier modificado, 1962; Cortes, 1991; Hudson, 1971; Lal, 1976), entre ellos, el Índice de Fournier modificado por Arnoldus (IMF) (Arnoldus H., 1977), ya que representa la agresividad climática dado un régimen pluvial y se obtiene por la siguiente expresión:

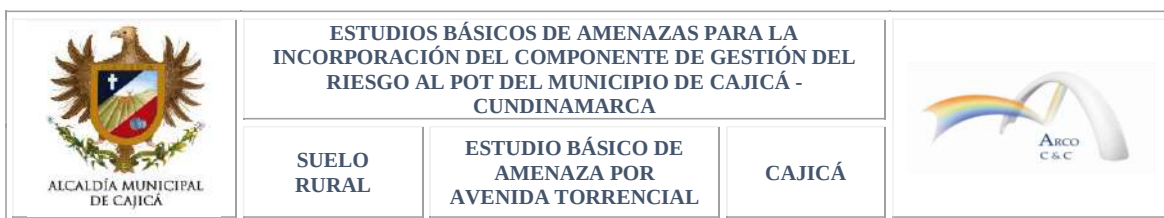
$$IF_m = \sum_{i=1}^{i=12} \frac{P_i^2}{P}$$

Donde, IFm = Índice de Fournier modificado por Arnoldus; P_i = Precipitación mensual del mes i (mm) y P = Precipitación anual de lluvias acumuladas (mm).

El índice de Fournier modificado caracteriza el fenómeno de las lluvias en zonas extensas, determinando la agresividad de la lluvia no solo por la afectación de las gotas de lluvia, si no por su potencial de erosión en un determinado terreno producto de la precipitación, la modificación de este índice, propone que no solo la precipitación mensual del mes más húmedo es la que genera erosión sino que hay meses con menores cantidades de precipitación que también producen erosión superficial aunque en menor proporción. (Arnoldus,1997)

El cálculo del índice se realiza para las estaciones meteorológicas que involucran la zona de estudio, para el municipio de Cajicá, se encuentran 9 estaciones meteorológicas, las cuales, presentan registros de precipitación desde el año 1991 hasta el año 2020 (rango de datos a trabajar). El modelo establecido por Ramírez, emplea como variable principal este índice, el cual, de acuerdo con el modelo guía, se debe calcular mensualmente, al tener 30 años de registros, se decide por criterio ingenieril promediar los índices mensuales obtenidos por cada año, definiendo de este modo un índice modificado de Fournier mensual promedio de todos los años, para un total de 12 índices correspondientes a cada mes del año. Siguiendo a esto se emplea la ecuación establecida por Ramírez, obteniendo un valor del Factor de Erosividad para cada estación de la zona de estudio, para convertir la variable continua en el espacio se realiza una interpolación de dichos valores mediante función matemática asignando valores donde no fueron medidos.

Los valores del índice de Fournier para el municipio de Cajicá oscilan de 902,15 a 1304,89. Los valores altos se concentran en la parte occidental, disminuyendo en sentido nororiente y suroriente.



Los altos valores se distribuyen principalmente en la zona occidental afectando en mayor escala al centro poblado Aguanica, y en menor escala a los centros poblados La Palma y Santa Ines. Los valores medios son los más representativos en el municipio y se encuentran principalmente en los costados centro y norte de la zona de estudio. Los valores más bajos, cercanos a 2249,52, se ubican en los costados sur y suroriente, de este modo, las veredas que presentan menores valores del índice son Los Pasos, Barro Blanco, Calahorra y Camino Los Vargas.

De acuerdo con los valores arrojados por el factor de erosividad para el municipio, se puede concluir que, en el costado occidental presenta las mayores intensidades de lluvia, por lo que la disgregación del suelo puede ser mayor implicando índices altos de erosividad. Adicional, en el costado sur y centro, debido a que los valores del factor son moderados, la susceptibilidad a presentarse procesos erosivos es media, mientras que, en la zona sur y oriente, se concentran los menores valores de este índice, por lo cual, la erosividad tiende a ser menos intensa que en el resto del municipio, disminuyendo de esta manera la susceptibilidad en esta zona en específico de presentar procesos erosivos por causa de lluvias.

Tabla 16 Estaciones pluviométricas y valores del factor R, usados en el presente estudio.

ESTACION	R(MJ*mm*Ha-1)
ALCO [21201590]	899,60
C.UNIV.AGROP-UDCA [21206260]	1206,29
GUANATA [21205890]	1090,49
LA COSECHA - AUT [21205910]	1231,77
PANTANO REDONDO 1 [21201060]	1514,17
SANTILLANA [21206020]	1137,86
STA ISABEL [21201760]	952,66
SUASUQUE [21205920]	1144,34
TABIO GRANJA [21201630]	1234,77

Fuente: Arco Consultorias & Construcciones Ltda., (2021)

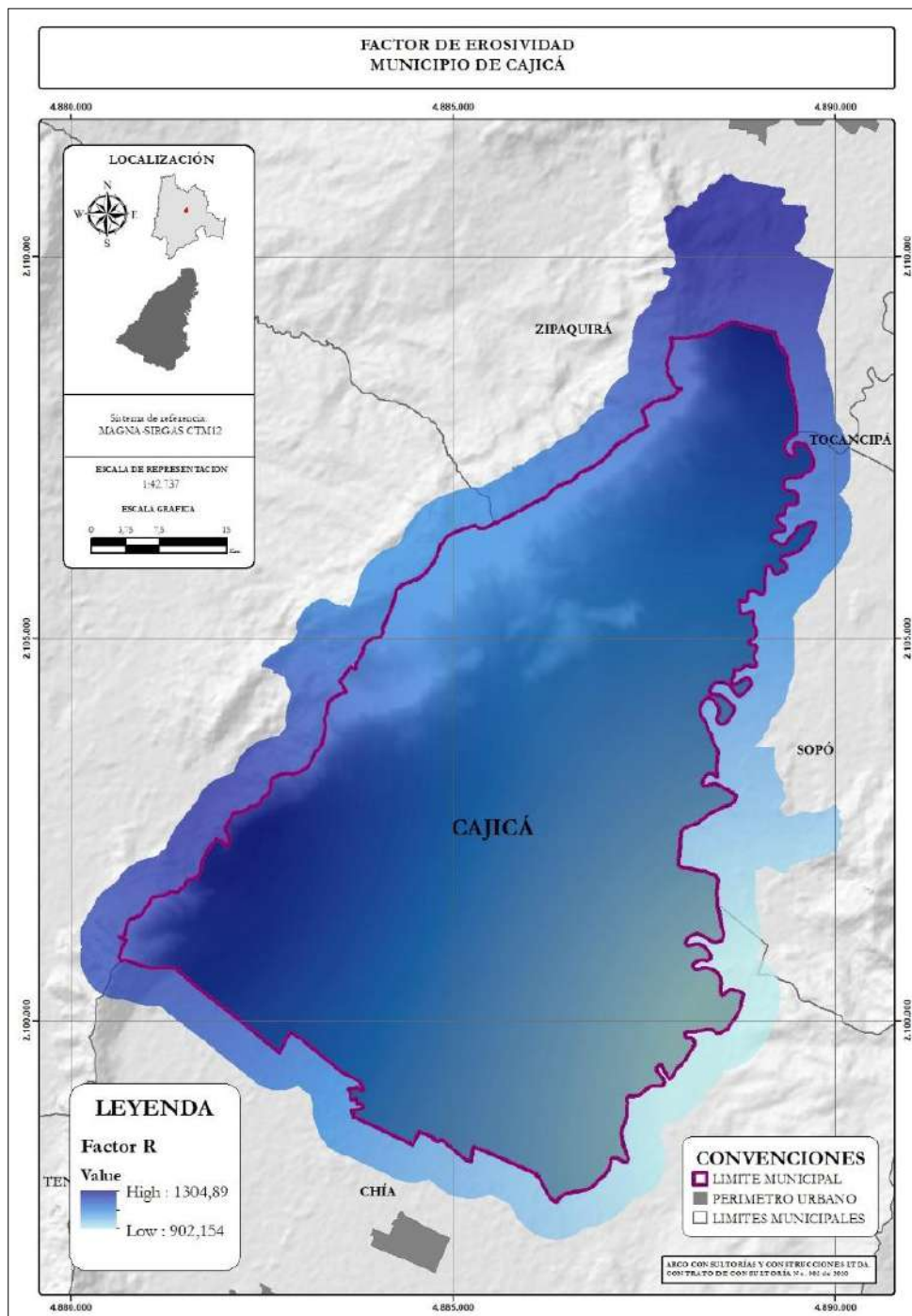


Ilustración 14 Zonificación del Índice de Erosividad suelo rural municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorias & 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

3.6.1.2. Factor de Erodabilidad (K2)

La erodabilidad del suelo se define como la mayor o menor susceptibilidad del material del suelo de ser disgregado y transportado por los agentes erosivos (Pérez, 2001), siendo esta, una característica inherente a los suelos, ya que, depende de la acción individual y/o combinada de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, así como también del manejo que de ellos se tenga (Barrios, 1995). Esta susceptibilidad de degradación es medida por la unidad del factor R cuando el suelo en cuestión es mantenido permanentemente desnudo con laboreo secundario a favor de la pendiente (unidad estándar), siendo esta la condición más crítica para que se presente la máxima erosión posible, este valor se reduce dentro de la ecuación general si presenta una buena cobertura asociada.

Este índice calcula a través del monograma de (Wischmeier & Smith, 1978), el parámetro de tamaño de partículas relacionado a los porcentajes granulométricos de limo, arena y arcilla, porcentaje de materia orgánica en función del porcentaje de carbono, estructura del suelo y clase de permeabilidad de los perfiles, los cuales son integrados en la ecuación definida por la USDA, (USDA, 1997) la cual se contempla a continuación.

$$K = \frac{((2.1 M^{1.14} * 10^{-4}) * (12 - a)) + (3.25 * (b - 2)) + (2.5 * (c - 3))}{100}$$

Donde,

K = Factor de Erodabilidad (Ton/MJ*mm)

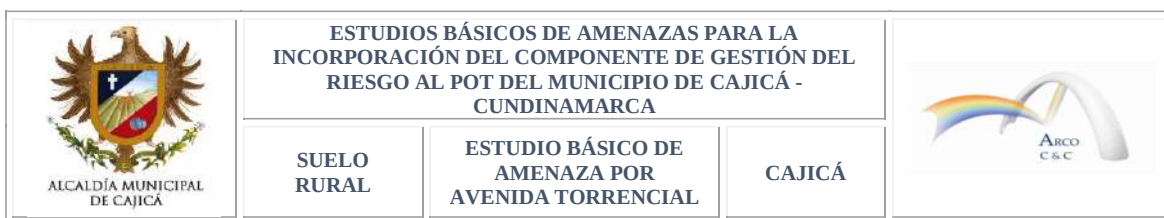
M = Parámetro asociado al tamaño de partículas

a = Porcentaje de Materia Orgánica

b = Código correspondiente a la clase de estructura, definida según Soil Survey Manual 1951 (USDA, 1951).

c = Código de la clase de permeabilidad del perfil definida según descripción del Soil Survey Manual, 1951 (USDA, 1951).

Redefinidas y actualizadas las unidades de suelos, se extraen de estos la información de estructura, permeabilidad, parámetro M y materia orgánica que se requiere para la obtención del factor K



como se explica a continuación.

El % MO es una variable cuya relación resulta ser indirectamente proporcional con respecto al factor de erodabilidad, dado que, si se incorpora al sistema suelo se incrementa la agregación en las partículas mejorando la estructura de este, y con ello, su infiltración, movimiento y retención del agua, permeabilidad y su resistencia a la acción de las gotas de lluvia y transporte dada por la escorrentía superficial (puede llegar a retener seis veces su peso en agua) (Camacho López, 1994).

De los perfiles de suelo también se extrajo información relaciona a su textura; específicamente se realizaron promedios ponderados para los perfiles que caracterizaban la unidad de suelo, de manera tal que se relacionó el contenido relativo del tamaño de las partículas arena, limo y arcilla, información que permitiría identificar los parámetros asociados a la permeabilidad, estructura y tamaño de las partículas.

La estructura del suelo es la manera en cómo se encuentra distribuido y dispuesto granulométricamente el suelo a partir de los elementos que lo componen, cuando las partículas individuales se agrupan toman aspecto de partículas mayores a lo cual se denomina agregados. La resistencia que presente los agregados a desintegrarse o romperse frente a la acción del agua se encuentra directamente ligado a sus constituyentes como Fe, Al, materia orgánica y contenido de arcilla (complejos arcillosos – húmicos), e influyendo en características como la porosidad del suelo, permeabilidad, dureza y aireación.

La permeabilidad, es la propiedad de un suelo en permitir el paso de agua a través de sus vacíos bajo la acción de una carga hidrostática impidiendo que dicho tránsito altere la estructura interna, la variabilidad del grado de permeabilidad de los suelos depende de la granulometría (tamaño de grano y distribución granulométrica (estructura), tamaño y continuidad de los poros y grietas, y naturaleza mineralógica (composición química del material)).

Los códigos de permeabilidad y estructura del suelo se obtuvieron en función de su textura mediante el diagrama triangular de arcillas, limos y arenas (ver Tabla 17 y Diagrama 4), ya que, la fracción granulométrica condiciona la caracterización de estas variables, valores que se tenían de antemano en la caracterización de las unidades de suelo a partir del análisis de los perfiles.

En la Tabla 17 se describe las variables de permeabilidad y estructura de acuerdo con lo establecido por Mannaerts y en el Diagrama 4 el diagrama triangular de suelos para determinar la clase de permeabilidad.

Tabla 17 Códigos de permeabilidad y estructura del suelo en función de su textura.

Fuente: (Mannerts, 1999).

Permeabilidad cm/h

1 - rápida a muy rápida	>15
2 - medianamente rápida	15-4
3 - moderada	4-2
4 - moderadamente lenta	2-0,5
5 - lenta	0,5-0,15
6 - muy lenta	<0,15

Conductividad hidráulica a saturación cm/h

Arcilla 18%
Limos 46%
Arenas 36%

Arcilla

Limo

Arena

Conductividad hidráulica a saturación cm/h

El parámetro asociado al tamaño de las partículas (M) hace referencia a la relación entre el porcentaje de limo, arena y arcilla de cada unidad de suelo, dicho parámetro es calculado a partir de la siguiente fórmula:

$$M = (\% \text{ Limo} + \% \text{ Arena}) * (100 - \% \text{ Arcilla})$$

En la Tabla 18 se resumen los valores obtenidos de cada una de las variables mencionadas anteriormente y así mismo el resultado final para el Factor K en relación con cada una de las unidades de suelo presentes en el municipio.

Tabla 18 Valores empleados para el cálculo del Factor K en relación con la unidad de suelo presente en el municipio.

UNIDAD DE SUELO	% ARENA	% LIMO	% ARCILLA	% MATERIAL ORGÁNICO	M	COD. ESTRUCTURA	COD. PERMEABILIDAD	FACTOR K
CH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,000
RzL21	32,69	40,62	26,69	11,71	5374,36	3	5	0,093
RzM07	0,10	33,29	66,58	4,27	1115,89	4	6	0,188
MsL05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,000
MnL01	50,79	38,22	11,01	9,50	7920,86	3	4	0,203
RzM08	6,56	31,15	62,29	3,46	1422,02	4	6	0,210
RaL02	12,89	32,68	54,43	6,39	2076,47	4	6	0,211
RzL12	8,68	30,47	60,94	2,30	1529,29	4	6	0,227
LxL01	43,59	32,61	24,01	7,72	5789,86	3	4	0,232
RzM14	27,58	25,42	47,02	2,75	2808,05	3	5	0,248
RzL31	14,65	29,08	56,28	1,11	1911,75	4	6	0,266
MsM06	34,99	17,99	46,76	1,13	2820,66	3	5	0,278
RaL03	43,28	31,32	25,41	6,33	5564,74	3	4	0,279
MsM07	44,09	13,57	42,34	2,67	3324,27	3	5	0,285
RzL08	32,08	50,65	17,27	6,97	6844,63	3	4	0,306
RzM01	24,63	34,27	41,12	2,00	3467,48	3	5	0,310
RzM17	12,47	58,35	29,18	5,00	5015,85	3	5	0,326
MsM04	48,85	13,30	37,85	3,12	3862,60	4	5	0,344
RzM06	61,94	24,92	13,13	5,20	7545,40	2	3	0,376
LxM04	67,47	8,47	24,07	4,17	5765,66	3	4	0,376
RzM10	5,71	62,86	31,43	2,71	4701,85	3	5	0,382
MaM03	61,57	17,07	21,36	4,41	6184,39	3	4	0,392
LxM05	48,27	16,52	35,21	2,07	4198,31	4	5	0,397

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

UNIDAD DE SUELO	% ARENA	% LIMO	% ARCILLA	% MATERIAL ORGÁNICO	M	COD. ESTRUCTURA	COD. PERMEABILIDAD	FACTOR K
RaM02	43,83	24,90	31,27	2,14	4723,59	3	5	0,402
RzM12	12,47	58,35	29,18	1,87	5015,85	3	5	0,434
LaM01	53,56	11,58	34,89	0,17	4241,54	4	5	0,454
MsL03	61,71	32,20	6,08	5,07	8820,30	2	3	0,458
MsL08	64,26	28,77	6,96	4,88	8654,84	2	3	0,461
MsM03	57,98	17,00	24,97	1,54	5625,50	3	4	0,472
MsL04	58,29	31,87	9,83	3,97	8130,29	2	3	0,484
MsH22	73,23	22,55	4,23	0,00	9172,85	2	3	0,829

Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda, (2021).

En la Tabla 18, se puede observar que los valores del factor K para el municipio van desde 0 hasta 0,829, indicando que los valores altos de k tienden a presentar mayor susceptibilidad por erosión. Los valores más altos de k se tienen en la unidad de suelo **MsL08, MsM03, MsL04 y MsH22**, identificadas en los límites municipales en el norte del municipio y sur (zona leve), sobre el centro poblado Camino Los Vargas (Zona sur), estas unidades presentan una permeabilidad que va de moderada a lenta y su estructura granular va de granular fina (1-2 mm) a media a gruesa (5- 10mm), con un grado de compactación bajo, debido principalmente a que esta unidad cuenta con concentraciones bajas de material orgánico la susceptibilidad a presentar procesos de erosión hídrica a nivel general es alto dado los valores promedios de k.

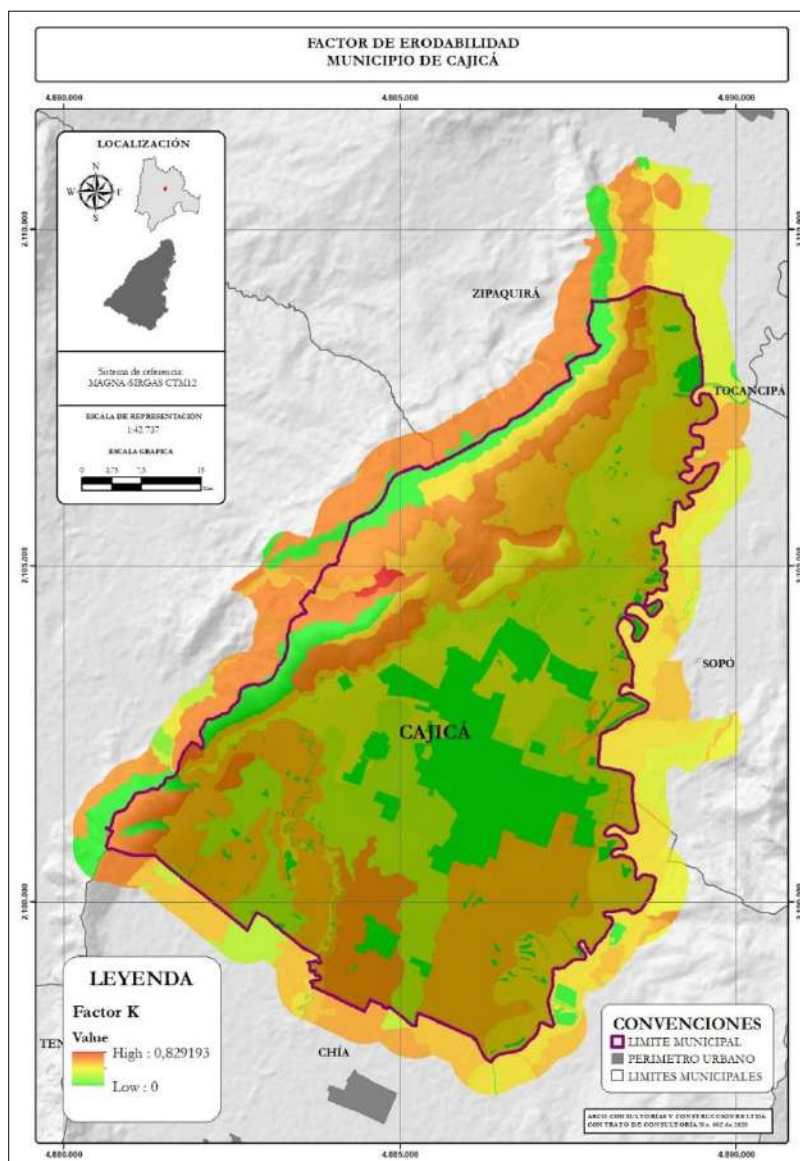
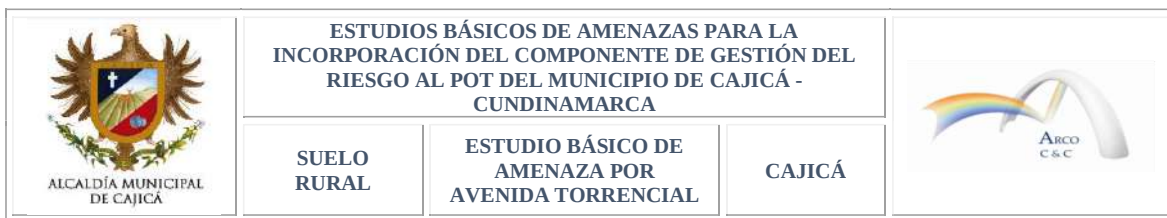


Ilustración 15 Factor de erodabilidad suelo rural municipio de Cajicá.

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

Seguido de las unidades **MsM07**, **RzL08**, **RzM01** y **RzM17**, las cuales tienen valores de factor k entre 0,28 y 0,33, éstas se encuentran ubicadas en su mayoría en el costado occidente y suroriente del municipio, la permeabilidad va de moderadamente lenta a lenta y su estructura granular de media a gruesa (5- 10mm) y cúbica, prismática, columnar y masiva con un grado de compactación



alto, lo cual, indica susceptibilidades moderadas a presentar procesos de erosión hídrica, debido además, al contenido de material orgánico presente en estas unidades.

Las unidades que presentan menores valores de factor k son **RzL21**, **RzM07** y **MsL05**, concentrándose principalmente en el centro y costado nororiente del municipio, la permeabilidad es lenta a muy lenta y su estructura granular es cúbica, prismática, columnar y masiva (en su mayoría), indicando así, un grado de compactación alto, cuenta además con un contenido de material orgánico alto, lo cual, dificulta la disgregación de partículas causadas por el impacto de agua lluvia, y por ende la susceptibilidad a desarrollar procesos erosivos es baja. Se puede concluir que en general el municipio presenta suelos con susceptibilidades moderadas/medias a desarrollar procesos erosivos producto de agentes hídricos.

3.6.1.3. Factor de longitud de ladera y pendiente (LS)

El factor topográfico (LS) es el gradiente de la longitud de pendiente que comprende a S como la pendiente y a L como la longitud de esa pendiente (Panagos, Borrelli, & Meusburger, 2015).

El factor de longitud de la pendiente se define como la distancia horizontal desde donde se origina el flujo superficial al punto donde comienza la deposición (Wischmeier & Smith, 1978) e ingresa como variable la cual tiene gran influencia en la estimación de la pérdida de suelo, ya que, cuanto mayor es la extensión de la pendiente mayor será la velocidad de escurrimiento (Souza, Marques, & Martins, 2003). Mientras que S al ser combinado con la longitud de la pendiente (L) caracterizan el tipo de relieve en que tendrán lugar los procesos de pérdida de suelo debido a la inclinación y longitud, permitiendo así, tener una mejor comprensión de las formas del paisaje, las cuales, pueden ayudar a la identificación de las rutas preferidas de los flujos de agua. En estas variables, se asume que la capacidad de transporte es superior a la capacidad limitada de desprendimiento.

La estimación del factor LS se encuentra enfocado en la estimación por geoprocetamiento, el cual, es desarrollado mediante secuencias de operaciones en SIG para el mapeo de las variables topográficas, reduciendo los procesos tradicionales al ser estos optimizados. La representación de este factor en la USLE corresponde a la comparación de la pérdida de suelo en una parcela unitaria estándar de 25 metros de largo con 9% de pendiente (Bertoni & Lombardi Neto, 1999). Para el presente estudio, el factor LS se calcula a través del algoritmo propuesto por Desmet y Govers (1996), el cual considera representar la esorrentía contribuyente del área específica de captación a ese punto (Moore & Nieber, 1989) y la pendiente modificada para una celda con coordenadas i,j a través de la siguiente expresión matemática:

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

$$LS_{i,j} = (m + 1) \left(\frac{2A_{i,j-in} + D^2}{2D * X_{i,j} * 22.13} \right)^m * S_{(i,j)}$$

Con

$$S_{(i,j)} = \begin{cases} 10.8 \operatorname{sen} \theta_{(i,j)} + 0.03 & \tan \theta_{(i,j)} < 0.09 \\ 16.8 \operatorname{sen} \theta_{(i,j)} - 0.5 & \tan \theta_{(i,j)} \geq 0.09 \end{cases}$$

Y

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

Siendo β ,

$$\beta = \frac{\operatorname{sen}(\theta)/\operatorname{sen}(5.143^\circ)}{3\operatorname{sen}(\theta)^{0.8} + 0.56}$$

Donde $A_{i,j-in}$ es el área de contribución aguas arriba en la entrada de una celda ráster con coordenadas i,j , D es la resolución de la celda, $X_{i,j}$ es la dirección de salida para la celda de la grilla y θ es la pendiente en grados.

El factor de longitud de ladera y pendiente para el municipio oscila de 0 a 1 donde los valores más altos se encuentran sobre los cerros occidentales (Ilustración 16) , principalmente en los límites municipales de occidente a norte, concentradas en su mayoría en la parte alta de las microcuencas especialmente en aquellas donde las pendientes son abruptas, se destacan las microcuencas número 0, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, Río Bogotá (Sector Tibitoc - Soacha) en donde se lleva a cabo el desprendimiento de material, y cuya velocidad de escurrimiento es mayor, se puede concluir entonces, que son las zonas donde se presenta mayor susceptibilidad a erodabilidad y se hallan en áreas de fuertes pendientes generando procesos de escorrentía más rápidos, facilitando la disgregación de sedimentos y por ende el desarrollo de procesos erosivos a nivel hídrico.

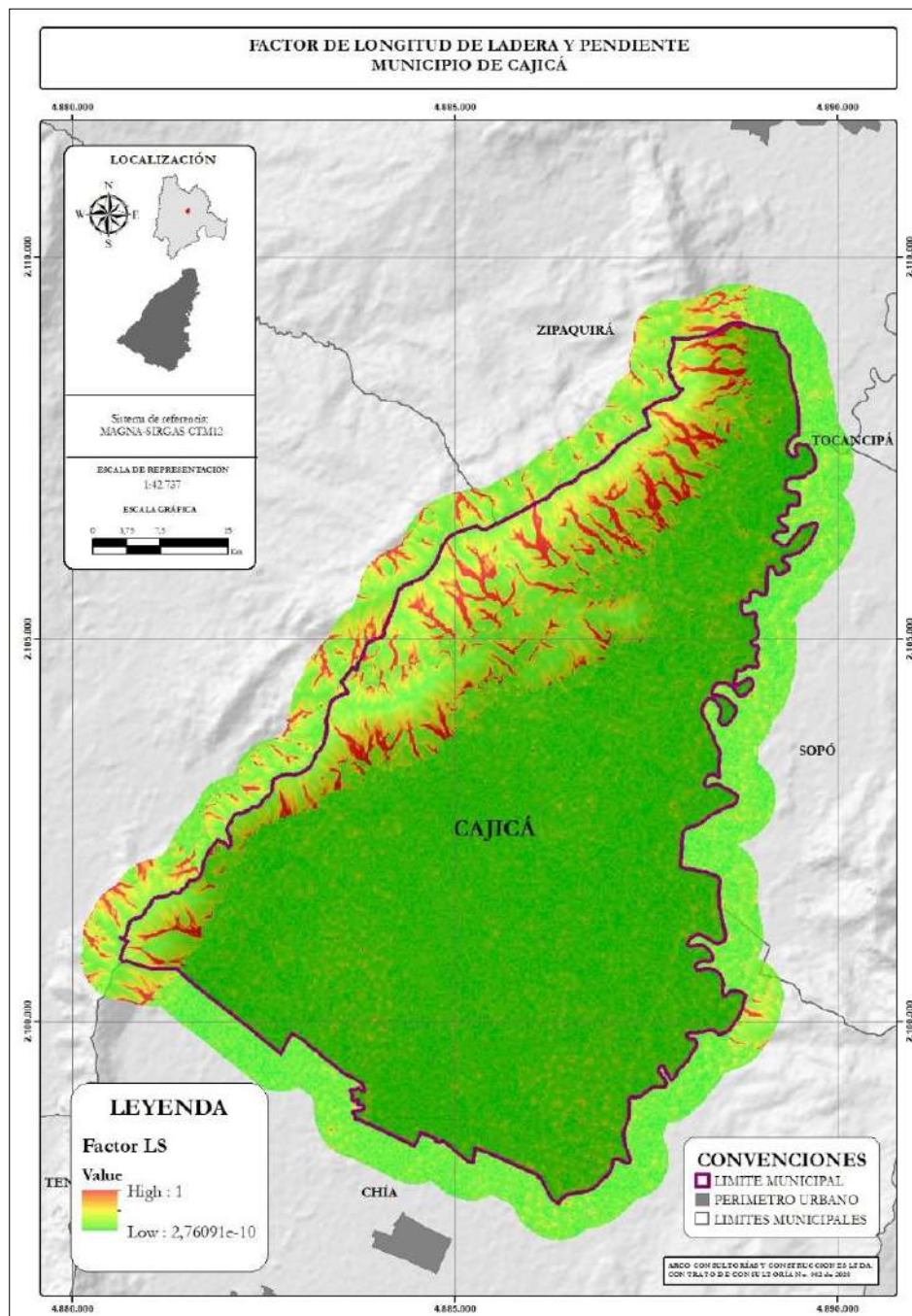


Ilustración 16 Índice de Longitud y pendiente de la ladera (LS) suelo rural municipio de Cajicá.
Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda. (2021).

Los valores bajos cercanos a 0,03 se concentran principalmente hacia el sur y centro del municipio sobre todos los centros poblados, dichos valores indican susceptibilidades bajas a presentar procesos erosivos, dado que, las pendientes en estas zonas tienden a ser ligeramente planas, por lo tanto, la velocidad de escurrimiento y el flujo superficial serán mínimos, disminuyendo así la pérdida del suelo.

3.6.1.4. Factor de cobertura vegetal (C)

El factor de cobertura vegetal se utiliza para determinar el efecto de la vegetación en la pérdida del suelo, ya que representa el grado de protección que puede llegar a brindar un determinado tipo de cobertura vegetal sobre el suelo. Los valores de C son pequeños cuando el suelo está protegido del impacto del agua de lluvia y de la acción de la escorrentía superficial oscilando de esta manera a valores cuya tendencia es a cero, por lo cual, los procesos de sedimentación pueden ser casi nulos debido a que, la cobertura vegetal brinda una buena protección sobre el suelo, caso contrario si los valores obtenidos en el factor C presentan tendencia a 1, en donde el suelo presentaría mayor vulnerabilidad frente al impacto que puede generar el agua lluvia sobre este, dado que la protección brindada por la cobertura vegetal en este caso es mala o mínima.

La determinación del factor C se realiza en base a una serie de tabulaciones dadas por el manual USLE de (Wischmeier & Smith, 1978), las cuales, permiten asignar un valor en función del grado de pérdida de suelo según el estudio de cálculo de factor C para los diferentes suelos de la Corine Land Cover, éstas se encuentran descritas en la Tabla 19.

Tabla 19 Valores del factor de cobertura (factor C)

USO DEL SUELO CORINE LAND COVER	% COBERTURA	FACTOR C
Zonas industriales o comerciales		1
Zonas de extracción minera		1
Viñedos		0,525
Tierras de labor seco		0,435
Terrenos regados permanentemente		0,507
Terrenos principalmente agrícolas con vegetación natural		0,435
Tejido urbano discontinuo		1
Tejido urbano continuo		1
Pastizales naturales		0,130
Olivares		0,525

USO DEL SUELO CORINE LAND COVER	% COBERTURA	FACTOR C
Mosaico de cultivos		0,435
Matorrales esclerófilos		0,153
Matorral boscoso en transición		0,153
Lámina de agua		0
Frutales		0,525
Espacios con vegetación escasa		0,9
Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes		0,435
Bosque mixto	Inferior al 2%	0,186
Bosque mixto	>2% & <7%	0,086
Bosque mixto	Superior al 7%	0,041
Bosque de frondosas	Inferior al 2%	0,186
Bosque de frondosas	>2% & <7%	0,086
Bosque de frondosas	Superior al 7%	0,041
Bosque de coníferas	Inferior al 2%	0,186
Bosque de coníferas	>2% & <7%	0,086
Bosque de coníferas	Superior al 7%	0,041

Fuente: (Wischmeier & Smith, 1978)

De acuerdo con esto, se establece el valor del factor de cobertura vegetal relacionando cada una de las coberturas establecidas (Wischmeier y Smith) con respecto a las coberturas rurales obtenidas en el municipio de Cajicá, teniendo un total de 48 tipos de coberturas. Finalmente se establece las coberturas y el factor correspondiente como se evidencia en la Tabla 20.

Tabla 20 Valores del factor de cobertura (factor C)

USO DE SUELO	ÁREA(Ha)	COBERTURA (%)	FACTOR C
Canales	0,63	0,01%	0
Cuerpos de agua artificiales	24,49	0,33%	0
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	1,99	0,03%	0
Ríos	7,81	0,11%	0
Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	1,17	0,02%	0
Herbazal abierto	0,60	0,01%	0,13
Herbazal abierto arenoso	28,75	0,39%	0,13
Herbazal abierto rocoso	88,56	1,19%	0,13
Herbazal denso inundable arbolado	1,50	0,02%	0,13
Herbazal denso inundable no arbolado	133,53	1,80%	0,13
Natural	82,83	1,11%	0,13
Pastos arbolados	231,19	3,11%	0,13

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

USO DE SUELO	ÁREA(Ha)	COBERTURA (%)	FACTOR C
Pastos enmalezados	180,98	2,43%	0,13
Pastos limpios	2361,05	31,74%	0,13
Vegetación secundaria alta	198,60	2,67%	0,13
Arbustal abierto	17,71	0,24%	0,153
Arbustal denso	25,93	0,35%	0,153
Bosque abierto alto de tierra firme	58,21	0,78%	0,186
Bosque de galería y ripario	54,07	0,73%	0,186
Bosque denso alto de tierra firme	30,30	0,41%	0,186
Cultivos confinados	307,01	4,13%	0,435
Cultivos permanentes arbóreos	2,13	0,03%	0,435
Hortalizas	158,77	2,13%	0,435
Maíz	49,19	0,66%	0,435
Mosaico de cultivos y espacios naturales	1,07	0,01%	0,435
Mosaico de pastos con espacios naturales	1,24	0,02%	0,435
Mosaico de pastos y cultivos	218,25	2,93%	0,435
Papa	78,75	1,06%	0,435
Plantación forestal	558,85	7,51%	0,507
Otros cultivos transitorios	125,86	1,69%	0,525
Vegetación secundaria baja	294,09	3,95%	0,9
Zonas Pantanosas	130,21	1,75%	0,9
Áreas culturales	0,68	0,01%	0
Áreas deportivas	312,87	4,21%	0
Artificial	77,98	1,05%	0
Explotación de carbón	28,46	0,38%	0
Explotación de materiales de construcción	42,44	0,57%	0
Instalaciones recreativas	62,47	0,84%	0
Obras hidráulicas	7,98	0,11%	0
Otras explotaciones mineras	1,25	0,02%	0
Otras zonas verdes urbanas	11,48	0,15%	0
Red ferroviaria y terrenos asociados	0,67	0,01%	0
Red vial y territorios asociados	171,40	2,30%	0
Tejido urbano continuo	621,70	8,36%	0
Tejido urbano discontinuo	439,22	5,90%	0
Zonas comerciales	2,57	0,03%	0
Zonas de extracción minera	64,54	0,87%	0
Zonas industriales	137,67	1,85%	0
TOTAL	7438,70	100,00%	-

Fuente: Arco Consultorias & Construcciones Ltda, (2021)

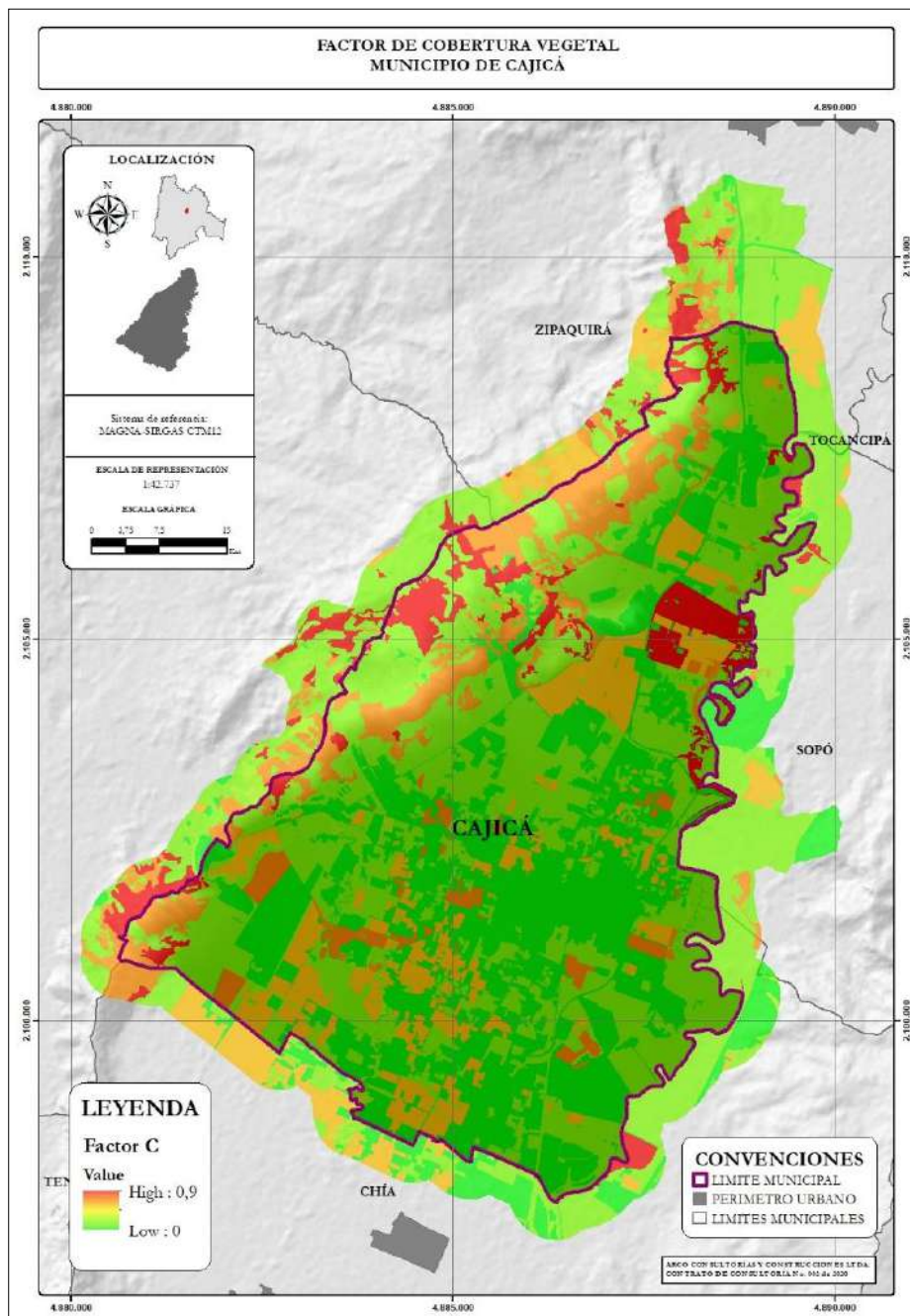


Ilustración 17 Factor de Cobertura Vegetal (C). suelo rural municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorias & 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

El factor de cobertura en el municipio oscila entre 0 a 1 donde, la tendencia en la gran mayoría del municipio es de altos y bajos valores. Se observan los valores más bajos para el factor C a lo largo del municipio de manera dispersa principalmente en los límites del municipio, en aquellas coberturas correspondientes a bosques, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, herbazales y vegetación secundaria siendo además, las que mayor área ocupan en el municipio, para estas zonas se puede concluir que los valores son más bajos debido a la buena vegetación con la que cuenta, lo que implica que la erosividad en este caso es baja a nula, ya que, al contar con una buena vegetación la protección del suelo aumenta, amortiguando de esta manera la incidencia de las gotas de lluvia sobre este, impidiendo su disgregación y por ende los procesos erosivos.

Los valores más altos se presentan concentrados principalmente al costado sur y centro del municipio afectando todos los centros poblados del municipio; se resaltan aquellas coberturas relacionadas con tejidos urbanos, zonas industriales y comerciales, redes viales, áreas culturales y recreativas, entre otras. Estas coberturas no resultan ser óptimas a la hora de brindar protección al suelo frente al impacto de agua lluvia, por lo cual, la susceptibilidad a presentarse procesos erosivos es alta.

3.6.1.5. Amenaza por erosión (A)

La amenaza final se realizó mediante un álgebra de mapas con las diferentes variables que influye dentro de los procesos de erosión (LS, K, R, C), a este resultado, se realizó una categorización aplicando los rangos dados por la Tabla 21 obteniendo la Ilustración 18.

Tabla 21 Categorización y áreas de participación de la amenaza por erosión para el municipio.

Clasificación de la erosión	Rango de Erosión (ton/ha/año)	Área (Ha)	Porcentaje
Ligera	<10	5077,91	99,07%
Moderada	10 -50	45,95	0,90%
Fuerte	50 – 200	1,70	0,03%
Severa	>200	0,00	0,00%
TOTAL		5.125,56	100%

Fuente: Clasificación de FAO – PNUMA – UNESCO (1981), ajustado por Arco Consultorías & Construcciones Ltda., (2021).

En el municipio de Cajicá, se obtienen valores de erosión baja, pues casi que la totalidad el área municipal se encuentra en erosión de tipo ligera y moderada, presentando valores del Factor A

de 0 a 185,41, y clasificándose de acuerdo con la metodología anterior. Estos valores y su comportamiento se evidencian en la zonificación de amenaza por erosión.

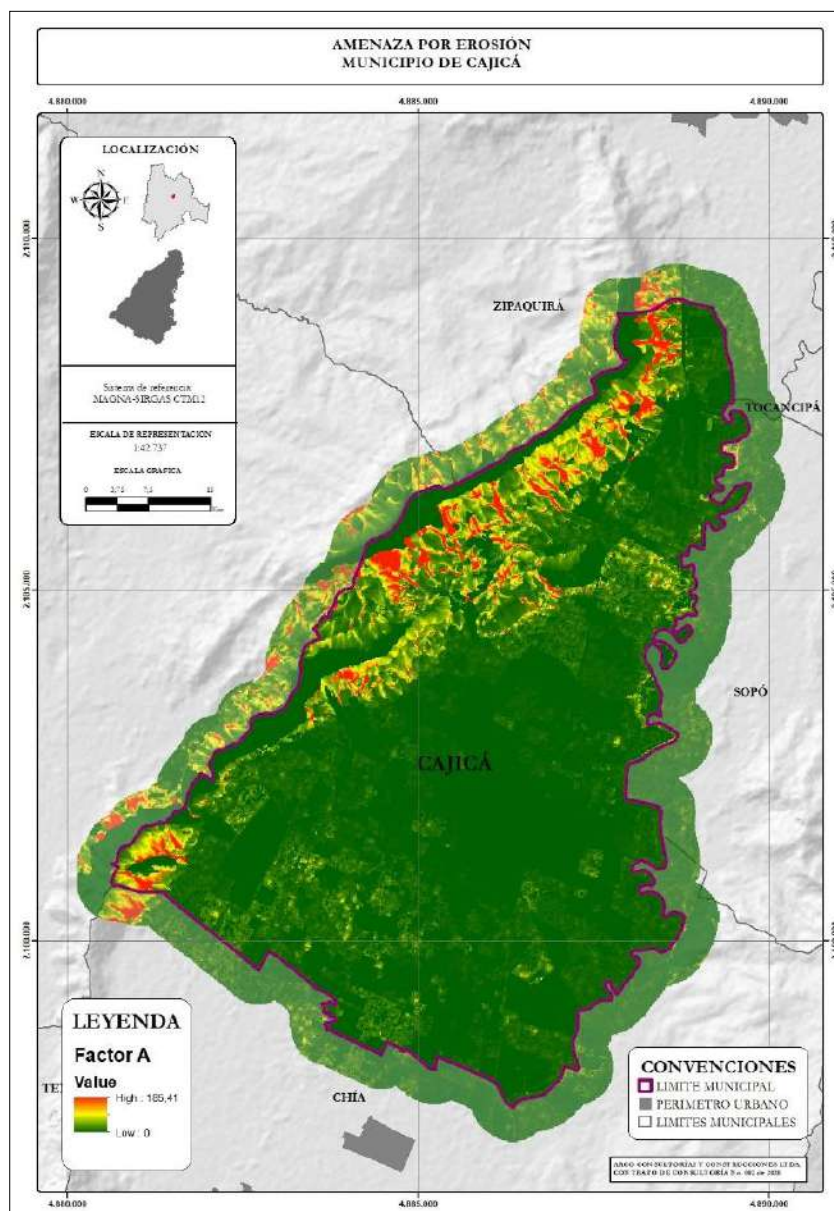


Ilustración 18 Zonificación de la amenaza por erosión suelo rural municipio de Cajicá.
Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda. (2021).

