

*METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE AMENAZA POR EVENTOS DE  
AVENIDA TORRENCIAL A ESCALA 1:2000*

Néstor Andrés Alarcón Alba  
Paola Andrea Bernal Calderón  
Leidy Xiomara Rivera Quintero

Universidad La Gran Colombia  
Facultad de Ingeniería Civil  
Bogotá, Colombia  
2017

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE AMENAZA POR EVENTOS DE  
AVENIDA TORRENCIAL A ESCALA 1:2000

Néstor Andrés Alarcón Alba  
Paola Andrea Bernal Calderón  
Leidy Xiomara Rivera Quintero

Trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título  
de:  
INGENIERO CIVIL

Asesor Disciplinar: Ing. MSc Christian Camilo Gutiérrez  
Asesor Metodológico: Licenciada Laura M. Cala Cristancho

Línea de Investigación:  
Geotecnia

Universidad La Gran Colombia  
Facultad de Ingeniería Civil  
Bogotá, Colombia  
2017

## Tabla de Contenido

INTRODUCCIÓN	10
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	11
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	13
2 ANTECEDENTES	14
3. JUSTIFICACIÓN	19
4. OBJETIVOS	21
4.1 OBJETIVO GENERAL	21
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
5. MARCO REFERENCIAL	22
5.1 MARCO CONCEPTUAL	22
5.1.1 Movimiento en Masa	22
5.1.1.1. Causas de los Movimientos en Masa	23
5.1.1.2 Sistemas de clasificación de los movimientos en masa	23
5.1.2. Flujos	27
5.1.2.1 Movimientos lentos, de reptación o “creep”	27
5.1.2.2. Flujos de detritos y flujos de tierras	28
5.1.2.3. Flujos de lodo	29
5.1.2.4. Flujos Hiperconcentrados	29
5.1.3. Avalanchas	30
5.1.3.1. Factores y variables influyentes cuando ocurre una avalancha	30
5.1.3.2. Efectos que producen las avalanchas	31
5.1.4. Resumen de las clases de deslizamiento	31
5.1.5. Esquemas de movimientos en masa	33
5.1.6. Avenida Torrencial	35
5.1.6.1. Origen y Causas de las Avenidas Torrenciales	35
5.1.6.2. Características de las Avenidas Torrenciales	36
5.1.6.3. Amenazas por eventos de Torrencialidad	36
5.1.6.4 Metodología para la evaluación de amenaza por Avenida Torrencial	37
5.1.7. Procesos sedimentarios	37
5.1.7.1. Intemperismo	38

5.1.7.2. Erosión	38
5.1.7.3. Transporte	38
5.1.7.4. Depósito	38
5.1.7.5. Acumulación	38
5.1.7.6. Litificación	39
5.1.7.7. Diagénesis	39
5.1.7.8. Ciclo de sedimentos	39
5.1.7.9. Geomorfología de la cuenca	40
5.1.8. Estudio Hidrológico de una Cuenca	41
5.1.8.1. Hidrología	41
5.1.8.2. Hidráulica	41
5.1.8.3. Modelación Hidráulica	41
5.1.9. Estudio geológico y geotécnico de una cuenca	42
5.1.10. Sistema de información geográfica (SIG) para Zonificación de amenazas por eventos de Torrencialidad	43
5.1.10.1. Sistema de Información Geográfico Global Mapper	43
5.1.10.2. Sistema de Información Geográfico ArcGIS	44
5.1.10 Metodologías de análisis de susceptibilidad por torrencialidad	44
5.1.11.1 Metodología Geomorfológica	45
5.1.11.2 Metodología Mapa de Combinación Cualitativo o Heurístico	45
5.1.11.3 Metodología estadística	45
5.1.11.4 Metodología Determinística	46
5.1.11.5 Metodología Probabilística	46
5.1.11.6 Método Bivariado	48
5.2 MARCO LEGAL	49
6. DISEÑO METODOLÓGICO	54
6.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	54
6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN	54
6.3 DEFINICIÓN Y OPERACIÓN DE LAS VARIABLES	55
6.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	55
6.5 FASES DE LA INVESTIGACIÓN	56
Fuente: Elaboración Propia	58
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS	59
7.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS CAUSAS QUE PROVOCAN PROCESOS DE AVENIDA TORRENCIAL	59
7.1.1 Información nacional e internacional	59