En conclusión, de acuerdo a los porcentajes de participación de la clasificación de la erosión se

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

observa que la mayor parte del municipio corresponde a ligera y moderada abarcando más del 99,07% del municipio, principalmente, se debe a que, el municipio presenta coberturas vegetales como bosques, mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, herbazales y vegetación secundaria, las cuales aumentan la amortiguación del suelo frente el impacto de agua lluvia, lo que disminuye la disgregación de partículas, además de contar con inclinaciones y longitudes de pendientes bajas en la mayoría del municipio, disminuyendo la velocidad de escurrimiento y el flujo superficial y por ende el desprendimiento de sedimentos; el área restante, tiene clasificación fuerte y severa para la susceptibilidad a procesos erosivos principalmente en los límites occidentales y del costados norte, sobre los cerros occidentales y demás reservas naturales, donde se observan, suelos con moderados contenidos de material orgánico, y grados de compacidad media, lo cual, otorga al municipio una resistencia moderada frente a procesos erosivos, además de presentar intensidades de lluvias altas aumentando la escorrentía superficial y por ende los procesos erosivos. Los valores de erosión resultantes son debidos a los drenajes de la zona montañosa (cerros occidentales), los cuales evidencian la presencia de erosión hídrica, levemente.

3.6.2. Zonificación de la amenaza por laderas potencialmente inestables

3.6.2.1. Caracterización del terreno y del proyecto

3.6.2.1.1. Caracterización del terreno

El terreno dónde se desarrolla el proyecto se caracteriza por presentar diferentes configuraciones de pendiente identificando zonas de montaña, piedemonte (zonas de abanicos aluviales) y de morfología plana asociada a depósitos lacustres.

3.6.2.1.2. Caracterización del proyecto

El proyecto se enmarca en los insumos asociados a potenciales volúmenes de sedimentos para realizar la zonificación de amenazas por avenidas torrenciales en el municipio de Cajicá. Cabe resaltar que se evaluaron todas las microcuencas del municipio ya que el especialista en hidrología no definió previamente las potencialmente torrenciales, mediante índices morfométricos como fue contemplado inicialmente, lo que incurrió en una alta sobrecarga de análisis y procedimiento computacional innecesario.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

3.6.2.1.3. Metodología y procedimiento

La metodología del estudio involucró las siguientes actividades:

- Recopilación y análisis de la información disponible
- Investigación del sub-suelo incluyendo inspección de campo, ejecución de perforaciones, toma de muestras y ensayos de laboratorio.
- Análisis geotécnico.
- Determinación de parámetros de las UGS y definición de ru.
- Extracción de modelo digital de elevación para cada unidad geológica superficial a escala urbana o rural según corresponda
- Análisis de estabilidad de taludes y laderas.

3.6.2.1.4. Recopilación y análisis de la información disponible

En esta fase del proyecto se ha recolectado toda la información disponible relevante para el correcto desarrollo de la investigación previo al inicio de los trabajos, entre la que se destaca: los requisitos del cliente y características del proyecto.

En complemento, se realizó una visita al sitio en la que se tomó atenta nota de las condiciones del terreno, necesarias para la elaboración de las recomendaciones de ingeniería, tales como: condiciones de drenaje y topográficas.

3.6.2.1.4.1. Investigación del sub-suelo

La evaluación de las características del subsuelo se realizó mediante una exploración de campo, complementada con ensayos de laboratorio.

3.6.2.1.4.2. Exploración de campo

De acuerdo con la tipología del proyecto, las indicaciones del solicitante, las unidades geológicas superficiales a caracterizar, se programaron once (11) sondeos manuales con profundidades variables entre 3,0 y 15,0 metros de profundidad, desarrolladas por el método de percusión. Por otro lado, se ejecutaron 15 apiques con los cuales se buscó tomar muestras inalteradas de las unidades de análisis para poder realizar ensayos de corte directo y caracterizar la resistencia al

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

corte de los depósitos y suelos residuales de interés. En la siguiente **Tabla 22** se identifican los sondeos y los apiques realizados por unidad geológica.

Tabla 22 Sondeos y Apiques por Unidad Geológica

SONDEO/APIQUE	CODIGO	UNIDAD
S2	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana
S3	Stal	Suelo transportado aluvial
S4	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana
S5	Rbfg	Roca blanda de la Formación Guaduas
S6	Stco	Suelo transportado coluvial
S7	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial
S8	Riflt	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna
S9	Stco	Suelo transportado coluvial
S10	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura
S11	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo
S12	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial
A1	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana
A2	Stal	Suelo transportado aluvial
A3	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial
A4	Riflt	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna
A5	Rbfg	Roca blanda de la Formación Guaduas
A6	Srfe	Suelo residual de la Formación Conejo
A7	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura
A8	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners
A9	Stco	Suelo transportado coluvial
A10	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana
A11	Stal	Suelo transportado aluvial
A12	Stal	Suelo transportado aluvial
A13	Stco	Suelo transportado coluvial

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

Durante las perforaciones se realizaron pruebas de penetración normal (S.P.T.) según la norma ASTM D1586 a intervalos de 1,00 metro y se tomaron muestras de naturaleza alterada e inalterada mediante tubería Shelby, consideradas representativas del perfil natural del terreno.

Las muestras fueron descritas en campo siguiendo el procedimiento visual y manual de la norma

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

ASTM D2488. La ubicación de los sondeos se anexa a la presente.

3.6.2.1.4.3. Ensayos de laboratorio

Las muestras recuperadas fueron sometidas en laboratorio a los ensayos principales atendiendo a las necesidades del proyecto y por la naturaleza de los suelos presentes. Se ejecutaron los siguientes ensayos:

- Contenido de agua (Humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo - agregado. Norma aplicada: INV E 122-13 (68 ensayos)
- Densidad del suelo en el lugar por el método del cilindro impulsor* Norma aplicada: ASTM D2937-71/ASTM D7263 – 21 (26 ensayos)
- Cantidad de material que pasa el tamiz de 75 μ M (N°200) en los agregados pétreos mediante lavado Norma Aplicada: INV E 214-13 (42 ensayos)
- Corte directo en suelos INV E-154-13 (23 ensayos)
- Determinación del límite líquido de los suelos Norma aplicada: INV E 125-13 (32 ensayos)
- Límite Plástico e Índice de plasticidad de los suelos Norma aplicada: INV E 126-13 (32 ensayos)
- Consolidación Unidimensional de los suelos Norma aplicada: INV E 151-13 (5 ensayos)
- Expansión libre INVE-151-13 (3 ensayos)
- Resistencia a la compresión inconfiada INV E 152 (2 ensayos)
- Contenido de materia orgánica INVE-121-13 (14 ensayos)
- Gravedad específica de los suelos INV E- 128 -13 (10 ensayos)

A continuación, en las figuras siguientes se presentan resúmenes de los ensayos ejecutados por sondeo, mientras que en la Tabla 23 se presentan los cuadros resúmenes que compilan la información de la campaña de exploración:

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

Tabla 23 Consolidado de ensayos principales por sondeo y apique

SONDEO /APIQUE	CODIGO	UNIDAD	Contenido de agua del material W (%)	Peso unitario total γ_{total} (g/cm ³)	% de material fino que pasa el tamiz de 75 μ m (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]	Corte directo en suelos INV E-154-13	
						Ángulo de fricción Φ (°)	C (kg/cm ²)
S2	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana	63,86	1,63	99,76%	17,47	0,12
S3	Stal	Suelo transportado aluvial	91,21	1,89	91,21%	20,34	0,01
S4	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana	31,76	1,86	77,70%	24,36	0,24
S5	Rbfg	Roca blanda de la Formación Guaduas	22,97	2,02	71,30%	32,46	0,19
S6	Stco	Suelo transportado coluvial					
S7	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	23,95	1,89	83,40%	26,51	0,15
S8	Riftl	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna					
S9	Stco	Suelo transportado coluvial	22,29	1,90	87,40%	26,17	0,17
S10	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	36,70	1,74	87,43%	20,28	0,19
S11	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	24,60	1,98	84,83%	31,36	0,26
S12	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	11,41	2,25	36,05%		
A1	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana	31,685	1,646	84,20%	28,45	0,1
A2	Stal	Suelo transportado aluvial	20,25	1,789	90,80%	25,83	0,21
A3	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	21,15	1,782	97,66%	21,16	0,18
A4	Riftl	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna	18,95	1,837	82,70%	23,69	0,11
A5	Rbfg	Roca blanda de la Formación Guaduas	32,54	1,781	88,37%	14,57	0,26
A6	Srfe	Suelo residual de la Formación Conejo	51,09	1,74	82,90%	18,07	0,23
A7	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	40,48	1,61	86,10%	27,16	0,05
A8	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	10,42	1,78	27,60%	20,81	0,01

SONDEO /APIQUE	CODIGO	UNIDAD	Contenido de agua del material W (%)	Peso unitario total γ_{total} (g/cm ³)	% de material fino que pasa el tamiz de 75 μ m (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]	Corte directo en suelos INV E-154-13	
						Ángulo de fricción Φ (°)	C (kg/cm ²)
A9	Stco	Suelo transportado coluvial	22,37	1,76	69,80%	32,18	0,01
A10	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana	51,46	1,57	82,70%	32,44	0,11
A11	Stal	Suelo transportado aluvial	37	1,84	62,90%	24,44	0,04
A12	Stal	Suelo transportado aluvial	44,47	1,80	36,05%	17,6	0,05
A13	Stco	Suelo transportado coluvial	15,36	1,65	73,40%	14,51	0,01

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

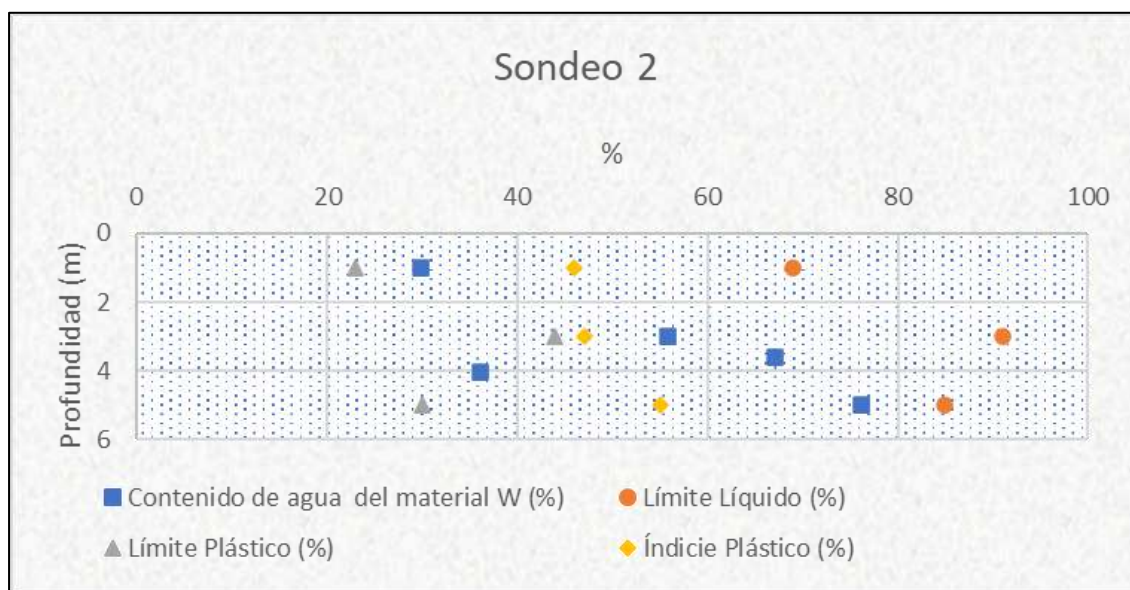


Figura 12 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 2.

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

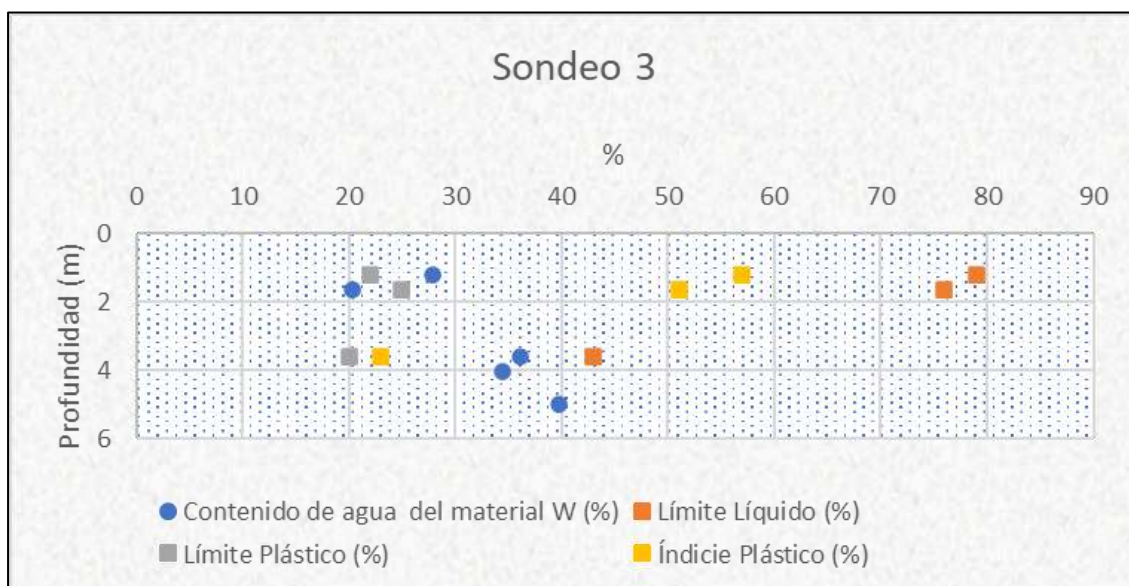


Figura 13 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 3.

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

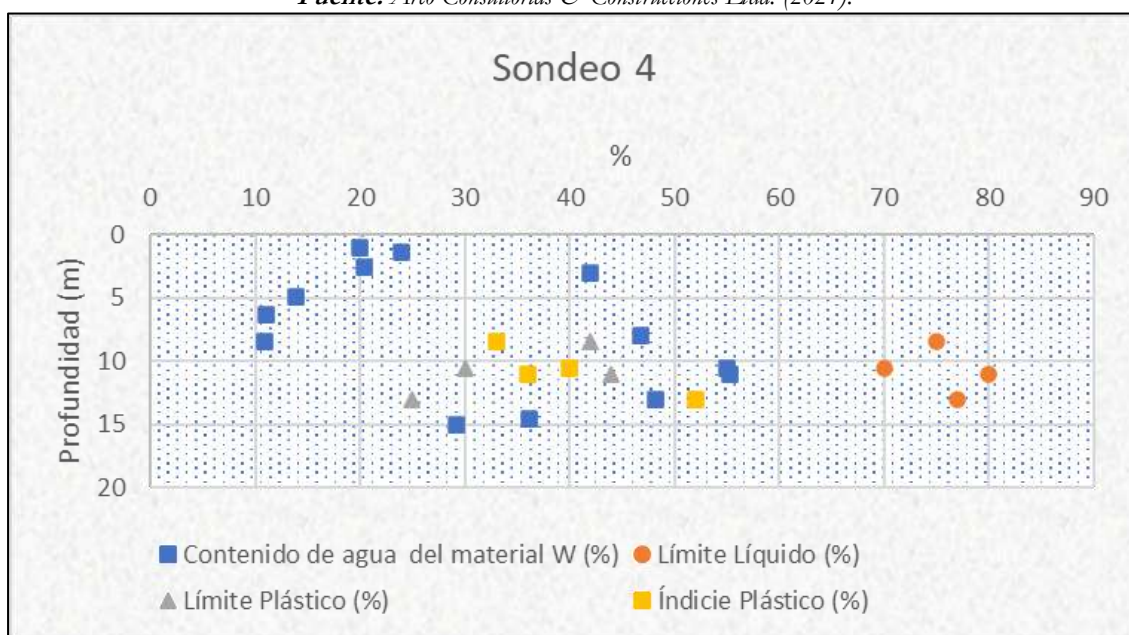


Figura 14 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 4.

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

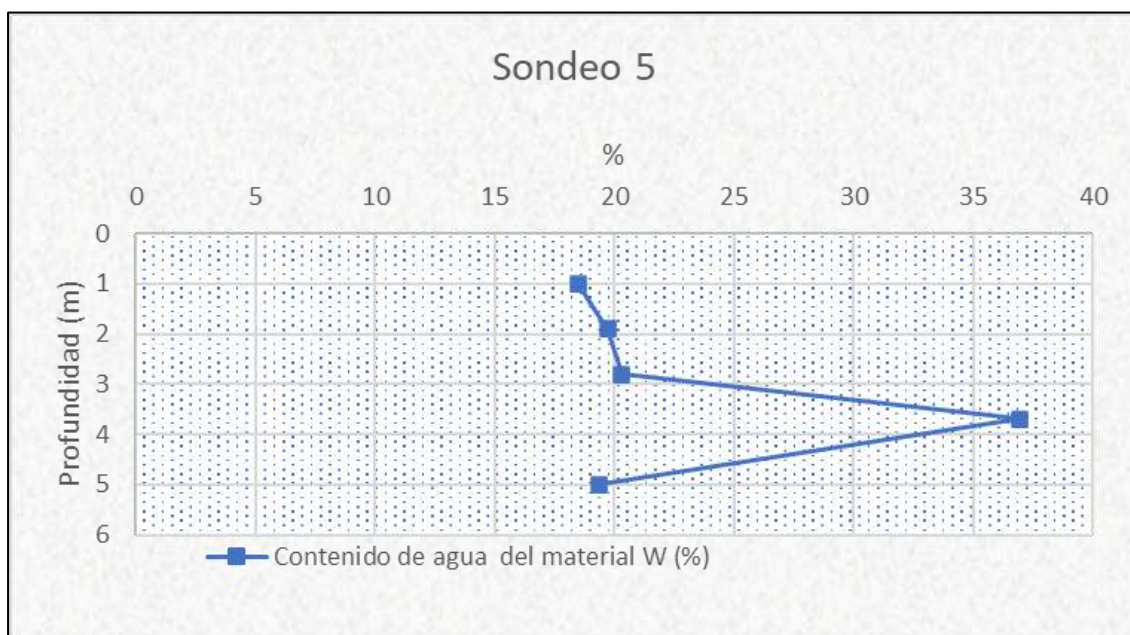


Figura 15 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 5.

Fuente: Arco Consultorias & Construcciones Ltda. (2021).

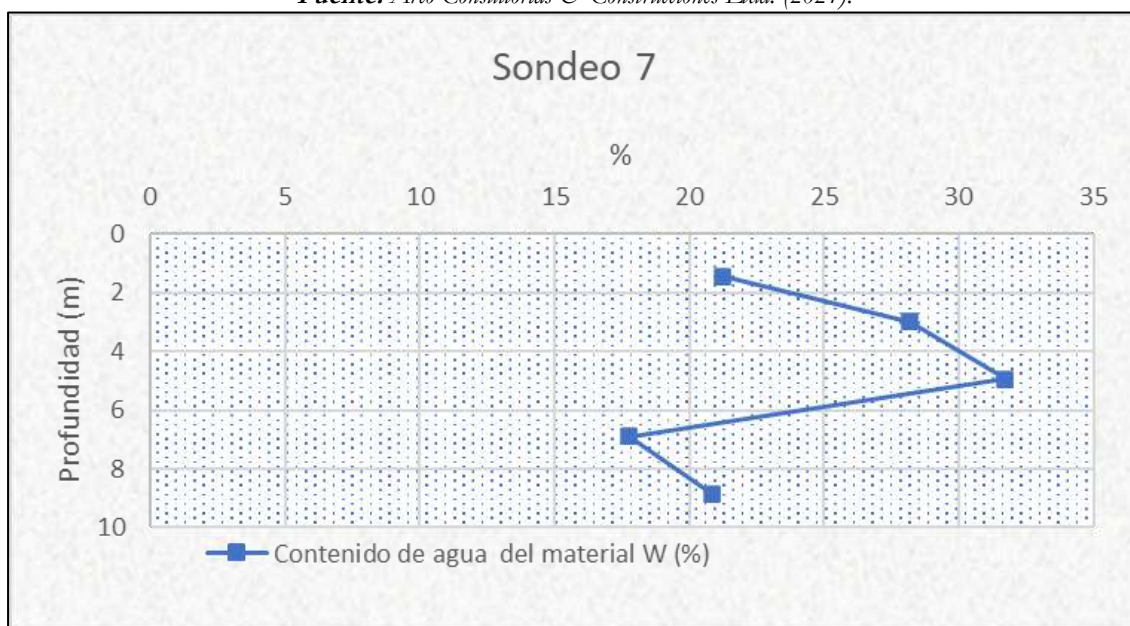


Figura 16 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 7.

Fuente: Arco Consultorias & Construcciones Ltda. (2021).

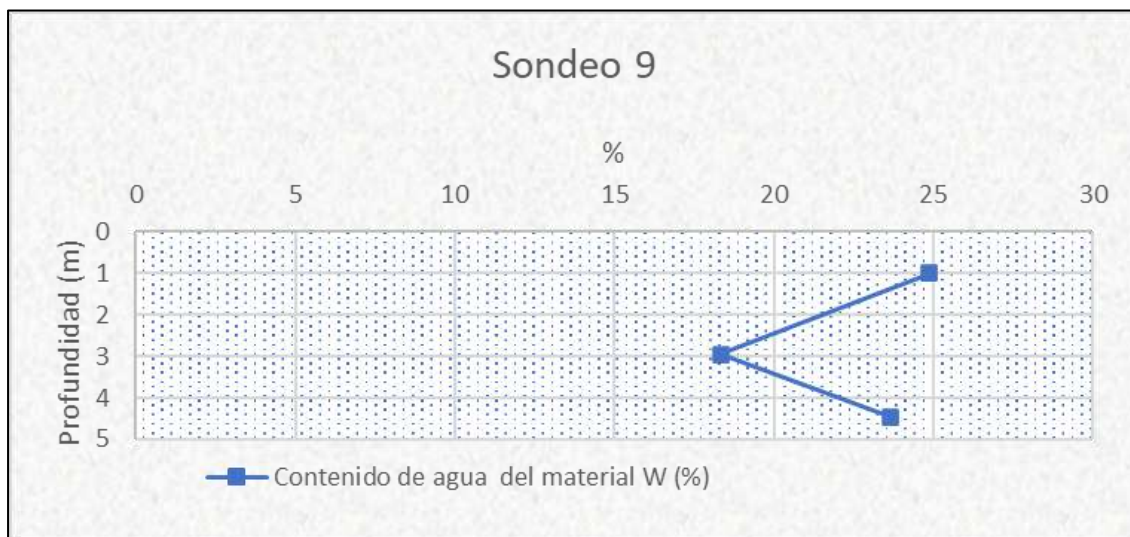


Figura 17 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 9.

Fuente: Arco Consultorias & Construcciones Ltda. (2021).



Figura 18 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 10.

Fuente: Arco Consultorias & Construcciones Ltda. (2021).

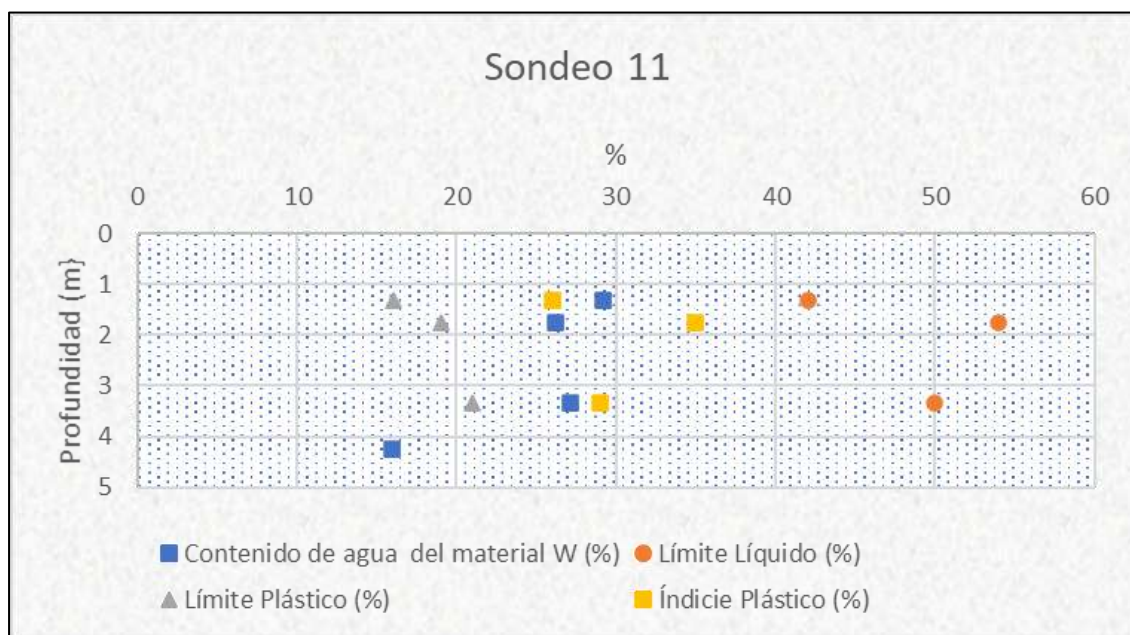


Figura 19 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 11.

Fuente: Arco Consultorias & Construcciones Ltda. (2021).

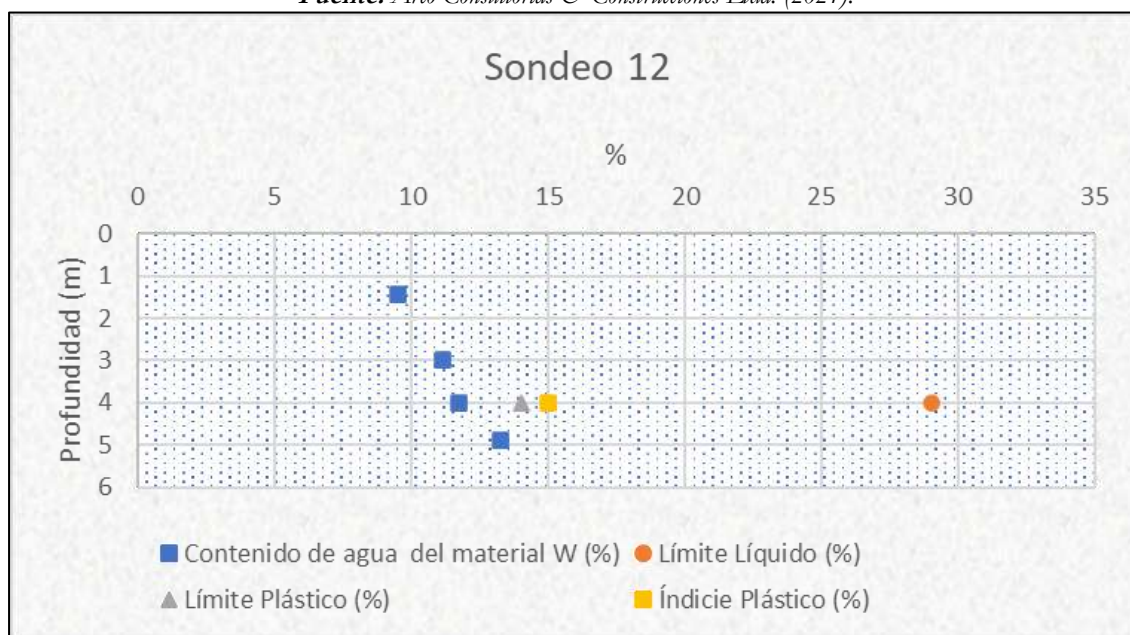


Figura 20 Variación de la humedad y límites de consistencia en el sondeo 12.

Fuente: Arco Consultorias & Construcciones Ltda. (2021).

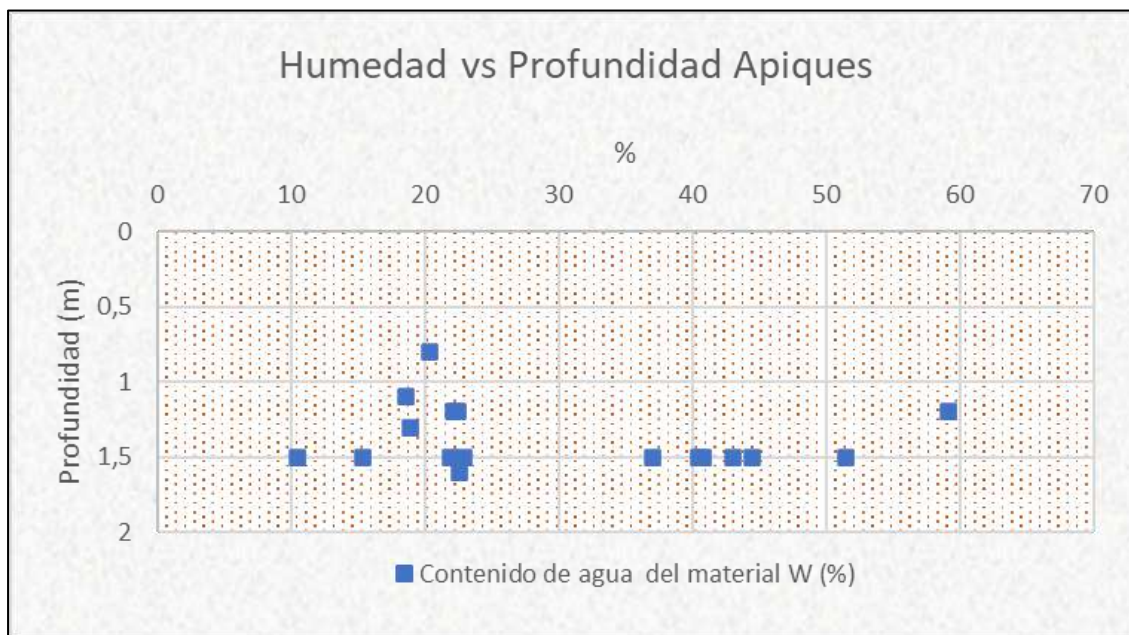


Figura 21 Variación de la humedad en los apiques realizados.

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

3.6.2.1.4.4. Estratigrafía y caracterización geotécnica

3.6.2.1.4.4.1. Estratigrafía

De los registros de perforación y de los resultados de los ensayos de laboratorio se deduce que el terreno presente está conformado por suelos provenientes de las diferentes formaciones presentes en el municipio en las zonas de montaña y piedemonte, en especial de la formación Arenisca dura y la Formación Conejo, mientras que, en las áreas planas, se presentan depósitos de origen aluvial lacustre, coluvial o de tipo abanico. En general estos materiales se encuentran identificados como Arcillas o Limos de alta compresibilidad, en estado sobreconsolidado, de acuerdo con los resultados de consolidación unidimensional y corte directo, en estado de parcial saturación. Por otro lado, y en menor medida se observan materiales areno-arcillosos. Ambas categorizaciones teniendo en cuenta que no se detectó niveles piezométricos asociados a saturación, se puede trabajar en términos de esfuerzos efectivos asociados a parámetros drenados.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

3.6.2.1.4.4.2. Caracterización geotécnica

Desde el punto de vista conservador, los análisis presentes en este informe, se realizan sobre la matriz de suelo (componente más débil del depósito o suelo residual según corresponda) el análisis se realizó sobre esfuerzos efectivos (condición de carga drenada), ya que no se detectó nivel freático in situ para las posibles superficies de falla, para el cual, las muestras cohesivas (arcillas arenosas, arenas arcillosas y en menor medida limos) de baja y alta compresibilidad, están constituidos por partículas que pasan el tamiz de 0.074 milímetros, en porcentajes que varían de 26,66% a 99,96%. Sus propiedades plásticas se establecieron en laboratorio mediante la ejecución de ensayos de límites de Atterberg, encontrándose valores de límite líquido entre 29% y 98%, y de índice de plasticidad entre 15% y 62%. Con base en lo anterior, las muestras clasifican bajo el sistema unificado U.S.C. como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24. Clasificación del material del suelo según SUCS

Sondeo	Codigo	unidad	Muestra	Profundidad (m)	Límites de Consistencia				
					Determinación del límite líquido de los suelos Norma aplicada: INV E 125-13	Límite Plástico e Índice de plasticidad de los suelos Norma aplicada: INV E 126-13		Símbolo del grupo	Denominación
						Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)		
2	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana	2	0.55-1.00	69	23	46	CH	Arcilla de alta compresibilidad
			4	1.45-3.00	91	44	47	MH	Limo de alta compresibilidad
			8	4.55-5.00	85	30	55	CH	Arcilla de alta compresibilidad
3	Stal	Suelo transportado aluvial	2	0.60-1.20	79	22	57	CH	Arcilla de alta compresibilidad
			3	1.20-1.65	76	25	51	CH	Arcilla de alta compresibilidad
			5	3.00-3.60	43	20	23	CL	Arcilla de baja compresibilidad
4	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana	10	8.00 - 8.45	75	42	33	MH	Limo de alta compresibilidad
			12	10.00 - 10.60	70	30	40	CH	Arcilla de alta compresibilidad
			13	10.60 - 11.05	80	44	36	MH	Limo de alta compresibilidad
			15	12.60 - 13.05	77	25	52	CH	Arcilla de alta compresibilidad
10	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	3	1.00 - 1.45	98	36	62	CH	Arcilla de alta compresibilidad
11	Rbfc	Roca blanda	2	0.70 - 1.30	42	16	26	CL	Arcilla de baja

Sondeo	Codigo	unidad	Muestra	Profundidad (m)	Límites de Consistencia				
					Determinación del límite líquido de los suelos Norma aplicada: INV E 125-13	Límite Plástico e Índice de plasticidad de los suelos Norma aplicada: INV E 126-13		Símbolo del grupo	Denominación
					Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)		
		de la Formación Conejo							compresibilidad
			3	1.30 - 1.75	54	19	35	CH	Arcilla de alta compresibilidad
			5	2.75 - 3.35	50	21	29	CH	Arcilla de alta compresibilidad
12	Stft	Suelo transportado fluvio- torrencial	3	1.00 - 1.45					Arena Arcillosa
			5	2.55 - 3.00					Arena Arcillosa
			6	3.55 - 4.00	29	14	15	CL	Arcilla de baja compresibilidad
A1	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana	2	0.60-1.20	74	31	43	CH	Arcilla de alta compresibilidad
			3	1.20-1.50	72	30	42	CH	Arcilla de alta compresibilidad
A2	Stal	Suelo transportado aluvial	2	0.50-1.10	60	17	43	CH	Arcilla de alta compresibilidad
			3	1.10-1.50	56	20	36	CH	Arcilla de alta compresibilidad
A3	Stft	Suelo transportado fluvio- torrencial	2	0.60-0.80	40	19	21	CL	Arcilla de baja compresibilidad
A4	Riflt	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna	2	0.50-1.30	31	16	15	CL	Arcilla de baja compresibilidad
A5	Rbfg	Roca blanda de la Formación Guaduas	3	1.20-1.50	68	20	48	CH	Arcilla de alta compresibilidad
A6	Srfc	Suelo residual de la Formación Conejo	2	0.60-1.20	83	53	30	MH	Limo de alta compresibilidad
			3	1.20-1.50	70	28	42	CH	Arcilla de alta compresibilidad
A7	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	2	0.50-1.50	70	33	37	CH	Arcilla de alta compresibilidad
A9	Stco	Suelo transportado coluvial	2	0.60-1.20	47	21	26	CL	Arcilla de baja compresibilidad
A10	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación	2	0.50-1.50	83	61	22	MH	Limo de alta compresibilidad

Sondeo	Codigo	unidad	Muestra	Profundidad (m)	Límites de Consistencia				
					Determinación del límite líquido de los suelos Norma aplicada: INV E 125-13	Límite Plástico e Índice de plasticidad de los suelos Norma aplicada: INV E 126-13		Símbolo del grupo	Denominación
						Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)		
		Sabana							
A11	Stal	Suelo transportado aluvial	3	1.10-1.50	44	25	19	CL	Arcilla de baja compresibilidad
A12	Stal	Suelo transportado aluvial	3	1.20-1.50	73	26	47	CH	Arcilla de alta compresibilidad
A13	Stco	Suelo transportado coluvial	2	0.70-1.50	40	19	21	CL	Arcilla de baja compresibilidad

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

Para las unidades se realizaron análisis de parámetros de acuerdo con la metodología propuesta por González (1999) en la cual se determina el ángulo de fricción y cohesión de un material ajustado a una envolvente de falla Mohr-Coulomb, como se muestra en la Tabla 25.

Tabla 25. Ángulo de Fricción y Cohesión mediante la Metodología de González (1999)

SONDEO/APIQUE	CODIGO	UNIDAD	SPT N ₄₅	
			Ángulo de fricción Φ (°)	C (KPa)
S4	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana	33,39	0
S5	Rbfg	Roca blanda de la Formación Guaduas	24,87	9,07
S7	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	32,06	0
S9	Stco	Suelo transportado coluvial	33,96	0
S10	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	26,72	2,77
S11	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	35,31	0

SONDEO/APIQUE	CODIGO	UNIDAD	SPT N ₄₅	
			Ángulo de fricción Φ (°)	C (KPa)
S12	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	30,53	0,84

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

La consistencia de estos depósitos se determinó como variable entre media y dura, según correlación con los ensayos de penetración normal realizados en campo. Estos suelos son de baja permeabilidad, altamente sobre consolidados, con estabilidad volumétrica también baja. Por lo anterior es de esperar alguna variación de volumen, motivada por cambios en el contenido de humedad. No obstante, teniendo en cuenta los resultados de límites de consistencia, este potencial se considera como bajo, por lo que si se provee en general al proyecto de adecuadas condiciones de drenaje superficial no se presentarán problemas asociados a cambios volumétricos.

Tabla 26 Consistencia depósitos cohesivos.

No. de golpes N	qu (kg/cm ²)	Consistencia
0 – 2	0.25	Muy blanda
2 – 4	0.25-0.50	Blanda
4 – 8	0.50-1.00	Media
8 – 15	1.00-2.00	firme
15 – 30	2.00-4.00	Muy firme
Mayor que 30	Mayor que 4.00	Dura

Fuente: Terzaghi y Peck (1976)

Tabla 27 Numero de golpes N para los sondeos realizados.

Sondeo	Prof (m)	Tipo	N SPT
4	1,00	CM	33
	1,45	CM	22
	3,00	CM	31

Sondeo	Prof (m)	Tipo	N SPT
	4,95	SM-SC	56
	6,40	SM-SC	40
	8,45	SM-SC	47
	11,05	CM	11
	13,05	CM	37
	15,00	SM-SC	66
5	1,00	CM	82
	1,45	CM	52
	1,90	CM	54
	2,35	CM	38
	2,80	CM	45
	3,25	CM	43
	3,70	CM	38
	5,00	CM	18
7	1,45	CM	21
	3,00	CM	22
	4,95	CM	26
	6,90	CM	43
	8,85	CM	38
9	1,00	CM	13
	2,95	CM	49
10	1,00	CM	40
	1,45	CM	55
	1,90	CM	21
	2,35	CM	18
	3,45	CM	22
	3,90	CM	26
11	1,75	CM	9
	3,80	CM	35
	4,25	CM	41
	4,70	CM	80
12	1,00	CM	38
	1,45	CM	36
	1,90	CM	28
	3,00	CM	33

Sondeo	Prof (m)	Tipo	N SPT
	4,00	CM	40
	4,45	CM	29
	4,90	CM	29

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

Por otro lado, las arcillas y limo arcillosos detectadas en la unidad geológica de Suelo Transportado aluvial, poseen partículas con diámetro nominal inferior a 0.074 milímetros en porcentajes que varían de 62,90% y 96,49%. Su índice de plasticidad se determinó entre 19% y 57%, y los valores de límite líquido entre 44% y 79%%, por lo que se han clasificado las muestras como CH y CL.

Se trata de suelos de permeabilidad alta a relativamente baja, con mediana estabilidad volumétrica y susceptibilidad baja a variar de volumen, cuando cambia el contenido de humedad. Su estado de compacidad relativa evaluada con base en los resultados de los ensayos de penetración normal, varía de media a muy densa. Los parámetros detallados para cada unidad se presentan en la Tabla 28. Por otro lado, en la Tabla 29 y en la Figura 22, se muestran las cartas de plasticidad de los resultados de laboratorio.

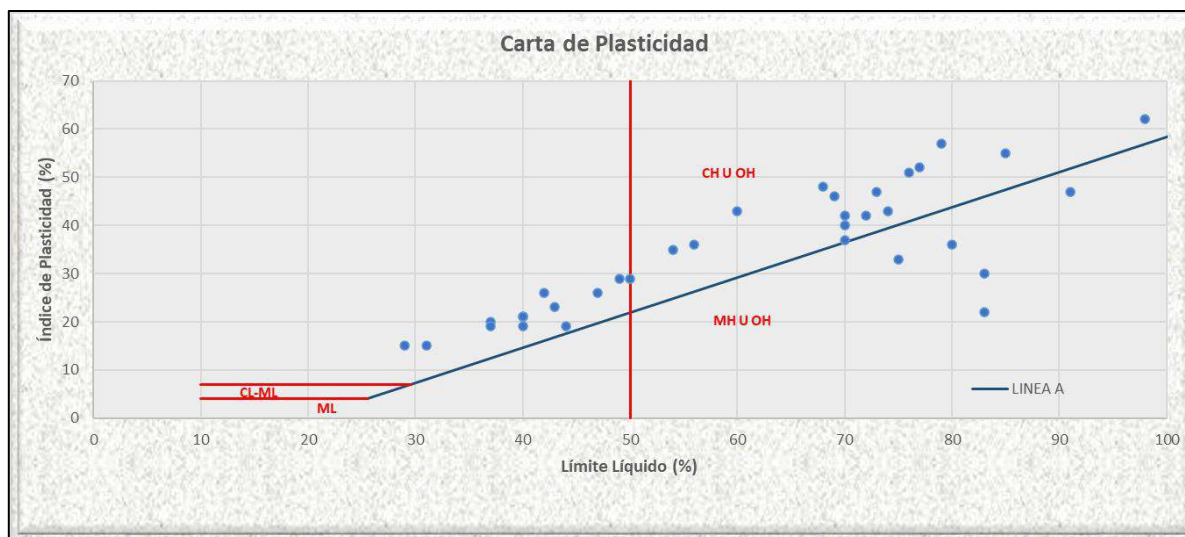


Figura 22 Carta de Plasticidad de Sondeos y Apiques.

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

Tabla 28 Límites de Consistencia y Clasificación SUCS.

							INV E 181 - 13	
Sondeo	Muestra	Pasa No 200	Profundidad (m)	Determinación del límite líquido de los suelos Norma aplicada: INV E 125-13	Límite Plástico e Índice de plasticidad de los suelos Norma aplicada: INV E 126-13		Símbolo del grupo	Denominación
				Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)		
2	2	76%	0.55-1.00	69	23	46	CH	Arcilla de alta compresibilidad
	4	76%	1.45-3.00	91	44	47	MH	Limo de alta compresibilidad
	6	99,63%	3.60-4.05	49	20	29	CL	Arcilla de baja compresibilidad
	8	76,00%	4.55-5.00	85	30	55	CH	Arcilla de alta compresibilidad
3	2	76,00%	0.60-1.20	79	22	57	CH	Arcilla de alta compresibilidad
	3	76,00%	1.20-1.65	76	25	51	CH	Arcilla de alta compresibilidad
	5	76,00%	3.00-3.60	43	20	23	CL	Arcilla de baja compresibilidad
	8	76,00%	4.50-5.00	40	21	19	CL	Arcilla de baja compresibilidad
4	10	83,70%	8.00-8.45	75	42	33	MH	Limo de alta compresibilidad
	12	80%	10.00-10.60	70	30	40	CH	Arcilla de alta compresibilidad
	13	88,40%	10.60-11.05	80	44	36	MH	Limo de alta compresibilidad
	15	80%	12.60-13.05	77	25	52	CH	Arcilla de alta compresibilidad
10	3	80%	1.00-1.45	98	36	62	CH	Arcilla de alta compresibilidad
11	2	80%	0.70-1.30	42	16	26	CL	Arcilla de baja compresibilidad
	3	90,10%	1.30-1.75	54	19	35	CH	Arcilla de alta compresibilidad
	5	76,30%	2.75-3.35	50	21	29	CH	Arcilla de alta compresibilidad
12	6	46%	3.55-4.00	29	14	15	CL	Arcilla de baja compresibilidad
A1	2	76%	0.60-1.20	74	31	43	CH	Arcilla de alta compresibilidad
	3	84,2%	1.20-1.50	72	30	42	CH	Arcilla de alta compresibilidad
A2	2	76%	0.50-1.10	60	17	43	CH	Arcilla de alta compresibilidad
	3	90,8%	1.10-1.50	56	20	36	CH	Arcilla de alta compresibilidad
A3	2	76,0%	0.60-0.80	40	19	21	CL	Arcilla de baja compresibilidad

							INV E 181 - 13	
Sondeo	Muestra	Pasa No 200	Profundidad (m)	Determinación del límite líquido de los suelos Norma aplicada: INV E 125-13	Límite Plástico e Índice de plasticidad de los suelos Norma aplicada: INV E 126-13		Símbolo del grupo	Denominación
				Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)		
A4	2	76,0%	0.50-1.30	31	16	15	CL	Arcilla de baja compresibilidad
A5	3	88,4%	1.20-1.50	68	20	48	CH	Arcilla de alta compresibilidad
A6	2	76,0%	0.60-1.20	83	53	30	MH	Limo de alta compresibilidad
	3	82,9%	1.20-1.50	70	28	42	CH	Arcilla de alta compresibilidad
A7	2	86,1%	0.50-1.50	70	33	37	CH	Arcilla de alta compresibilidad
A9	2	69,8%	0.60-1.20	47	21	26	CL	Arcilla de baja compresibilidad
A10	2	82,7%	0.50-1.50	83	61	22	MH	Limo de alta compresibilidad
A11	3	63%	1.10-1.50	44	25	19	CL	Arcilla de baja compresibilidad
A12	3	76%	1.20-1.50	73	26	47	CH	Arcilla de alta compresibilidad
A13	2	76%	0.70-1.50	40	19	21	CL	Arcilla de baja compresibilidad
A14	2	76%	0.50-1.00	37	17	20	CL	Arcilla de baja compresibilidad
A15	3	76%	1.30-1.50	37	18	19	CL	Arcilla de baja compresibilidad

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

Tabla 29. Caracterización Geotécnica detallada por unidad geológica superficial de análisis

CÓDIG O	UNIDAD	Contenido de agua del material W (%)		Peso unitario total y total (g/cm3)		% de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]		C (kg/cm2)		Ángulo de fricción Φ (°)		Límite Líquido (%)		Límite Plástico (%)		Índice de Plasticidad (%)		Materia orgánica (%)	
		Promedi o	s	Promedi o	s	Promedi o	s	Promedi o	s	Promedio	s	Promedio	s	Promedio	s	Promedio	s	Promedi o	s
Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	24.603		1.980		85%		0.260		33.335		48.67	4.99	18.67	2.05	30.00	3.74		
Rbfg	Roca blanda de la Formación Guaduas	27.754	6.768	1.899	0.166	80%	0.121	0.225	0.049	23.967	8.979	68.000		20.00		48.00			
Rbfad	Roca blanda de la Formación Arenisca Dura	38.592	2.670	1.671	0.093	87%	0.009	0.120	0.099	24.720	3.851	84.000	14.000	34.50	1.50	49.50	12.50	12.20	
Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	38.592	2.670	1.671	0.093	87%	0.009	0.120	0.099	24.720	3.851	84.000	14.000	34.50	1.50	49.50	12.50	12.20	
Rbflt	Roca blanda de la Formación Labor Tierna	18.950		1.837		83%		0.110		23.690		31.000		16.00		15.00		2.08	
Riflt	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna	18.950		1.837		83%		0.110		23.690		31.000		16.00		15.00		2.08	
Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	10.420		1.776		28%		0.010		20.810								1.87	
Srfad	Suelo residual de la Formación Arenisca Dura	38.592	2.670	1.671	0.093	87%	0.009	0.120	0.099	24.720	3.851	84.000	14.000	34.50	1.50	49.50	12.50	12.20	
Srfc	Suelo residual de la Formación Conejo	51.090		1.739		83%		0.230		18.070		76.500	6.500	40.50	12.50	36.00	6.00	3.40	
Srflt	Suelo residual de la Formación Labor Tierna	18.950		1.837		83%		0.110		23.690		31.000		16.00		15.00		2.08	
Srfp	Suelo residual de la Formación Plaeners	10.420		1.776		28%		0.010		20.810								1.87	

CÓDIGO	UNIDAD	Contenido de agua del material W (%)		Peso unitario total γ total (g/cm ³)		% de material fino que pasa el tamiz de 75 μm (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]		C (kg/cm ²)		Ángulo de fricción Φ (°)		Limite Líquido (%)		Limite Plástico (%)		Índice de Plasticidad (%)		Materia orgánica (%)	
		Promedio	s	Promedio	s	Promedio	s	Promedio	s	Promedio	s	Promedio	s	Promedio	s	Promedio	s	Promedio	s
Stal-Stfch	Suelo transportado aluvial-Suelo transportado aluvial - Formación Chia	55.730	50.176	1.840	0.071	91%	0.003	0.110	0.141	23.085	3.882	62.800	13.288	20.80	2.64	42.00	11.87	3.25	0.54
Stal-JRB	Suelo transportado aluvial JRB	40.735	5.282	1.820	0.028	49%	0.190	0.045	0.007	21.020	4.837	58.500	14.500	25.50	0.50	33.00	14.00	7.04	0.69
Stco	Suelo transportado coluvial	20.005	4.023	1.771	0.126	77%	0.093	0.063	0.092	26.705	8.787	43.500	3.500	20.00	1.00	23.50	2.50	3.68	0.80
Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana	46.988	13.832	1.679	0.127	86%	0.095	0.143	0.066	27.222	6.521	77.600	6.726	36.00	11.01	41.60	9.11	6.43	4.00
Stft-Stab	Suelo transportado fluvio-torrencial-Suelo transportado de Abanico	18.837	6.582	1.973	0.246	72%	0.323	0.165	0.021	27.565	4.869	34.500	5.500	16.50	2.50	18.00	3.00		

s*= desviación estándar.

Fuente: Arco Consultorías & 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

3.6.2.1.4.5. Cálculo de volúmenes de sedimentos

3.6.2.1.4.5.1. Determinación de parámetros de las UGS

La evaluación de las características del subsuelo se realizó mediante una exploración de campo, complementada con ensayos de laboratorio, la cual se detalla en el documento de caracterización geotécnica.

3.6.2.1.4.5.2. Parámetros de resistencia por UGS.

De acuerdo con los análisis de exploración del subsuelo y ensayos de laboratorio y los análisis realizados en el documento de caracterización geotécnica, a continuación, se muestran los parámetros promedio utilizados en la modelación de estabilidad de taludes 3 dimensiones, para las diferentes cuencas Hidrográficas identificadas en la zona de estudio.

Tabla 30. Parámetros de resistencia mecánica para el área de estudio

CUENCA	CODIGO	UNIDAD	ÁREA AFERENTE (HA)	PORCENTAJE	Contenido de agua del material W (%)		Peso unitario total y total (g/cm3)		% de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]		C (kg/cm2)		Ángulo de fricción Φ (°)	
					X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}
CH0	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	36,40	21,7%	38,59	33,86	1,67	1,84	0,87	0,83	0,12	0,19	24,72	26,45
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	52,23	31,2%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	28,49	17,0%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Stal	Suelo transportado aluvial	3,23	1,9%	55,73		1,84		0,91		0,11		23,09	
	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	11,76	7,0%	38,59		1,67		0,87		0,12		24,72	
	Srfc	Suelo residual de la Formación Conejo	35,55	21,2%	51,09		1,74		0,83		0,23		18,07	
CH1	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	20,32	52,7%	38,59	31,83	1,67	1,82	0,87	0,86	0,12	0,18	24,72	28,65
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	17,29	44,8%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	0,97	2,5%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
CH2	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	5,07	39,9%	38,59	30,18	1,67	1,86	0,87	0,86	0,12	0,20	24,72	29,90
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	7,64	60,1%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
CH3	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	2,17	27,1%	38,59	28,40	1,67	1,90	0,87	0,85	0,12	0,22	24,72	31,00
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	5,83	72,9%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
CH4	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	9,39	74,6%	38,59	35,03	1,67	1,75	0,87	0,86	0,12	0,16	24,72	26,91
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	3,20	25,4%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	

CUENCA	CODIGO	UNIDAD	ÁREA AFERENTE (HA)	PORCENTAJE	Contenido de agua del material W (%)		Peso unitario total y total (g/cm3)		% de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]		C (kg/cm2)		Ángulo de fricción Φ (°)	
					X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}
CH5	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	3,56	100,0%	24,60	24,60	1,98	1,98	0,85	0,85	0,26	0,26	33,34	33,34
CH6	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	25,38	43,5%	38,59	30,13	1,67	1,80	0,87	0,83	0,12	0,16	24,72	27,94
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	19,86	34,0%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stco	Suelo transportado coluvial	10,74	18,4%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	0,91	1,6%	38,59		1,67		0,87		0,12		24,72	
	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	0,89	1,5%	10,42		1,78		0,28		0,01		20,81	
	Riflt	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna	0,01	0,0%	18,95		1,84		0,83		0,11		23,69	
	Stal	Suelo transportado aluvial	0,53	0,9%	55,73		1,84		0,91		0,11		23,09	
CH7	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	56,24	31,5%	38,59	28,71	1,67	1,82	0,87	0,83	0,12	0,15	24,72	28,37
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	64,58	36,2%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stco	Suelo transportado coluvial	50,49	28,3%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
	Stal	Suelo transportado aluvial	5,90	3,3%	55,73		1,84		0,91		0,11		23,09	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	1,13	0,6%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
CH8	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	8,54	34,1%	24,60	32,57	1,98	1,79	0,85	0,85	0,26	0,16	33,34	27,80
	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	12,78	51,0%	38,59		1,67		0,87		0,12		24,72	
	Stal	Suelo transportado aluvial	1,07	4,3%	55,73		1,84		0,91		0,11		23,09	

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

CUENCA	CODIGO	UNIDAD	ÁREA AFERENTE (HA)	PORCENTAJE	Contenido de agua del material W (%)		Peso unitario total γ total (g/cm3)		% de material fino que pasa el tamiz de 75 μm (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]		C (kg/cm2)		Ángulo de fricción Φ (°)	
					X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}
	Stco	Suelo transportado coluvial	2,68	10,7%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
CH9	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	1,83	2,0%	10,42	29,70	1,78	1,83	0,28	0,81	0,01	0,16	20,81	27,82
	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	2,32	2,5%	10,42		1,78		0,28		0,01		20,81	
	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	4,87	5,4%	38,59		1,67		0,87		0,12		24,72	
	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	30,28	33,3%	38,59		1,67		0,87		0,12		24,72	
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	30,10	33,1%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stco	Suelo transportado coluvial	4,85	5,3%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
	Stal	Suelo transportado aluvial	4,06	4,5%	55,73		1,84		0,91		0,11		23,09	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	12,67	13,9%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
CH10	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	7,51	20,8%	38,59	22,65	1,67	1,79	0,87	0,69	0,12	0,09	24,72	23,18
	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	9,43	26,1%	10,42		1,78		0,28		0,01		20,81	
	Riflt	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna	11,60	32,1%	18,95		1,84		0,83		0,11		23,69	
	Riflt	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna	5,05	14,0%	18,95		1,84		0,83		0,11		23,69	
	Stal	Suelo transportado aluvial	1,79	5,0%	55,73		1,84		0,91		0,11		23,09	
	Stco	Suelo transportado coluvial	0,71	2,0%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
CH11	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	18,74	60,4%	38,59	28,86	1,67	1,74	0,87	0,71	0,12	0,10	24,72	24,24

CUENCA	CODIGO	UNIDAD	ÁREA AFERENTE (HA)	PORCENTAJE	Contenido de agua del material W (%)		Peso unitario total y total (g/cm3)		% de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]		C (kg/cm2)		Ángulo de fricción Φ (°)	
					X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}
	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	7,20	23,2%	10,42		1,78		0,28		0,01		20,81	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	2,99	9,6%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Stco	Suelo transportado coluvial	1,35	4,3%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	0,76	2,4%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
CH12	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	1,73	10,0%	10,42	20,83	1,78	1,83	0,28	0,77	0,01	0,10	20,81	23,60
	Stco	Suelo transportado coluvial	1,37	7,9%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
	Riflt	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna	12,93	74,9%	18,95		1,84		0,83		0,11		23,69	
	Stal	Suelo transportado aluvial	1,24	7,2%	55,73		1,84		0,91		0,11		23,09	
CH13	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	2,09	9,9%	10,42	34,49	1,78	1,71	0,28	0,81	0,01	0,12	20,81	25,15
	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	17,07	80,6%	38,59		1,67		0,87		0,12		24,72	
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	2,01	9,5%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
CH14	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	4,03	32,8%	38,59	29,13	1,67	1,88	0,87	0,85	0,12	0,21	24,72	30,45
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	8,14	66,2%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	0,12	1,0%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
CH15	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	1,92	29,4%	38,59	28,34	1,67	1,89	0,87	0,85	0,12	0,21	24,72	30,42
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	4,16	64,0%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

CUENCA	CODIGO	UNIDAD	ÁREA AFERENTE (HA)	PORCENTAJE	Contenido de agua del material W (%)		Peso unitario total y total (g/cm3)		% de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]		C (kg/cm2)		Ángulo de fricción Φ (°)	
					X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	0,43	6,6%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
CH16	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	12,78	64,9%	38,59	33,68	1,67	1,78	0,87	0,86	0,12	0,17	24,72	27,74
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	6,92	35,1%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
CH17	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	13,48	66,7%	38,59	33,88	1,67	1,77	0,87	0,86	0,12	0,17	24,72	27,54
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	6,57	32,5%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	0,17	0,8%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
CH18	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	4,10	98,3%	24,60	24,51	1,98	1,98	0,85	0,85	0,26	0,26	33,34	33,24
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	0,07	1,7%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
CH19	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	13,33	59,6%	38,59	32,22	1,67	1,78	0,87	0,85	0,12	0,16	24,72	27,37
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	5,99	26,8%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	1,90	8,5%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Stco	Suelo transportado coluvial	1,14	5,1%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
CH20	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	15,11	77,0%	38,59	34,85	1,67	1,74	0,87	0,85	0,12	0,14	24,72	26,18
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	2,72	13,9%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	0,36	1,8%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	1,42	7,3%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	

CUENCA	CODIGO	UNIDAD	ÁREA AFERENTE (HA)	PORCENTAJE	Contenido de agua del material W (%)		Peso unitario total y total (g/cm3)		% de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]		C (kg/cm2)		Ángulo de fricción Φ (°)	
					X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}
CH21	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	3,67	31,4%	38,59	27,87	1,67	1,88	0,87	0,83	0,12	0,20	24,72	29,51
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	5,74	49,1%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	2,28	19,5%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
CH22	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	6,59	47,1%	38,59	32,26	1,67	1,82	0,87	0,85	0,12	0,18	24,72	28,27
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	5,36	38,3%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	1,25	9,0%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Stal	Suelo transportado aluvial	0,50	3,6%	55,73		1,84		0,91		0,11		23,09	
	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana	0,29	2,1%	46,99		1,68		0,86		0,14		27,22	
CH23	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	0,06	0,2%	10,42	31,17	1,78	1,80	0,28	0,83	0,01	0,16	20,81	27,14
	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	0,05	0,2%	10,42		1,78		0,28		0,01		20,81	
	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	16,24	56,2%	38,59		1,67		0,87		0,12		24,72	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	1,62	5,6%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	1,21	4,2%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	6,03	20,9%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	3,64	12,6%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana	0,06	0,2%	46,99		1,68		0,86		0,14		27,22	

CUENCA	CODIGO	UNIDAD	ÁREA AFERENTE (HA)	PORCENTAJE	Contenido de agua del material W (%)		Peso unitario total y total (g/cm3)		% de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]		C (kg/cm2)		Ángulo de fricción Φ (°)	
					X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}
CH24	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	8,44	36,8%	38,59	28,42	1,67	1,86	0,87	0,82	0,12	0,18	24,72	28,69
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	8,63	37,7%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	5,74	25,0%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Stfs	Suelo transportado lacustre - Formación Sabana	0,11	0,5%	46,99		1,68		0,86		0,14		27,22	
CH25	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	10,18	46,6%	38,59	31,83	1,67	1,83	0,87	0,85	0,12	0,18	24,72	28,53
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	9,30	42,6%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	1,58	7,2%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Stal	Suelo transportado aluvial	0,79	3,6%	55,73		1,84		0,91		0,11		23,09	
CH26	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	2,36	15,3%	38,59	26,35	1,67	1,93	0,87	0,84	0,12	0,23	24,72	31,62
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	12,01	77,9%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	1,06	6,8%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
CH27	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	11,80	43,8%	38,59	30,50	1,67	1,84	0,87	0,85	0,12	0,19	24,72	29,05
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	13,01	48,2%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	1,23	4,5%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	0,29	1,1%	38,59		1,67		0,87		0,12		24,72	
	Stco	Suelo transportado coluvial	0,64	2,4%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

CUENCA	CODIGO	UNIDAD	ÁREA AFERENTE (HA)	PORCENTAJE	Contenido de agua del material W (%)		Peso unitario total γ total (g/cm ³)		% de material fino que pasa el tamiz de 75 μ m (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]		C (kg/cm ²)		Ángulo de fricción Φ (°)	
					X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}
CH28	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	32,28	45,2%	38,59	29,93	1,67	1,83	0,87	0,83	0,12	0,17	24,72	28,04
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	22,50	31,5%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	14,67	20,5%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Stal	Suelo transportado aluvial	0,64	0,9%	55,73		1,84		0,91		0,11		23,09	
	Stco	Suelo transportado coluvial	1,23	1,7%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	0,16	0,2%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
CH29	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	13,18	27,6%	38,59	26,70	1,67	1,88	0,87	0,81	0,12	0,18	24,72	28,43
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	14,50	30,4%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	17,89	37,5%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Stal	Suelo transportado aluvial	0,74	1,5%	55,73		1,84		0,91		0,11		23,09	
	Stco	Suelo transportado coluvial	1,26	2,6%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	0,14	0,3%	38,59		1,67		0,87		0,12		24,72	
CH30	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	0,26	4,7%	24,60	19,11	1,98	1,97	0,85	0,73	0,26	0,17	33,34	27,84
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	5,24	95,3%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
CH31	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	1,52	18,4%	38,59	19,48	1,67	1,79	0,87	0,63	0,12	0,08	24,72	23,11
	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	2,98	36,1%	10,42		1,78		0,28		0,01		20,81	

CUENCA	CODIGO	UNIDAD	ÁREA AFERENTE (HA)	PORCENTAJE	Contenido de agua del material W (%)		Peso unitario total y total (g/cm3)		% de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]		C (kg/cm2)		Ángulo de fricción Φ (°)	
					X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}
	Riflt	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna	3,17	38,4%	18,95		1,84		0,83		0,11		23,69	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	0,54	6,5%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Stco	Suelo transportado coluvial	0,05	0,6%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
CH32	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	2,57	74,5%	38,59	31,41	1,67	1,70	0,87	0,72	0,12	0,09	24,72	23,72
	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	0,88	25,5%	10,42		1,78		0,28		0,01		20,81	
CH33	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	1,12	69,8%	38,59	30,10	1,67	1,70	0,87	0,69	0,12	0,09	24,72	23,54
	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	0,48	30,2%	10,42		1,78		0,28		0,01		20,81	
CH34	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	1,19	75,3%	38,59	31,65	1,67	1,70	0,87	0,72	0,12	0,09	24,72	23,76
	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	0,39	24,7%	10,42		1,78		0,28		0,01		20,81	
CH35	Srfe	Suelo residual de la Formación Conejo	0,09	0,8%	51,09	32,28	1,74	1,71	0,83	0,79	0,23	0,10	18,07	24,18
	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	8,16	71,2%	38,59		1,67		0,87		0,12		24,72	
	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	1,30	11,3%	10,42		1,78		0,28		0,01		20,81	
	Riflt	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna	1,42	12,4%	18,95		1,84		0,83		0,11		23,69	
	Stco	Suelo transportado coluvial	0,48	4,2%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
CH36	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	6,26	30,6%	38,59	24,25	1,67	1,78	0,87	0,69	0,12	0,11	24,72	23,31
	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	5,29	25,9%	10,42		1,78		0,28		0,01		20,81	

CUENCA	CODIGO	UNIDAD	ÁREA AFERENTE (HA)	PORCENTAJE	Contenido de agua del material W (%)		Peso unitario total y total (g/cm3)		% de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]		C (kg/cm2)		Ángulo de fricción Φ (°)	
					X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}
	Riflt	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna	5,42	26,5%	18,95		1,84		0,83		0,11		23,69	
	Rbfg	Roca blanda de la Formación Guaduas	3,46	17,0%	27,75		1,90		0,80		0,23		23,97	
CH37	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	2,20	76,0%	10,42	12,48	1,78	1,79	0,28	0,41	0,01	0,03	20,81	21,54
	Riflt	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna	0,66	22,8%	18,95		1,84		0,83		0,11		23,69	
	Stco	Suelo transportado coluvial	0,03	1,2%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
CH38	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	0,64	12,0%	38,59	26,78	1,67	1,75	0,87	0,78	0,12	0,10	24,72	24,04
	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	1,74	32,7%	38,59		1,67		0,87		0,12		24,72	
	Riflt	Roca intermedia de la Formación Labor Tierna	1,93	36,3%	18,95		1,84		0,83		0,11		23,69	
	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	0,63	11,8%	10,42		1,78		0,28		0,01		20,81	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	0,06	1,1%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Stco	Suelo transportado coluvial	0,33	6,2%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
CH39	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	0,37	2,0%	38,59	25,19	1,67	1,75	0,87	0,64	0,12	0,09	24,72	23,46
	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	7,07	38,6%	38,59		1,67		0,87		0,12		24,72	
	Rifp	Roca intermedia de la Formación Plaeners	6,46	35,3%	10,42		1,78		0,28		0,01		20,81	
	Stco	Suelo transportado coluvial	2,02	11,0%	20,01		1,77		0,77		0,06		26,71	
	Rbfg	Roca blanda de la Formación Guaduas	2,38	13,0%	27,75		1,90		0,80		0,23		23,97	

CUENCA	CODIGO	UNIDAD	ÁREA AFERENTE (HA)	PORCENTAJE	Contenido de agua del material W (%)		Peso unitario total y total (g/cm3)		% de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (Nº200) obtenido por lavado (A) [%]		C (kg/cm2)		Ángulo de fricción Φ (°)	
					X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}	X _i	X _{prom}
CH40	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	4,09	49,8%	38,59	31,36	1,67	1,83	0,87	0,85	0,12	0,19	24,72	28,83
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	3,82	46,5%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	0,30	3,7%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
CH41	Rdfad	Roca dura de la Formación Arenisca Dura	4,09	55,9%	38,59	31,92	1,67	1,81	0,87	0,85	0,12	0,17	24,72	28,02
	Rbfc	Roca blanda de la Formación Conejo	2,59	35,4%	24,60		1,98		0,85		0,26		33,34	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	0,02	0,3%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	
	Stft	Suelo transportado fluvio-torrencial	0,62	8,4%	18,84		1,97		0,72		0,17		27,57	

Fuente: Arco Consultorias 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

- **Espesores de falla**

De acuerdo con los resultados de la inspección de campo, se tomaron espesores promedio de 1 a 4 metros para la mayoría de las unidades, siguiendo lo evidenciado en los sondeos y apiques. De igual forma una vez realizados los diferentes recorridos de campo, se logra evidenciar que el espesor de falla representativo para el proyecto corresponde a 1.0 metro y con este dato se realizarán los cálculos de aportes de volúmenes o sedimentos.

- **Parámetro r_u**

Teniendo en cuenta los espesores de falla mencionados se analizó condición de saturación parcial equivalente al 40% del talud deslizante lo cual se traduce en parámetros de relación de presión de poros r_u entre 0.195 y 0.20, tomando como dato un r_u de 0.20, para los análisis respectivos

- **Delimitación de modelos digitales de elevación para cada UGS.**

Teniendo en cuenta que la información suministrada referente a los modelos digitales de elevación se divide en dos tipos a saber:

- RURAL DEM a partir de las curvas de nivel del IGAC con datos de elevación cada 10 metros.
- Urbano: DEM a partir de ortofotorestitución.

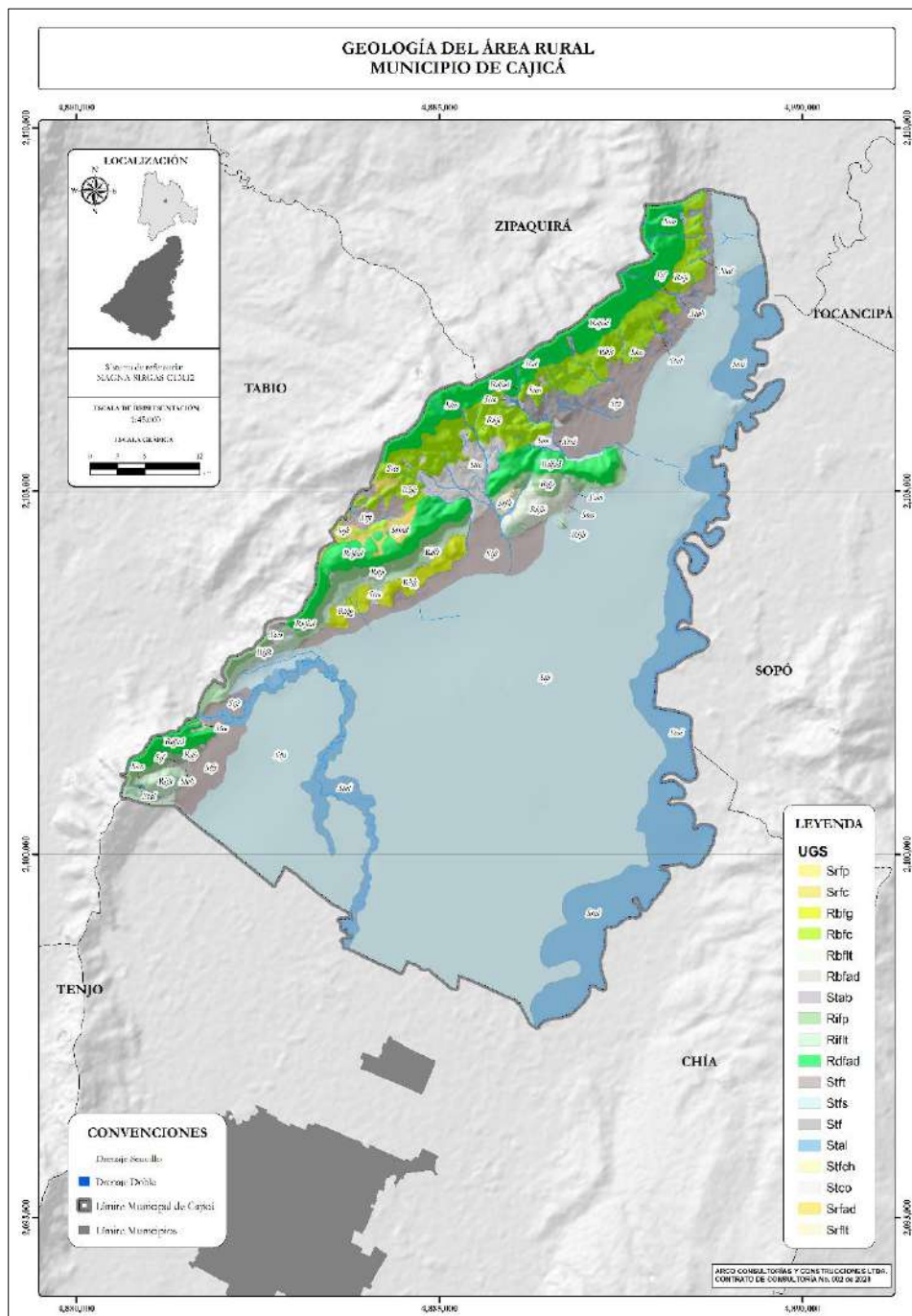
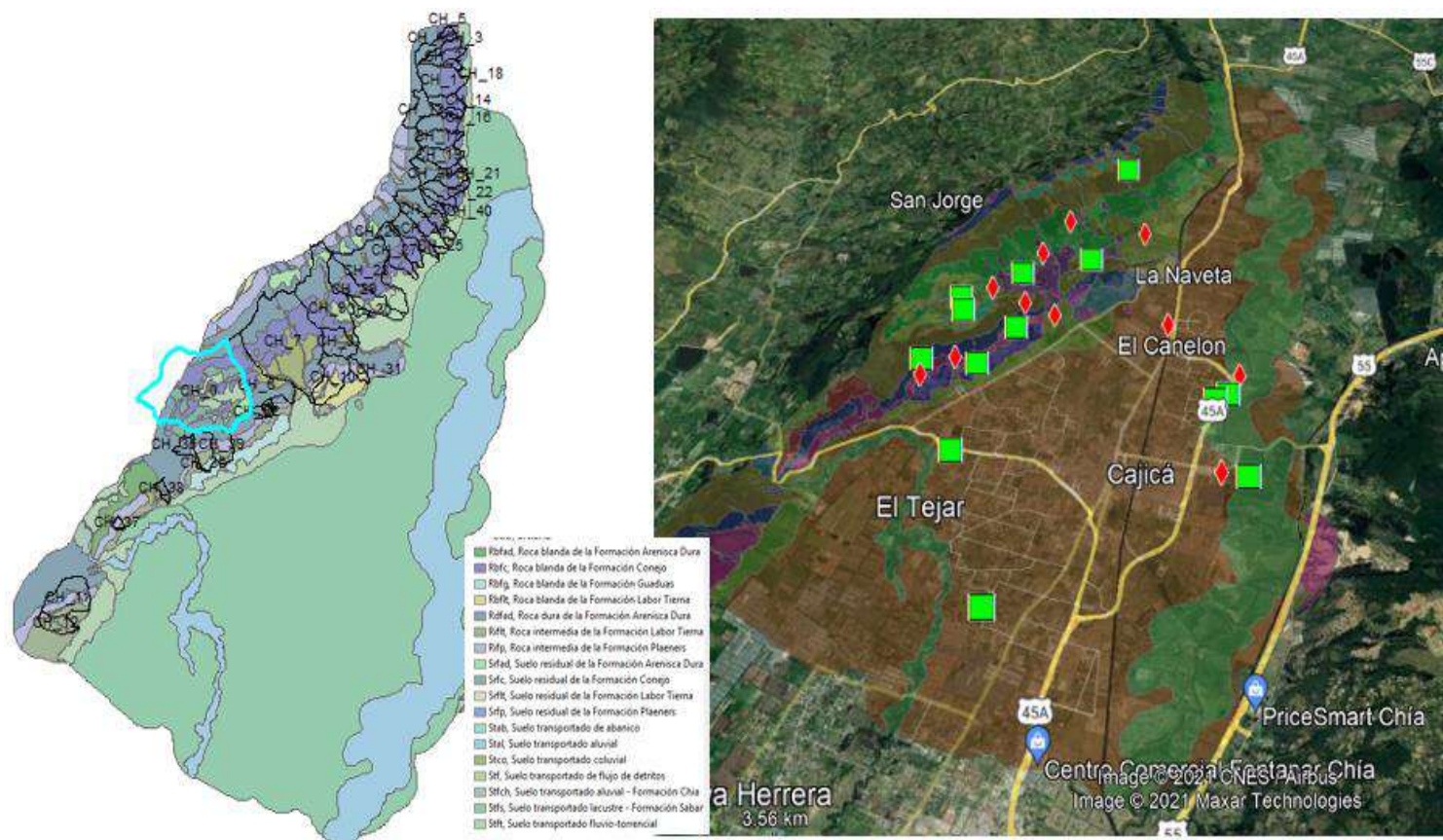


Ilustración 19 Delimitación de UGS
Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021).

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

Se presentan a nivel de microcuenca y cuenca conflictos de límites entre los dos modelos, se procedió a realizar análisis detallados en las zonas urbanas por UGS, mientras que para las zonas rurales se trabajó con el DEM del IGAC tomando parámetros conservadores para el material utilizado en las microcuencas, toda vez que este DEM tiene limitaciones en la escala de trabajo y simplemente mostraría un acercamiento de tipo regional para las superficies de falla probables y los volúmenes asociados con escalas de trabajo del orden de 1:10.000 para las zonas rurales.

Específicamente se extrajeron los DEM para cada unidad utilizando herramientas correspondientes a sistemas de información geográfico, mediante el uso del software ArcGIS, generando un modelo digital de elevación por cuenca. Por ejemplo, para la delimitación de las microcuencas a nivel urbano y rural del casco urbano principal se superponen las unidades geológicas con la delimitación de las microcuencas para poder evaluar los diferentes aportes de volúmenes.

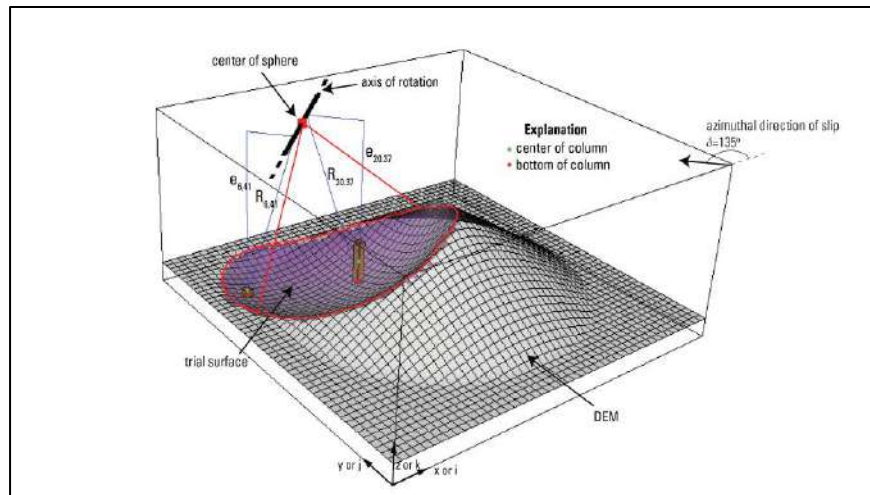


Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda. (2021).

3.6.2.1.5. Metodología para evaluar la estabilidad de taludes en 3 dimensiones mediante el software scoops.

Para determinar la estabilidad de las laderas que pueden aportar volumen a los diferentes cauces, se trabajó mediante el software Scoops el cual evalúa superficies de falla que se asemejan a una cucharada, como se ilustra a continuación.

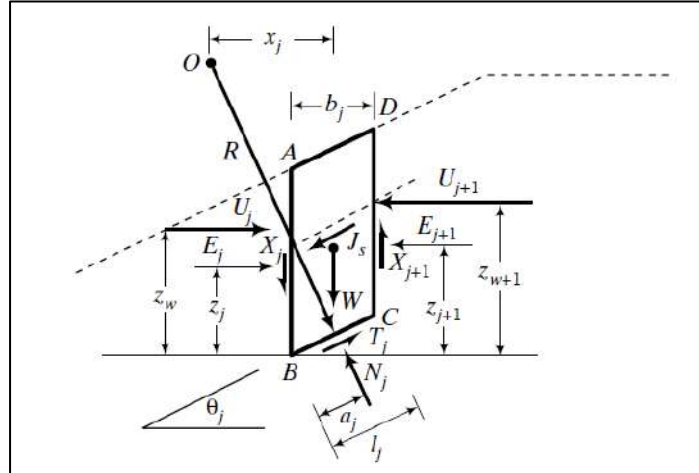
Figura 24. Esquema de evaluación de las superficies de falla en 3 dimensiones mediante el software scoops.



Fuente: Manual del software Scoops 3D.

De una manera más simplificada a continuación se muestran los parámetros que se evalúan para cada dovela en dos dimensiones. Cabe resaltar que para 3 dimensiones el análisis es similar.

Figura 25. Esquema de fuerzas que actúan en una dovela por el método de Bishop simplificado.



Fuente: Manual del software Scoops 3D.

Las hipótesis planteadas en este método se enumeran a continuación

1. Resistencia al corte por Mohr-Coulomb
2. El factor de seguridad es igual para todas las dovelas
3. Los factores de seguridad son iguales para la cohesión y $\tan\Phi$
4. Las fuerzas de corte en los lados de cada dovela son ignoradas, ya que Bishop demostró que el porcentaje de error es inferior al 1%
5. Las fuerzas normales al lado de cada dovela se consideran colineales. (i.e horizontales)
6. La presión de poros (u) es tomado en cuenta para reducir el peso total de la dovela por la fuerza de subpresión que actúa en la base de la misma.

Bishop entonces propuso las siguientes ecuaciones para determinar el factor de seguridad para una superficie de falla de tipo rotacional.

$$F = \frac{\sum \{ (W - ub) \tan \phi \} m_\alpha}{\sum W \sin \alpha}$$

Dónde,

$$m_{\alpha} = \left(1 - \frac{\tan \alpha \tan \phi}{F} \right) \cos \alpha$$

Si se trabaja con la relación de presión de poros o parámetro r_u se obtiene la siguiente ecuación.

Ecuación 1 Calculo de factor de seguridad por Bishop Simplificado con parámetro r_u

$$FS = \frac{\sum [W_j (1 - r_u)] \tan(\phi')_j m_j}{\sum W_j \sin \theta_j}$$

Dónde

$$m_j = \frac{1}{\cos \theta_j + \frac{\tan(\phi')_j \sin \theta_j}{FS}}$$

3.6.2.1.6. Evaluación de estabilidad a nivel de microcuenca en 3 dimensiones

Con respecto a los análisis a nivel de cuenca se contemplaron modelaciones en 3 dimensiones bajo métodos de equilibrio límite de tipo columnar aplicando la teoría de Bishop simplificada en la cual se calculan factores de seguridad bajo lo mencionado en los ítems anteriores.

Para el efecto se realiza entonces una zonificación de amenazas por remoción en masa estimada de acuerdo con el rango propuesto por la resolución 227 de 2006 de Bogotá, la cual se ilustra a continuación:

Tabla 31 Rango de factores de seguridad propuestos

CONDICIONES NORMALES	
Amenaza	FS
Alta	<1.2
Media	1.2-1.9
Baja	>1.9

Fuente: Resolución 227 de 2006

Teniendo en cuenta lo anterior, se calculan mediante el método en comento, los volúmenes asociados a las superficies de falla que representan condiciones inestables o de amenaza alta ($FS < 1.2$), con volúmenes variables por cuenca, que afectarían los cauces y podrían condicionar eventos de tipo torrencial.

En las siguientes figuras se muestra la distribución de las amenazas de las cuencas a nivel esquemático.

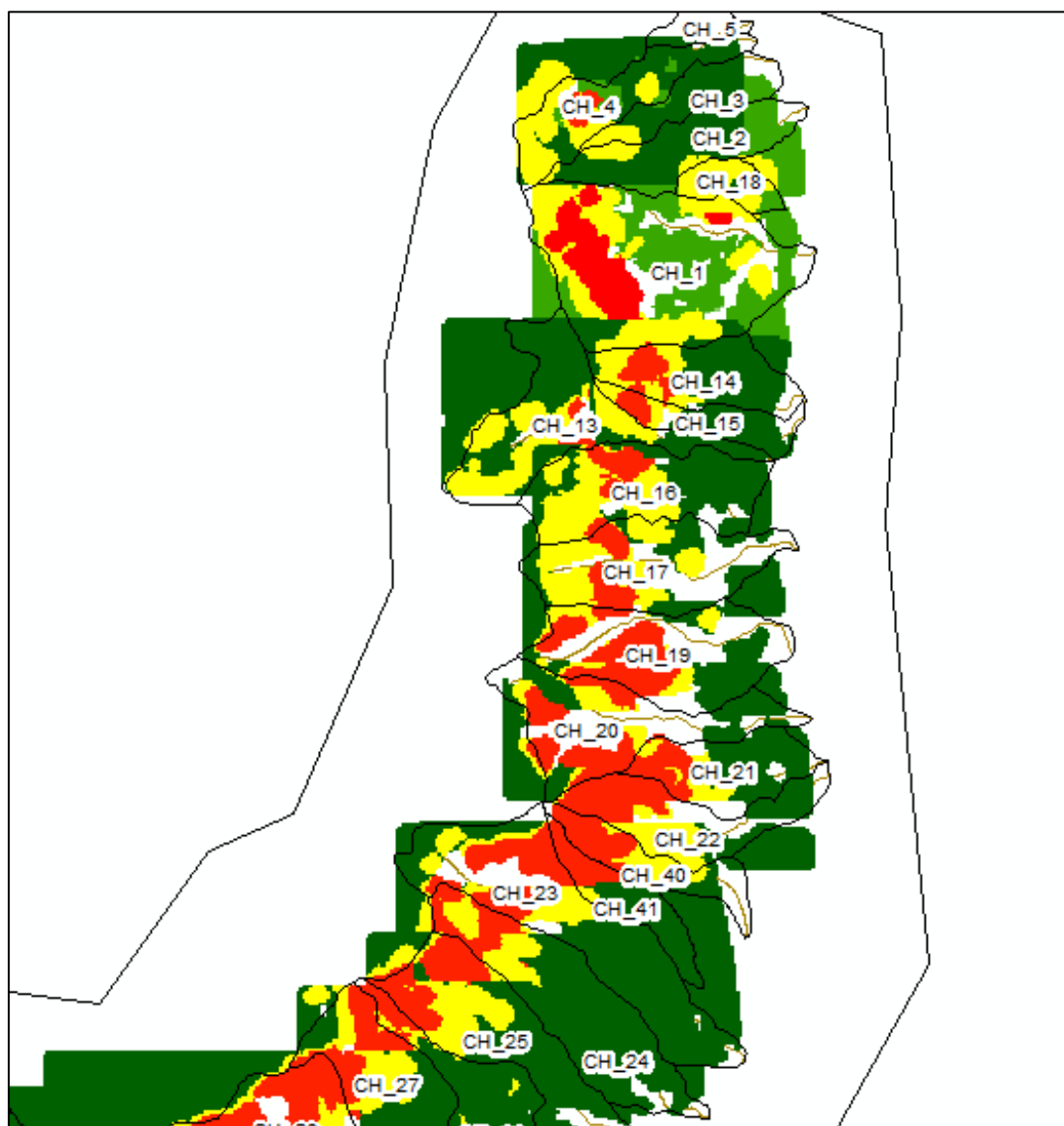


Figura 26 Vista zonificación de amenazas para las diferentes cuencas en el municipio.

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

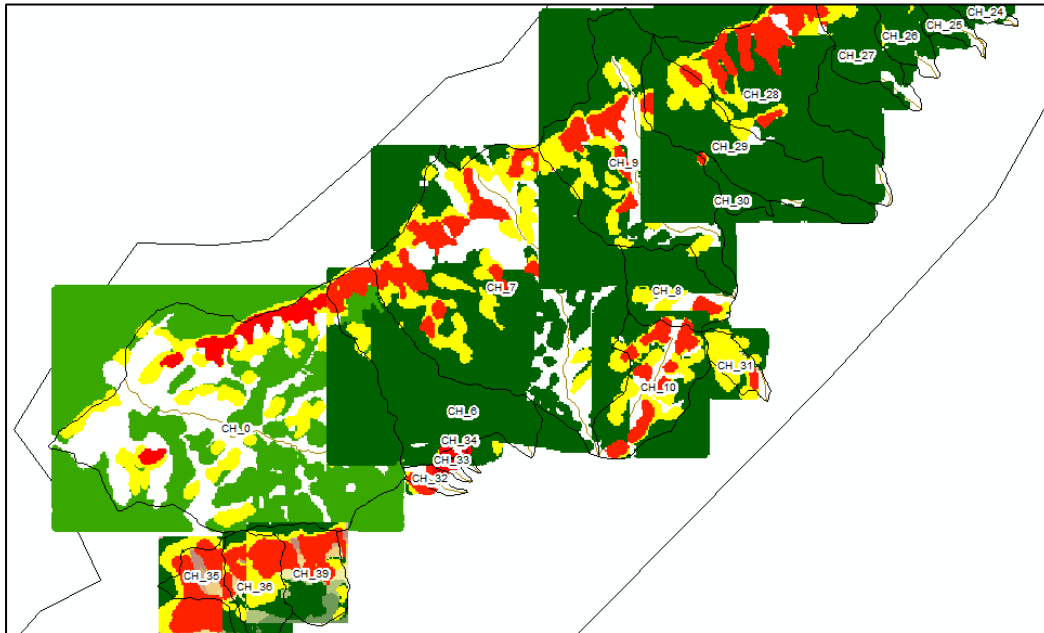


Figura 27 Vista zonificación de amenazas para las diferentes cuencas en el municipio.