7.1.2 Matriz DOFA con la información de la anterior matriz de análisis de información de los artículos recopilados.	67
7.2.1 Consecuencias que puede llegar a generar las variables involucradas en eventos por torrencialidad	85
8. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACION DE AMENAZA POR EVENTOS DE AVENIDA TORRENCIAL A ESCALA 1:2000	88
8.1 ANÁLISIS DE LOS FACTORES Y LAS VARIABLES QUE SE CONSIDERAN GENERAN LOS EVENTOS POR AVENIDA TORRENCIAL.	88
8.1.1 Topografía	88
8.1.2 Topo batimetría:	90
8.1.3 Cartografía	91
8.1.4 Geología	92
8.1.5 Geomorfología	94
8.1.6 Cobertura Vegetal	98
8.1.7 Hidráulica	100
8.1.8 Hidrología	100
8.1.9 Flujo Hiperconcentrado	101
8.1.10 Inventario de procesos por Eventos de Torrencialidad	102
8.2 MÉTODO BIVARIADO	103
8.2.1 Procedimiento para aplicar el método estadístico bivariado en el SIG	104
8.2.2 Flujograma para el desarrollo de la metodología para la evaluación de amenaza por eventos de avenida torrencial a escala 1:2000	106
8.3 DESARROLLO DE CADA UNA DE LAS VARIABLES CON EL MÉTODO BIVARIADO	107
8.3.1. Pendiente:	107
8.3.2. Geomorfología:	109
8.3.3. Procesos de remoción en masa:	110
8.3.4. Hidrología:	112
8.3.5. Cobertura Vegetal:	113
8.3.6. Geología:	115
8.3.7. Sedimentos:	116
8.3.8 Hidráulica	118
8.3.9 Inventario de procesos Eventos de torrencialidad	120
8.4 EJEMPLO DE APLICACIÓN METODOLOGÍA PARA LA EVALUACION DE AMENAZA POR EVENTOS DE AVENIDA TORRENCIAL A ESCALA 1:2000	122
9. ANALISIS DE RESULTADOS	132

10. CONCLUSIONES	133
11. RECOMENDACIONES	135
BIBLIOGRAFÍA	136
ANEXOS	139

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Procesos De Remoción En Masa	22
Figura 2 Movimiento De Reptación	28
Figura 3 Flujos De Detritos Y Flujos De Tierras	28
Figura 4 Flujo De Lodos	29
Figura 5 Flujo Hiperconcentrado	30
Figura 6 Avalancha	30
Figura 7 Clases De Movimientos Masa	33
Figura 8 Partes De Un Movimiento Torrencial	34
Figura 9 Delimitación De Áreas De Manifestación Por Avenidas Torrenciales	34
Figura 10 Avenida Torrencial, Huila	35
Figura 11 Ciclo De Sedimentos	40
Figura 12 Ciclo De Sedimentos	40
Figura 13 Erosión Por Golpeo De Una Gota De Lluvia	83
Figura 14 Curvas De Nivel Con Grilla De Coordenadas.	89
Figura 15 Tabla De Caracterización Del Terreno A Partir De Las Pendientes	90
FIGURA 16 SECCIÓN TRANSVERSAL DE UNA BATIMETRÍA	90
FIGURA 17 CARTOGRAFÍA A ESCALA 1:2000	92
Figura 18 Unidades Geológicas A Escala 1:2000	94
Figura 19 Mapa Cobertura Vegetal	99
Figura 20 Ejemplo De Diagrama De Isoyetas	101
Figura 21 Traslapo De Mapas, Método Bivariado.	104
Figura 22 Flujograma Para Desarrolló De La Metodología	106
Figura 23 Clasificación De Pendientes	108
Figura 24 Clasificación Geomorfológica	109
Figura 25 Inventario Procesos De Remoción En Masa	111
Figura 26 Clasificación De Cauces	112
Figura 27 Clasificación Cobertura Vegetal	114
Figura 28 Clasificación Ugi	115
Figura 29 Clasificación De Sedimentos	117
Figura 30 Inventario Eventos De Torrencialidad	120
Figura 31 Conversión De Capa A Raster De La Variable Principal	122
Figura 32 Raster De Cada Variable	123
Figura 33 Tabla De Atributos Con Pixeles De Cada Clase	123
Figura 34 Combinación De Raster Con El De Eventos Torrenciales	124
Figura 35 Tabla De Atributos Con Pixeles De Eventos Torrenciales	124
Figura 36 Campo De Pesos En Cada Una De Las Variables	128
Figura 37 Raster De Cada Variable Incluyendo Los Pesos	128
Figura 38 Diagrama De Torta Para Zonificación De Amenaza Por Eventos De Torrencialidad	130

### LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Tipos De Movimientos De Falla De Taludes.	24
Tabla 2 Resumen De Clase De Deslizamiento, Con Criterios Para El Reconocimiento En El Campo De Los Mecanismos Que Intervienen	32
Tabla 3 Normas Y Decretos.	49
Tabla 4 Variables De Operación	55
Tabla 5 Fases De La Investigación.	57
Tabla 6 Matriz De Análisis De Información De Los Artículos Recopilados	60
Tabla 7 Matriz Dofa Metodología 1	68
Tabla 8 Matriz Dofa Metodología 2	70
Tabla 9 Matriz Dofa Metodología 3	72
Tabla 10 Matriz Dofa Metodología 4	74
Tabla 11 Matriz Dofa Metodología 5	76
Tabla 12 Matriz Dofa Metodología 6	78
Tabla 13 Matriz Dofa Metodología 7	80
Tabla 14 Unidades Geológicas De Ingeniería Según Su Origen	93
Tabla 15 Rugosidades Del Cauce Para El Modelamiento De Flujos De Tierra (Xu Y Feng, 1979).	102
Tabla 16 Tamaño De Pixeles En Función De La Escala Trabajada	105
Tabla 17 Código Y Clase Para Clasificación De Pendientes	108
Tabla 18 Código Y Clase Para Clasificación De Unidades Geomorfológicas	110
Tabla 19 Código Y Clase Para Clasificación De Procesos De Remoción En Masa	111
Tabla 20 Código Y Clase Para Clasificación De Causes En Hidrología	113
Tabla 21 Código Y Clase Para Clasificación En Cobertura Vegetal	114
Tabla 22 Código Y Clase Para Clasificación De Aspectos Geológicos	116
Tabla 23 Código Y Clase Para Clasificación Para Ciclo De Sedimentos	117
Tabla 24 Clasificación Granulométrica	118
Tabla 25 Clasificación Para Eventos De Torrencialidad	121
Tabla 26 Aplicación Del Método Bivariado Para Pendientes	125
Tabla 27 Aplicación Del Método Bivariado Para Geología	125
Tabla 28 Aplicación Del Método Bivariado Para Hidrología	125
Tabla 29 Aplicación Del Método Bivariado Para Geomorfología	126
Tabla 30 Aplicación Del Método Bivariado Para Remoción En Masa	126
Tabla 31 Aplicación Del Método Bivariado Para Cobertura	126
Tabla 32 Aplicación Del Método Bivariado Para Sedimentos	127
Tabla 33 Aplicación Del Método Bivariado Para Inundación	127

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A Mapa Cobertura Vegetal Proyecto 4g Llanos	139
Anexo B Flujograma Metodología Para Las Avenidas Torrenciales A Escala 1: 2000	140
Anexo C Clasificación Y Definición De Unidades Geomorfológicas	141
Anexo D Clasificación Corine Land Cover Para Colombia	146
Anexo E Mapa De Zonificación De Amenaza Por Eventos De Avenida Torrencial	151

## INTRODUCCIÓN

Las Avenidas Torrenciales son la combinación entre un movimiento en masa y un proceso fluvial que se desplaza generalmente por los cauces de las quebradas y los ríos, llegando transportar volúmenes importantes de sedimentos y escombros con velocidades considerables para los habitantes e infraestructuras ubicados en la zona de acumulación de cuencas de montaña susceptibles a dichos eventos. En el presente trabajo se dará a conocer una metodología aplicada en la zonificación de amenaza por los eventos anteriormente nombrados a una escala de detalle 1:2000.