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

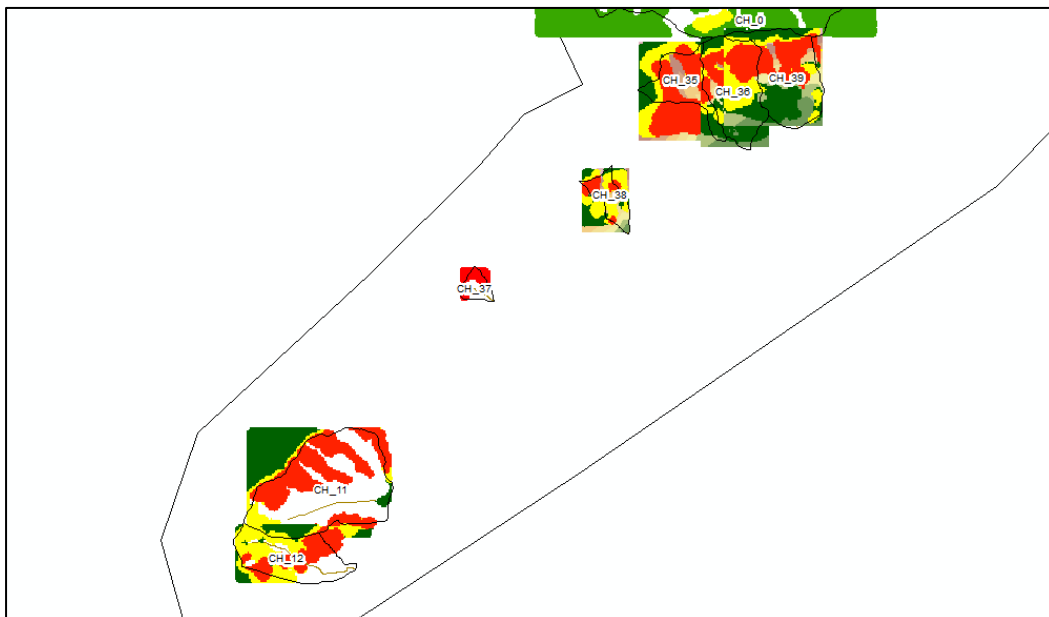


Figura 28 Vista zonificación de amenazas para las diferentes cuencas en el municipio.

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

3.6.2.1.7. Análisis de resultados

Con respecto a las microcuencas se observa que se dividen en 41 grandes identificaciones, para lo cual tenemos que para la cuenca hidrográfica 11 se presenta el mayor aporte de volumen de 212.478 m³. Las cuencas hidrográficas, 3, 5 y 18, no presentan riesgos por volúmenes de sedimentos. El aporte de volumen total de sedimentos es de 1.997.534 m³ el cual corresponde a la sumatoria de superficies de falla con factor de seguridad inferior a 1.2 calculadas en scoops. Lo anterior se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 32 Parámetros de resistencia mecánica para las cuencas hidrográficas identificadas.

Volumen de Sedimentos		
CUENCA	m ³	observación
CH0	115180	
CH1	88973	
CH2	7925	
CH3	0	FS>1.2
CH4	10847	
CH5	0	FS>1.2
CH6	58978	
CH7	202220	
CH8	15260	
CH9	131348	
CH10	103482	
CH11	212478	
CH12	62247	
CH13	36832	
CH14	17454	
CH15	9086	
CH16	18830	
CH17	36145	
CH18	0	FS>1.2
CH19	72275	
CH20	53119	

Volumen de Sedimentos		
CUENCA	m ³	observación
CH21	22506	
CH22	40630	
CH23	54973	
CH24	32245	
CH25	53838	
CH26	14024	
CH27	55455	
CH28	160295	
CH29	43028	
CH30	1678	
CH31	6917	
CH32	21953	
CH33	8294	
CH34	11696	
CH35	27689	
CH36	29686	
CH37	15091	
CH38	12648	
CH39	76513	
CH40	33136	
CH41	22560	

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

3.6.2.1.8. Conclusiones

De acuerdo con los análisis presentados se presentan las siguientes conclusiones.

- En términos generales se presentan tres tipos de unidades geológicas a saber, correspondientes a macizos rocosos, a su vez compuestos principalmente por las

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

formaciones Conejo, Arenisca Dura y Plaeners, suelos transportados aluviales (fluvio torrencial, lacustre y aluvial de cauce) y algunos suelos coluviales.

- Es de anotar que para efectos de análisis las formaciones anteriormente mencionadas, fueron tenidas en cuenta desde la respuesta superficial de espesores de falla ente 2 y 4 metros, asociados entonces a suelos residuales. Para los suelos transportados se identificaron espesores de falla variables entre 1 y 3.0 metros, para lo cual en términos generales se trabajaron superficies de falla representativo de 1.0 metro, según los recorridos de campo y calibración del modelo de trabajo.
- En términos de respuesta geomecánica, los suelos del municipio denotaron ser ligeramente a altamente sobreconsolidados, de acuerdo con los resultados de los ensayos de consolidación unidimensional y la relación entre los límites de Atterberg y las humedades naturales, las cuales en promedio se encontraban cercanas a los límites plásticos. Por su parte para las zonas de depósitos lacustres asociadas a las zonas urbanas de morfología plana principalmente, se presentan arcillas y limos sobre consolidados a nivel superficial, para pasar a normalmente consolidados después de cotas relativas del orden de los 6.00 metros, dónde su compresibilidad aumenta linealmente con la profundidad.
- Siguiendo lo recomendado por la NSR-10 título A-2-4, se presentan suelos tipo “D” según el número de golpes promedio, para las zonas de ladera y piedemonte, mientras que para las zonas correspondientes a los suelos transportados lacustres de la sabana de Bogotá, se identifican suelos tipo “E”, para los cuales se recomienda evaluar posibles problemas de ablandamiento cíclico de finos (ver (Boulanger & Idriss, 2007) o similar) dada su consistencia, para los proyectos de edificaciones y vías, que se piensen desarrollar en el municipio.
- Por otro lado, el potencial de expansión evaluado mediante los hinchamientos libres, arrojó resultados bajos. Sin embargo, se recomienda dar un adecuado manejo a las aguas superficiales y evaluar para los diferentes proyectos localmente el posible efecto de este fenómeno.
- La campaña de auscultación del suelo abarcó todas las unidades geológicas superficiales de análisis mediante sondeos y/o apiques describiendo apropiadamente sus características geotécnicas, para el alcance de un estudio básico para el desarrollo del POT del municipio.
- En la exploración no se detectaron niveles freáticos, pero estas condiciones pueden variar con la temporada del año y los regímenes de precipitación del sector.

Con respecto a las microcuencas se observa que se dividen en 41 grandes identificaciones, para

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

lo cual tenemos que para la cuenca hidrográfica 11 se presenta el mayor aporte de volumen de 212.478 m³. Las cuencas hidrográficas, 3, 5 y 18, no presentan riesgos por volúmenes de sedimentos. El aporte de volumen total de sedimentos es de 1.997.534 m³ el cual corresponde a la sumatoria de superficies de falla con factor de seguridad inferior a 1.2 calculadas en scoops.

3.6.2.1.9. Limitaciones

Las recomendaciones incluidas en este informe se basan en la investigación ejecutada en el presente informe, acorde con la práctica común de la ingeniería de suelos, y con la cobertura suficiente para definir las condiciones del sub-suelo en el área del proyecto.

No obstante, si se presentan condiciones no contempladas en este informe, como variación en el proyecto o diferencias en el sub-suelo, se nos deberá comunicar oportunamente para establecer los ajustes necesarios a las recomendaciones formuladas.

3.7. Zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales

3.7.1. Cálculo de aportes de sedimentos

El análisis de aportes de sedimentos para el área de estudio se hizo estimando el material generado por procesos de erosión (anual) y de movimientos en masa determinados a partir de laderas potencialmente inestables, estos valores son afectados por el coeficiente de producción de sedimentos mencionado anteriormente y permitirán obtener la concentración volumétrica la cual se ingresa dentro de la simulación del software FLO 2D.

3.7.2. Volúmenes de sólidos

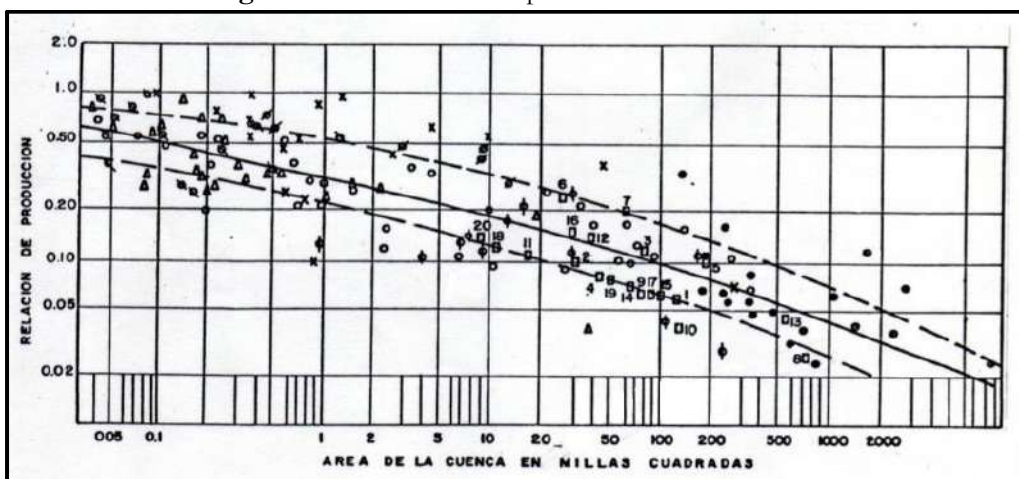
Los resultado de los volúmenes se obtuvieron de la siguiente manera: para establecer el volumen asociado a las laderas potencialmente inestables se realizó por medio del software Scoops3D desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), el cual, permite la evaluación de la estabilidad de taludes representados por un Modelo de Elevación Digital del Terreno (DEM), toma en cuenta múltiples fallas potenciales permitiendo de esta manera registrar la estabilidad más baja en relación al factor de seguridad obtenido en cada simulación. En cuanto a los cálculos de material generado por los procesos de erosión se parte de la masa calculada por hectárea anual obtenida de la zonificación de la amenaza por erosión, la densidad aparente (Da)

y el peso unitario (M) tomado de la caracterización cuantitativa de las unidades geológicas superficiales presentes, aplicando posteriormente la ecuación de volumen en relación con la densidad ($V=M/Da$). Los volúmenes calculados corresponden a volúmenes brutos, cabe resaltar que solo un porcentaje de estos materiales llegarán a los cauces y menor será la proporción del material que se acumule dentro de estos reduciendo la capacidad hidráulica o generando represamiento de su caudal.

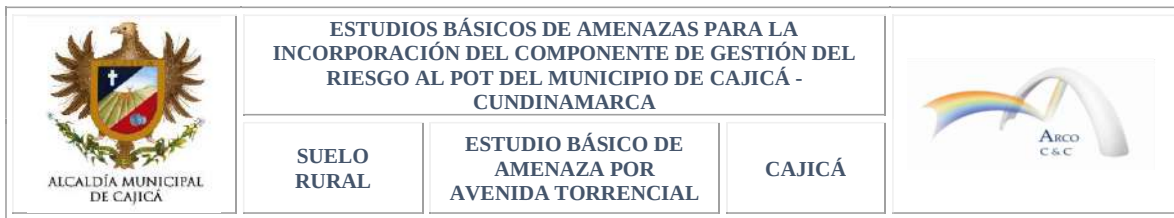
3.7.2.1. Coeficiente de producción (D)

El volumen efectivo se obtiene aplicando el coeficiente de producción de sedimentos el cual se define como el coeficiente entre el volumen estimado de sedimentos a la salida de la cuenca respecto al volumen total de suelo removido en esta; aunque este coeficiente es dependiente de factores como eficiencia de la red de drenajes, material a transportar, clima, uso de la tierra y calas características morfológicas, para el presente estudio y con fines prácticos utilizaremos los coeficientes de producción de por Díaz-Granados et al. (1986), el cual a través de ecuaciones empíricas y gráficas (Figura 29), relaciona el parámetro morfológico de la cuenca (área) con el coeficiente de producción de sedimentos. La utilización de la curva envolvente y por lo tanto la definición de la función que determinara el coeficiente de producción se obtuvo del análisis de las características morfométricas para cada una de las cuencas, en donde se utiliza la curva inferior si las cuencas daban indicios de ser hoyas latentes de degradación y por el contrario cuando estas evidenciaban procesos de agradación se daba uso a la curva superior.

Figura 29. Coeficientes de producción de sedimentos



Fuente: Granados, D., Ordoñez, & Deeb. (1986).



Una vez obtenido el coeficiente de producción se procede a calcular el volumen efectivo el cual permitirá realizar el valor de concentración volumétrica.

3.7.2.1.1. Concentración volumétrica

Para la determinación de la concentración volumétrica de los puntos de descarga de las unidades hidrográficas que aportan sedimentos al cauce de la corriente principal de la cuenca, se debe dividir el volumen total de sedimentos que llega al cauce principal proveniente de las subcuencas por el volumen total en cada sitio de entrega, es decir la sumatoria del volumen líquido obtenido para cada período de retorno del programa HEC-HMS y el volumen de sedimentos. La cual se expresa en la siguiente ecuación:

$$C_v = \frac{Q_s}{Q_s + Q_l} = \frac{\text{volumen sólidos}}{(\text{volumen sólidos} + \text{volumen líquido})}$$

Donde,

Q_s = Caudal sólido

Q_l = Caudal líquido

Q_T = Caudal Total = $Q_s + Q_l$

Q_v = Concentración volumétrica, es la relación existente entre el volumen de sólidos y el volumen total

Para el área de estudio que comprende el suelo rural del municipio de Cajicá, se delimitaron 35 unidades hidrográficas encontrándose que el aporte de material por deslizamientos es mayor en la cuenca 28, seguido de las cuencas 35 y 36 y con menor aporte de material la cuenca 30; por su parte, la unidad hidrográfica 0 es la que presenta el mayor aporte de material por erosión y la cuenca 37 la de menor aporte. La cuenca de la unidad hidrográfica 37 es la que presenta los mayores caudales para los tres periodos de retorno estudiados.

Tabla 33 . Porcentajes de aporte volumétrico de sedimentos al flujo en las diferentes unidades hidrográficas para el suelo rural del municipio de Cajicá

Unidad hidrográfica (id)	Área (km²)	Área (mi²)	Volumen líquido (Tr 2.3 años)	Volumen líquido (Tr 25 años)	Volumen líquido (Tr 100 años)	Volumen por deslizamiento (m³)	Volumen por erosión (m³)	Coefficiente de producción (d)	Volumen efectivo total (m³)
Ch_0	2.1522	5.5185	695.9	6839	14968.7	57590	10364.81	0.1951	13,258.83
Ch_10	0.3610	0.9256	2233.7	11313.1	21687.8	51741	1987.32	0.6326	33,985.87
Ch_12	0.1733	0.4445	2373.5	11662.1	22190.6	31123.5	3228.42	0.8123	27,902.55
Ch_13	0.2116	0.5426	1781.6	9458	18338.1	18416	350.55	0.7634	14,325.83
Ch_14	0.1229	0.3152	2504	11233.8	20885.6	8727	53.36	0.8965	7,871.26
Ch_15	0.0651	0.1670	2318.9	10793.8	20260.7	4543	296.67	1.0522	5,092.07
Ch_16	0.1970	0.5050	3762.2	14031	24772.7	9415	1454.60	0.7810	8,488.80
Ch_17	0.2021	0.5183	2376.8	10932.4	20458	18072.5	2242.37	0.7746	15,736.36
Ch_19	0.2237	0.5736	1919.5	9810.2	18848.9	36137.5	3013.11	0.7498	29,353.91
Ch_20	0.1961	0.5029	3242.7	12911.4	23233.5	26559.5	4082.87	0.7820	23,962.58
Ch_21	0.1172	0.3004	7.8	2747.5	7736.7	11253	1593.46	0.9082	11,667.28
Ch_22	0.1400	0.3589	16.3	2900.1	8009.1	20315	849.98	0.8647	18,300.36
Ch_23	0.2892	0.7415	2295.8	10738.1	20181.4	27486.5	1906.33	0.6869	20,189.57
Ch_24	0.2292	0.5878	2214.2	10540.7	19899.5	16122.5	1916.72	0.7438	13,417.44
Ch_25	0.2185	0.5602	1703.7	9255.5	18043	26919	1469.79	0.7556	21,449.57
Ch_26	0.1543	0.3955	4135.6	14811	25833.2	7012	1054.22	0.8409	6,782.52
Ch_27	0.2697	0.6915	1431.5	8526.8	16972.3	27727.5	3105.45	0.7040	21,705.26
Ch_28	0.7148	1.8328	1835.4	9596.2	18539	80147.5	5030.86	0.4652	39,622.74
Ch_29	0.4771	1.2233	755.7	6504.2	13918.5	21514	3418.37	0.5642	14,067.42
Ch_30	0.0550	0.1411	147.6	3988	9883.7	839	260.80	1.0933	1,202.45
Ch_31	0.0825	0.2116	967.1	7180.4	14954.5	3458.5	495.61	0.9941	3,930.59
Ch_32	0.0345	0.0884	9696.3	26176.2	41551.8	10976.5	83.94	1.2078	13,359.03
Ch_33	0.0160	0.0411	6568.6	20563.5	34363.1	4147	47.12	1.3958	5,854.24
Ch_34	0.0157	0.0404	4502.8	16463.3	28894.1	5848	89.58	1.4000	8,312.82
Ch_35	0.1146	0.2938	10012.2	26713.2	42223.8	41534	120.45	0.9137	38,059.07
Ch_36	0.2043	0.5240	5496.8	18486.2	31617.9	44528.5	799.07	0.7720	34,990.84
Ch_37	0.0289	0.0741	10944.1	28270.6	44158.4	7545.5	2.72	1.2511	9,443.56
Ch_38	0.0531	0.1362	9927.1	26569.1	42043.7	6324	5.54	1.1020	6,975.08

Unidad hidrográfica (id)	Área (km²)	Área (mi²)	Volumen líquido (Tr 2.3 años)	Volumen líquido (Tr 25 años)	Volumen líquido (Tr 100 años)	Volumen por deslizamiento (m³)	Volumen por erosión (m³)	Coefficiente de producción (d)	Volumen efectivo total (m³)
Ch_39	0.2197	0.5632	6788.3	20978.1	34905.2	38256.5	2222.63	0.7543	30,531.59
Ch_40	0.0821	0.2105	2080.8	10213.6	19430.6	16568	410.89	0.9954	16,900.53
Ch_41	0.0732	0.1877	2157.9	10403.3	19702.8	11280	325.04	1.0235	11,878.03
Ch_6	0.5833	1.4956	30.1	3470	9428.3	29489	7346.25	0.5150	18,969.42
Ch_7	1.8424	4.7240	2184.4	11188.6	21507.9	303330	15469.35	0.2332	74,342.98
Ch_8	0.2508	0.6430	794	6630.8	14113.8	7630	1986.15	0.7218	6,941.01
Ch_9	0.9120	2.3385	1540.9	8824.1	17410.8	65674	6925.95	0.4055	29,437.46
Ch_11	0.4317	1.1069	4168.7	15758.3	27932	637434	3267.34	0.5887	377,187.40

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

3.7.2.2. Condiciones de torrencialidad

Para la determinación de las unidades hidrográficas a modelar, se toma como base el posible comportamiento torrencial que éstas pueden llegar a presentar a partir de una serie de condiciones evaluadas anteriormente, siendo estas, el índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET) teniendo presente aquellas categorías de alta y muy alta; Wilford al diferenciar el tipo de flujo encontrado en las cuencas contemplando aquellos flujos de detritos y lodos únicamente; el coeficiente de torrencialidad tendrá en cuenta el número de drenajes de orden uno presente la cuenca, es decir, entre más drenajes de dicho orden presente la cuenca tendrá mayor susceptibilidad a presentar eventos de carácter torrencial; la concentración de sedimentos volumétricos estimados para cada una de las cuencas, a partir de los criterios empíricos desarrollados por O'Brien (1985) en su Manual FLO-2D (Ver Tabla 5), donde se estima que aquellas cuencas de carácter torrencial presentan concentraciones de sedimentos que oscilan de 0,20 a 0,55. Adicionalmente, se examina los diferentes registros históricos de ocurrencia de avenidas torrenciales.

Los insumos para la evaluación de los parámetros contemplados para este capítulo se elaboran a escala 1:10.000 para el suelo rural cumpliendo la normatividad para estos estudios, pero dicha información se extiende o se complementa con escalas menores para abarcar las unidades hidrográficas objeto de estudio, de forma tal que se concilia con los requerimientos normativos y la información disponibles. Estos insumos se efectúan para las temáticas de que se derivan del DEM, drenajes, coberturas y unidades geológicas ingenieriles.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

A continuación, se presentan los resultados de las diferentes condiciones de torrencialidad contempladas anteriormente, con su respectiva figura y análisis.

3.7.2.2.1. Wilford

La mayoría de las hoyas hidrográficas del municipio de Cajicá (27) tienen tendencia a presentar flujos de detritos en sus cauces principales, sugiriendo la posible presencia de avenidas torrenciales ante la presencia de eventos hidrometeorológicos extremos dado su diferencia de alturas de su cabecera respecto a su desembocadura y su área.

En menor proporción se encuentran cuencas que tienden a presentar crecientes de detritos y sólo 2 unidades hidrográficas tienden a presentar inundaciones de aguas claras (Ilustración 20), definido principalmente por una relativa menor diferencia de alturas de la cabecera y la desembocadura de estas cuencas respecto a las que presentan teóricamente flujos de detritos.

Teniendo esto en cuenta, el índice de Wilford sugiere la alta susceptibilidad de las cuencas evaluadas a presentar eventos torrenciales dada la morfología de las cuencas, siempre y cuando se presenten precipitaciones extremas en las partes altas de las mismas y exista material sólido disponible para ser arrastrado por el cauce principal.

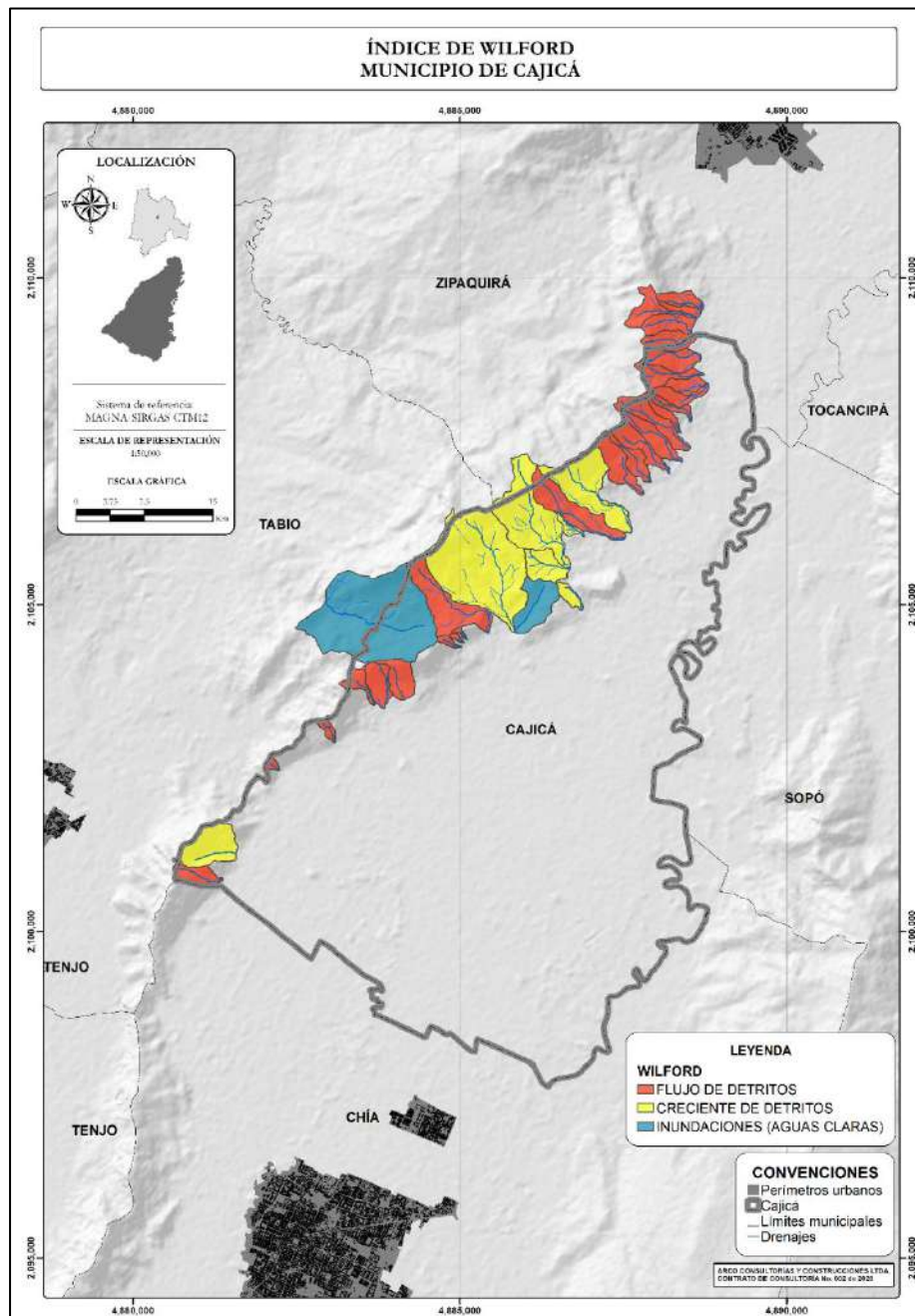


Ilustración 20 Parámetros de Wilford suelo rural – Municipio de Cajicá.
Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda. (2021).

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

3.7.2.2.2. Melton

Dentro de los parámetros de Melton para el área de estudio se encuentran valores entre 0,21 – 1,64. Existen algunas microcuencas, ubicadas en la parte central Y suroccidnetal de la ladera occidental del municipio, que cuentan con valores relativamente bajos del índice de Melton (Ilustración 21). Caso contrario, los valores altos se encuentran en las microcuencas localizadas principalmente en la parte noroccidental del municipio, sugiriendo que estas cuencas son susceptibles a transportes de aguas con alta carga de sedimentos, ya que fueron estimados valores del Índice de Melton superiores a 0.8, resultado que implica la tendencia de estas unidades hidrográficas a presentar eventos torrenciales violentos y espontáneos.

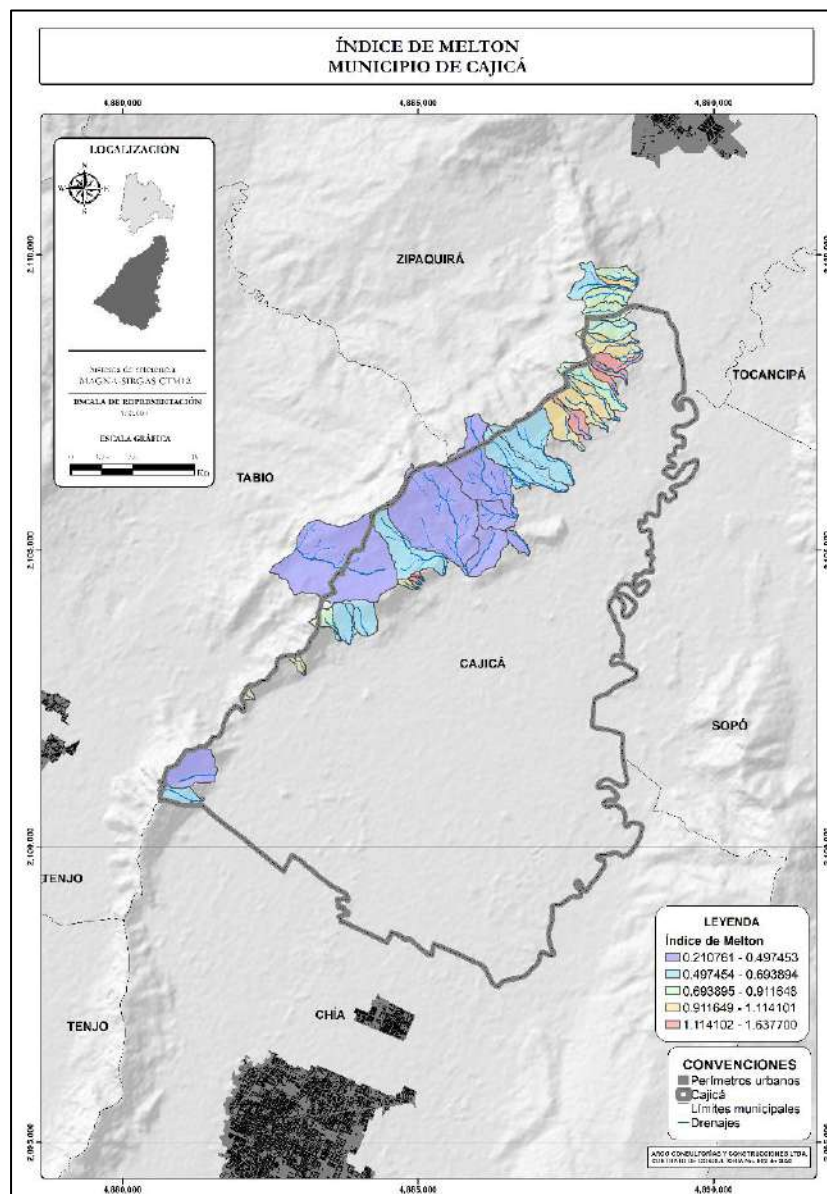


Ilustración 21 Parámetros de Melton para las microcuencas del objeto de estudio.

Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda., (2021).

3.7.2.2.3. IVET

Conforme los resultados obtenidos para el IVET, se aprecia que existe una clara predominancia de las hoyas hidrográficas de clasificación “alta” (Ilustración 22), con dos microcuencas con

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

vulnerabilidad frente a eventos torrenciales “muy alta”. Esto implica que la gran mayoría de unidades hidrográficas evaluadas cuenta con condiciones hidrológicas y morfométricas que las hacen proclives a presentar eventos torrenciales, debido a que existen comportamientos de alta variabilidad en sus caudales y a la dinámica hidrológica de sus drenajes y afluentes dadas sus formas.

En adición a esto, la alta densidad de drenajes, el coeficiente de compacidad oval redonda a oval oblonga a casi redonda a oval redonda y pendientes medias a altas favorece un índice de vulnerabilidad alto en casi la totalidad de microcuencas evaluadas para el territorio comprendido por el municipio de Cajicá.

Por otra parte, existen dos cuencas que han sido clasificadas como “medias” respecto al índice de vulnerabilidad, localizadas al suroccidente y occidente del municipio, hoyas hidrográficas donde la variabilidad de sus caudales tiene valores prudenciales y su morfometría no cuenta con valores críticos que favorezcan la ocurrencia de avenidas torrenciales en las mismas. El nivel medio del IVET no implica que no exista la posibilidad de presentarse un evento torrencial en estas cuencas, dado que eventos hidrometeorológicos extremos pueden incrementar excesivamente los caudales y generar procesos degradativos.

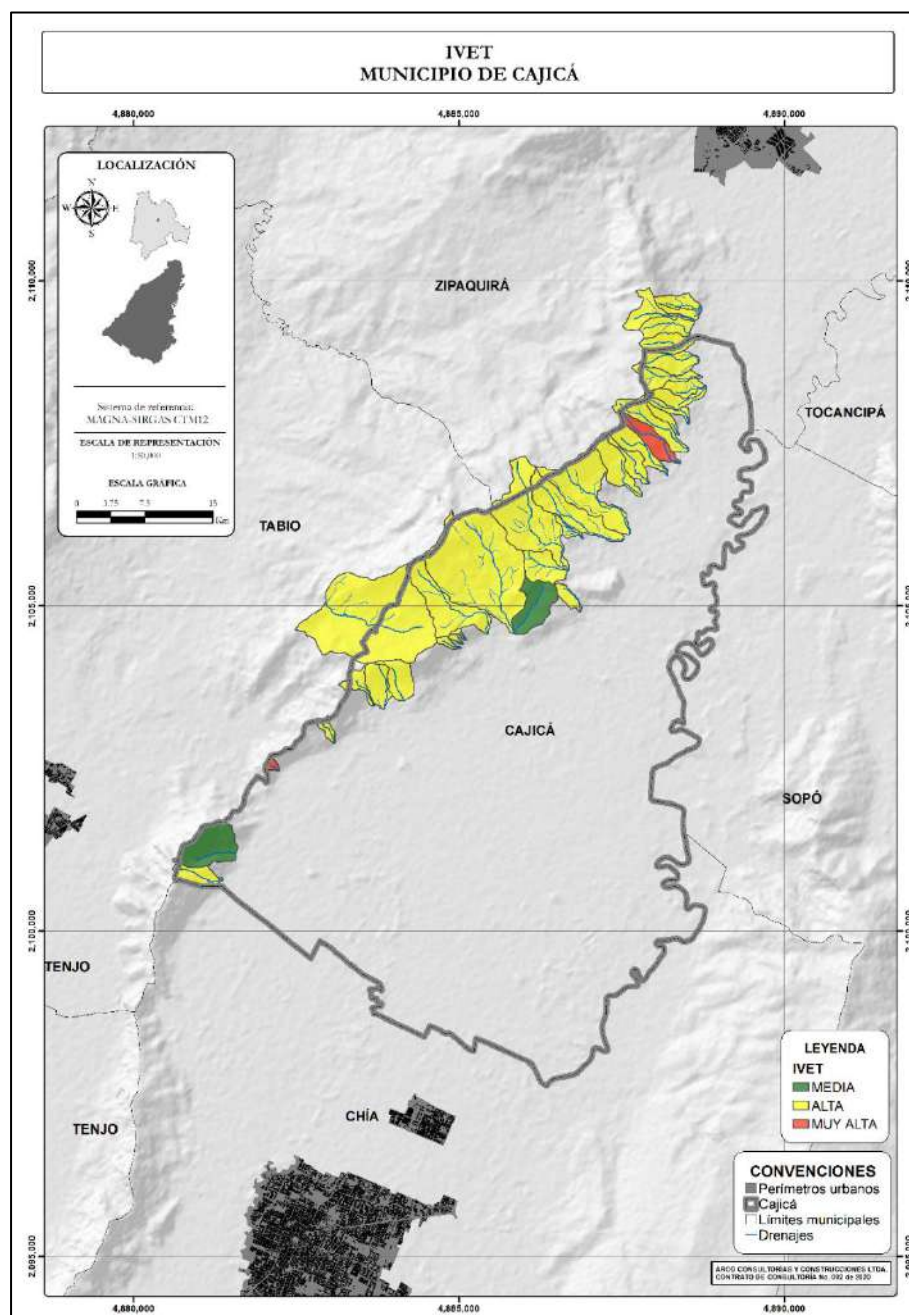


Ilustración 22. Índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales para las cuencas hidrográficas objeto de estudio.

Fuente: Arco Consultorías & 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

3.7.2.2.4. Coeficiente de torrencialidad

Conforme los resultados obtenidos para el coeficiente de torrencialidad, se ha determinado que algunas cuencas dispersas ubicadas en la región norte y a lo largo del margen occidental del municipio de Cajicá, cuentan con valores críticos para el coeficiente de torrencialidad. En la región norte las cuencas tienen numerosos drenajes de primer orden y no cuentan con un área considerable, sugiriendo una actividad erosiva muy activa en estas hoyas hidrográficas de alta montaña y siendo de especial atención ante la ocurrencia de eventos extremos de origen hidrometeorológico.

Por otra parte, las tonalidades azules de la Ilustración 23 indican valores por debajo del umbral crítico de torrencialidad, pero no implican que no haya meteorización intensa ni probabilidades de ocurrencia de procesos torrenciales en estas regiones.

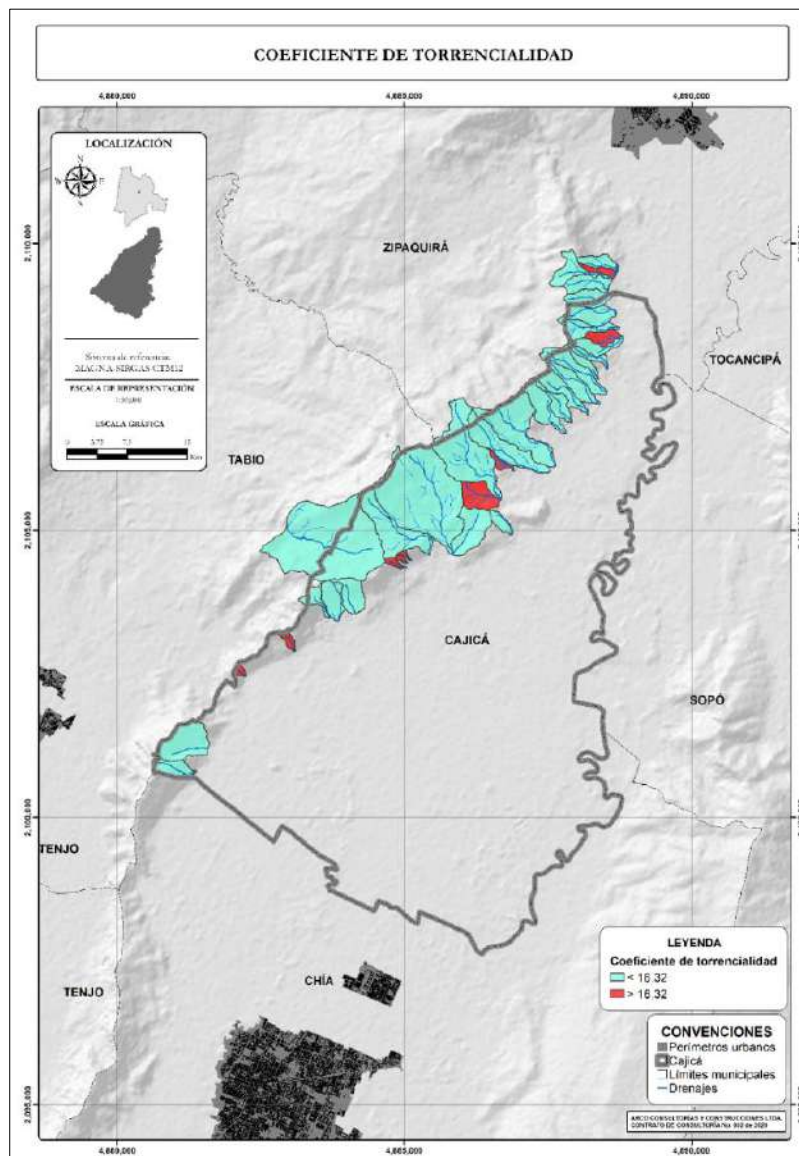


Ilustración 23. Coeficiente de torrencialidad suelo rural municipio de Cajicá.

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

Las microcuencas diseminadas en la ladera dentro de la jurisdicción municipal son de una muy pequeña extensión, factor que, acompañado de algunos drenajes de primer orden en las mismas, genera el incremento de los valores para este parámetro morfométrico y sugiere una probable erosión intensa en estas pequeñas regiones.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

3.7.2.2.5. Concentración Volumétrica

Conforme los resultados de la concentración volumétrica promedio de los periodos de retorno de 2.33, 25 y 100 años, se ha determinado que 24 unidades hidrográficas tienen la tendencia a presentar flujos o avenidas de lodo, determinado por concentración entre 20 y 55% de material sólido respecto al líquido teóricamente presente en cada cauce ante un evento de precipitación extremo.

Así mismo, existen 11 cuencas diseminadas a lo largo del flanco occidental del municipio de Cajicá que probablemente presente movimientos en masa ante la ocurrencia de lluvias de alta intensidad, implicando una alta proporción de sedimentos, mayores al 55% del material total transportado por el cauce, respecto a la proporción de agua. En estas hoyas hidrográficas hay una menor probabilidad de presentar avenidas torrenciales, más no implica que no sea posible el desencadenamiento de un evento de este tipo en dichas regiones.

Finalmente, no se determinaron cuencas con tendencia a presentar inundaciones de agua según el resultado de la concentración volumétrica en la cuenca. Es decir, que cuenten con menos del 20% de material sólido respecto al líquido en el cauce, sugiriendo la potencial existencia de gran carga de sedimentos provenientes de movimientos en masa anteriores, depósitos no litificados y/o fenómenos erosivos en la cuenca.

La distribución espacial de la clasificación de las concentraciones volumétricas de las cuencas emplazadas dentro del territorio comprendido por el municipio de Cajicá se presenta en la Ilustración 24, donde las tonalidades amarillas y azules denotan flujos y avenidas de lodo respectivamente.

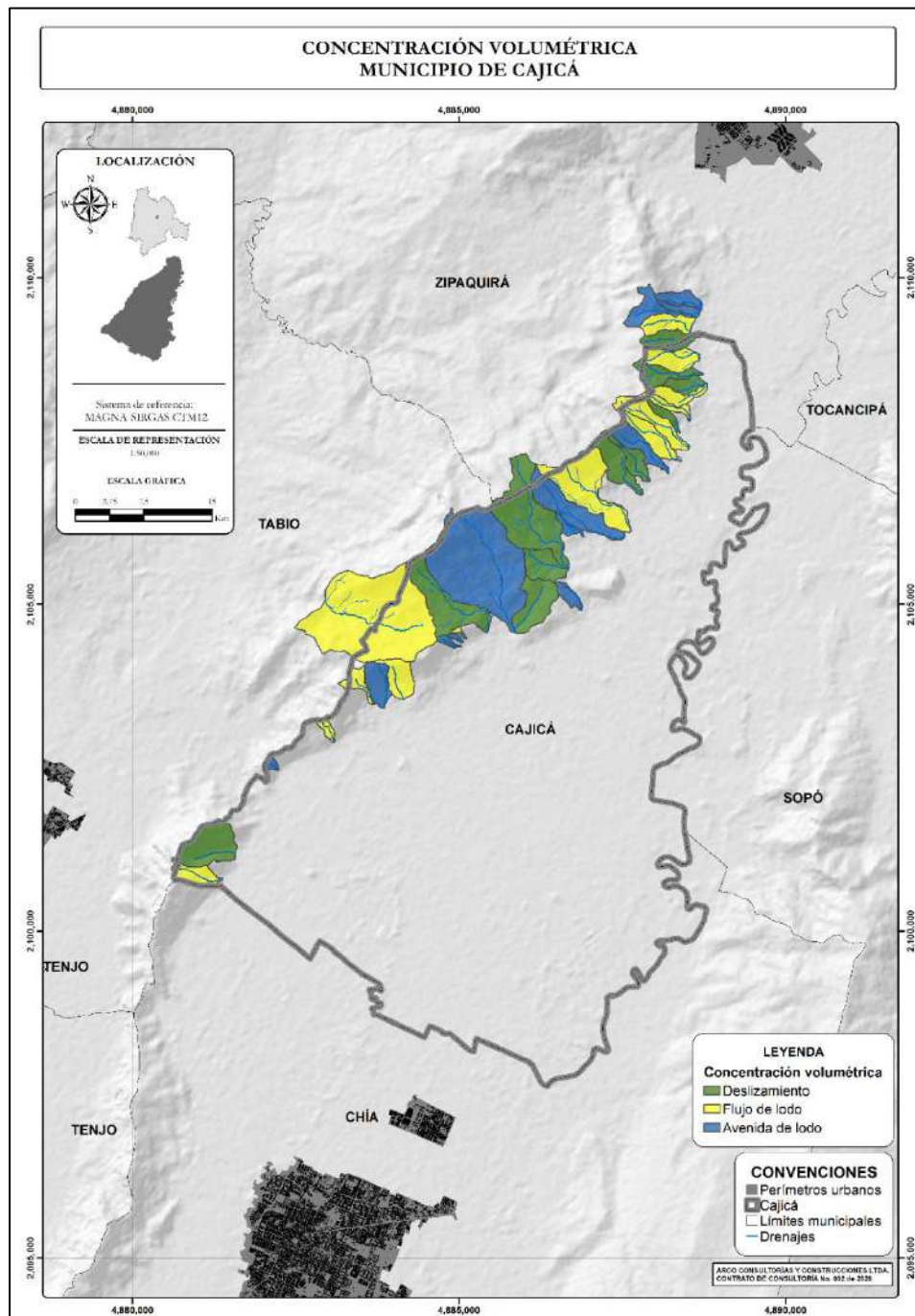


Ilustración 24. Concentración volumétrica suelo rural municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda. (2021)

3.7.2.2.6. Cuencas con carácter torrencial

Una vez analizados todos los parámetros e índices que pueden medir el grado de torrencialidad para las cuencas objeto de estudio, se determinan con estos las cuencas de carácter torrencial y por lo tanto objeto de modelación para flujos hiperconcentrados en el modelo numérico, para ello se muestra en un mapa las cuencas de carácter torrencial con una tabla de referencia de cuales se modelarán y la compilación de los parámetros que condicionaron su comportamiento torrencial.

De acuerdo con lo anterior, los parámetros hidrológicos y morfométricos dados por los demás índices en estudio, indican que, si se evidencia un comportamiento torrencial, por lo que las cuencas a seleccionar dentro del modelo se seleccionan basado en estos criterios, mayores índices torrencialidad, Wilford con crecientes de detritos e IVET alto y medio. Finalmente, las cuencas presentes en la no fueron modeladas dado a que tiene una tendencia a presentar bajo comportamiento torrencial.

Tabla 34 Índices de torrencialidad para determinar cuencas torrencales

Unidad hidrográfica (id)	IVET	Índice de Wilford	Coefficiente de torrencialidad	Cuenca para modelar
CH_0	Alta	Inundaciones (aguas claras)	5.1110	Si
CH_10	Media	Inundaciones (aguas claras)	2.7703	No
CH_12	Alta	Flujo de detritos	5.7687	No
CH_13	Alta	Flujo de detritos	9.4505	Si
CH_14	Alta	Flujo de detritos	16.2696	Si
CH_15	Alta	Flujo de detritos	30.7154	Si
CH_16	Alta	Flujo de detritos	10.1542	Si
CH_17	Alta	Flujo de detritos	14.8419	Si
CH_19	Alta	Flujo de detritos	13.4102	No
CH_20	Alta	Flujo de detritos	15.2961	Si
CH_21	Alta	Flujo de detritos	25.6029	Si
CH_22	Alta	Flujo de detritos	7.1443	No
CH_23	Alta	Flujo de detritos	13.8327	Si
CH_24	Muy alta	Flujo de detritos	4.3623	Si

Unidad hidrográfica (id)	IVET	Índice de Wilford	Coefficiente de torrencialidad	Cuenca para modelar
CH_25	Alta	Flujo de detritos	4.5771	Si
CH_26	Alta	Flujo de detritos	6.4830	Si
CH_27	Alta	Flujo de detritos	3.7078	No
CH_28	Alta	Creciente de detritos	5.5962	Si
CH_29	Alta	Flujo de detritos	8.3843	Si
CH_30	Alta	Creciente de detritos	90.8447	Si
CH_31	Alta	Creciente de detritos	12.1153	Si
CH_32	Alta	Flujo de detritos	28.9914	Si
CH_33	Alta	Flujo de detritos	62.4493	Si
CH_34	Alta	Flujo de detritos	63.5324	Si
CH_35	Alta	Flujo de detritos	8.7272	Si
CH_36	Alta	Flujo de detritos	9.7875	Si
CH_37	Muy alta	Flujo de detritos	34.5925	Si
CH_38	Alta	Flujo de detritos	18.8221	Si
CH_39	Alta	Flujo de detritos	4.5527	Si
CH_40	Alta	Flujo de detritos	12.1815	Si
CH_41	Alta	Flujo de detritos	13.6640	Si
CH_6	Alta	Inundaciones (agua clara)	6.8577	No
CH_7	Alta	Inundaciones (agua clara)	6.5133	Si
CH_8	Media	Inundaciones (agua clara)	19.9396	Si
CH_9	Media	Inundaciones (agua clara)	10.9649	No
CH_11	Media	Creciente de detritos	2.31640734	Si

Fuente: Arco Consultorias & Construcciones Ltda. (2021).

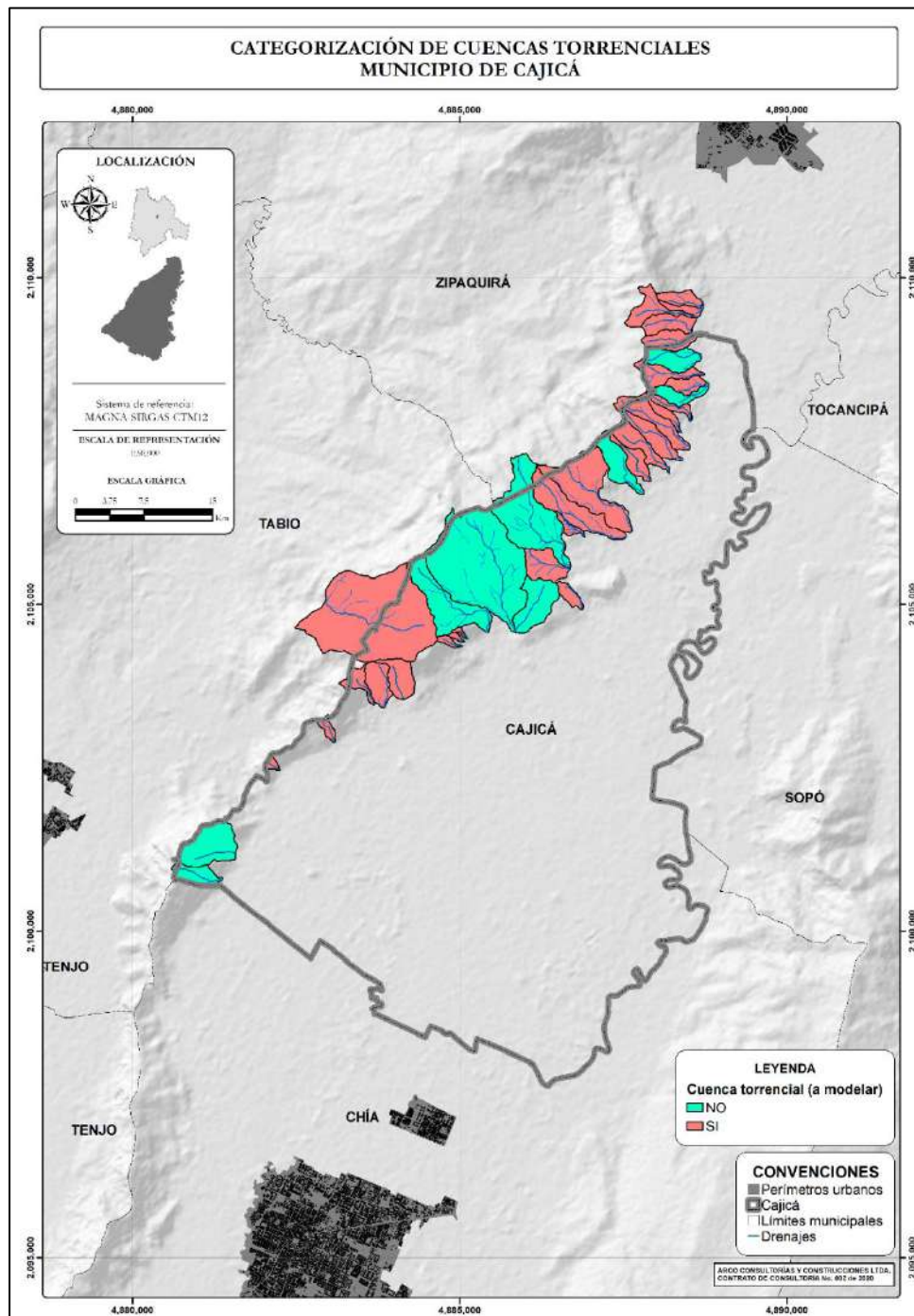
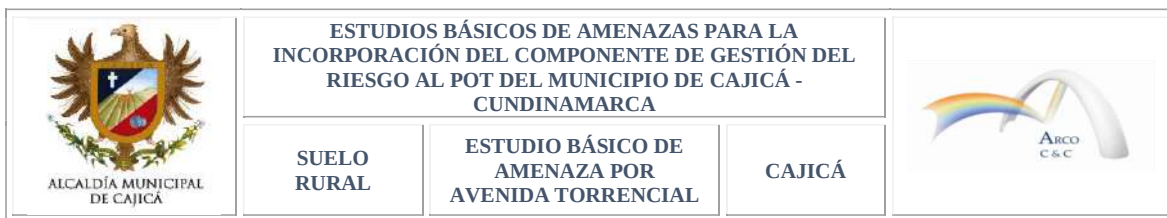


Ilustración 25 Categorización final de las cuencas torrenciales suelo rural municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorias & Construcciones Ltda. (2021).



Conforme los resultados obtenidos, únicamente 8 de las 36 cuencas evaluadas para el municipio de Cajicá, no presentan teóricamente características de torrencialidad que puedan favorecer la ocurrencia de avenidas torrenciales en la región. Por otra parte, 24 cuencas presentan cualidades morfológicas, hidrológicas y superficiales que las hacen proclives a desencadenar este tipo de eventos al desencadenarse una lluvia extrema, razón por la cual deben modelarse.

3.7.3. Hidrogramas líquidos – sólidos

A partir del análisis hidrológico de la zona, se estimaron los hidrogramas de caudal líquido para diferentes eventos en la cuenca. Dicha actividad se realizó con el método del hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de EEUU y el empleando el método de la curva número para la estimación de la precipitación efectiva. Las tormentas empleadas para la generación de los hidrogramas corresponden a los periodos de retorno de 2.33, 25 y 100 años, para la modelación hidrológica se empleó en el modelo HEC-HMS.

Posteriormente, se realizó el cálculo de concentración de sólidos, mediante la relación existente entre el volumen total de material sólido potencialmente transportable, y el volumen total del flujo calculado a partir de los hidrogramas, lo que corresponde a la concentración de la mezcla (agua más sedimentos).

Para la aplicación del hidrograma propuesto por O' Brien (2006) para generar el hidrograma total del flujo torrencial, de debe generar una convolución del hidrograma de caudales líquidos con un factor volumétrico que depende del coeficiente concentración en volumen solidos (variación de la concentración de sedimentos) en función del tiempo. El valor de la concentración máxima es un parámetro por calibrar dentro del proceso, y, por tanto, el caudal máximo alcanzado por el flujo corresponde a la suma entre el caudal líquido pico y el decrecimiento del caudal sólido, donde el caudal sólido para cada intervalo de tiempo corresponde al producto de la concentración de sólidos por el caudal líquido para el mismo periodo de tiempo.

La obtención de un hidrograma de flujo hiperconcentrados se estimó a partir de la hidrógrafa de flujo de agua multiplicando por un factor que es una función de la concentración volumétrica de los sedimentos (C_v), dicho hidrograma se calculó conociendo el caudal pico de la descarga y conociendo el volumen de sedimentos disponibles en la cuenca la concentración promedio para una hidrógrafa.

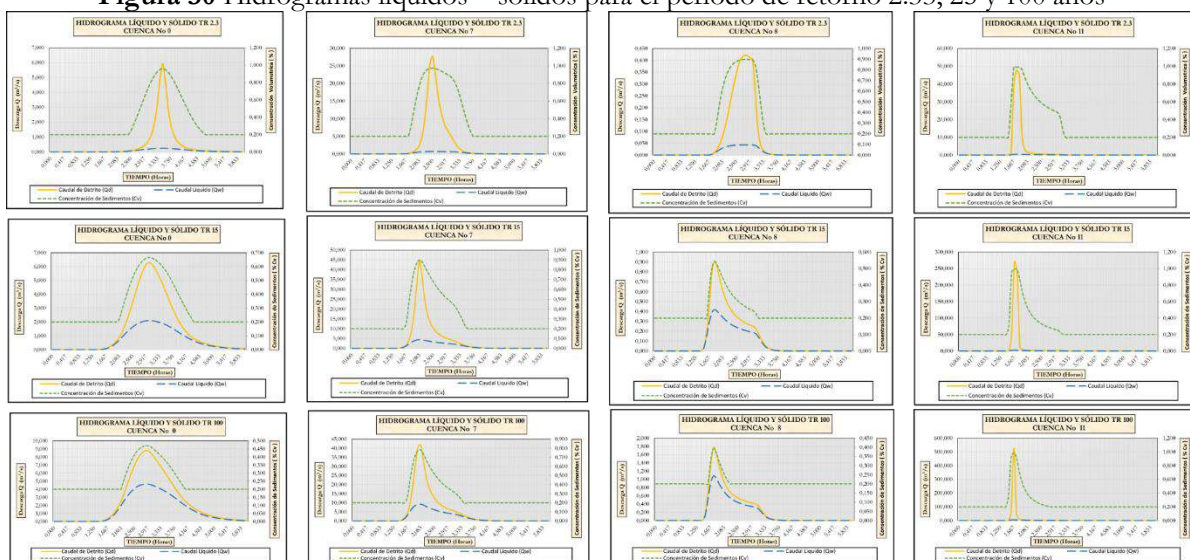
Para la distribución de la carga volumétrica en el tiempo se debe considerar una concentración de sedimentos típica para la descarga máxima de un flujo de lodos, la cual es aproximadamente entre

el 45% a 55% (la cual puede variar dependiendo de la concentración de sedimentos finos en la matriz de fluido, la cual puede adoptar rangos de la hidrógrafa de un flujo de lodos entre 25% y 35% para tormentas de corta duración y de 10% a 25% para tormentas de larga duración (O'Brien, 1997).

La hidrógrafa debe comenzar en una concentración del 20% ya que corresponde a los datos que se han estudiado y por lo tanto se convierten en datos teóricos para las zonas donde no se posee información detallada.

La distribución de la hidrógrafa determinará el comportamiento la masa de la onda frontal, el movimiento el fluido en la mancha de inundación (correspondiente a los depósitos lobulados, abanicos y llanuras de inundación). En la Figura 30 se muestran los Hidrogramas líquidos – sólidos para el periodo de retorno 2.33, 25 y 100 años para las microcuencas emplazadas en el municipio de Cajicá.

Figura 30 Hidrogramas líquidos – sólidos para el periodo de retorno 2.33, 25 y 100 años





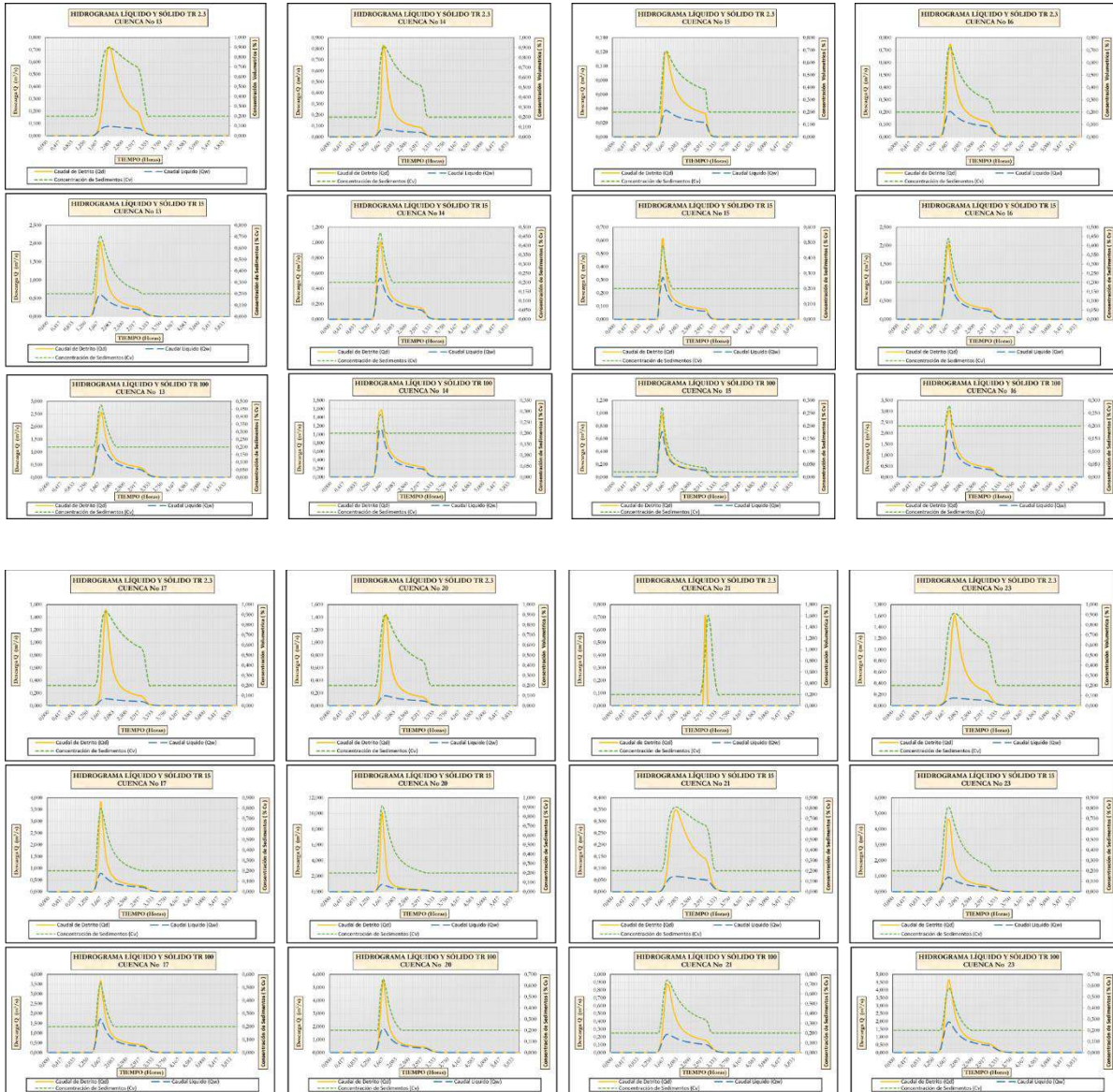
ALCALDÍA MUNICIPAL
DE CAJICÁ

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
AVENIDA TORRENCIAL

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 AVENIDA TORRENCIAL

CAJICÁ



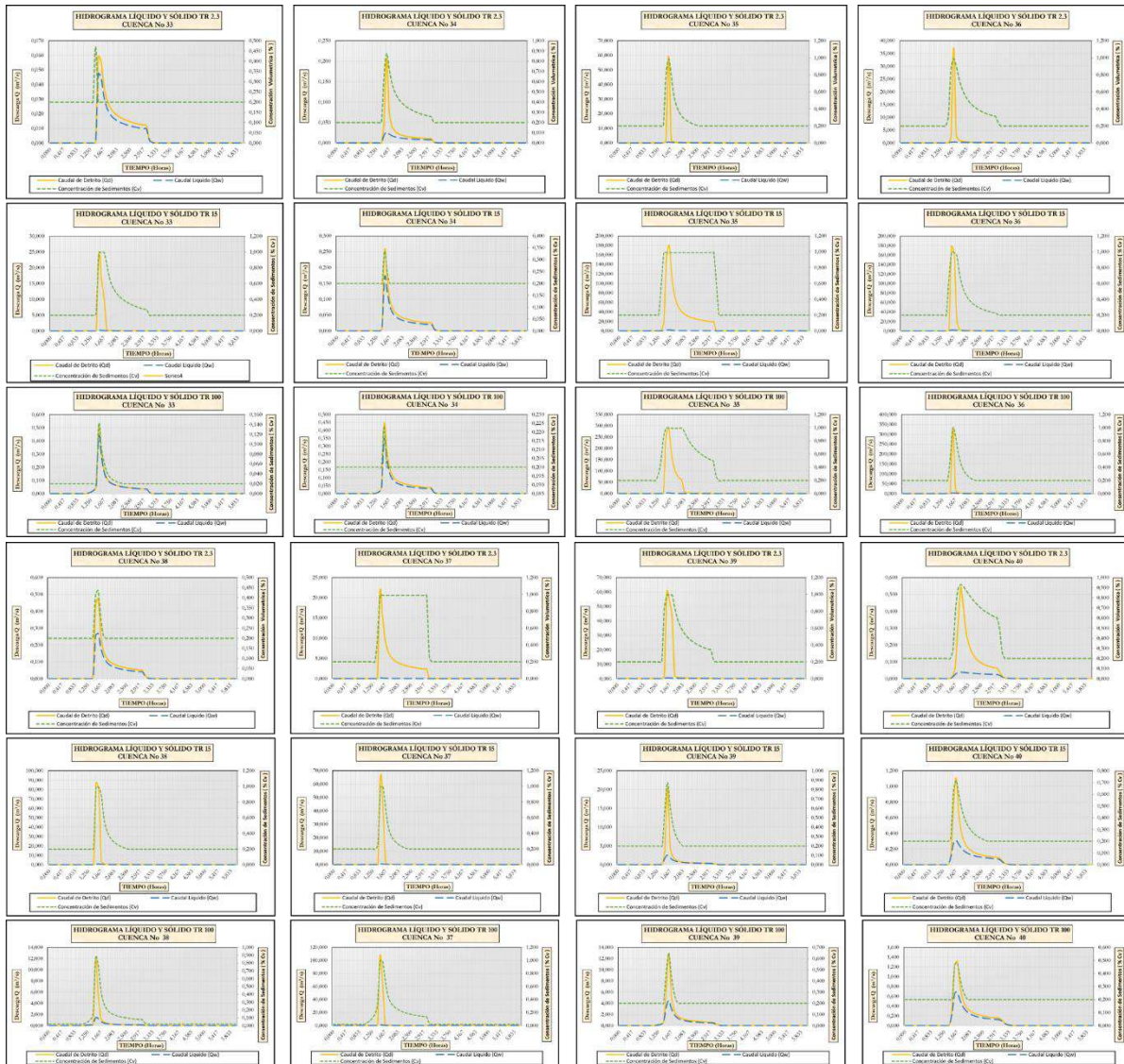


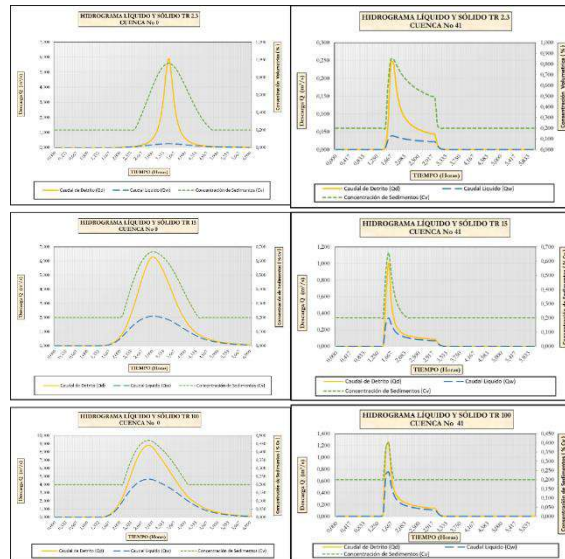
ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA

SUELO
RURAL

ESTUDIO BÁSICO DE
AMENAZA POR
AVENIDA TORRENCIAL

CAJICÁ





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

3.7.4. Modelación numérica

3.7.4.1. Pre-procesamiento

Para el caso de estudio se definió el modelo bidimensional para la simulación de flujo hiperconcentrado de lodo y detritos implementado en Flo – 2D, utilizando ecuaciones que gobiernan el movimiento bajo la expresión más compleja a la onda dinámica. Para ello se definió y se incorporó dentro del programa los siguientes criterios:

- **Definición de la geometría del área de estudio**

Este paso consta de tomar el Modelo de Elevación Digital del Terreno (DEM) contemplado para el área de estudio que contiene los tramos de los cauces que tiene influencia dentro o cerca del polígono del suelo rural a escala 1:10.000 y exportarlo al preprocesador GDS (System Developer Grid) en formato ASCII, el cual permite definir las celdas utilizadas para realizar la simulación. Las grillas delimitadas para la simulación fueron de 2 m x 2 m y corresponde a las áreas de los afluentes que afectan directa e indirectamente el territorio comprendido por el municipio de Cajicá. Los archivos que almacenan dicha información corresponden a FPLAIN.OUT y TOPO.OUT.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

- **Condiciones de borde o de frontera**

La solución de la ecuación diferencial depende de las condiciones iniciales y de contorno que definen el comportamiento del modelo en sus límites, y permiten dar una solución a las ecuaciones diferenciales al restringir la función a determinados valores particulares de la variable. Para ello, dentro del pre-procesador (GDS) se procede a delimitar la zona de modelación obteniendo las celdas del área de trabajo con las siguientes condiciones:

- La condición de borde aguas arriba son los hidrogramas líquidos – sólidos (Cv) de entrada (INFLOW) de las unidades hidrográficas asignadas a su corriente principal, las cuales fueron calculadas para las cuencas hidrográficas que fueron categorizadas por los criterios morfométricos e hidrológicos de carácter torrencial. Esta condición se realiza para cada uno de los tiempos de retorno calculados en los hidrogramas.
- La condición de borde aguas abajo es el flujo de salida (OUTFLOW), para ello se determinan celdas de salida que permite que el flujo no se estanque donde las curvas topográficas acaban en la zona de simulación (punto de confluencia de aguas).

Para el caso de la zona de estudio se establecieron las siguientes condiciones de frontera para el programa como se describe a continuación: La condición de borde aguas arriba se da sobre el inicio de los cauces principales de las Cuencas caracterizadas por presentar comportamiento torrencial, dicha condición se realiza mediante el ingreso del hidrograma de entrada (INFLOW). Las condiciones de borde aguas abajo en la salida del flujo (OUTFLOW) se realiza para los drenajes correspondientes a las cuencas hidrográficas referentes a aguas directas.

- **Definición de parámetros de estabilidad y convergencia de la solución numérica**

En el panel de control de variables se encuentran los parámetros de control que permiten definir los criterios de estabilidad numérica para hacer convergir una solución a las ecuaciones diferenciales planteadas dentro del modelo (criterios que relacionan la distribución del movimiento de la onda). Dentro de estos criterios se deben definir los asociados al tiempo de control, ajustes a los datos globales para las variables independientes dentro de las ecuaciones diferenciales de momentum y de continuidad y los parámetros de estabilidad numérica (número de Courant). Estos criterios de estabilidad son la base para determinar el paso de tiempo de las simulaciones.

Tabla 35 Variables de control para las simulaciones numéricas

Variable de control		
Control de tiempo	Tiempo de simulación	63 horas
	Intervalo de simulación	0.85 Horas
Modificación de datos globales	Ajuste n- valor	0.0275
	Factor Bulking (Engrosamiento)	0.15
	Límite de inundación para Froude	2
	Superficie del flujo	0.2
Parámetros de estabilidad numérica	Para llanura de inundación	0.6
	Para Canales	0.35
	Tasa de cambio de aceleración	0.1

Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda., (2021)

• Definición de parámetros reológicos

La viscosidad y el esfuerzo de cedencia de mezclas agua-sedimento son parámetros reológicos necesarios para la aplicación de los modelos de cálculo de los flujos con altas concentraciones de sedimentos. Una manera directa de calcular la viscosidad es empleando un “reómetro” que es similar a un viscosímetro que construye todo el diagrama de esfuerzo vs. tasa de deformación. Usualmente en estos aparatos sólo se analiza la matriz del fluido (limos y arcillas con tamaños menores a 0,072 mm), es decir sólo se analiza la matriz más viscosa de la mezcla sin considerar el material grueso. Sin embargo, el uso de esta metodología resulta ser complicado y a la vez muy costosa.

Otro método es seleccionar parámetros de los datos existentes a mediante tamizaje de muestras recolectadas en campo, la correlación de los parámetros se puede realizar a partir de los valores teóricos obtenidos por O’Brien y Julien (1988), quienes hicieron un análisis de laboratorio de muestras recolectadas de depósitos naturales de flujos de lodo en Colorado Rocky Mountain cerca de las ciudades de Aspen y Glenwood Springs. Las propiedades de las muestras de los flujos de lodo en términos de distribución del tamaño de sedimento y contenido de arcilla son dadas en la Tabla 36. Las muestras con alto contenido de arcilla fueron ensayadas para determinar el límite líquido y el índice plástico. Los resultados obtenidos se correlacionaron con otros estudios (Tabla 36).

Tabla 36. Coeficientes para el cálculo de esfuerzos cortantes y viscosidad en el flujo

SITIOS ESTUDIADOS	α_s	β_s	α_v	β_v
Datos de Campo				
Aspen Pit 1	0.181	25.7	0.0360	22.1
Aspen Pit 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Aspen Natural Soil	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen Mine Fill	0.0473	21.1	0.128	12.0
Aspen Watershed	0.0383	19.6	0.000495	27.1
Aspen Mine Source Area	0.291	14.3	0.000201	33.1
Glenwood 1	0.0345	20.1	0.00283	23.0
Glenwood 2	0.0765	16.9	0.0648	6.20
Glenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
Parámetros disponibles en la literatura				
Iida (1938) *	-	-	0.0000373	36.6
Dai et al. (1980)	2.60	17.48	0.00750	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
Qian et al. (1980)	0.00136	21.2	-	-
	0.050	15.48	-	-
Chien and Ma (1958)	0.0588	19.1-32.7	-	-
Fei (1981)	0.166	25.6	-	-
	0.00470	22.2	-	-

Fuente: O'Brien y Julien (1988)

- Parámetros reológicos para el área de estudio**

Con base a la anterior se encontró que los parámetros para valorar tanto los esfuerzos cortantes y la viscosidad del flujo fueron los presentes en la Tabla 37 para cada área de estudio.

$$1 \text{ dina/cm}^2 = 0.10 \text{ N/m}^2$$

$$2 \text{ poise} = 0.10 \text{ Kg/m/s}$$

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

Tabla 37 Parámetros reológicos para las áreas de estudio

	VISCOSIDAD VS CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTO		ESTRÉS DE RENDIMIENTO VS CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTO	
	COEFICIENTE (POISES)	EXPONENTE	COEFICIENTE (DINAS / CM2)	EXPONENTE
Suelo Rural de Cajicá	0,000495	27,1	0,0383	19,6

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

Coeficiente de rugosidad en el cauce y en las planicies

La metodología utilizada para el cálculo del coeficiente de rugosidad se expone en el capítulo de Hidrología en el ítem de coeficiente de Manning (**Capítulo I Numeral 1.4.7.7**).

3.7.4.2. Simulación

Una vez importado el DEM al preprocesador GDS (System Developer Grid) con la delimitación de la zona de modelación con las celdas del área de trabajo, la asignación de los coeficientes de rugosidad, la ubicación de los hidrogramas de entrada (INFLOW) en las celdas correspondientes y en la parte baja las celdas de salida del flujo (OUTFLOW) e ingresar todos los parámetros solicitados por el programa tanto para los criterios de estabilidad como de las características del tipo de flujo a simular, se procede a realizar la corrida de las simulaciones del flujo para el cuerpo de agua del estudio.

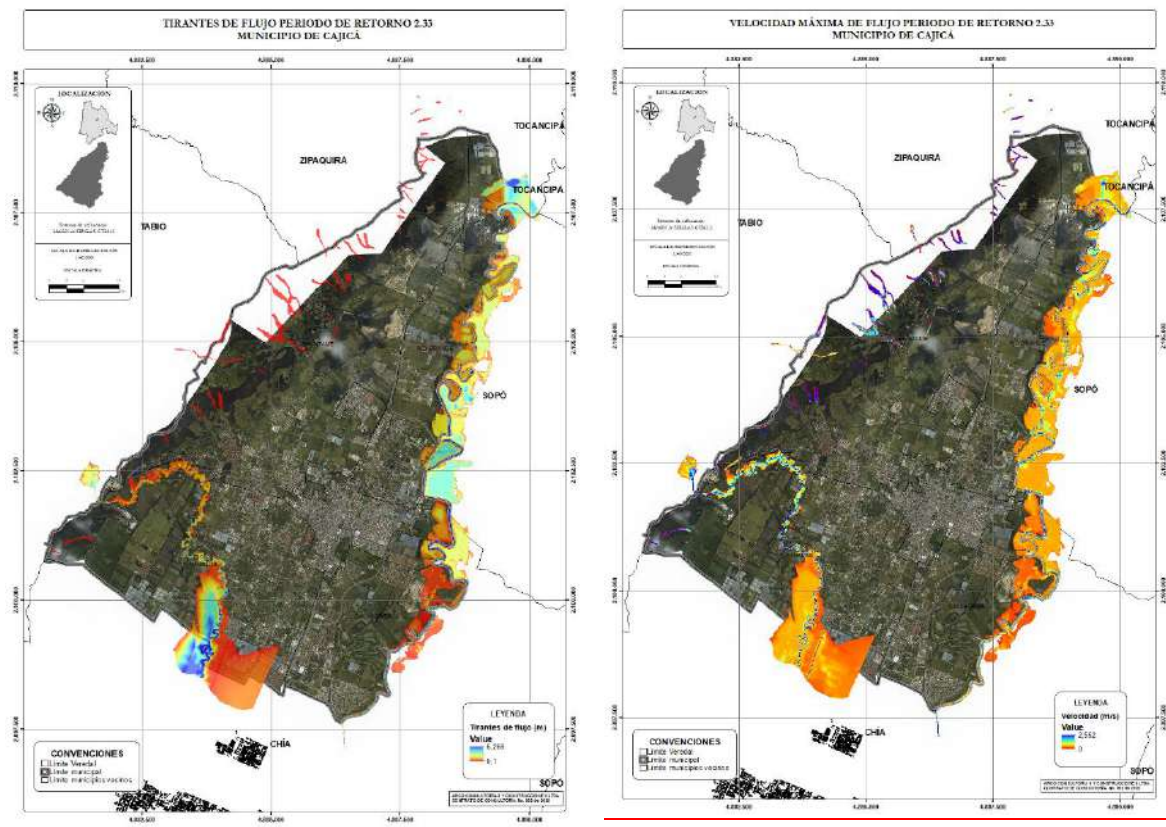
3.7.4.3. Post – Procesamiento

Los resultados de la simulación son presentados en forma gráfica en los post-procesadores MAXPLOT y MAPPER que forman parte del software. De la ejecución del programa se obtiene las elevaciones del terreno de la cuenca, tirantes de altura del flujo de detritos del cauce y las zonas afectadas, así mismo las velocidades, cantidad de agua y sedimento del flujo fuera del área de estudio (flujo de salida y la cantidad de agua y sedimento remante sobre el abanico y el cauce (flujo almacenado). El resumen de los resultados obtenidos se sintetiza en el archivo SUMMARY.OUT (reporte de las simulaciones realizadas) el cual se adjunta en el **ANEXO 1**.

- **Escenario de modelación**

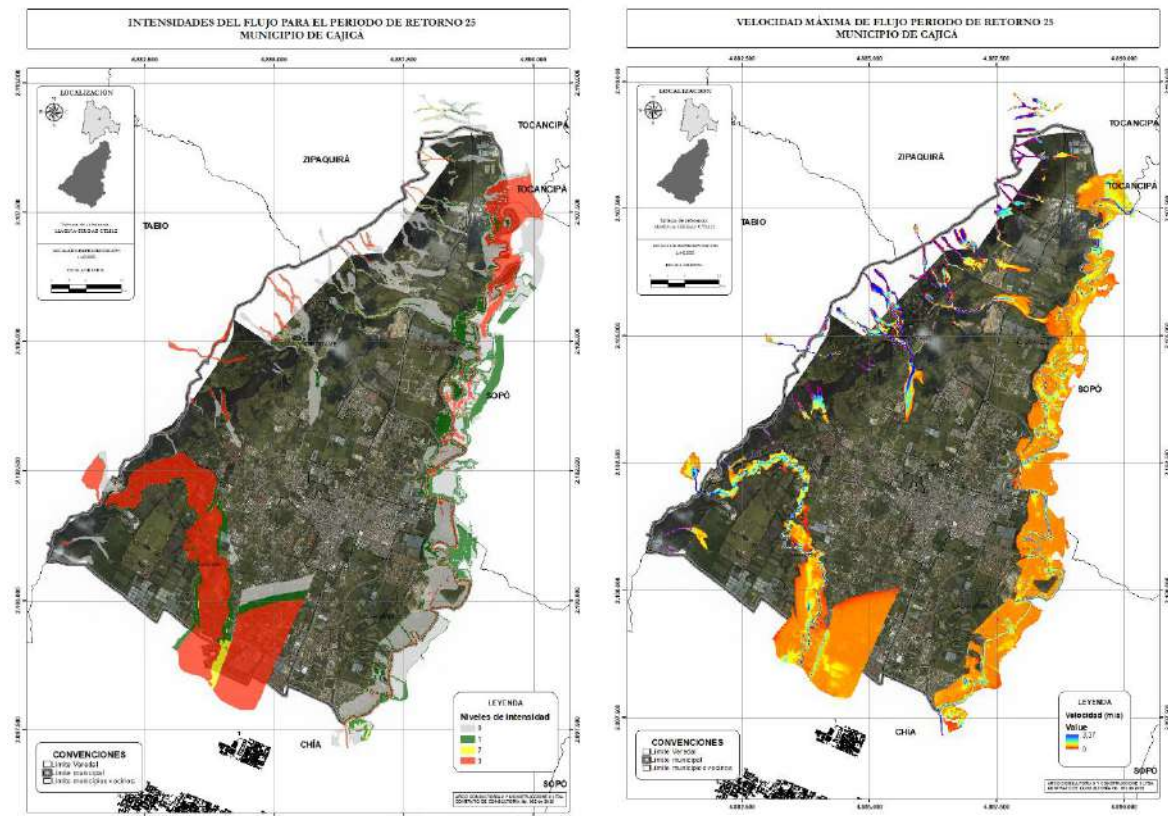
Para el presente caso de estudio se plantearon 3 escenarios, para cada corriente hídrica considerada como torrencial; cada escenario corresponde a los valores del hidrograma ingresado al modelo (software FLO – 2D), los cuales corresponden a los periodos de retorno de 2.33, 25 y 100 años. Para cada tiempo de retorno se estableció la zona de influencia de flujo (agua + sedimento). Los resultados de los parámetros hidráulicos de los escenarios planteados se presentan a continuación:

Ilustración 26 Caracterización hidráulica del fluido suelo rural, municipio de Cajicá para el periodo de retorno 2.33 años.



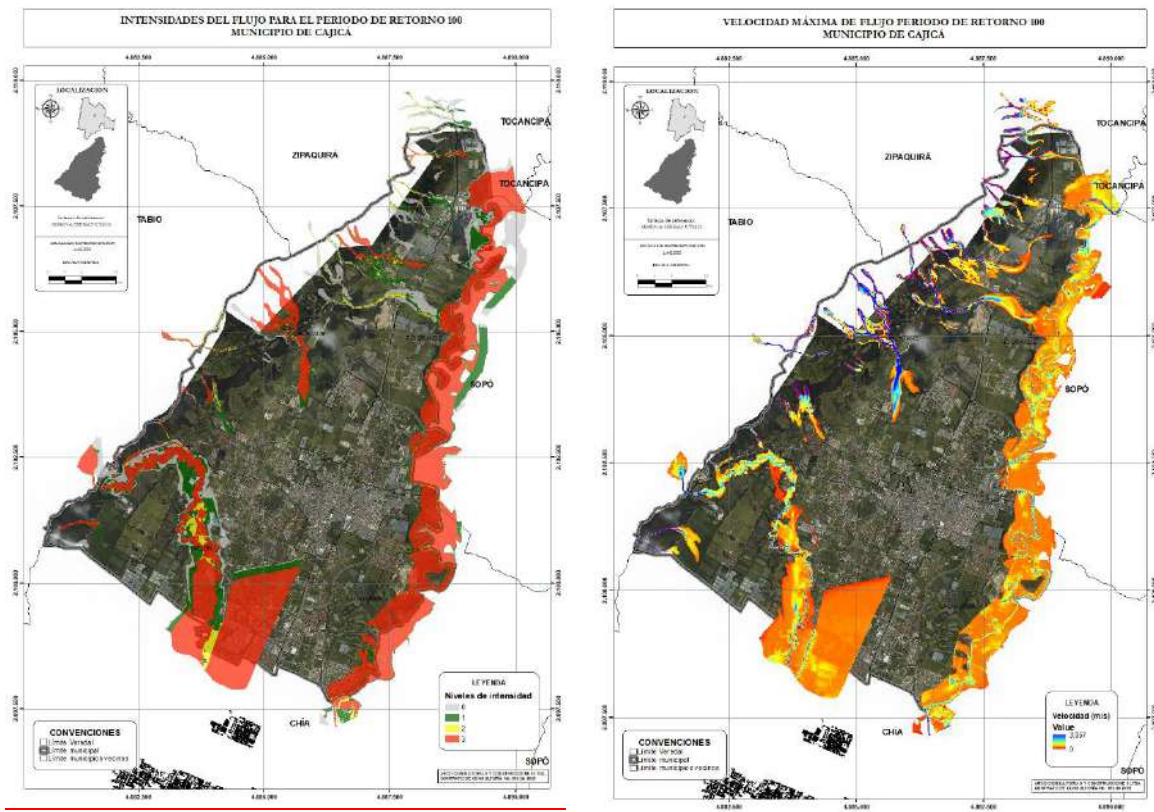
Fuente: Arco Consultorias y Construcciones Ltda. (2021)

Ilustración 27 Caracterización hidráulica del fluido suelo rural, municipio de Cajicá para el periodo de retorno 25 años.



Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

Ilustración 28 Caracterización hidráulica del fluido suelo rural, municipio de Cajicá para el periodo de retorno 100 años.



Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

3.2.1.1.2. Criterio para definir la amenaza por avenidas torrenciales

La amenaza por flujos se define como el producto entre la probabilidad de ocurrencia del fenómeno y su intensidad la cual es función de la profundidad y la velocidad del flujo, y la duración de estas variables en una determinada zona.

De acuerdo con la profundidad del flujo, se puede decir que un determinado evento produjo una afectación mínima, media o severa, para los residentes de una determinada zona poblada, así como también a las edificaciones, especialmente de la infraestructura estratégica, entre otras. El efecto de la velocidad es importante, dado que cuanto mayor sea ésta, la fuerza de impacto del flujo tiende a ser mayor.

Se define entonces la amenaza por avenidas torrenciales, como el producto entre la probabilidad

o frecuencia de ocurrencia del fenómeno y su intensidad, es decir, matemáticamente la amenaza es:

$$\text{Amenaza} = f(\text{Intensidad} \times \text{Probabilidad de ocurrencia})$$

Donde, la Intensidad es una función de la profundidad y la velocidad del flujo, mientras que la probabilidad de ocurrencia depende de los eventos de precipitación, caudal, etc.

3.7.4.4. Determinación de la intensidad de flujo

Como se mencionó anteriormente, la intensidad de un evento depende de la profundidad y la velocidad del flujo, o de su efecto combinado. Por lo que algunos autores como García, et. al., (2003) y Fiebiger (1997) plantean que el análisis de la intensidad a partir de la profundidad del flujo y/o el producto entre la velocidad y la profundidad del flujo. Sistemáticamente, estas variables presentan unos determinados rangos que definen si la intensidad es alta, media o baja, de acuerdo con el tipo de flujo.

Dado que, en una inundación de agua sin sedimentos, los efectos son menos catastróficos o destructivos en comparación con un flujo que presenten altas concentraciones de sedimentos (como, por ejemplo, flujos hiperconcentrados, flujos de lodos, etc.), García, et. al., 2003, al igual que en las normas suizas (Fiebiger, 1997), diferencian las intensidades de dichos eventos, como se presentan a continuación (en términos de la profundidad máxima del agua y el producto de la máxima velocidad por la máxima profundidad.) categorizando con mayor intensidad respecto a las inundaciones de aguas claras:

Tabla 38 Intensidad para una inundación de aguas con altas concentraciones de sedimento

Intensidad para inundación de agua con altas concentraciones de sedimentos	Profundidad máxima H (m)		Producto de la profundidad máxima h y la velocidad máxima V (m ² /s)
Alta (3)	H > 1.0	ó	V*H > 1.0
Media (2)	0.2 < H ≤ 1.0	y	0.2 < V*H ≤ 1.0
Baja (1)	0.2 < H ≤ 1.0	y	0.0 < V*H ≤ 0.2
Sin intensidad (0)	H ≤ 0.2	y	V*H ≤ 1

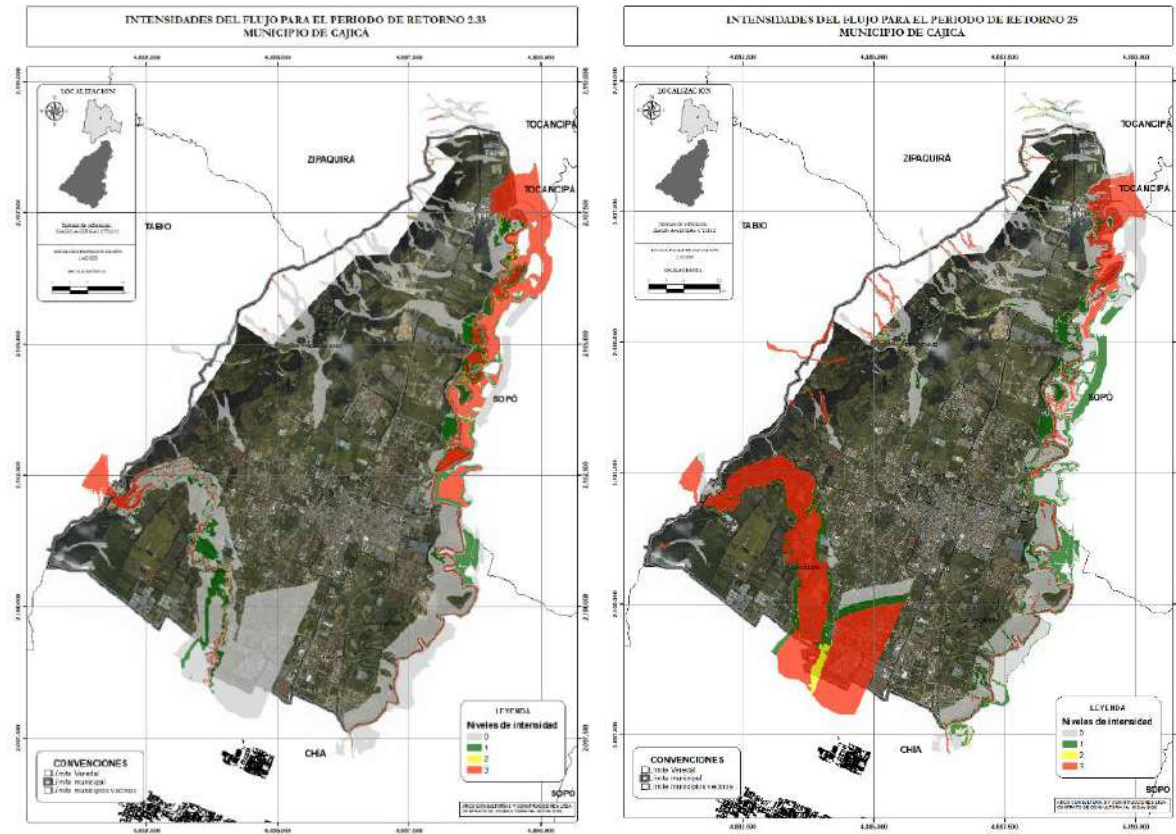
Fuente: García, et al (2003)

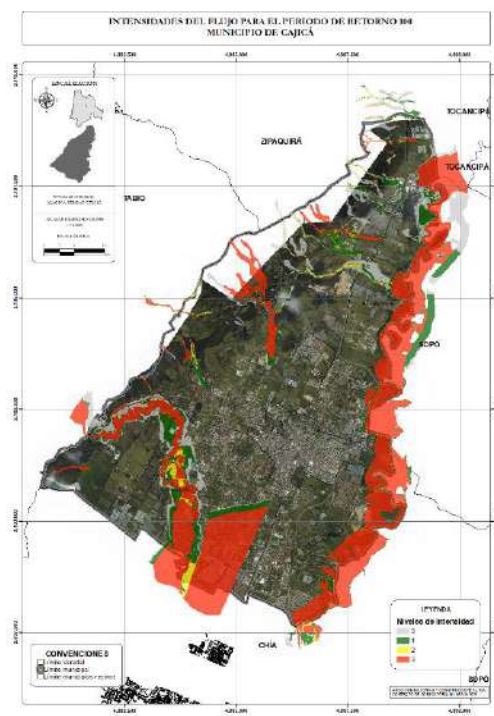
Las variables velocidad y profundidad del flujo se pueden tener en cuenta también empleando un parámetro adimensional como lo es el número de Froude, el cual describe el régimen de flujo en

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

un canal abierto, sin embargo, en la literatura no aparece reportado un caso claro en el cual se defina el grado de intensidad a partir de dicho parámetro.