Para el planteamiento de la metodología, se tuvieron en cuenta distintos factores dentro de los cuales se encuentran: La topografía del terreno, la geología geomorfología y cobertura vegetal de la zona estudiada, un factor detonante muy importante como es la hidráulica e hidrología de la zona, el inventario de procesos de movimientos en masa que han ocurrido en el área que abarca el cauce estudiado y por último la variable eventos de torrencialidad, la anterior nombrada fue la variable utilizada para realizar la comparación de todas las demás a través del método estadístico bivariado y con una modelación final en un sistema de información geográfica donde se permite visualizar el mapa de amenaza por avenida torrencial.

El método bivariado se centra en la comparación de todas las variables en torno a una, en este caso eventos de torrencialidad. El objetivo es darle un peso a cada variable por medio de un sistema de referenciación geográfica, donde se convierten las shapes de cada variable a raster y se realiza el conteo de pixeles para obtener los pesos, posterior a ello se realiza un procedimiento de álgebra de mapas para sumar cada una de las variables con sus respectivos pesos. Con los resultados de la simulación se hace una reclasificación final asignando los valores de amenaza en una escala de alta, media y baja para el mapa de zonificación de amenaza en función de la intensidad del evento y la frecuencia de ocurrencia.

# 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia predominan rocas blandas, es decir, materiales intermedios entre suelos y rocas. La mayoría de estas rocas son de bajo o medio metaforismo. Las rocas blandas son susceptibles a los cambios de humedad típicos del ambiente tropical<sup>1</sup>. Por otra parte, Colombia es un territorio que posee una topografía compuesta de sistemas montañosos donde se reúnen macizos volcánicos, nevados, llanuras, valles y ríos, con problemas de erosión, sistemas de fallas geológicas y altas pendientes, a esto se unen periodos de precipitaciones y sequías fuertes, variables influyentes que en conjunto forman el escenario propicio para eventos de movimientos masales.

Los agentes geológicos de erosión como: agua, hielo y viento asociados a fenómenos naturales como La Niña y El Niño, explican la susceptibilidad y debilidad de algunos de los suelos Colombianos en las partes altas de las cuencas. De manera que se puede decir que Colombia ha sido epicentro de procesos naturales desde el siglo pasado con un historial de avenidas torrenciales entre las que se recuerdan los siguientes municipios afectados como Utica, Fusagasugá y Quebradanegra, el Valle de Aburrá, entre otros. Estos eventos crean antecedentes considerables en función a la susceptibilidad frente al desarrollo de eventos de origen hidrometeorológico.

Eventos como los ocurridos en el municipio de San Cayetano Cundinamarca en el año 1999, donde se originó una falla geológica de gran intensidad que sumada a las lluvias, movimientos telúricos y en conjunto con la masa lodosa provocaron una avenida torrencial, ocasionando la evacuación del municipio en su totalidad y su posterior asentamiento en la vereda centro en la cual se construyó el nuevo casco urbano; indican que las avenidas torrenciales se generan cuando el agua que circula por el cauce de una corriente produce el desprendimiento y transporte de los materiales que conforman su perímetro mojado, es decir que estos procesos de erosión son típicos de cuencas de montaña con fuertes gradientes y áreas moderadas, en consecuencia se generan daños irreversibles como la pérdida de vidas humanas, estructuras de contención, redes de acueducto, sistemas viales y obras de infraestructura. De acuerdo con los sucesos anteriormente mencionados El Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio en el año 2014 establece el decreto 1807, por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a

---

<sup>1</sup> DUQUE ESCOBAR, Gonzalo. Movimientos masales. En: Manual de geología para ingenieros. 1 ed. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2016. p. 375.

la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones<sup>2</sup>. En dicho documento el artículo 10 hace referencia a los estudios básicos de amenaza por avenidas torrenciales, así mismo considera pertinente que se tenga en cuenta para dicha evaluación variables como: la geomorfología, el estudio hidrológico de la cuenca y el análisis hidráulico del área con el fin de obtener la zonificación de amenaza por avenida torrencial a escala 1:2000 de acuerdo con las necesidades y características del territorio recopilando y analizando la información contenida en el Plan de Ordenamiento Territorial, estudios regionales, informes técnicos, información de las bases de datos institucionales y la información de redes de monitoreo de amenazas existentes.

Teniendo en cuenta las normatividades y Leyes, que orientan al desarrollo de una metodología para enfrentar las avenidas torrenciales en el país y en base a lo explicado anteriormente, se evidencian deficiencias en la estructura de las metodologías que se han propuesto hasta el momento; variables asociadas como la escala de trabajo, la falta de zonificación de lugares con mayor susceptibilidad a que se presenten estos eventos naturales. Por esta razón y considerando estas metodologías existentes, nace la necesidad de proponer una metodología que cumpla con las variables y factores necesarios para dar una posible solución a las exigencias que estos procesos naturales requieren, haciendo una zonificación respectiva de lugares de mayor, medio y menor índice de amenaza manejando un escala de trabajo adecuada con la finalidad de implementar las medidas necesarias de amenaza antes de que estos eventos se presenten.

---

<sup>2</sup> COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto 1807 de 2014, Reglamentación del artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012. Bogotá, D.C., 2014. p.1-2

## **1.2 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Cuáles son las variables que se deben tener en cuenta para establecer una metodología que permita evaluar la amenaza por avenida torrencial a una escala de trabajo 1:2000?

## 2 ANTECEDENTES

Las avenidas torrenciales son un evento natural que en los últimos años ha causado grandes daños en comunidades e infraestructuras, es por esto que diferentes autores e instituciones han realizado estudios teniendo en cuenta variables y factores que se asocian directamente a la causalidad y efecto de estos procesos naturales.

Barrios y Olaya, realizaron la implementación de modelos hidrológicos de flujos torrenciales en cuencas hidrográficas colombianas con información hidrometeoro lógica escasa en el año 2007 en donde los autores resaltan un desarrolló en la generación de un hidrograma sintético del Soil Conservation Service (SCS) y un hidrograma analítico fundamentado en mediciones de campo, útiles para el flujo torrencial ocurrido el 22 de junio de 2006 en la microcuenca El Salto, afluente del río Combeima en el municipio de Ibagué Tolima lugar en donde se desarrolla la investigación.

Los autores en su análisis de resultados especifican la modelación realizada para determinar el hidrograma analítico que fue calculado con el fin de comprender de manera profunda el flujo torrencial ocurrido en la microcuenca El Salto. Esto representa el comportamiento hidrológico de tal evento y puede ser empleado para diseñar medidas de mitigación del riesgo de desastre en el centro poblado de Villa Restrepo, las cuales pueden ser actualizadas en los planes de emergencia municipal, basados en los resultados en donde se recomienda desarrollar investigaciones similares en otras áreas tomadas como lugar de estudio para demostrar diversos eventos que generen riesgo con el propósito de evaluar la aplicación de estos modelos.

Dos años más tarde en la investigación basada en el análisis de la vulnerabilidad en la microcuenca Joaquín Herrera por avenidas torrenciales. En la investigación Mendoza<sup>3</sup> resalta que una planificación del uso del suelo y el buen manejo de los recursos naturales, especialmente en el manejo de cuencas, desempeña un papel fundamental en la reducción de riesgos, tanto en México como en otras regiones. Según Mendoza, debido a la presencia de una serie de condiciones físicas en la microcuenca Joaquín Herrera, existe áreas críticas que aumentan su vulnerabilidad en términos biofísicos y económicos a los desastres naturales<sup>4</sup>, esta hipótesis nace de un completo estudio de la zona, en donde se tuvo en cuenta datos estadísticos desde el

---

<sup>3</sup> MENDOZA Jesús. Análisis de la vulnerabilidad en la microcuenca Joaquín Herrera por avenidas torrenciales. Tesis de Maestría en gestión integrada de cuencas. Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro. Revista Gestión y Ambiente, 2009. 14 p.