Ilustración 29 Intensidad de flujos simulados para los diferentes periodos de retorno para el suelo rural, municipio de Cajicá.





Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

A mayor tiempo de retorno mayores serán las zonas de intensidad para la categoría de amenaza alta disminuyendo el área de participación de las categorías restantes, al ser eventos más extremos, pero con menor probabilidad de ocurrencia.

El período de retorno para 100 años es el más drástico y de muy baja ocurrencia, ya que, a mayores caudales y al ser constantes los volúmenes de sedimentos estos tienden a generar más flujos con menores volúmenes de concentración asociados a procesos de inundaciones de aguas y avenidas de lodos y no al fenómeno del presente estudio.

3.7.4.5. Determinación del nivel de amenaza

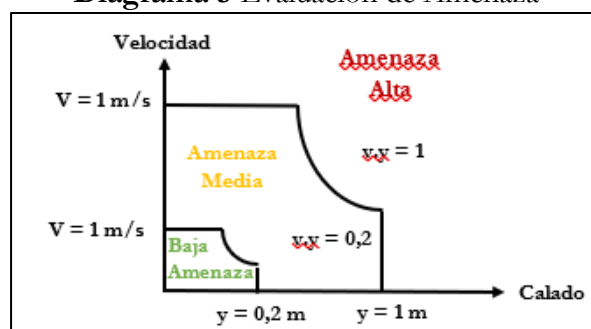
Dado que, en nuestro país, las series de datos tanto para lluvia como para caudal, en muchos casos no exceden los 50 años, realizar extrapolaciones para periodos de retorno de más de 100 años, puede ser bastante arriesgado, dadas las imprecisiones matemáticas que se podrían generar ya sea por sobrestimación del dato, o por la subestimación del mismo. Por tal razón, para este estudio, se decidió zonificar la amenaza, empleando periodos de retorno hasta 100 años como máximo. Se le asigna entonces, a un periodo de retorno de 2.33 años una frecuencia alta, a un

periodo de retorno de 25 años, una frecuencia media, y a un periodo de retorno de 100 años, una frecuencia baja, para así definir la frecuencia necesaria para la zonificación de amenaza (ver Tabla 39).

Por consiguiente, el nivel de amenaza está en función tanto de la intensidad como de la probabilidad de ocurrencia del flujo. La intensidad del flujo está definida por la profundidad y el producto de profundidad por la velocidad del flujo. La probabilidad es inversamente proporcional a la magnitud del evento; por ello, los grandes eventos ocurren con menor frecuencia, pero poseen alta intensidad relativa a la profundidad y a la velocidad del flujo, mientras que los eventos pequeños son más frecuentes, pero menos dañinos. El nivel de la amenaza se define, entonces, como una función discreta que combina la intensidad (magnitud del evento) y el periodo de retorno (frecuencia), como se muestra en el

Diagrama 5 y se sintetiza en la Tabla 39.

Diagrama 5 Evaluación de Amenaza



Fuente: Extraída y modificada de la Agencia Catalana del Agua (ACA, 2010)

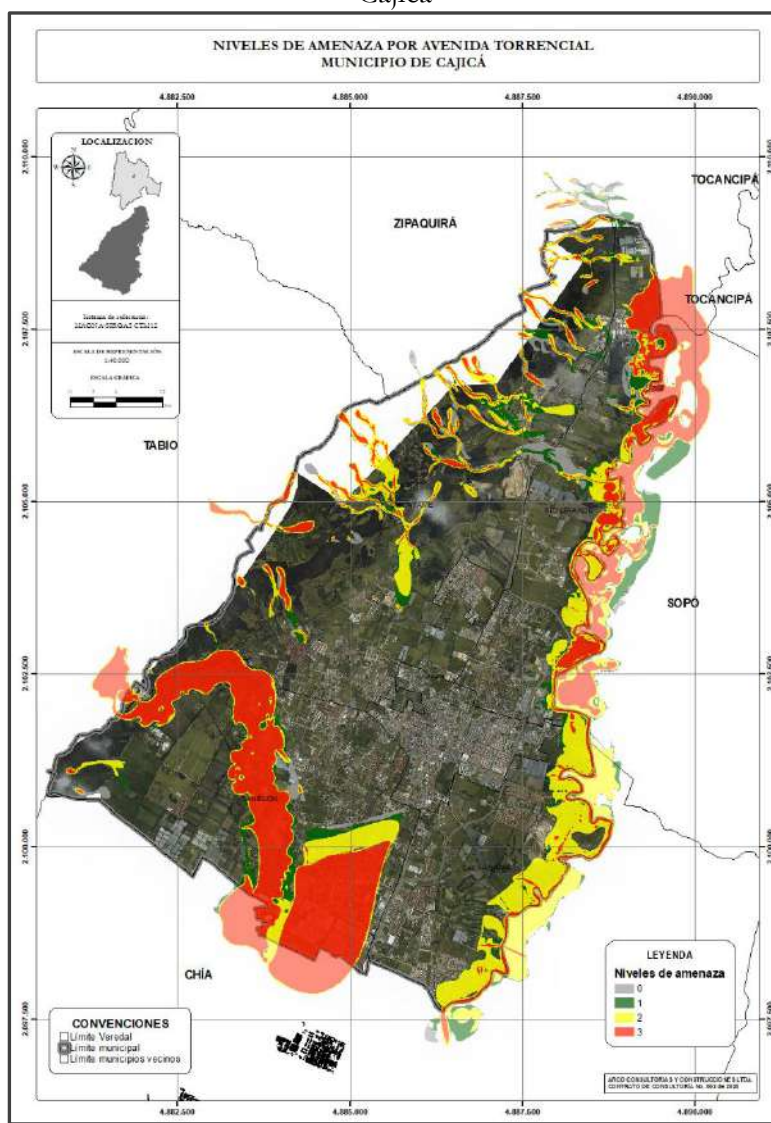
Tabla 39 Nivel de amenaza por avenidas torrenciales

INTENSIDAD	ALTA	3	3	2
	MEDIA	3	2	1
	BAJA	2	1	1
	SIN INTENSIDAD	0	0	0
FRECUENCIA		ALTA	MEDIA	BAJA
Periodo de Retorno		2.33	25	100
Probabilidad de Ocurrencia		43%	4%	1%

Fuente: Extraída y modificada de la Agencia Catalana del Agua (ACA, 2010)

El nivel de amenaza se presenta a lo largo de la zona de estudio para las diferentes corrientes que fueron categorizadas con comportamiento torrencial.

Ilustración 30 Niveles de amenaza por avenidas torrenciales para suelo rural, municipio de Cajicá



Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

3.7.4.6. Categorización de la Amenaza

Una vez realizados los ajustes y la verificación cartográfica, se obtuvo la Ilustración 31 cada zona de amenaza presenta las características establecidas en la Tabla 40.

Tabla 40 Categorización de la Amenaza por Avenidas Torrenciales.

AMENAZA	DESCRIPCIÓN
Alta	Inundación por flujo con altas concentración de sedimento, con alturas entre 1 a 6.034 m, velocidades del flujo entre 1 y 4.212 m/s, que se pueden presentar al menos una vez en un periodo de 2.33 años. Por las características del flujo (alta intensidad), éste puede arrastrar personas y objetos pesados, además de generar colapso en viviendas.
Media	Inundación por flujo con altas concentración de sedimento, con alturas cercana a 1 m, velocidades del flujo entre 0,2 y 0.87 m/s, que se pueden presentar al menos una vez en un periodo de 25 años. Por las características del flujo (intensidad media), puede causar daños a la población más vulnerable y generar mayor afectación a viviendas y arrastrar objetos menores.
Baja	Inundación por flujo con alta concentración de sedimentos, con alturas menores a 0.20 m, velocidades del flujo menores a 0.20 m/s, que se pueden presentar al menos una vez en un periodo de 100 años. Por las características del flujo (baja intensidad), las personas pueden movilizarse dentro de él, sin embargo, éste puede generar leves afectaciones a las viviendas y objetos.
Sin Amenaza	No presenta afectación alguna por inundación de flujos con altas concentraciones de sedimentos para periodos de retorno menores a los 100 años o corresponde a zonas sin comportamiento morfométrico de carácter torrencial.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

4. RESULTADOS

Para el suelo urbano, suelo de expansión urbana y centros poblados definidos y dada la normatividad del Decreto 1077 de 2015 se presenta a continuación, la categorización de la amenaza clasificada en 3 rangos (Alta, media y baja) (ver Tabla 41).

Tabla 41. Categorización de la Amenaza por Avenidas Torrenciales para el suelo rural de Cajicá

AMENAZA	DESCRIPCIÓN
Alta	Inundación por flujo con altas concentración de sedimento, con alturas entre 1 a 6,034 m, velocidades del flujo entre 1 y 4,212 m/s, que se pueden presentar al menos una vez en un periodo de 2.33 años. Por las características del flujo (alta intensidad), éste puede arrastrar personas y objetos pesados, además de generar colapso en viviendas. Esta categoría está vinculada con una expresión geomorfológica fluvial y fluviotorrencial; en donde se identifican unidades como cauce aluvial, planicie y delta lacustrino, abanicos fluviotorrenciales antiguos y abanicos fluviales.
Media	Inundación por flujo con altas concentración de sedimento, con alturas cercana a 1 m, velocidades del flujo entre 0,2 y 0.87m/s, que se pueden presentar al menos una vez en un periodo de 25 años. Por las características del flujo (intensidad media), puede causar daños a la población más vulnerable y generar mayor afectación a viviendas y arrastrar objetos menores. Asociada predominantemente a las geoformas: ladera suavemente inclinada, terraza aluvial, planicie y delta lacustrino, abanicos fluviotorrenciales y abanicos aluviales antiguos.
Baja	Inundación por flujo con alta concentración de sedimentos, con alturas menores a 0.20 m, velocidades del flujo menores a 0.70 m/s, que se pueden presentar al menos una vez en un periodo de 100 años. Por las características del flujo (baja intensidad), las personas pueden movilizarse dentro de él, sin embargo, éste puede generar leves afectaciones a las viviendas y objetos o no presenta afectación alguna por inundación de flujos con altas concentraciones de sedimentos para periodos de retorno menores a los 100 años o corresponde a zonas sin comportamiento morfométrico de carácter torrencial o a zonas topográficamente altas caracterizadas por geoformas con alto relieve relativo o cuya génesis no se encuentra asociada al fenómeno estudiado.

Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

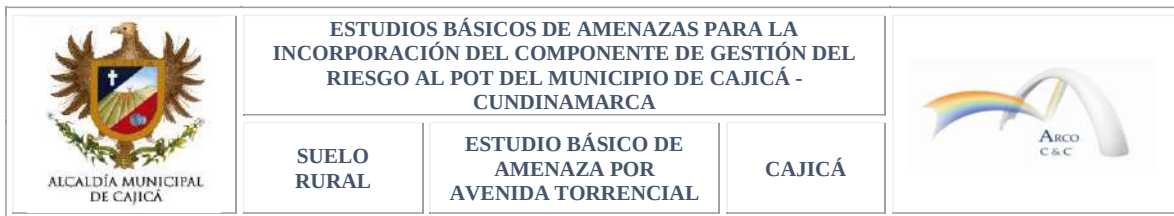
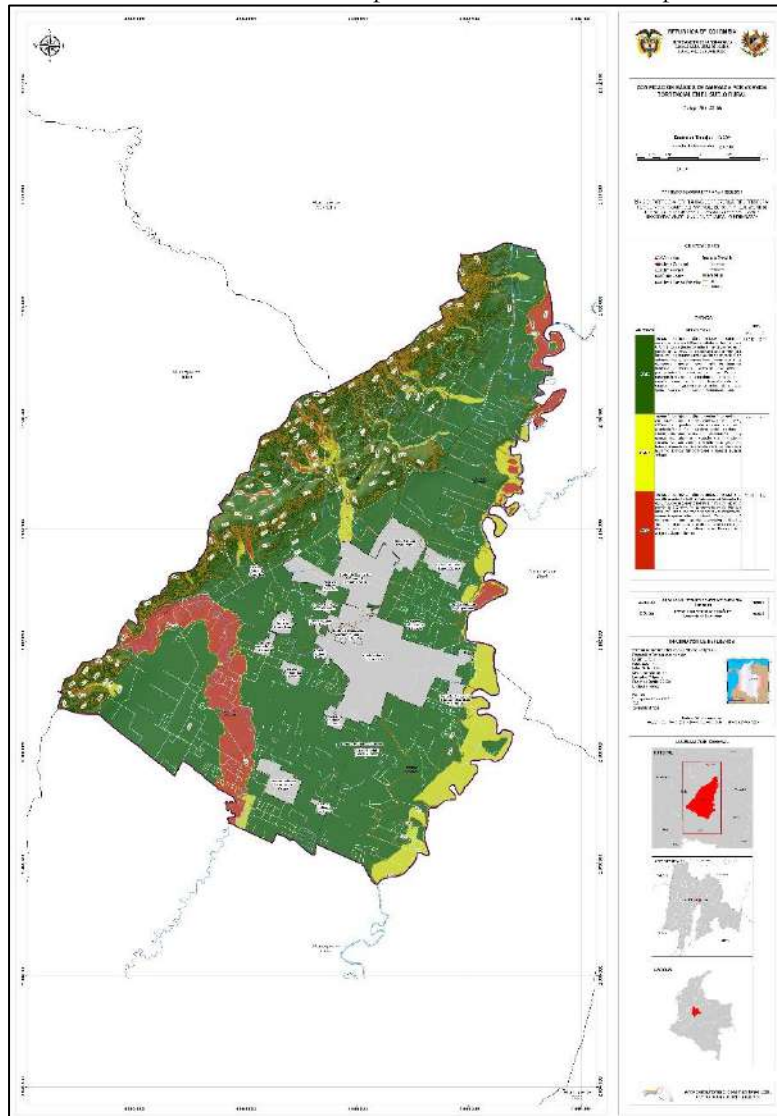
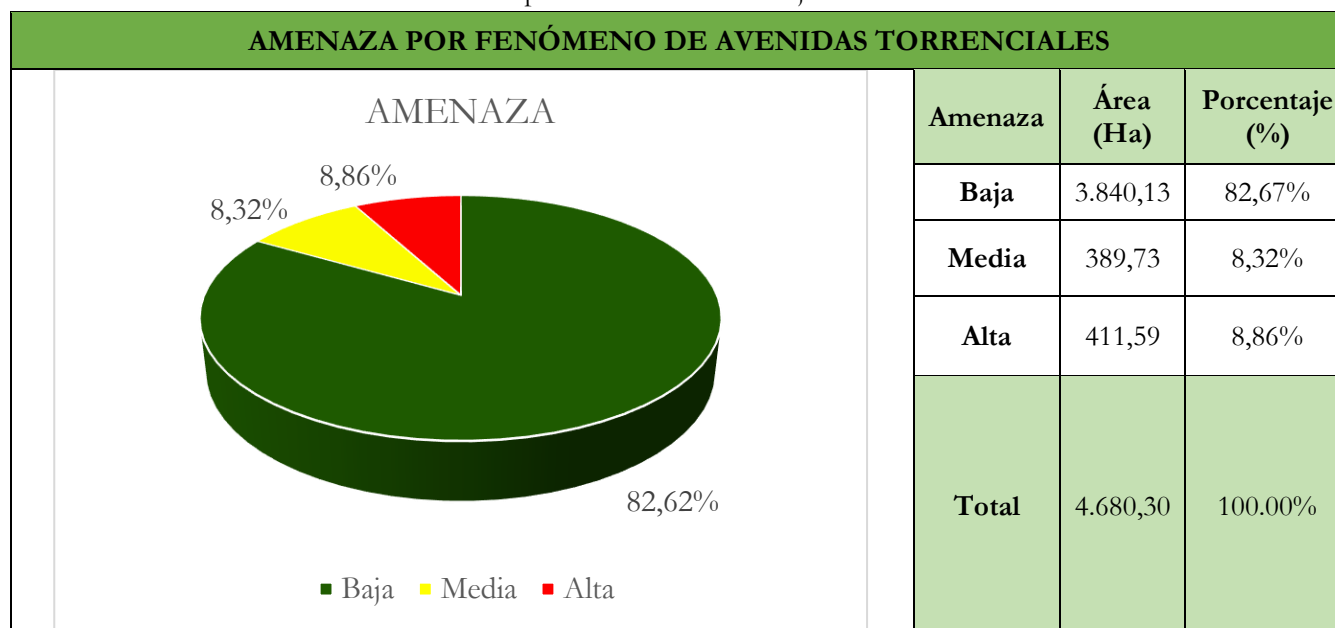


Ilustración 31 Zonificación básica de amenaza por avenidas torrenciales para la zona rural de Cajicá



Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2022)

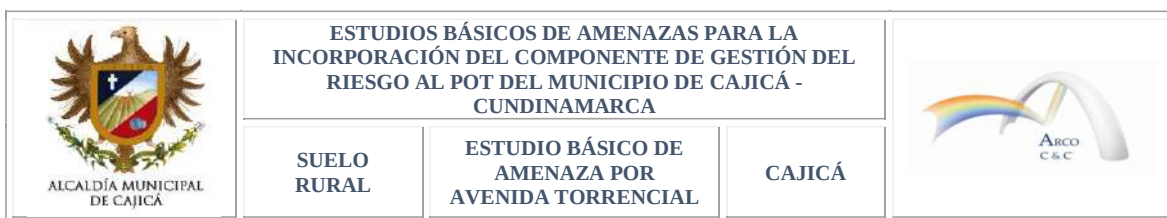
Gráfica 2. Estadísticas de áreas y porcentajes de ocupación de la amenaza por Avenidas Torrenciales para el suelo rural de Cajicá



Fuente: Arco Consultorías y Construcciones Ltda. (2021)

5. CONDICIONES DE TORRENCIALIDAD PARA EL SUELO URBANO, DE EXPANSIÓN Y CENTROS POBLADOS DEL MUNICIPIO DE CAJICA.

Dada las connotaciones sobre la cual se acentúa el suelo urbano, de expansión y centros poblados de Cajicá, y los resultados de las modelaciones numéricas implementados para modelar el fenómeno de estudio. Se concluye que en general Cajicá puede presentar avenidas torrenciales sobre el cerro occidental, pero que dada las magnitudes de los eventos tanto registrados como simulados, no se evidencia que haya exposición de elementos expuestos sobre las zonas urbanas. La dinámica fluvial del sector es proveniente de las actividades del Río Bogotá y Río Frio, los cuales se halla para Cajicá en su fase sinuosa, final, que indica que prevalece las actividades de erosión y transporte fluvial y no fluviotorrencial, como si lo presenta los drenajes que nacen de los cerros occidentales. Los otros cuerpos hídricos identificados para el suelo urbano comprenden vallados y canales que son alimentados por el Río Frio y por las aguas lluvias, con lo cual solo se contempla como amenaza latente el fenómeno de inundación que actualmente vive y no eventos derivados de fenómenos fluviotorrenciales.



6. VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMATICO

La ocupación y transformación de un territorio se ve condicionado económica, social y ambientalmente por las características climáticas e hidrológicas, donde las actividades productivas y el asentamiento humano se ve fuertemente influenciado por el régimen de precipitaciones dominante, la temperatura promedio, humedad relativa, entre otras. Por esta razón, todos aquellos fenómenos atmosféricos que producen fluctuaciones o tendencias en las variables meteorológicas son de suma importancia para la planeación territorial a corto, mediano y largo plazo.

El conjunto de procesos atmosféricos que producen anomalías en las condiciones promedio de las variables meteorológicas de una región, hacen parte de la variabilidad climática del territorio. Mientras que la tendencia a largo plazo de los registros de temperatura, precipitación, entre otras variables, son resultado del cambio climático global.

6.2. Variabilidad climática

Los regímenes climáticos presentan ciclos o fluctuaciones a través del tiempo y en diferentes escalas, donde las variables meteorológicas como la temperatura, los volúmenes de precipitación y la presión atmosférica presentan anomalías positivas o negativas respecto a un valor promedio en escalas interestacionales, interanuales e interdecadales (IDEAM - UNAL, 2018). Por esta razón, es relevante su análisis y entendimiento, con fines de gestión de riesgo, para el entendimiento de las repercusiones de estos procesos en el desencadenamiento de procesos degradativos en el municipio de Cajicá.

6.3. Variabilidad climática mensual

La variabilidad climática en escala mensual se ve reflejada en el territorio colombiano en las temporadas de altas y bajas precipitaciones a lo largo del año, donde el principal mecanismo generador de esta dinámica es el doble paso de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) sobre la región.

La ZCIT o zona de calmas (por presentar velocidades del viento inferiores a 0.5m/s), es una franja cálida de alta evaporación, nubosidad y precipitación formada por la convergencia de los Vientos Alisios del Noreste y del Sureste (León, Zea, & Eslava, 2000). La Zona de Confluencia Intertropical se mueve, en el primer semestre del año, de hemisferio sur a Norte con un retraso de 4-5 semanas respecto a la migración solar; caso contrario, en el segundo semestre del año la ZCIT migra del hemisferio norte al Sur con rezago de 6-7 semanas respecto a la migración solar.

La representación esquemática de la posición de esta franja cálida se muestra en la Figura 31.

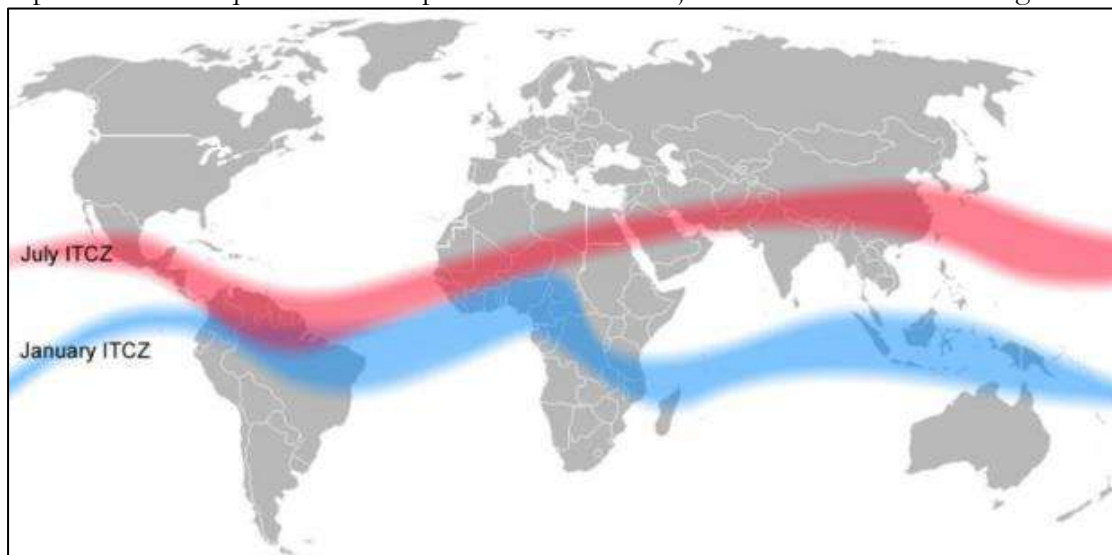


Figura 31. Ubicación de la ZCIT en enero y julio

Fuente: SIOH, 2010

Dado el movimiento de este fenómeno atmosférico sobre la región ecuatorial, el territorio comprendido por el municipio de Cajicá y gran parte de la cadena montañosa de Colombia presenta un régimen de lluvia bimodal, con mayores volúmenes de precipitación promedio en los meses de abril y noviembre, y periodos secos en los meses de enero y julio. Durante las épocas lluviosas del año, aumenta la probabilidad de generarse encharcamientos y sobresaturación en los suelos, lo que puede conllevar a detonar procesos degradativos. No obstante, en los periodos de bajas precipitaciones también pueden desencadenarse lluvias extremas que generen diversos problemas en el territorio.

6.3.1. Variabilidad climática interanual

La variabilidad climática interanual corresponde a todas las fluctuaciones de variables climáticas en periodos iguales o mayores a un año. Entre los fenómenos de mayores repercusiones en Colombia con esta frecuencia se encuentran, entre otros, la Oscilación Madden-Julian (OMJ), la Oscilación Cuasi-bienal (OCB) y la fase fría y cálida del fenómeno de El Niño – Oscilación del Sur (ENOS). El conjunto de estos fenómenos tiene una influencia directa en el clima del territorio nacional, propiciando condiciones atmosféricas particulares que hacen imperativo su análisis con fines de gestión del riesgo.

6.3.2. Fenómenos ENOS

Los fenómenos ENOS o ENSO (por sus siglas en inglés) representan el tipo de variabilidad climática más distintivo del acople entre la atmósfera y el océano, generados por el desplazamiento de masas de agua cálidas o frías en el Pacífico Ecuatorial, produciendo anomalías de temperatura y precipitación en las costas suramericanas, asiáticas y de Oceanía en conjunto (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2020).

Para determinar los periodos La Niña y El Niño en la región ecuatorial, los indicadores más utilizados en la evaluación de El Niño Oscilación del Sur son los índices Oceanic Niño Index (ONI) y el Multivariate ENSO Index (MEI) (NOAA, 2020). El índice ONI (Figura 32) se calcula a partir del análisis de desviaciones del valor de la temperatura superficial del mar en el Pacífico Central respecto a su promedio histórico.

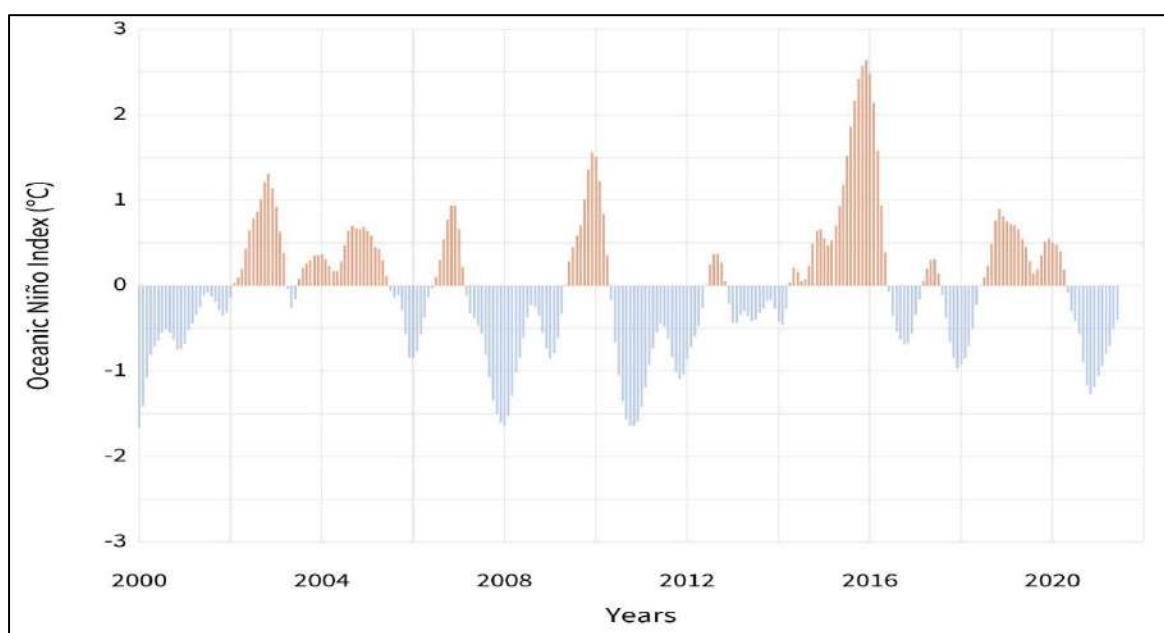


Figura 32. Distribución temporal de los eventos ENSO, índice ONI

Fuente: NOAA, 2020

Las anomalías positivas en la temperatura superficial del mar, de más de $0,5^{\circ}\text{C}$ en un periodo igual o mayor a 6 meses, indican un evento ENSO tipo El Niño, como fue el caso de los años 2002, 2004, 2009, 2015, 2019. Caso contrario, valores negativos en el índice ONI, menores a $-0,5^{\circ}\text{C}$ en un lapso temporal igual o mayor de 6 meses, sugiere la presencia del fenómeno de La Niña, como

en los años 1988, 1999, 2008, 2011 y 2017.

El principal efecto de este tipo de eventos se aprecia en la alteración del patrón de circulación de aire en la Celda de Walker (Figura 33), la cual se alimenta de los sistemas de alta y de baja presión en la región ecuatorial y, en consecuencia, se encarga de movilizar las masas de aire húmedo o seco en las diferentes regiones del mismo.

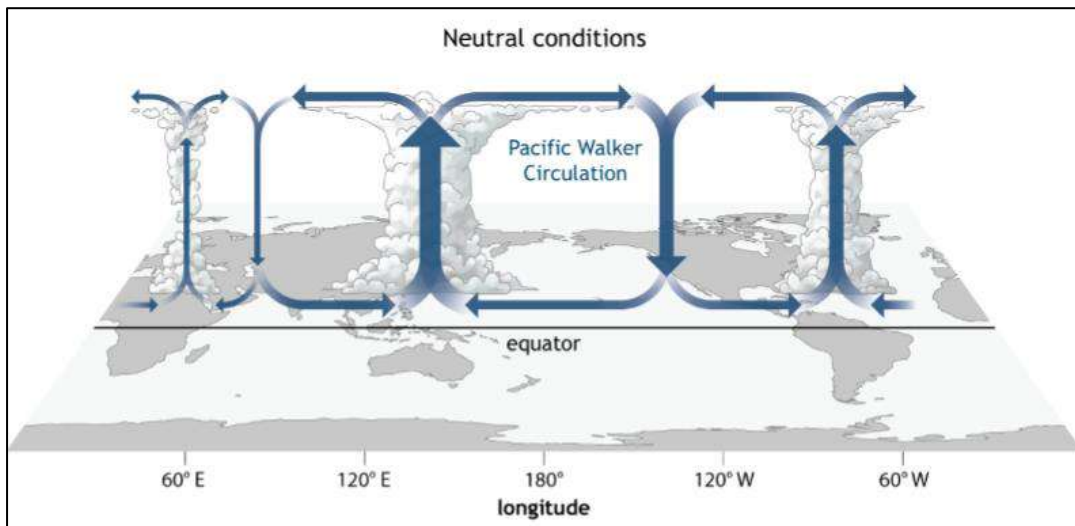


Figura 33. Celda de circulación de Walker en condiciones neutrales

Fuente: NOAA, 2020

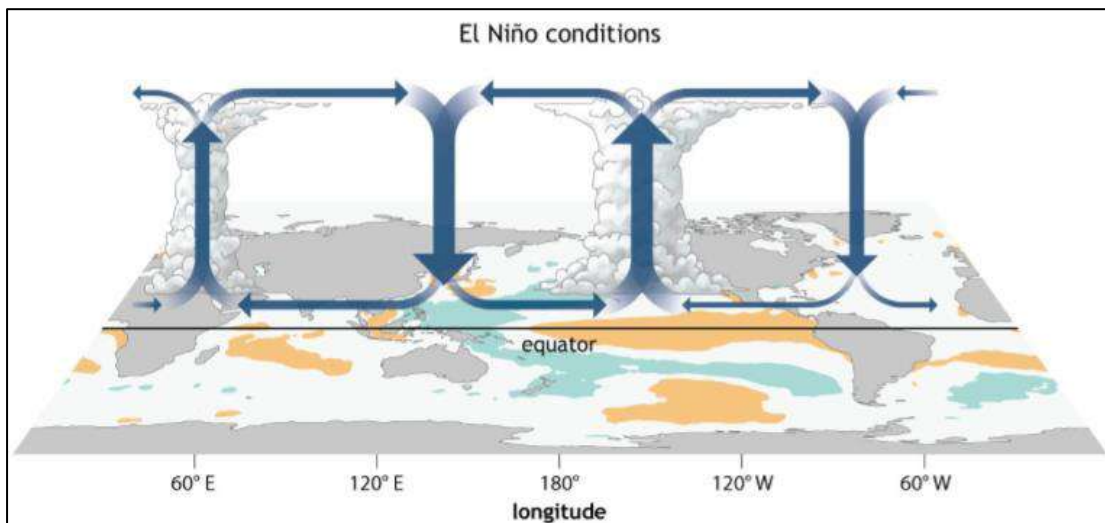


Figura 34. Celda de Circulación de Walker, fenómeno de El Niño

Fuente: NOAA, 2020

Cuando se produce un evento ENSO tipo El Niño, existe un desplazamiento de la circulación de Walker hacia el oriente (Figura 34), modificando todos los patrones de precipitación en el ecuador. Este fenómeno se produce en respuesta a una anomalía positiva de presión sobre el pacífico oriental, acompañado de un descenso en la temperatura en la región oriental y central del Océano Pacífico. En consecuencia, se presenta un debilitamiento de los Vientos Alisios del Noreste y del Sureste, generando un desplazamiento de las aguas cálidas y los vientos húmedos del Pacífico Oriental hacia la región del Pacífico Central.

En respuesta a esta anomalía de los patrones de circulación de aire, gran parte del territorio colombiano sufre un descenso significativo en los volúmenes de precipitación depositados en todas las regiones del país, produciendo eventos de sequía, desabastecimiento de agua, desertificación de los suelos, entre otros.

Respecto al municipio de Cajicá y la sabana de Bogotá, ante la ocurrencia del fenómeno ENOS en su fase cálida existen leves descensos en los niveles de precipitación en las épocas de lluvias (IDEAM, y otros, 2014). Caso contrario, las épocas de sequía de los meses de julio-agosto y diciembre-enero cuentan con déficits severos de precipitaciones respecto a sus promedios (Figura 35).

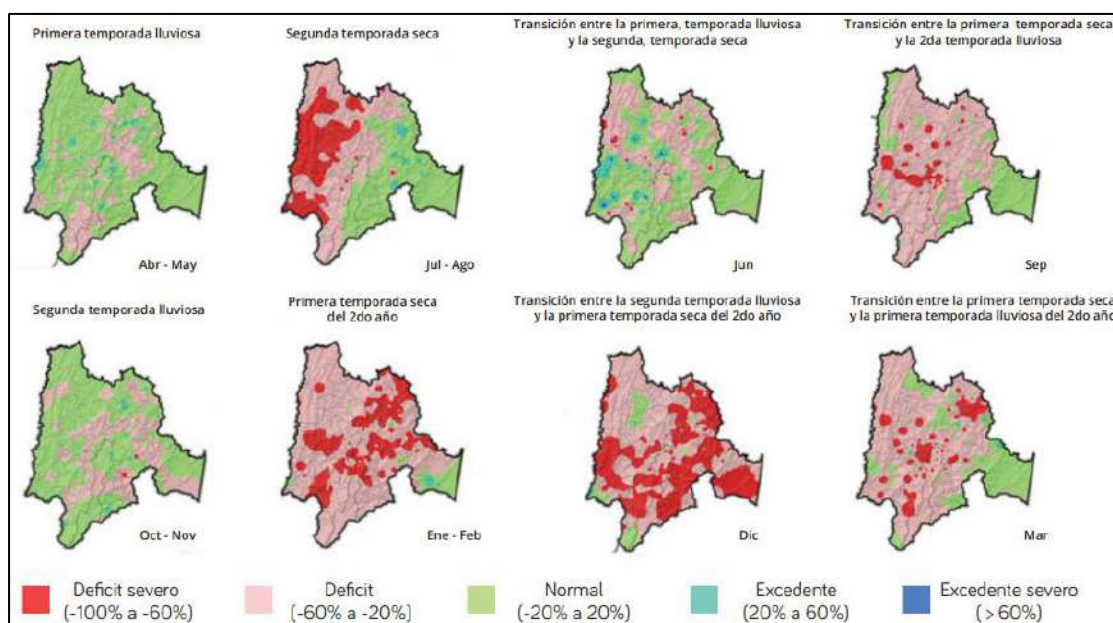


Figura 35. Alteraciones estacionales (izquierda) e interestacionales (derecha) más probables de la precipitación en la Región Bogotá Cundinamarca, durante la ocurrencia de un fenómeno típico de El Niño

Fuente: IDEAM Y OTROS, 2014

En estos lapsos temporales disminuye consecuentemente la ocurrencia de lluvias de carácter torrencial respecto a las condiciones normales, lo cual dificulta (más no imposibilita) la materialización de algunos eventos de origen hidrometeorológico como las avenidas torrenciales.

Por otra parte, el fenómeno de La Niña se presenta por un aumento significativo en la temperatura superficial del mar en el Pacífico Occidental, acompañado del descenso de la misma en el Pacífico Oriental. Esto genera una intensificación de la circulación de Walker (Figura 36), fortaleciendo la rama de ascenso de vientos húmedos en el Pacífico Oriental, sobre Suramérica.

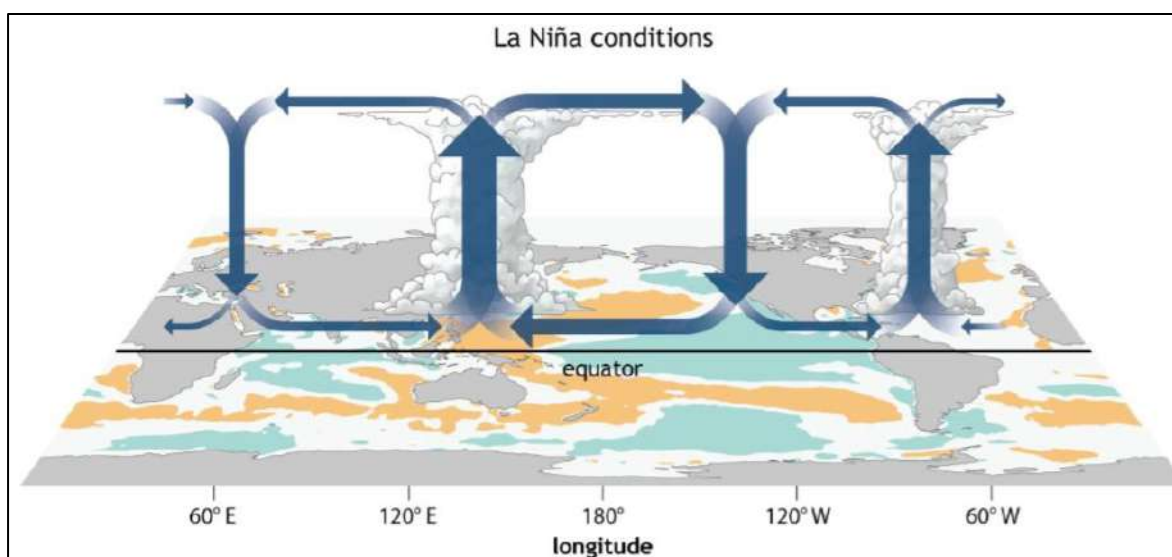


Figura 36. Celda de circulación de Walker, fenómeno de La Niña

Fuente: NOAA, 2020

Cómo consecuencia del fenómeno de La Niña existe en general un aumento significativo de las precipitaciones en Colombia, repercutiendo en la depositación de grandes volúmenes de lluvias en el territorio. Este fenómeno aumenta la posibilidad de que se genere una sobresaturación de los suelos en las diferentes regiones de Colombia, ya sea por un evento de lluvia de mucha intensidad, o por la acumulación paulatina de humedad en el terreno, generando subsecuentemente inundaciones, avenidas torrenciales y demás eventos de origen hidrometeorológico.

En la región del valle del Río Bogotá se presentan excedentes de precipitación entre el 20 y el 60% respecto a sus promedios climatológicos ante la presencia del ENOS en su fase fría (Figura 37), con anomalías positivas incluso superiores al 60% en las épocas de bajas precipitaciones (diciembre-enero y julio-agosto), implicando el aumento de probabilidades de presentar eventos

de altas magnitudes e intensidades que potencialmente detonen procesos degradativos en el municipio de Cajicá.

Respecto a la ocurrencia de avenidas torrenciales, estas pueden ser detonadas por lluvias, sismos y por efectos antrópicos como la desestabilización de laderas y la movilización de sedimentos en un cauce. La distribución temporal de la ocurrencia de avenidas torrenciales señala la estrecha relación de dichos fenómenos con las variaciones en las condiciones hidrológicas producidas por los eventos ENSO en su fase La Niña (Aristizábal, Arango Carmona, & García López, 2020). La Figura 38 muestra la cantidad de eventos y muertos en Colombia por efecto de avenidas torrenciales en los últimos 100 años, donde se evidencia la periodicidad de la ocurrencia de este tipo de eventos en el territorio colombiano.

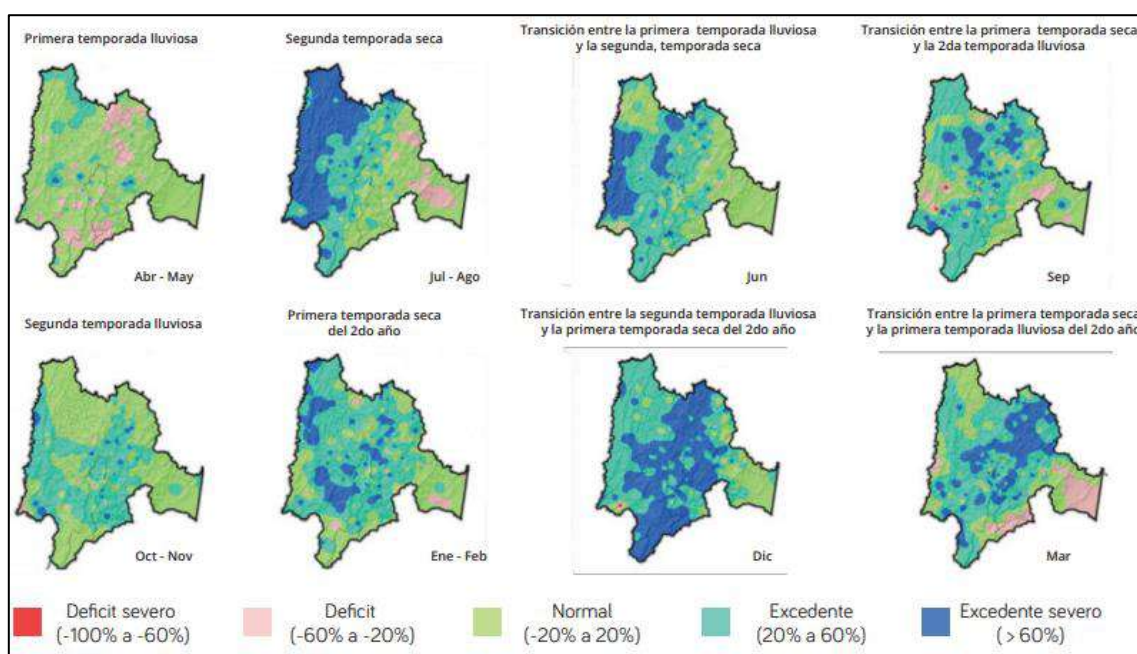


Figura 37. Alteraciones estacionales (izquierda) e interestacionales (derecha) más probables de la precipitación, en la Región Bogotá Cundinamarca, durante la ocurrencia de un fenómeno típico de La Niña

Fuente: IDEAM Y OTROS, 2014

Los años con mayores registros de eventos tipo avenida torrencial, como los años 1988, 1995, 1999, 2008, 2011-2013 y 2017, con congruentes con los años donde la temperatura superficial del Pacífico Central ha disminuido más de 0,5°C por más de 6 meses, desencadenando el fenómeno de variabilidad climático tipo La Niña.

En adición a esto, al establecer un modelo que compara el índice MEI con la exposición a

procesos degradativos del suelo (Emberson, R. et all, 2021), se ha establecido que existe una estrecha relación entre el aumento de la exposición a fatalidades cuando se cuenta con valores inferiores a -1 (fase fría del ENSO) para el MEI, como se observa en la Figura 39.

Los valores negativos del MEI sugieren la ocurrencia del fenómeno ENSO en su fase La Niña, donde los procesos degradativos se ven exacerbados en el territorio nacional, siendo entonces un proceso atmosférico cuyo entendimiento es de vital importancia para la gestión del riesgo.

Bajo este escenario, el evento ENSO en su fase La Niña es un factor condicionante en el aumento de la probabilidad de ocurrencia de eventos amenazantes tipo avenida torrencial detonados por lluvias en el municipio de Cajicá.