<sup>4</sup> Ibid. . p. 14.

2006 para llevar a cabo la investigación. Para el autor fue determinante establecer la vulnerabilidad frente a los procesos naturales, la define como un concepto relativo que se debe analizar frente a las condiciones particulares de cada comunidad<sup>5</sup>. Para el estudio de procesos de remoción en masa la vulnerabilidad es un factor muy importante, ya que de allí se ubican los desastres naturales.

Mendoza indica que para poder realizar el análisis de la vulnerabilidad se utilizó el método de clasificación conocido como proceso de Análisis Jerárquico (AHP), desarrollado por Satty 1980, el cual organiza y evalúa la importancia relativa de los criterios<sup>6</sup>.

Caballero José, inició su investigación analizando que susceptibilidades en torno al proceso de avenidas torrenciales propiamente dichas, flujos hiperconcentrados, flujos de lodo y flujo de escombros y transiciones entre éstos. Dentro de la investigación el autor resalta que el Valle de Aburrá es un valle profundo, estrecho, con cuencas que, en su mayoría nacen dentro del valle y se inician como corrientes de fuerte inclinación en los escarpes, con recorridos cortos, de alto gradiente y alta velocidad<sup>7</sup>.

Caballero, enfatiza que teniendo en cuenta las condiciones geomorfológicas, climáticas y de ocupación en el valle de Aburrá existe un alto potencial de avenidas torrenciales que pueden afectar a las poblaciones e infraestructura asentadas en las zonas de riesgo dado el nivel de corrientes que se ubican en este lugar, en las zonas marcadas por el cambio brusco de gradiente cuando las quebradas pasan a las zonas de baja pendiente<sup>8</sup>. De igual manera Caballero analiza que hay muchas falencias en estudios que involucren las diferentes variables relacionadas con este tipo de procesos en el país. Por último, afirma que por el escaso conocimiento, se asume que todas las corrientes que tienen la geomorfología definida como crítica, son susceptibles de presentar avenidas torrenciales en tramos medios y bajos<sup>9</sup>.

Rivas Maribel et al, realizaron una investigación con el fin de determinar los niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del río Mocotíes en Merida, Venezuela. Determinaron que esta área es representativa de los Andes Venezolanos haciéndola adecuada para la aplicación de una metodología

---

<sup>5</sup> Ibíd. . p. 18.

<sup>6</sup>Ibíd. . p. 23.

<sup>7</sup>CABALLERO, José Humberto. Las avenidas torrenciales: una amenaza potencial en el valle de Aburrá. En: Revista Gestión y Ambiente, Diciembre 2011.vol. 14, no. 3, p.04.

<sup>8</sup>Ibíd., p.45.

<sup>9</sup>Ibíd., p.04.

paramétrica que permita la determinación y ubicación geográfica de los diferentes niveles de potencialidad torrencial presentes en dicha cuenca.<sup>10</sup>

Los autores establecieron una metodología la cual estaba integrada por parámetros interrelacionados: la precipitación; estabilidad relativa (definida por las condiciones geológicas y geomorfológicas); la morfometría, expresada por la densidad de drenaje, pendiente media y forma de la cuenca y el índice de protección del suelo representado por la cobertura vegetal; se le asigna a cada parámetro valores del 1 al 6, que representa la condición más favorable (valor 1) hasta la más desfavorable (valor 6). Los parámetros fueron ponderados para obtener cuatro niveles de potencialidad torrencial: Bajo, Medio, Alto y Muy Alto. Los resultados indican que en la vertiente izquierda predomina un nivel de potencialidad torrencial Alto; en la vertiente derecha, la distribución entre el nivel Medio y Alto es equitativo. Además, los resultados coincidieron con los torreses activados durante el evento de precipitación ocurrido en la cuenca en febrero de 2005, lo cual demuestra que la metodología aplicada tiene un alto grado de confiabilidad.<sup>11</sup>

En su análisis de resultados los autores verificaron que los parámetros utilizados en la metodología fueron validados, ya que sus resultados se lograron evidenciar con el evento ocurrido en febrero de 2005 en el lugar objeto de estudio. La metodología aplicada representa una herramienta de apoyo para la identificación y localización de zonas potencialmente torrenciales lo cual facilitará posteriormente, la aplicación de metodologías específicas para el diseño de medidas en vertientes y obras de corrección de torreses tendentes a minimizar o mitigar los efectos y consecuencias de las crecidas torrenciales.