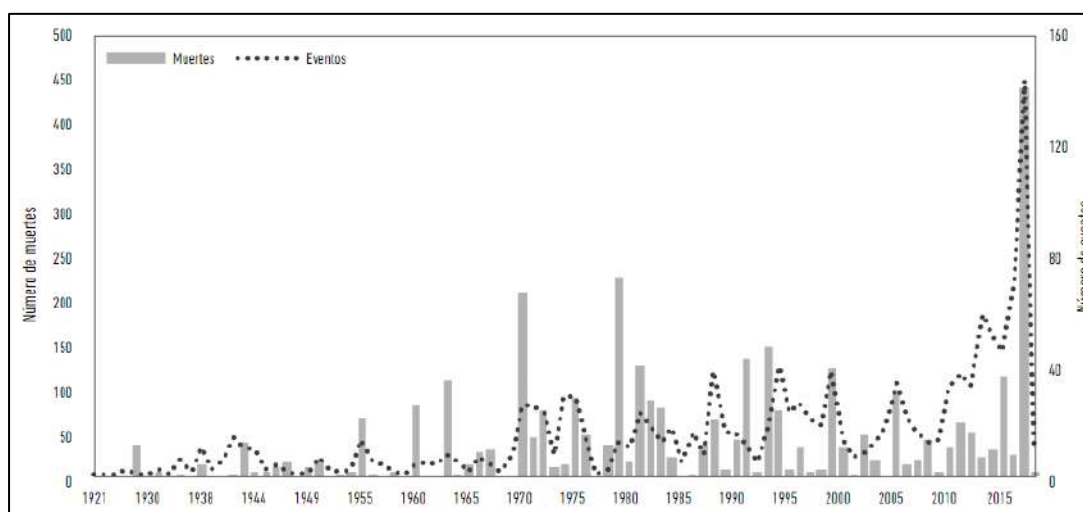


Figura 38. Número de eventos y víctimas fatales asociadas a los eventos de avenidas torrenciales en Colombia para el periodo 1920-2018

Fuente: Aristizábal, Arango Carmona, & García López, 2020

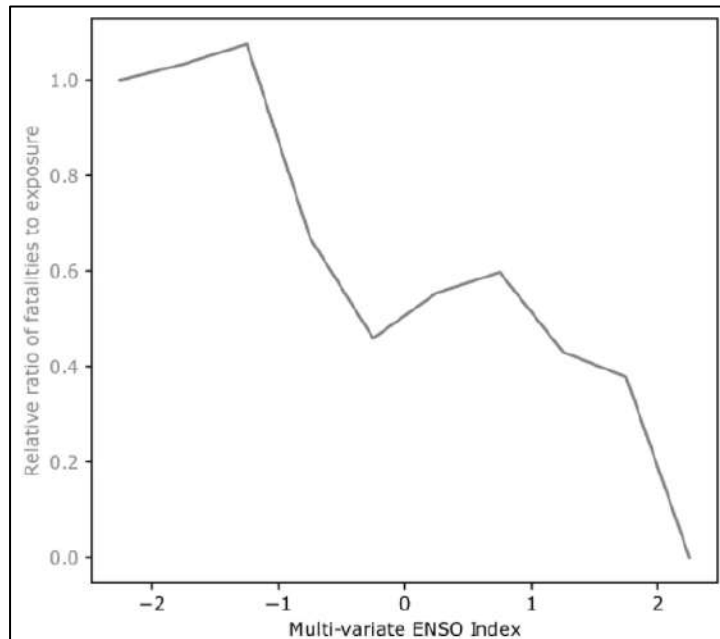


Figura 39. Relación relativa exposición a fatalidades dadas las anomalías del índice ONI

Fuente: Emberson et al, 2021

6.3.3. Oscilación Madden-Julian

Otro fenómeno de variabilidad climática relevante para la gestión de riesgo asociada a la variabilidad climática es la Oscilación Madden-Julian, definida como una perturbación tropical que se desplaza desde el Océano Índico al Pacífico en un ciclo de 30 a 60 días (NOAA, 2021).

En general esta perturbación se genera sobre el Océano Índico y se propaga hacia el este sobre las aguas cálidas del Pacífico Occidental y central, y finalmente sobre las aguas frías del Pacífico Oriental (Figura 40). Este patrón, aunque con periodicidad definida, cuenta con resultados e implicaciones variadas sobre la temperatura y la precipitación del ecuador terrestre.

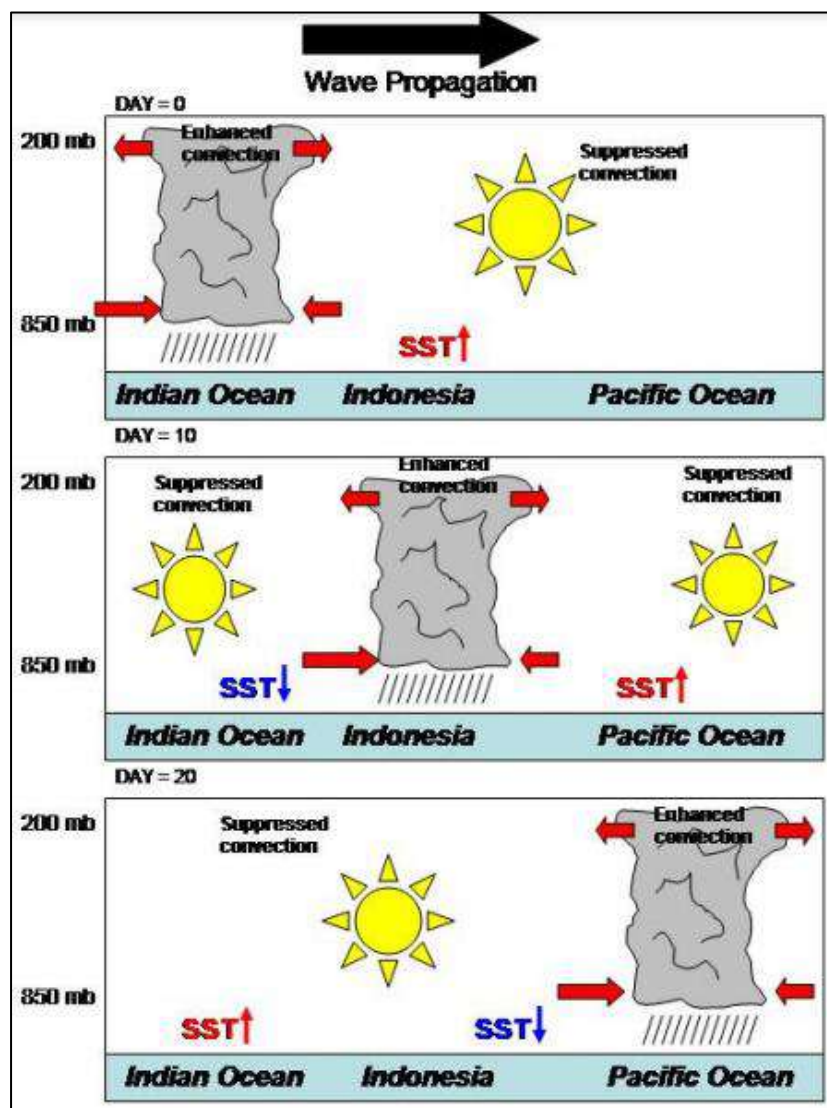


Figura 40. Sección vertical del comportamiento de la Oscilación Madden-Julian
Fuente: NOAA, 2021

Además de su perfil vertical, es importante entender su movimiento en el plano horizontal para evaluar la dinámica atmosférica sobre el territorio colombiano cuando la Oscilación Madden-Julian se localiza en el Pacífico Oriental (Figura 41).

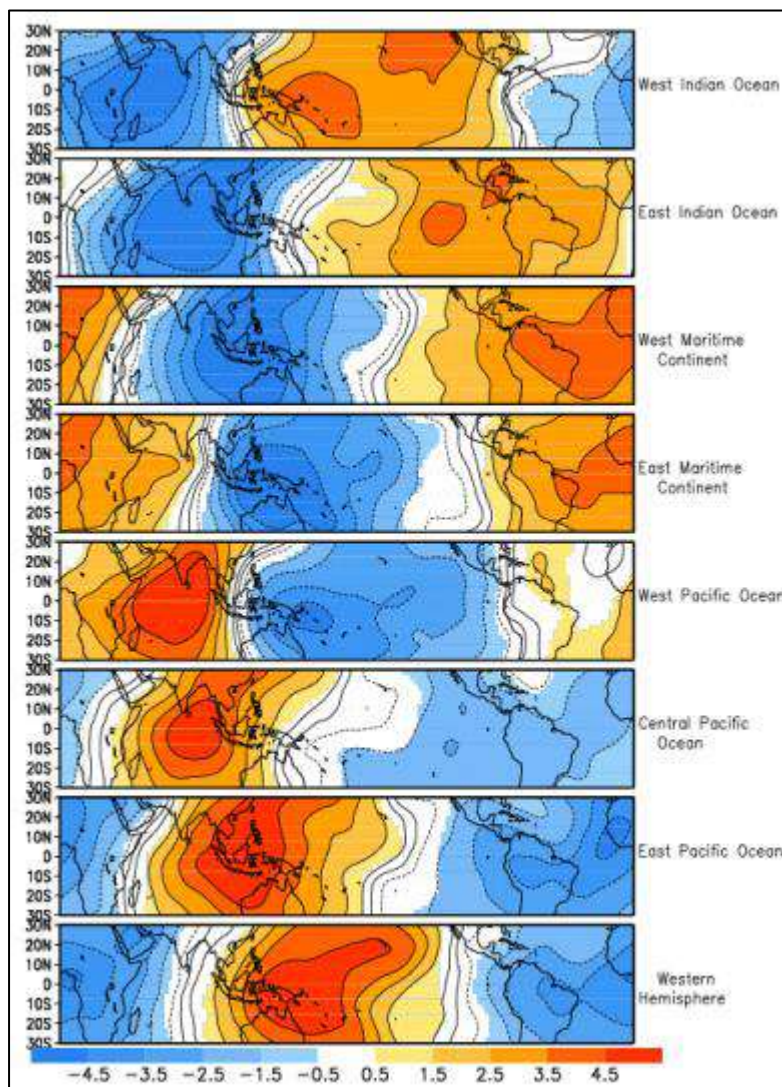


Figura 41. Velocidad Potencial a 200hPa promedio de Noviembre a Marzo

Fuente: NOAA, 2021

Cuando existe una anomalía negativa en la velocidad potencial sobre Suramérica (colores azules de la Figura 41), se genera una fase de no divergencia que propicia la aparición de lluvias durante un mes aproximadamente en el territorio colombiano. En adición a esto, este proceso ha sido relacionado con los fenómenos ENOS en cuanto a fortalecer y retroalimentar los eventos La Niña y El Niño, haciendo relevante su comprensión y análisis para determinar su relación con la generación de procesos degradativos en el territorio comprendido por el municipio de Cajicá.

La OMJ se ha estudiado en Colombia mediante la correlación de los índices Madden Julian (IMJ) y el índice de precipitación estandarizada (SPI), donde se determinaron anomalías de precipitación dadas las fases extremas de la OMJ (Torres & Pabón, 2012), donde se encuentran señales de correlación entre ambas variables en periodos de 30 días.

En adición a esto, se han establecido anomalías en el comportamiento de la temperatura ambiente, precipitación, humedad relativa y otras variables climáticas en un lapso de 30-60 días sobre el caribe colombiano. Dinámica atribuida a la OMJ y teniendo implicaciones incluso en la surgencia y salinidad del océano.

6.3.4. Oscilación Cuasi-bienal

Dentro del territorio colombiano, además de la respuesta del régimen de lluvias dados los fenómenos ENOS y OMJ, se encuentran variaciones de lluvias en un periodo de 24 a 30 meses aproximadamente, atribuidos a la presencia (o ausencia) de la Oscilación Cuasi-Bienal o QBO.

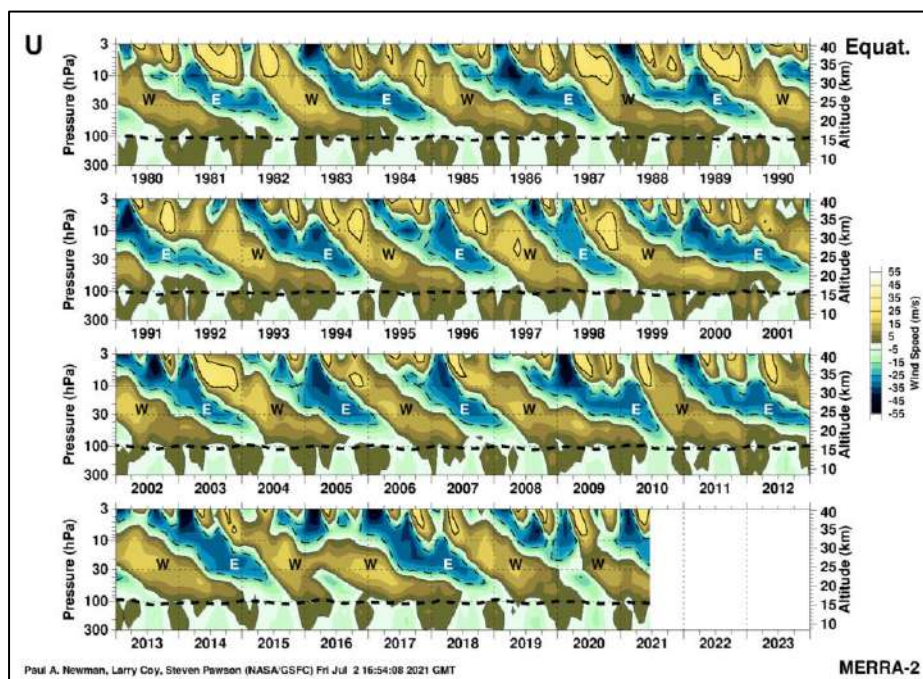
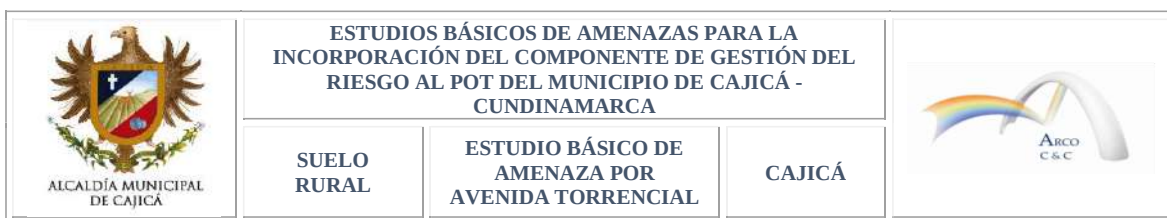


Figura 42. Perfil vertical de la atmósfera en el ecuador

Fuente: NASA, 2021



La Oscilación Cuasi-bienal (QBO) se define como un fenómeno atmosférico de fluctuación en la dirección de los vientos zonales (este – oeste) en la estratósfera, generando así mismos cambios en la temperatura, dadas las inversiones de los vientos, sobre el ecuador terrestre (Zuluaga, M. et all, 2018). Esta dinámica se origina sobre la altura geopotencial de los 10hPa y desciende a razón de 1km por mes hacia la tropósfera, generando perturbaciones en la parte baja de la atmósfera y en su interacción con la superficie.

A partir de datos mensuales promedios del proyecto MERRA-2 de la NASA, es posible observar el perfil vertical de los vientos zonales en el ecuador durante el periodo de 1980 y 2021 para evaluar la dinámica atmosférica sobre la estratósfera (arriba de las líneas punteadas negras que representan la tropopausa) y analizar el comportamiento de la Oscilación Cuasi-Bienal (Figura 42).

Existe la clara variación de los vientos zonales de la estratósfera entre el oeste y el este en un periodo de menos de 3 años en el ecuador terrestre. Sobre el territorio colombiano se presentan anomalías positivas de precipitación cuando se presentan altas velocidades de estos vientos, es especial cuando se dirigen al oeste (Aguirre, A. Et All, 2017). Caso contrario, cuando existen vientos zonales débiles en la estratósfera, se presentan en general déficits del recurso hídrico en el territorio.

Se han establecido correlaciones de la ocurrencia de este fenómeno atmosférico con el aumento en el régimen de precipitaciones en Bogotá en un 11 a 14% respecto a su promedio climatológico, contando con un retardo en las señales de aproximadamente 11 a 12 meses dadas las diferentes fases de la oscilación, registrado mediante la medición de caudales de los embalses que proporcionan el recurso hídrico a la ciudad (Aguirre, A. Et All, 2017). Además, se concluyó que, aunque esta Oscilación influye en un menor grado que los fenómenos ENOS en los eventos extremos de precipitación, es imperativa su caracterización a detalle para estudios hidrometeorológicos en la región.

La OCB ha sido estudiada a su vez mediante análisis de correlaciones simples entre la ocurrencia de este proceso atmosférico y las precipitaciones en 11 estaciones de Colombia, donde en principio no se han encontrado anomalías significativas en el régimen de lluvias dado el fenómeno en cuestión, sugiriendo que la detección de señales de la OCB requiere de estudios de correlación más detallados y complejos para determinar cómo influye en los patrones de lluvias estudiados (Zuluaga, M. et all, 2018).

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

6.3.5. Cambio climático

Cuando existen cambios o tendencias en las condiciones climáticas predominantes de una región en un largo plazo, de siglos o milenios, se le denomina cambio climático. Un ejemplo son los periodos de hielo y deshielo característicos de los últimos 2 millones de años (Periodo Cuaternario), relacionado a los ciclos astronómicos de oblicuidad, excentricidad y precesión que presenta la tierra; denominados ciclos de Milankovich (Uriarte, 2010).

Dentro de este marco, la excentricidad terrestre es definida cómo la variación de la órbita terrestre alrededor del sol, cambiando de una trayectoria elíptica a una semicircular y viceversa en un periodo de 80.000 a 90.000 años. Este proceso influye directamente en la cercanía del planeta al sol y, por tanto, en la cantidad de radiación solar que recibe el planeta, repercutiendo en ciclos de enfriamiento (glaciación) y calentamiento (desglaciación) de la Tierra.

Teniendo en cuenta que el último periodo glacial terminó hace 18.000 años aproximadamente, donde la excentricidad fue máxima, la órbita terrestre ha cambiado de forma elipsoidal a semicircular gradualmente en los últimos miles de años, tendencia que se mantendrá por varios siglos y miles de años, y que genera un calentamiento progresivo del planeta.

Este proceso genera un paulatino aumento de la temperatura, cuyas consecuencias a mediano plazo son el derretimiento de los casquetes glaciares, aumento del nivel del mar, desertificación de regiones, entre otras; sugiriendo un escenario de calentamiento global.

Por otra parte, el balance energético y radiativo de La Tierra (Figura 43), donde se evalúa la radiación solar entrante (onda corta) y terrestre saliente (onda larga) junto con las interacciones físicas con las nubes, cuenta con una fracción de 0.6 W/m² de densidad de flujo calor o irradiancia que se acumula en la superficie terrestre, lo que ha ocasionado un progresivo aumento de temperatura en La Tierra.

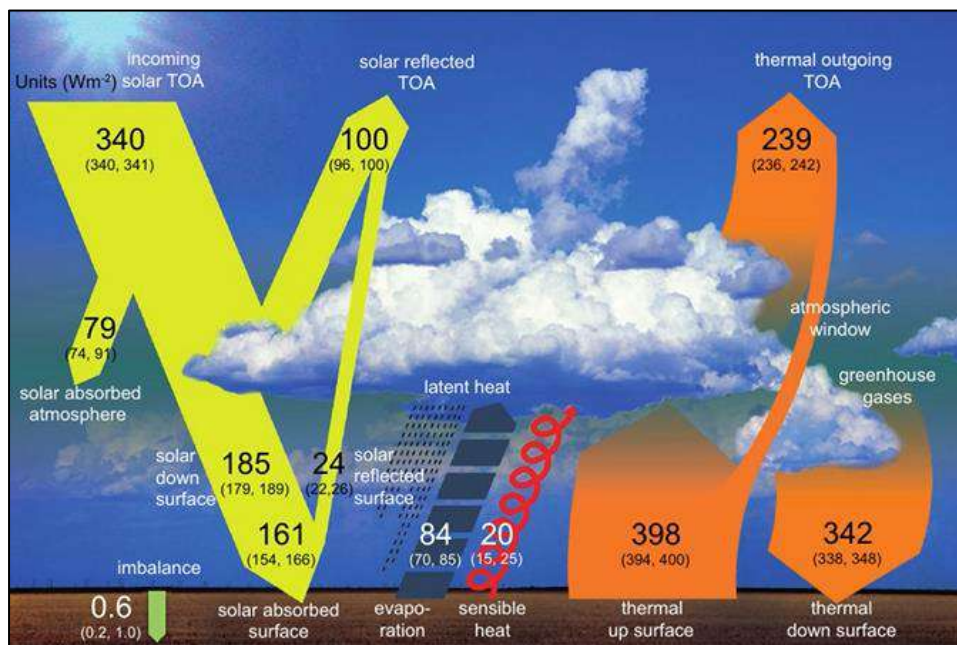


Figura 43. Balance energético global

Fuente: IPCC, 2013

Teniendo esto en cuenta, el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero dadas las actividades antropogénicas, genera un incremento en la radiación de onda larga (tonalidades naranjas de la Figura 43) que se refleja con las nubes y regresa a la superficie terrestre, intensificando el desbalance energético del planeta y favoreciendo el aumento el proceso de calentamiento global en una tasa cada vez mayor.

Por tanto, este proceso se ha agudizado con la retroalimentación positiva del calentamiento por efecto de las acciones antrópicas durante los últimos 3 siglos, donde existe una dramática liberación de gases de efecto invernadero, como Dióxido de Carbono y Metano a la atmósfera que intensifican el aumento de temperatura en todas las regiones del mundo. La Figura 44 muestra el registro de temperatura del aire, medido por distintas entidades, donde se evidencia un calentamiento desmesurado en los últimos 50 años, tendencia que continúa en ascenso en la actualidad (IDEAM - UNAL, 2018).

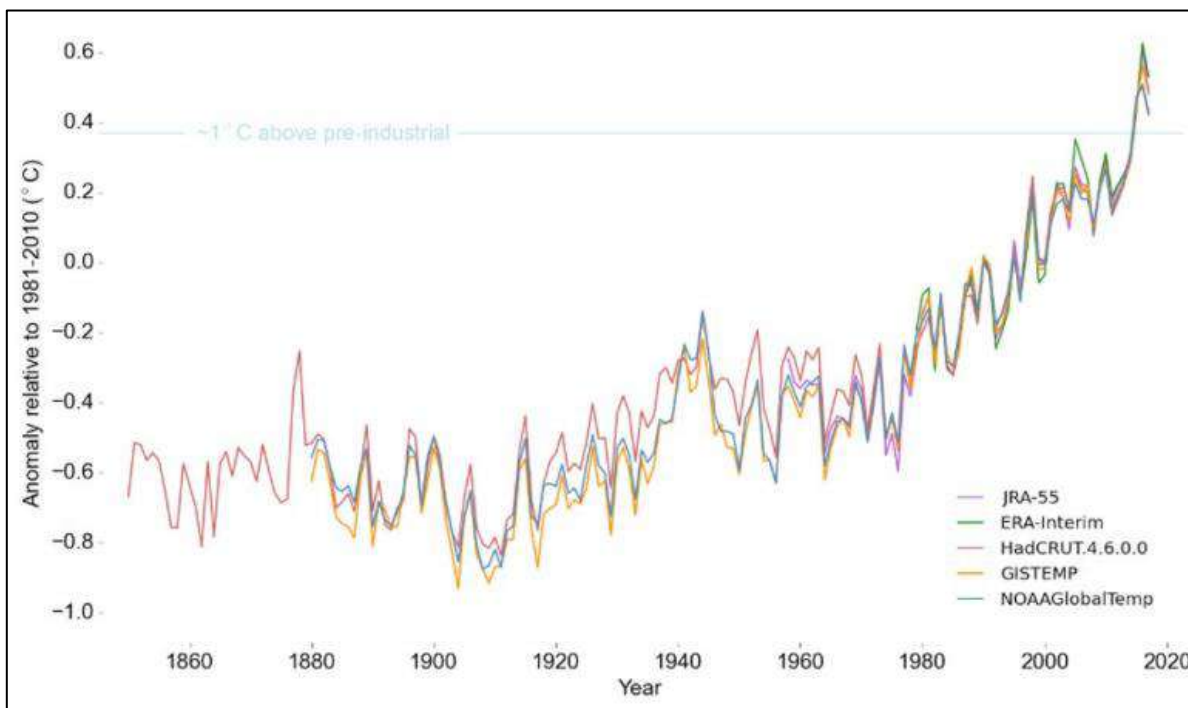


Figura 44. Anomalía de la temperatura global en el período 1886-2017 referenciada al período 1980-2010, según las diversas aproximaciones de procesamiento de las mediciones de la temperatura del aire

Fuente: IDEAM – UNAL, 2018

Teniendo en cuenta el panorama global y en diversos lapsos temporales respecto al cambio climático, y dentro del marco de la tercera comunicación nacional de Colombia a la convención del marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (2017), se ha pronosticado la variación de temperatura para los escenarios de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, cuyos resultados para el municipio de Cajicá se muestran en la Figura 45.

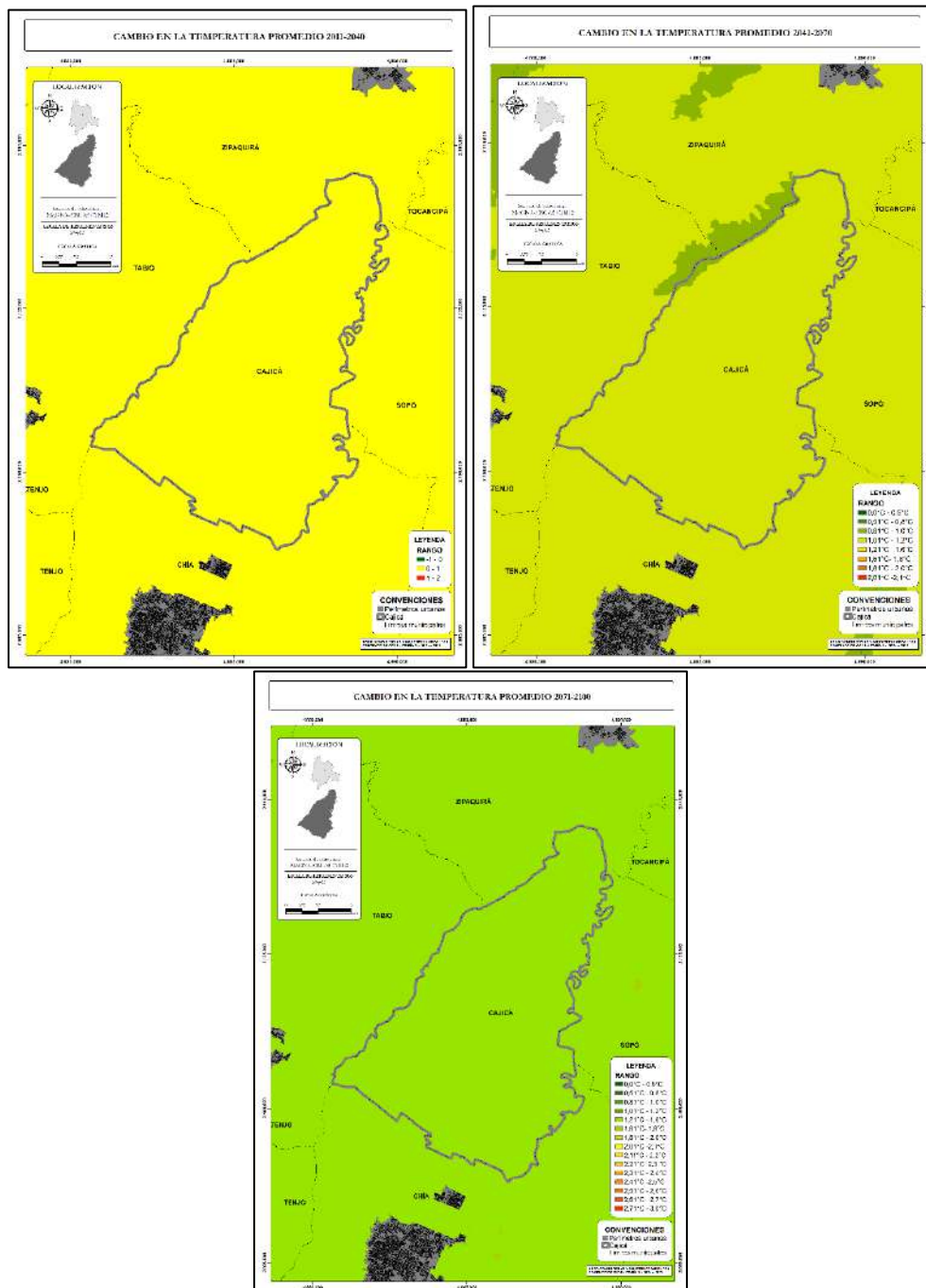
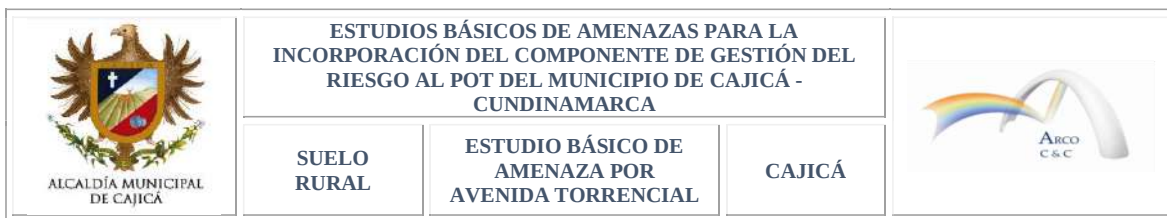


Figura 45. Mosaico de pronósticos de temperatura en el municipio de Cajicá para los lapsos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100.
Modificado de: SIAC e IDEAM, 2017



Los pronósticos regionales de la variación de temperatura esperada para el municipio de Cajicá, exhiben un aumento progresivo en los registros de temperatura en el territorio, esperándose un incremento promedio del orden de los 2°C a finales del siglo.

El incremento de temperatura en el municipio puede tener diferentes repercusiones en la dinámica hidroclimática del municipio. Es posible que el aumento de la temperatura repercuta en un cambio significativo en la oferta hídrica del municipio de Cajicá, debido a que estos incrementos de temperatura tienen influencia directa en el incremento de la evapotranspiración potencial de agua en la región y, por tanto, pueden ocasionar un descenso en el almacenamiento de agua útil en los cauces y acuíferos que abastecen de agua la zona.

Por otra parte, el aumento de la temperatura de la atmósfera genera una expansión del volumen de la misma y un descenso en la presión (derivado de la ecuación de los gases ideales). Este fenómeno implica que la atmósfera contaría con un mayor potencial de almacenamiento de gotículas de agua, favoreciendo la formación de nubes y el consecuente aumento en las precipitaciones de la región. A partir de la ecuación de Clausius Clapeyron se estima que cada grado que aumenta la atmósfera repercute en un 7% de vapor de agua que puede ser almacenado en la misma (Tsonis, 2007).

Dentro de los posibles escenarios planteados desde la Tercera Comunicación nacional de Colombia a la convención del marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, se ha establecido el incremento o descenso porcentual de las precipitaciones en escala 1:100.000, cuyo resultado se muestra en la Figura 46.

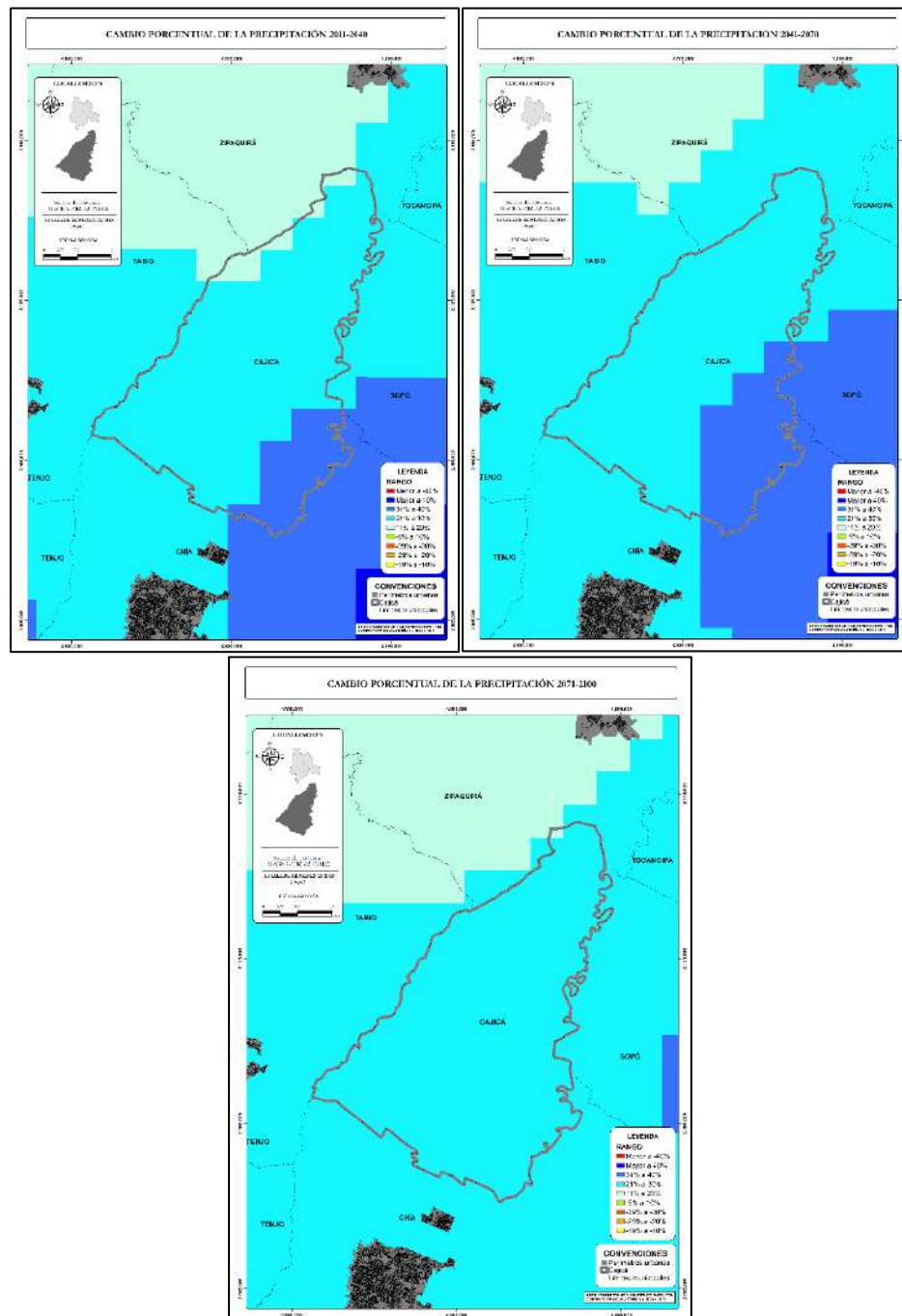


Figura 46. Mosaico de pronósticos de precipitación en el municipio de Cajicá para los lapsos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100.
Modificado de: SIAC e IDEAM, 2017

Para el territorio comprendido por el municipio de Cajicá se espera un aumento entre el 21 y el 30% del volumen de precipitaciones respecto a las condiciones actuales, sugiriendo la mayor probabilidad de ocurrencia de eventos de lluvias extremos que potencialmente detonen avenidas torrenciales en el municipio.

En los lapsos de 2011-2040 y 2041-2070 se pronostican incrementos mayores al 30% de las precipitaciones promedio observadas en la actualidad, principalmente en cercanías del Río Bogotá en la margen oriental del municipio, factor que favorece la ocurrencia de inundaciones en el municipio principalmente.

Realizando una evaluación de los efectos del cambio climático en la dinámica hidrológica del municipio, haciendo uso de los registros de precipitación diaria (1991-2020) de la estación “LA COSECHA - AUT [21205910]”, localizada en el extremo norte del municipio de Cajicá, y apelando a la herramienta “RCLIMDEX” desarrollada por el IDEAM en el año 2007, se establecieron tendencias de cambio climático, en general sugiriendo un incremento en los volúmenes de agua que se depositan sobre el territorio (Figura 47).

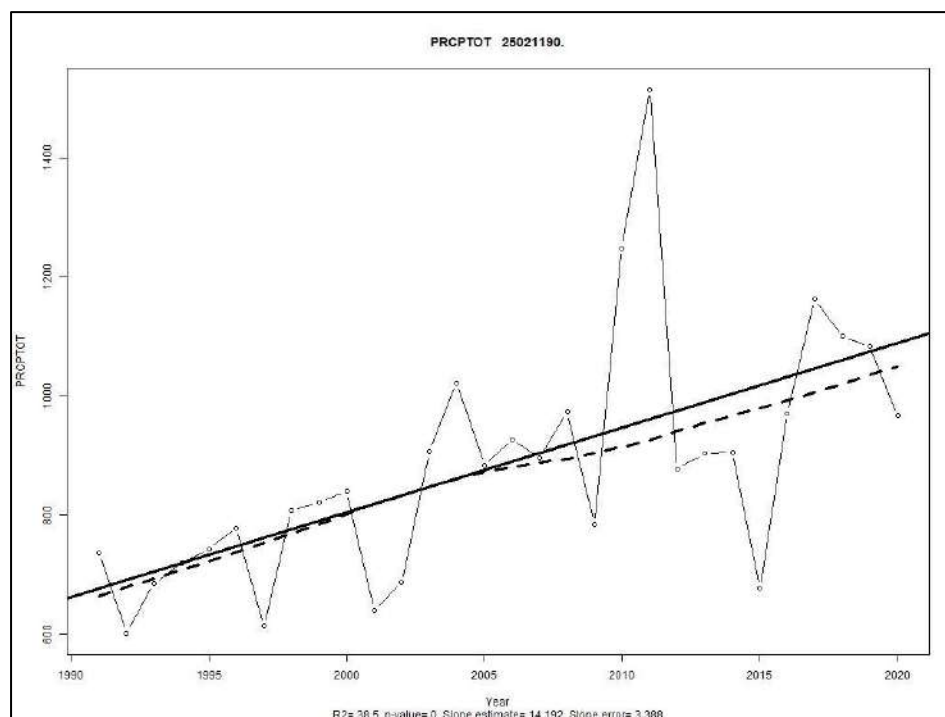


Figura 47. Tendencia de la precipitación total anual
Fuente: ARCO C&C, 2021

Los resultados exhiben el aumento de la precipitación anual desde 1991 a 2020 con una tendencia a continuar en ascenso y con un porcentaje de error de cerca del 0% (p-valor=0), siendo concordante con los escenarios propuestos por el IDEAM para el municipio de Cajicá.

Teniendo en cuenta el incremento anual de la precipitación, es imperativo estudiar a su vez la tendencia de la región a presentar precipitaciones diarias considerables (mayores a 20mm en 24 horas), cuyo resultado se observa en la Figura 48 para la estación evaluada.

Conforme los resultados observados, y con un porcentaje de error del 1%, existe un claro aumento en la cantidad de eventos de lluvia superiores a 20mm en el municipio de Cajicá, implicando un incremento en los eventos de precipitaciones intensas y/o prolongadas en el territorio que puedan potencialmente desencadenar procesos degradativos.

Por otra parte, para evaluar la acumulación paulatina de agua en el subsuelo que pueda sobrepasar el umbral de lluvia que puede almacenar el subsuelo, la Figura 49 muestra la tendencia de la región a presentar lluvias máximas durante 5 días consecutivos.

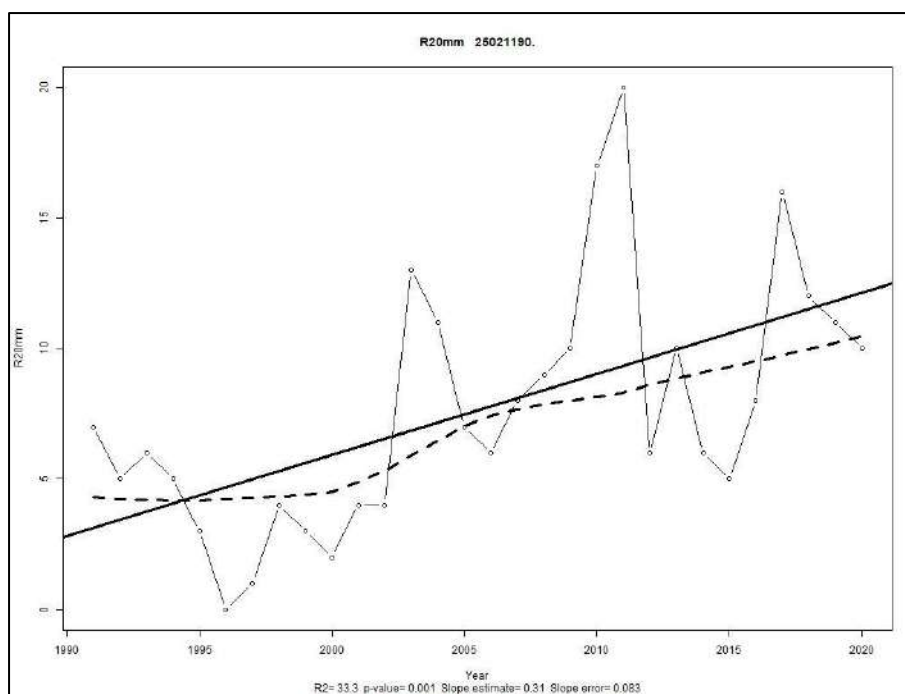


Figura 48. Número de días en un año con lluvia mayor a 20mm

Fuente: ARCO C&C, 2021

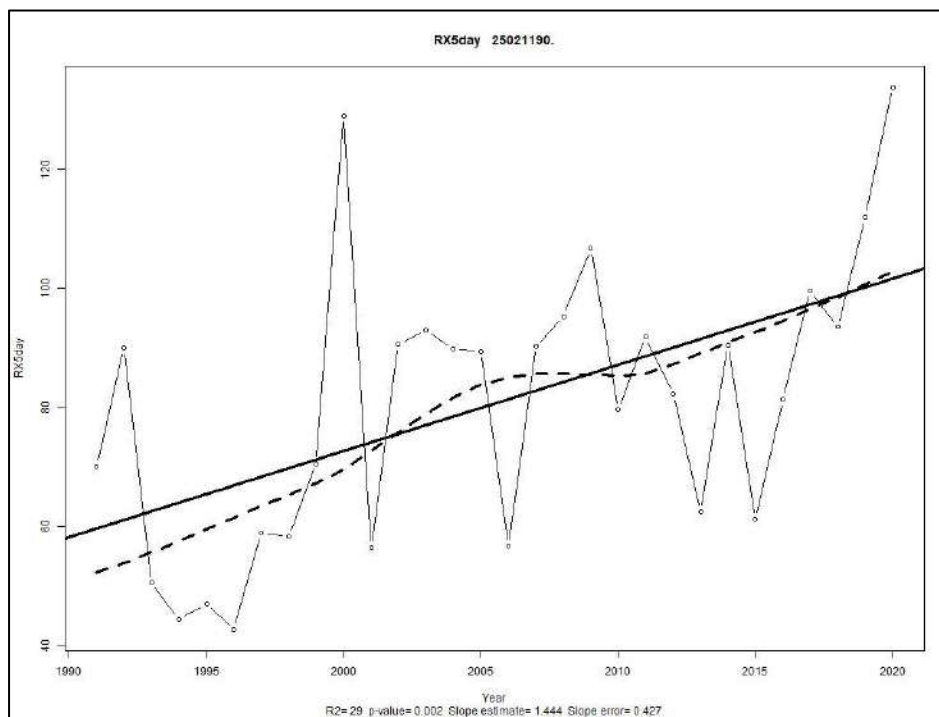


Figura 49. Máximo anual de precipitación en 5 días consecutivos

Fuente: ARCO C&C, 2021

El aumento de la probabilidad de ocurrencia de lluvias máximas durante 5 días consecutivos implica posibles escenarios de sobresaturación del suelo dados los eventos de precipitaciones continuos, proceso que favorece la materialización de amenazas de origen hidrometeorológico en el municipio.

Finalmente, y haciendo uso de la información hidrológica, aumento poblacional y exposición de la comunidad a inundaciones, remociones en masa y demás procesos degradativos (IDEAM, y otros, 2014), se estableció la vulnerabilidad integral del municipio de Cajicá ante el cambio climático y sus repercusiones (Figura 50).

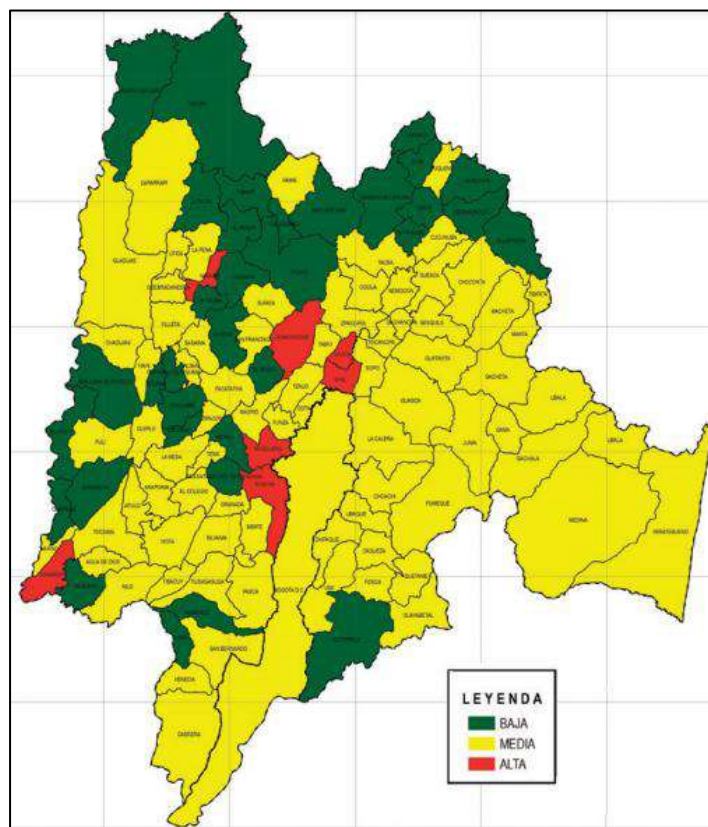


Figura 50. Vulnerabilidad integral para (a) los municipios de Cundinamarca.