La Corporación Autónoma Regional (CORNARE), presenta a la comunidad regional y municipal el estudio que abordó dos tareas importantes, la primera es la zonificación de riesgo por movimientos en masa y avenidas torrenciales e inundación y la segunda es la atención de las áreas afectadas por los eventos desastrosos ocurridos por la temporada invernal. Esta última se incorpora como una actividad integrada al logro de la identificación de las zonas de riesgo del municipio. Los sitios afectados por los eventos desastrosos serán caracterizados e interpretados, presentando para ellos, una propuesta de recuperación que incluya obras de corrección, mitigación y control según sea pertinente.

---

<sup>10</sup>RIVAS MARIBEL et al. Determinación de niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del río Mocotíes, Mérida, Venezuela. Trabajo de investigación. Mérida, Venezuela. Revista Forestal Venezolana, Año XLIII, Volumen 53(1) enero-junio, 2009... 33 p.

<sup>11</sup> Ibid., p. 34

El análisis de resultados en esta investigación presenta valores predominantemente altos para los riesgos de tipo movimiento en masa y avenidas torrenciales, esto dado por las características propias del terreno como son las altas pendientes debidas a estar ubicadas en las vertientes que bajan desde el Altiplano de Oriente hacia el Valle Medio del Magdalena, caracterizado geomorfológicamente como el Escarpe Erosivo del Magdalena; así mismo las altas precipitaciones acaecidas en las últimos temporadas invernales y algunos inadecuados del terreno, han ayudado al incremento del riesgo en sectores tanto urbano como rurales del municipio de Cocorná.

Según Francés, F. y Bussi, G. en su investigación sobre el análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos de la cuenca del río Ésera (España) mediante un modelo hidrológico distribuido TETIS, con el objetivo de analizar el efecto del cambio climático sobre la dinámica de los sedimentos en la cuenca y en el aterramiento del embalse. La implementación del submodelo de sedimentos se ha realizado utilizando como referencia los volúmenes de sedimentos depositados en el embalse medidos a partir de tres batimetrías históricas.<sup>12</sup> Los resultados de la investigación fueron que; la evolución de la capacidad de almacenamiento del embalse se ha calculado utilizando como caudales líquido y sólido entrantes al embalse los suministrados por el modelo TETIS, mientras que la evolución de la densidad de los sedimentos y de la eficiencia de retención se han estimado como se ha expuesto en la sección de implementación del modelo<sup>13</sup>.

Lin, Yang, Lin, & Lin, en el 2011, este artículo analiza los flujos de escombros en la zona Songhe inducida por Typhoon Mindulle mediante el empleo de un modelo numérico para la simulación de flujo de escombros, se aprobó el programa numérica FLO-2D para simular las condiciones de circulación de los flujos de escombros en la zona Songhe, incluyendo profundidades de flujo, velocidades del flujo, y deposiciones de sedimentos<sup>14</sup>. Adoptaron 24 horas de precipitación acumulada en diversos periodos de retorno (10, 100, y 500 años) para realizar el escenario de simulación de flujos de detritos. Se clasifica el grado de riesgo de las zonas de flujo de detritos peligrosos en tres categorías, correspondiente a alta, media y baja. El enfoque propuesto genera el mapa de distribución de riesgos que puede utilizarse para la creación de una estrategia de mitigación de desastres en el área de Songhe. En esta investigación se considera como factor detonante la intensidad de la lluvia utilizando la fórmula sencilla de caudal pico pero no considera factores contribuyentes como el tipo

---

<sup>12</sup> Ibid., p. 34

<sup>13</sup> Ibid., p. 34

<sup>14</sup> Ibid., p. 34

de roca, topografía, geomorfología, entre otros. El riesgo es clasificado teniendo en cuenta tanto la intensidad de la amenaza y probabilidad de ocurrencia. No se tiene en cuenta la vulnerabilidad y el riesgo corresponde a un análisis semicuantitativo, sin tener en cuenta el tipo de afectaciones o pérdidas causa. Solo aplica para las condiciones de la cuenca del río Songhe Stream en Taiwán.<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> Ibid., p. 34