Fuente: IDEAM y OTROS, 2014

El municipio de Cajicá cuenta con una alta vulnerabilidad ante los efectos de cambio climático para el futuro, donde el aumento de la temperatura, régimen de humedad y densidad poblacional aumentan la probabilidad de presentar eventos amenazantes que puedan afectar a la comunidad asentada.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

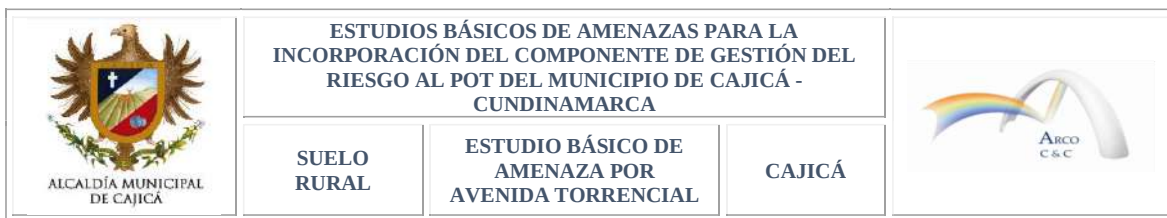
7. CONCLUSIONES

Para el área del suelo urbano, de expansión y los centros las condiciones geológicas y topográficas condicionan el bajo carácter torrencial de la zona, pero las condiciones geomorfológicas, morfométricas e hidrológicas evidencia un rasgo torrencial en la zona montañosa, pero los parámetros hidráulicos como profundidad, velocidad y energía no condicionan el evento dada su baja intensidad (magnitud reportada) que se generó en la zonificación propuesta en el presente estudio.

La expresión geomorfológica del área del suelo urbano está controlada principalmente por procesos fluviales al oriente y sectores denudativos y estructurales al occidente, que quedan como unidades remanentes, mostrando una variación altimétrica de 246 m (2721 a 2475 msnm) y con pendientes que varían entre toda la gama de los grados. Cajicá se puede dividir en dos zonas:

Primero, corresponde a una zona caracterizada por laderas conformadas por depósitos fluviales, fluviotorrenciales y coluviales con pendientes suaves a moderadamente inclinadas sobre los cuales confluyen varios drenajes que viene de la parte alta de las cuencas como la quebrada Teneria, entre otras, que contrasta con el resto del territorio, sector oriental(segunda zona); correspondiente a geoformas fluviales y lacustres bajo topográficas de mayor altura respecto al relieve circundante, lo anterior condiciona el terreno para que tenga afectación directa al fenómeno de estudio, dicho contraste topográfico más las condiciones hidrológicas que se encuentran altamente intervenidas antrópicamente favorece la ocurrencia del evento, sin embargo los bajos volúmenes de sedimento indican que predominan los procesos de inundaciones de aguas claras o de bajas concentraciones volumétricas asociado a flujos de lodo principalmente. Las características morfométricas e hidrológicas dadas por Wilford, Índice de torrencialidad e IVET evidencia un comportamiento torrencial, lo que implica que las cuencas aportantes a la zona urbana, suelo de expansión y centros poblados adyacentes se ven condicionado al aumento de crecidas repentinas, condiciones que se corroboran con los históricos registrados. La zonificación propuesta tiende más a evidenciar procesos de avenidas de lodo más que el de flujos de detritos que es lo característico de una avenida torrencial según O'Brien, pero la generación constante de dicho material afecta la población de forma directa ya obstruye las estructuras hidráulicas, las calles y altera la dinámica fluvial de los ríos canalizados con lo cual se fomenta socavación del fondo y con ello colapso de obras de paso.

Actualmente se cuenta con un único registro histórico en las cuencas identificadas para la zona de estudio, por lo que el presente estudio no solo indica zonas potenciales al tránsito y transporte de material torrencial basado en las simulaciones generadas bajo condiciones específicas



identificadas por lo evidenciado en campo y por lo adquirido mediante sensores remotos para la fecha de realización, si no que corrobora las futuras potenciales recurrencias en donde se ha reportado eventos.

Para la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales se empleó una zonificación derivada de una modelación numérica en la cual se caracterizó el comportamiento de un fluido bajo las condiciones topográficas y reológicas (viscosidad dinámica, esfuerzos cortantes y resistencia al flujo laminar) que permitieron simular condiciones hidráulicas extremas. La categorización de la amenaza se realizó a partir de la caracterización de la velocidad y profundidad del flujo (intensidad del evento) junto a la frecuencia de ocurrencia del fenómeno.

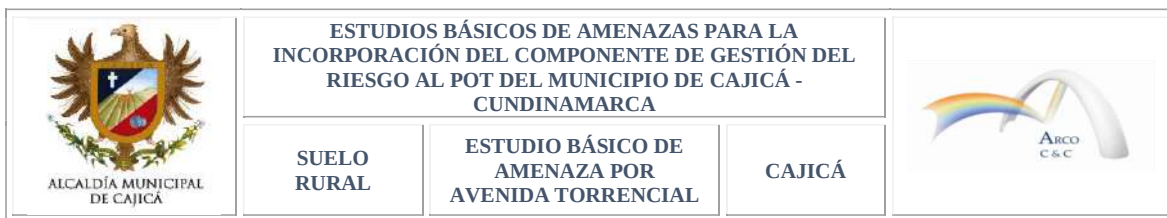
Los resultados de la zonificación corresponden a una aproximación simplificada para un momento determinado de un fenómeno natural altamente complejo y dinámico en el tiempo, ya que, al ser un prototipo estático de la realidad no tiene en cuenta las variaciones espacio - temporales que puedan experimentar las variables, entendiendo que, debido a la interacción del hombre con el medio y su capacidad para transformarlo, los resultados de esta zonificación deben ser actualizados conforme a la realidad del territorio.

Los fenómenos de variabilidad y cambio climático generan cambios en las condiciones climáticas normales que en general pueden favorecer la ocurrencia de avenidas torrenciales en el municipio, dadas las anomalías en las precipitaciones y temperatura promedio.

El fenómeno de variabilidad climática que genera cambios más significativos en las precipitaciones promedio es el ENOS en sus periodos El Niño y La Niña, donde su fase fría genera un incremento considerable de eventos y magnitudes de lluvias en el municipio. Así mismo, existe una correlación entre el fenómeno de La Niña y la ocurrencia de avenidas torrenciales en el territorio nacional, por lo cual se sugiere el análisis de las variaciones en los volúmenes de precipitación y los registros de temperatura en el municipio por la influencia de este fenómeno.

La Oscilación Madden Julian y Oscilación Cuasi-Bienal genera perturbaciones en el régimen de precipitación en el territorio, por tanto, es imperativo el análisis de la fluctuación de los mismos, para conocer y pronosticar los lapsos temporales donde probablemente se desarrollen eventos de lluvia extrema que puedan desencadenar fenómenos erosivos.

Los efectos del cambio climático global se manifiestan en el incremento de la temperatura promedio en el municipio de Cajicá. Esta dinámica genera una expansión de la atmósfera y permite un mayor almacenamiento de gotículas de agua, favoreciendo la formación de nubes y



repercutiendo en una tendencia a incrementar los volúmenes de precipitaciones promedio en la región.

El aumento del régimen de lluvias en el municipio incrementa la probabilidad de ocurrencia de eventos meteorológicos intensos y/o prolongados que desencadenen procesos degradativos en el área. Por tanto, es imperativa la planificación y gestión del recurso hídrico a mediano y largo plazo en la región.

Es necesario realizar acciones de prevención ante el probable aumento de las precipitaciones en el municipio, como la protección de la cobertura vegetal, programas de reforestación y demás recursos que aporten resistencia mecánica a los suelos y amortigüen los impactos de los procesos degradativos en el municipio, junto con el monitorio constante de los reportes de amenazas potenciales del IDEAM.

Es imperativa la conservación de caudales ecológicos, para con esto conservar la dinámica natural del Río Bogotá y Frío, y los demás drenajes principales del municipio, y evitar la desestabilización de los cauces que puedan favorecer la ocurrencia de eventos amenazantes.

Las medidas de conservación y manejo adecuado de los ecosistemas estratégicos y de la vegetación son vitales para facilitar la regulación natural de los ciclos hidrológicos y la conservación de suelos en el territorio, por lo cual deben tratarse como una prioridad en el ordenamiento territorial para la reducción del riesgo.

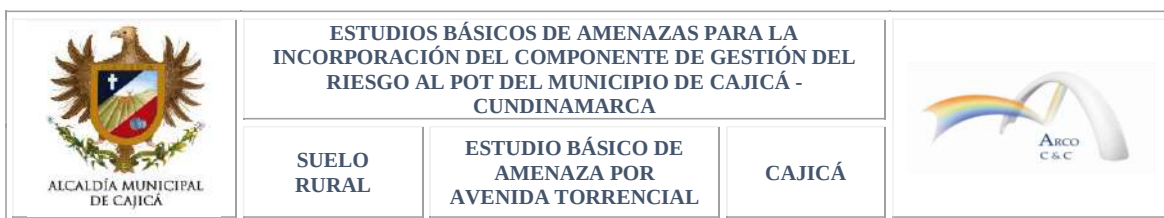
Es precisa la realización de estudios de detalle de variabilidad y cambio climático, buscando contar con insumos para la reubicación de la población vulnerable. Así mismo, es importante respetar la ronda hídrica y las zonas de alta amenaza del municipio mediante el control de construcción y perturbación del medio natural en estas regiones.

Se sugiere a la población de Cajicá poner en práctica el principio de autoconservación, estipulado en la Ley 1523 de 2012, buscando salvaguardar el medio ambiente ante cualquier acción o intervención desde una perspectiva de solidaridad social.

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

8.1. 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).

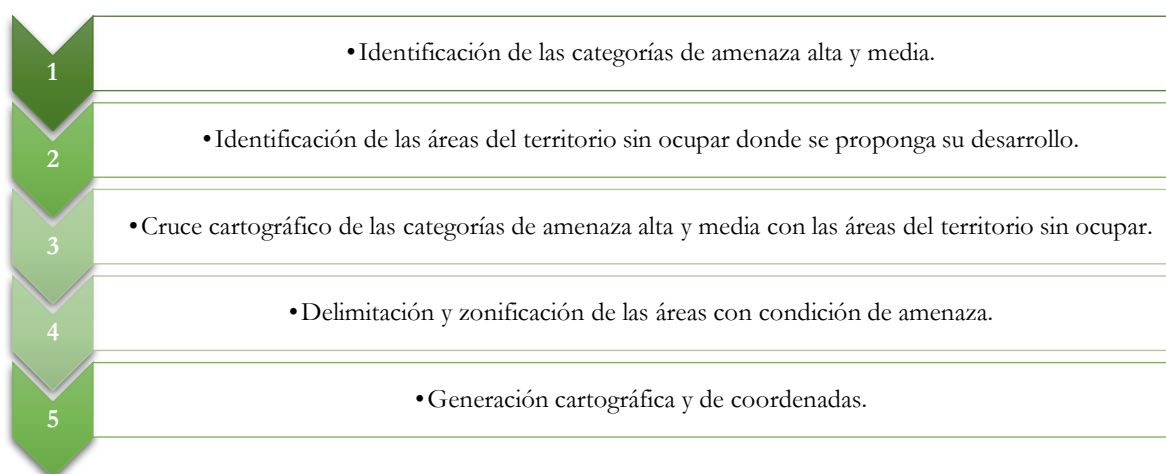
“Con fundamento en la delimitación y zonificación de amenazas, se delimitan y zonifican aquellas áreas sin ocupar del suelo urbano, de expansión urbana, rural suburbano o centros poblados rurales en las que en la revisión o en la expedición de un nuevo POT se proponga su desarrollo.

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.

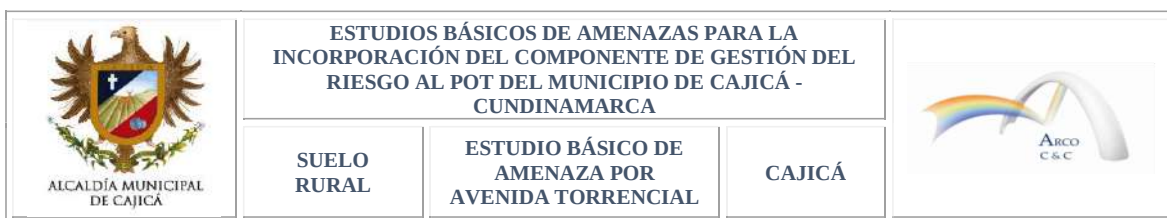
Con esta información se elabora el mapa con la delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza y se establecen los criterios para la caracterización y delimitación de las unidades de análisis en las áreas que serán objeto de estudios detallados.” (Decreto 1077 de 2015, art 2.2.2.1.3.2.1.4).

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

Diagrama 6. Proceso metodológico empleado para la delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza.



Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda, (2021).



1. Se identifican las categorías de amenaza MEDIA y ALTA resultado de la ZONIFICACIÓN BÁSICA DE AMENAZA del fenómeno natural.
2. Se identifican 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, que para el 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 geográfico 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, zonificando los diferentes polígonos producto del cruce cartográfico mediante un código único (ID_POL), así mismo se delimitan mediante vértices con coordenadas e identificadas con un código único (ID_COORD); información cartográfica en formato feature class de ESRI en la geodatabase del fenómeno (AT_SR.gdb) y listado de coordenadas por polígono en formato Excel.
5. Se representan cartográficamente los polígonos productos 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_AT_SR” (Ilustración 32)**, adicional, se generan los planos específicos para todos los polígonos donde se incorporan las coordenadas de cada vértice **“DYZ_CA_AT_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).

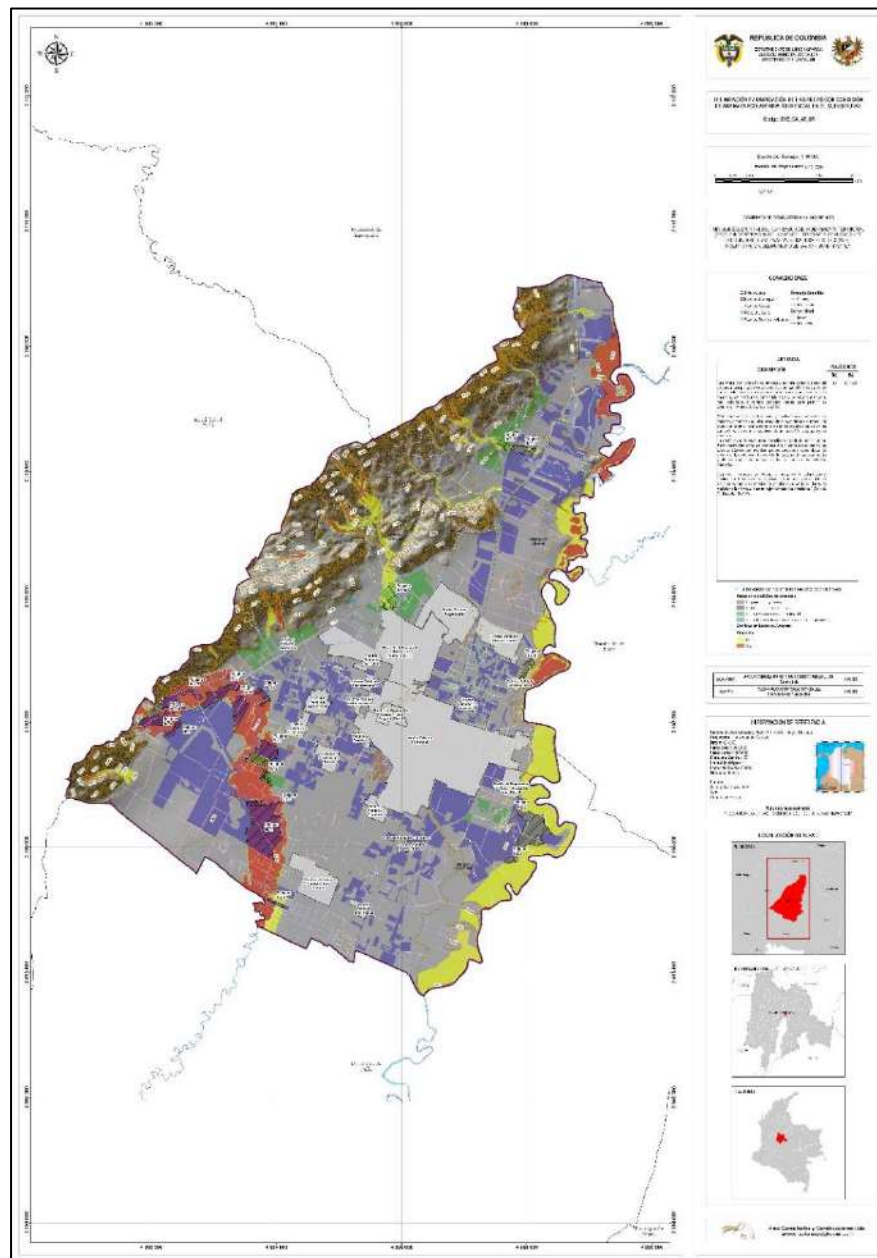
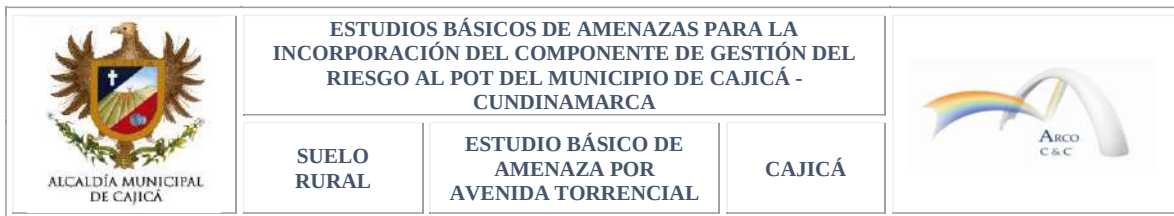
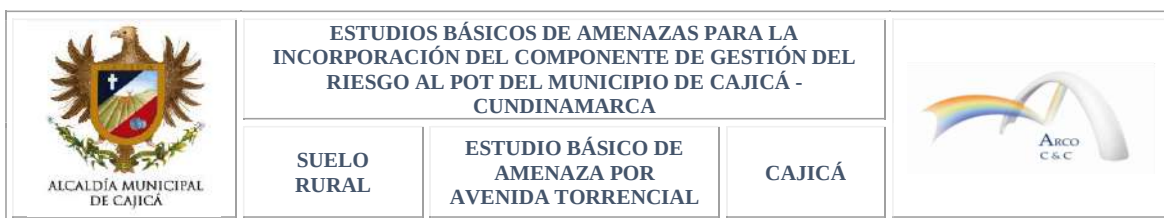


Ilustración 32. Zonificación de las áreas con condición de amenaza para el suelo rural del municipio de Cajicá.

Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda, (2022).



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

Tabla 42. Resumen de las áreas con condición de amenaza.

No. Total de polígonos	Área del territorio (ha)	Porcentaje del área total (%)
18	122,98	2,64%

Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda, (2022).

Con un total de 18 polígono de área con condición de amenaza que suman un total de 122,98 hectáreas que significan un 2,64% del área total del suelo rural, siendo estos polígonos las áreas que serán objeto de estudios detallados (Artículo 2.2.2.1.3.2.1.4 del Decreto 1077 de 2017).

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

Conforme a los 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:

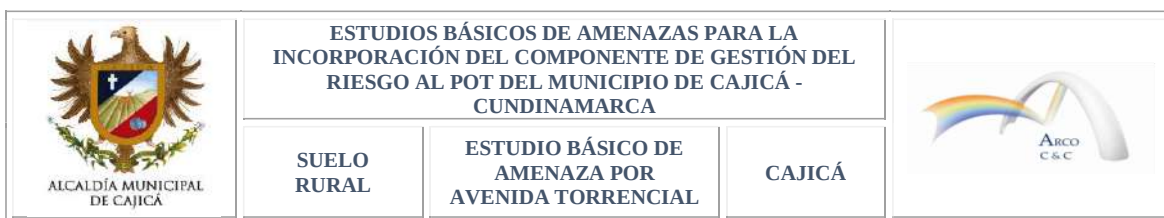
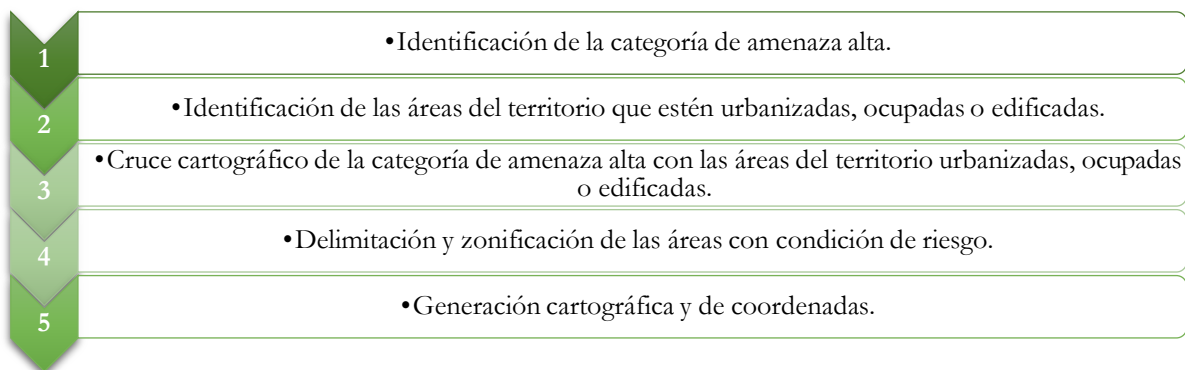
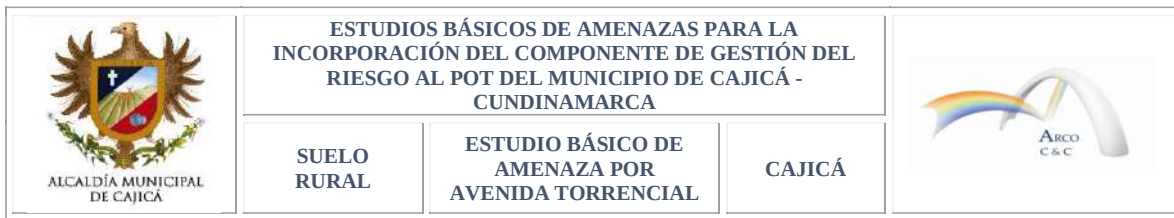


Diagrama 7. Proceso metodológico empleado para la delimitación y zonificación de las áreas con condición de riesgo.



Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda, (2021).

1. Se identifican la categoría de amenaza ALTA resultado de la ZONIFICACIÓN BÁSICA DE AMENAZA del fenómeno natural.
2. Se identifican las áreas del territorio que estén urbanizadas, ocupadas o edificadas, que para el 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 geográfico 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, zonificando los diferentes polígonos producto del cruce cartográfico mediante un código único (ID_POL), así mismo se delimitan mediante vértices con coordenadas e identificadas con un código único (ID_COORD); información cartográfica en formato feature class de ESRI en la geodatabase del fenómeno (AT_SR.gdb) y listado de coordenadas por polígono en formato Excel.
5. Se representan cartográficamente los polígonos productos 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_AT_SR” (Ilustración 33), adicional se generan los planos específicos para todos los polígonos donde se incorporan las coordenadas de cada vértice “DYZ_CR_AT_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).

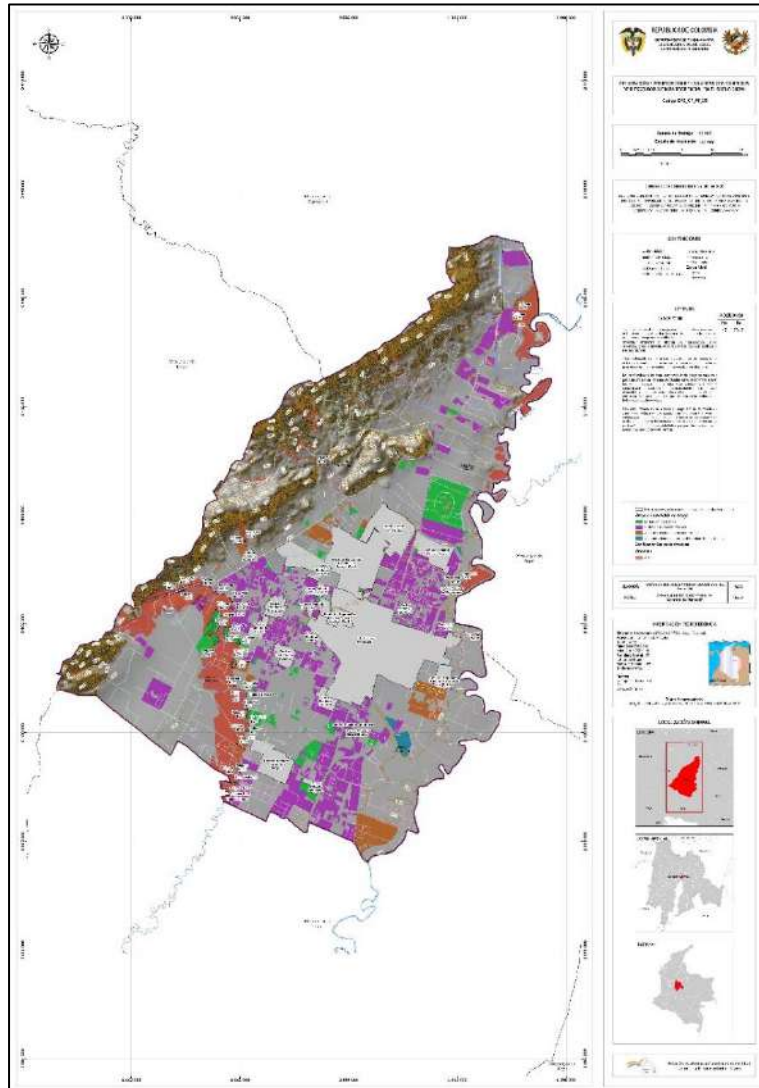


Ilustración 33. Zonificación de las áreas con condición de riesgo para el suelo rural del municipio de Cajicá

Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda, (2022).

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

Tabla 43. Resumen de las áreas con condición de riesgo.

	No. Total, de polígonos	Área del territorio (ha)	Porcentaje del área total (%)
Predios	22	21,06	0,453%
Sistema Vial	20	9,06	0,195%

Fuente: Arco Consultorías & Construcciones Ltda, (2022).

Para los predios de la base catastral IGAC se identificó un total de 22 polígonos de áreas con condición de riesgo que suman un total de 21,06 hectáreas que significan un 0,45% del área total del suelo rural, además del sistema vial de la base cartográfica se identificó un total de 20 polígonos de áreas con condición de riesgo que suman un total de 9,06 hectáreas que significan un 0,195% del área total del suelo rural, siendo estos polígonos las áreas que serán objeto de estudios detallados que permitan categorizar el riesgo (Artículo 2.2.2.1.3.2.1.5 del Decreto 1077 de 2017).

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

Los resultados de la zonificación corresponden a una aproximación simplificada para un momento determinado de un fenómeno natural altamente complejo y dinámico en el tiempo, ya que, al ser un prototipo estático de la realidad no tiene en cuenta las variaciones espacio - temporales que puedan experimentar las variables que influyen dentro del desarrollo del fenómeno, entendiendo que, debido a la interacción del hombre con el medio y su capacidad para transformarlo, así mismo los resultados de esta zonificación deben irse actualizando. De igual forma la evaluación se presenta bajo una escala de trabajo definida y una metodología determinística definida, con lo cual la exclusión o inclusión de nuevas variables podría alterar los resultados obtenidos. Por último, se debe tener en cuenta que el riesgo sobre la amenaza objeto de estudio es derivada de los procesos de uso y ocupación del territorio, es por lo anterior que se hace necesario el establecimiento de medidas que permitan un control para la disminución del riesgo, con lo cual se propone tener en cuenta las siguientes sugerencias:

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

1. Como medida no estructural, se propone generar acciones de prevención por parte de los entes gubernamentales encargados de la gestión del riesgo para aumentar el nivel de conocimiento en la temática. Para ello se plantea:
 - a. Implementación de la demanda del conocimiento en gestión de riesgo dando la oportunidad obtener datos suficientes y robustos que puedan ser posteriormente analizados para crear soluciones factibles a los problemas históricos y actuales que posee el municipio, e implementarse en políticas dentro del plan de desarrollo, Plan de Gestión de Riesgo y Plan de Contingencia. Esto implica inversión en proyectos que genere conocimiento enfocado a recolectar información detallada de los eventos (se recomienda tener un formato de reporte que permita ingresar información básica del desarrollo de fenómeno como: profundidad de la lámina de agua (tirante), área afectada mediante sensores remotos, daños y afectaciones, duración del eventos, descripción del material arrastrado, curvas granulométricas, factores condicionantes, factores detonantes, etc.), si se estandariza y unifica la información esta permitirá tener un tratamiento y aprovechamiento de forma más óptima.
 - b. Se recomienda considerar el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico PNMRH donde se dan los lineamientos para dar respuesta a las necesidades de la implementación del monitoreo con el fin de proporcionar herramientas conceptuales y metodológicas para evaluar el estado y la dinámica del agua, en cantidad y calidad en el municipio.
 - c. Implementación de Sistemas de Aletas Tempranas (SAT), tomando en consideración los procedimientos estándares dispuestos por el IDEAM (Protocolo del agua y la Guía y protocolos de monitoreo y seguimiento del agua) y el Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico PNMRH donde se tenga el seguimiento de los niveles y caudales en ríos quebrada, lagos, lagunas o embalses, constituyendo un modo de control de la cantidad de agua superficial lo que permitirá obtener información actual, confiable y oportuna para dar una alerta temprana en el control de inundaciones, avenidas torrenciales y manejo de embalses, de manera que se cuenten con los balances hídricos que describan el comportamiento de las unidades hidrológicas y permitan la correcta gestión integral de los recursos hídricos.
 - d. Se sugiere la implementación de muestreos constantes de caudales sólidos sobre LE Río Frío, para la generación de conocimiento en la capacidad de transporte, hidrometría y reología de los sedimentos, información que permitirá ampliar

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

comprensión del fenómeno estudiado y los procesos de erosión presentes que ingresan en el sistema de canalización y disminuye la capacidad hidráulica y generan daños en la infraestructura.

2. Se recomienda realizar acciones y estrategias de concientización mediante capacitación, incentivación, seguimiento y evaluación con las poblaciones para que adopten prácticas de buen manejo y uso productivo del recurso natural renovable, para disminuir la exposición al riesgo (disminución de la vulnerabilidad). Actividades como:
 - a. Concientizar a la comunidad para preservar los corredores de vegetación nativa que protegen las riberas de los cauces evidenciando los beneficios que tienen los corredores verdes en un suelo desarrollado. La protección de la vegetación ripiara juega un papel fundamental en la regulación hidrológica: frena de igual forma a violencia de las crecidas al mantener permeabilidad y capacidad de desagüe en los suelos; ayuda a estabilizar los márgenes de los ríos reduciendo la erosión lateral de estos, el arrastre de material y favoreciendo los procesos de sedimentación. Dentro de la ciudad los corredores verdes permiten combatir la contaminación, mejoran la calidad paisajística, zonas para encuentros sociales y aumenta la conciencia ambiental de los ciudadanos.
 - b. Incentivar a la construcción de obras civiles eco-sostenibles y de protección de los taludes de las márgenes de las fuentes hídricas, que sea ambientalmente sostenibles y no generen un impacto sobre la dinámica fluvial.
 - c. Actividades de reforestación en las partes altas de las cuencas con vegetación nativa, permitiendo la regulación de flujo de agua lluvia de forma más eficiente, reduciendo los niveles extremos de los caudales y la capa freática, disminuye la posibilidad de generar inundaciones tanto por encharcamiento como por desborde de cauces.
 - d. Concientizar a la población de no construir cerca de las riberas de los ríos, quebradas y demás fuentes de agua lóticos y lénticos, con el fin de reducir la exposición ante las amenazas presentes.
 - e. Generar una conciencia ciudadana que tenga sentido de pertenecía, de forma tal que dicha apropiación del territorio no les permita arrojar basura sobre los cauces, ya que reducen la capacidad hidráulica de estos. Y penalizaciones económicas mediante comparendos ambientales a quienes realicen dichas acciones.
 - f. Creación de proyectos que generen concientización de la población a través de la divulgación del conocimiento desde las escuelas hasta las asociaciones

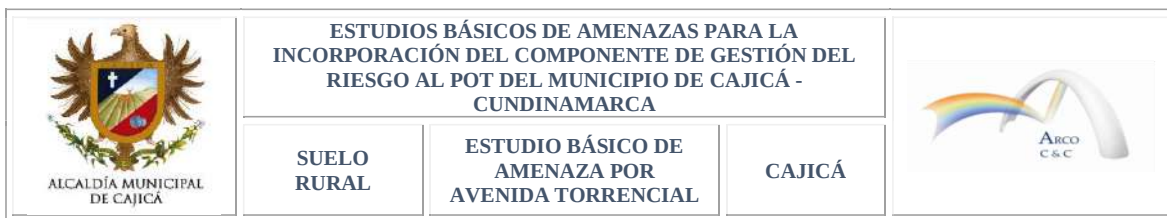
 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

comunitarias, charlas participativas con la comunidad, campañas de divulgación y mallas informativas para que la población este constantemente alerta de las potencialidades afectaciones que el municipio puede atravesar.

3. Como medidas no estructurales enfocadas en acciones de prevención que pueden realizar los entes gubernamentales encargados de la gestión del riesgo para disminuir los posibles impactos se sugiere:
 - a. Evaluar el sistema de alcantarillado pluvial y sanitario en el que se establezca las adecuaciones pertinentes para cubrir las demandas de los usuarios y la captación de aguas lluvias sin que se colapse el sistema, donde se valore la viabilidad de mejorar el sistema canalizado existente o de restauración a sus condiciones iniciales en función de los costos generados en la ejecución y los beneficios sociales y ambientales brindados.
 - b. Continuar con el mantenimiento de los canales, quebradas y ríos y de la infraestructura hidráulica. De igual forma se deben realizar estudios que determinen causales y estado de las estructuras hidráulicas del municipio y con ello generar medidas de reforzamiento, o rediseño de las obras que así lo requieran, teniendo presente la funcionalidad, ya que estas deben soportar los volúmenes según los diseños y deben mantener una adecuación y evaluación de su funcionamiento ya que las condiciones son cambiantes en el tiempo, evitando así las inundaciones generadas por la falta del mantenimiento de las estructuras, que amplían la magnitud del eventos. Dichas limpiezas se recomiendan hacer al menos al final del verano y/o comienzo de invierno con el objetivo de darle capacidad hidráulica a los drenajes.
 - c. Como el suelo urbano de Cajicá presenta una alta intervención antrópica al sistema de drenajes naturales que atraviesa las zonas urbanizadas y es un factor consecuente en la situación de amenaza actual por inundación, se recomienda dar priorización a conservar los drenajes de forma natural, dándoles el área de conservación ambiental que normativamente se aplica, evitando construir estructuras que modifique su comportamiento hidráulico natural, pero priorizando su adecuación hidráulica para disminuir el riesgo.
 - d. Se sugiere tomar medidas en el sistema de drenaje en las vías de comunicación, mediante obras que permiten un manejo adecuado de los fluidos, para la cual es indispensable considerar los procesos de captación, conducción, y evacuación de los mismos (cuando la vía se encuentra en riesgo).

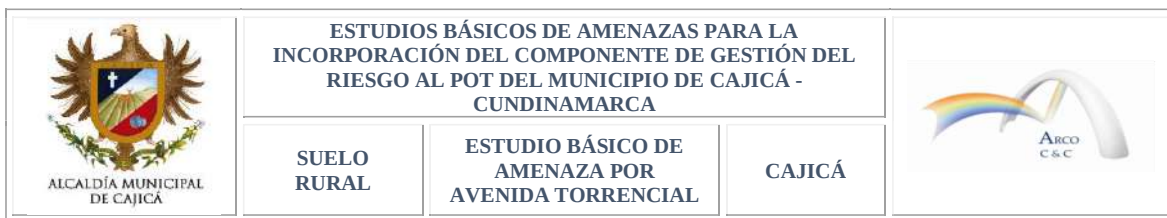
 ALCALDÍA MUNICIPAL DE CAJICÁ	ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZAS PARA LA INCORPORACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO AL POT DEL MUNICIPIO DE CAJICÁ - CUNDINAMARCA			 ARCO C&C
	SUELO RURAL	ESTUDIO BÁSICO DE AMENAZA POR AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

4. Si se disponen de estudios detallados que al evaluarse cumplen con los lineamientos expedidos en el Decreto 1807 de 2014, deberán añadirse al Documento Técnico de Soporte, y en consecuencia incorporarse durante la revisión y/o actualización del POT.
5. Se debe plantear la conservación y reforestación de la cobertura boscosa en la parte alta de las cuencas con el fin de mitigar la amenaza a la ocurrencia de un evento torrencial que puede ser consecuencia de la alta degradación de las cuencas como se evidencia en el presente estudio. Dicha medida permite controlar la estabilización de las laderas y con ello reducir la potencialidad a la ocurrencia de un evento. En zonas dónde se presente inestabilidad o procesos de erosión severa se deben tomar medidas de protección de suelo mediante la revegetalización de taludes como controlador.

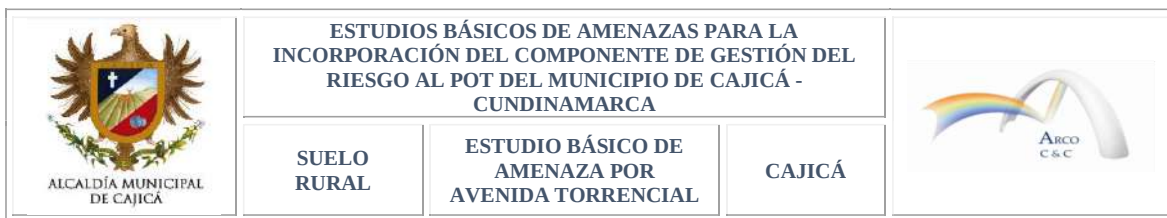


BIBLIOGRAFÍA

- ACA. (2010). Estimación de daños potenciales por inundación en el espacio fluvial. En A. C. l'Aigua, *Generalitat de Catalunya*. Barcelona, Catalunya.
- Aristizábal, E., Arango Carmona, M. I., & García López, I. K. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 242-258.
- Bagnold. (1954). Experiments on gravity-free dispersion of large solid sphere in a Newtonian fluid under shear. *The Royal Society*, 49-63.
- Bertoni, J., & Lombardi Neto, F. (1999). *Conservação do solo*. Sao Paulo.
- Blijenberg. (2007). Application of physical modelling of debris flow triggering to field conditions: Limitations posed by boundary conditions. *Engineering Geology*.
- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2007). Evaluation of Cyclic Softening in Silts and Clays. *JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 641-652.
- Caballero, & Mejía. (1998). Algunos comentarios acerca del evento torrencial de la Quebrada Ayurá (Envigado) del 14/04/1998 y sus implicaciones en la evaluación de la amenaza al municipio. *Memorias 2da conferencia sobre riesgos geológicos en el Valle de Aburrá*.
- CAR. (2018). *CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA. Ajuste del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Bogotá. 1998 a 2018 (febrero)*.
- Castillo. (2006). Aplicación de un modelo numérico de flujos de escombros y lodo en una quebrada en el Perú. Lima.
- Castro. (2007). Deslizamientos y Avenidas Torrenciales. *Cosmos, Año 10, No 41*.
- Costa. (1984). Physical geomorphology of debris flows. *Developments and Applications of Geomorphology*, 268-317.
- Coussot. (1997). Mudflow Rheology and Dynamics. International Association for Hydraulic Research (IAHR). *Balkema Rotterdam*.
- Davies. (1988). Debris flow surges - a laboratory investigations. Zürich: Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie.
- Durán, Elizaga, Garzón, Lamas, & Prieto. (2008). Geología y prevención de daños por inundaciones. *Instituto Geológico Minero de España*.



- García. (2006). Sedimentación Engineering, Processes, Measurements, Modeling and Practice World Enviromental and Water Resource Congress 2006. . *AM 110*.
- IDEAM. (2010). Estudio Nacional del Agua.
- IDEAM. (2013). Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua.
- Julien, & Lan. (1991). *Rheology of Hyperconcentrations. Journal of Hydraulic Enigineering*.
- Kaliser, B., Mccarter, M. K., Pack, R., & Newman. (s.f.). 1984. *Abstracts of specialty conference papers; delineation of landslide, flash flood and debris flow hazards in Utah*. Reports.paper 283.
- Mannerts. (1999). *Factores de erosión. Notas de clase. Cochabamba, Bolivia*.
- Meunier. (1991). *Eléments d' hydraulique torrenyielle*.
- MINAMBIENTE. (2014). *Acuerdo N° 16 de 2014 "Por el cual se adopta la revisión general del plan básico de ordenamiento territorial del municipio de Cajicá adoptado mediante el acuerdo número 08 de 2000 y modificado por los acuerdos municipales 009 de 2002, 007 de 200, 21 de 20*.
- Moore, I. D., & Nieber, J. L. (1989). *Landscape assessment of soil erosion and nonpoint source pollution. Journal of the Minn. Acad. Sci.*, 18-25.
- Niño. (2015). Comparación de criterios de engrosamiento del flujo para la simulación de avalanchas en casos colombianos de estudio. *Bogotá: Universidad Nacional de Colombia*.
- NRC. (1982). *Selecting a Metgodology for Delineating Mudslide Hazard Areas fot The National Flood Insurance Program*.
- O'Brien, & Julien. (1985). Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. *Proc of the Speciality Conference and delineation of Landslides, Flash Food and Debris Flow Hazard in Utah*.
- O'Brien, J. (2006). *Flo-2d user manual online*. Obtenido de http://www.flood.com/v2006/documentation/manual_main_2006.pdf
- O'Brien, Julien, & Fullerton. (1993). *Two-Dimensional Water Flood and Mudflow Simulation*.
- Panagos, P., Borrelli, C., & Meusburger, P. (2015). *Rainfall erosivity in Europe. Total Environ*, 801-814.
- Parra, E., Viana, R., & González, M. (1995). *Metodología para la evaluación de la torrencialidad caso oriente antioqueño, 189-201. Citado en el Protocolo de Incorporación de la Gestión del Riesgo en los POMCAS*.
- Piedrahíta. (1996). Estudio preliminar por eventos torrenciales en la vertiente occidental del Río San Juan (Suroeste Antioqueño). *Desastres de origen natural de Colombia 1979-2004*, 109-120.



- Pierson, & Costa. (1987). A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, 7-12.
- Rendón. (1997). La Hidráulica Torrencial. *DYNA*.
- Rivas, M., & Soto, A. C. (2009). Determinación de niveles de potencialidad torrencial de las cuencas del río Mocotíes, Mérida, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 33-41.
- Rodine, & Johnson. (1976). The ability of Debris, heavily freighted with coarse clastic materials, to flow on gentle slopes. *Sedimentology*, 231-234.
- Santos, L., & Gonzalez, C. (1999). Mapa de Indices de Erodabilidad en la Cuenca Alta del Río Bogotá Utilizando el Sistema de Información Geográfica ARC-INFO. *Revista Ingeniería e Investigación*, 30-33.
- Savage. (1984). The mechanics of rapid granular flows. *Advances in Applied Mechanics*. *Advances in Applied Mechanics*, 289-366.
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Geología de la plancha 228 Bogotá Noreste*. Bogotá: MinMinas.
- Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Concepto técnico sobre la amenaza por deslizamientos y avenidas torrenciales en la cuenca del Río Cañaveral, Municipios de San José del Palmar (Chocó), La Celia (Risaralda) y El Aguila - COrrregimiento de Villanueva (Valle del Cauca)*. Bucaramanga: Ministerio de Minas.
- Souza, C. K., Marques, J., & Martins, M. V. (2003). *Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal "SP"*. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 1067-1074.
- Takahashi. (1981). Debris Flow. *Annual Reviews in Fluid Mechanics*, 57-77.
- Urrea, & Vásquez. (1996). Caracterización, Cartografía y Estrategias de manejo de las cuencas hidrográficas torrenciales del municipio de Guatapé. *Universidad Nacional de Colombia*.
- USDA. (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*.
- Valderrama. (2006). Geología, Geodinámica, y simulación de flujos en ciudades de Urubamba y Ollantoytambo. *Universidad Nacional de San Antonio*.
- Vergara, J. G., De la Espriella, R., & Cortés, R. (2006). *Vulcanismo cenozoico en la sabana de Bogotá*. Bogotá: Ciencias de la tierra.
- Vernes. (1958). Landslide Types and Processes. In *Landslides slides and Engineering Practice. Landslides Analysis and Control*.

 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 AVENIDA TORRENCIAL	CAJICÁ	

Wilford, D. J., Sakals, M. E., Innes, J. L., & Sidle, R. C. (2004). Recognition of debrisflow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides*, 61-66.

Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses*. USDA, 537.