### 3. JUSTIFICACIÓN

Si bien es cierto que hasta el momento ya se han estipulado metodologías en los planes de ordenamiento territorial (POT) municipal y distrital para la delimitación y zonificación de las áreas en condición de amenaza por eventos de avenida torrencial en Colombia, también es cierto que no se ha logrado cumplir a cabalidad con la necesidad presentada en los lugares para los cuales han sido diseñadas las metodologías ya existentes, como aplicar una escala de trabajo con la que se pueda obtener de manera precisa una zonificación de lugares con mayor amenaza; por lo tanto es necesario basarse en las variables y factores específicos implementados en estas metodologías para llegar a proponer una más completa que logre evaluar estos sucesos, manejando una escala de trabajo más adecuada, de manera que se logre establecer una zonificación que permita saber los niveles de amenaza en diferentes zonas.

Las avenidas torrenciales son una amenaza natural muy común y posiblemente la menos estudiada en Colombia; sin embargo causan grandes pérdidas en vidas humanas e infraestructura. En la búsqueda de lograr encontrar soluciones en metodologías implementadas para la zonificación de amenazas por avenida torrencial se encuentran falencias por estos procesos en distintos lugares del País, que poseen antecedentes por procesos de erosión dada su ubicación, siendo este uno de los factores más influyentes a que se desarrollan estos eventos.

Por las condiciones geomorfológicas, climáticas y de asentamiento del territorio colombiano, existe un gran potencial en la ocurrencia de eventos por avenida torrencial, es necesario anotar que en Colombia se desarrollan prácticas inadecuadas en los usos del suelo generando procesos erosivos, inestabilidad geológica en épocas de invierno, favoreciendo a que las cuencas hidrográficas y sus afluentes generen procesos de desbordamiento.

El detonante de estos procesos torrenciales son factores como el material residual luego de que se presente un evento de remoción en masa por el cual se depositan grandes cantidades de material específico como lodo, sedimentos, rocas de distintos tamaños, madera ahogada y todo lo que proviene de la cuenca alta cuando se generan las precipitaciones. Estos materiales se depositan en los vasos de la quebrada y colmatan la sección óptima o la zona en donde el agua discurre normalmente, generando que se represe el material. En época invernal, hay un momento en el que ocurre una ruptura de los vasos en las quebradas tributarias, generada por la alta presión ocasionada por el flujo del agua y toda la energía que se acumula en estos lugares, cuando eso sucede se puede desencadenar un evento por avenida torrencial.

Dado que las metodologías existentes carecen de todas las herramientas necesarias para realizar la zonificación detallada de amenaza por los procesos anteriormente nombrados, es necesario tener en cuenta algunas variables influyentes como: Las condiciones geomorfológicas, climáticas, hidrológicas, hidrográficas, geotécnicas, topográficas en el país, con el fin de trabajar tanto en las dificultades como en las fortalezas de las metodologías que se han implementado hasta el momento.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

4.1.1 Establecer una metodología para la evaluación de la amenaza por eventos de avenida torrencial teniendo en cuenta la escala de trabajo 1:2000

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

4.2.1 Identificar y determinar factores y variables influyentes en la generación de eventos por torrencialidad que pueden provocar el proceso de avenida torrencial, con base en las metodologías existentes.

4.2.2 Diagnosticar la interacción entre los factores y variables que pueden generar avenidas torrenciales.

4.2.3 Proponer una metodología que incluya los diferentes factores y variables asociadas a eventos de avenidas torrenciales.

## 5. MARCO REFERENCIAL

### 5.1 MARCO CONCEPTUAL

Con el fin de formular una metodología que permita la zonificación de amenaza por avenida torrencial a escala 1:2000, es necesario revisar algunos conceptos básicos relacionados con el tema, conceptos como movimientos en masa, clases o tipos de movimientos en masa.

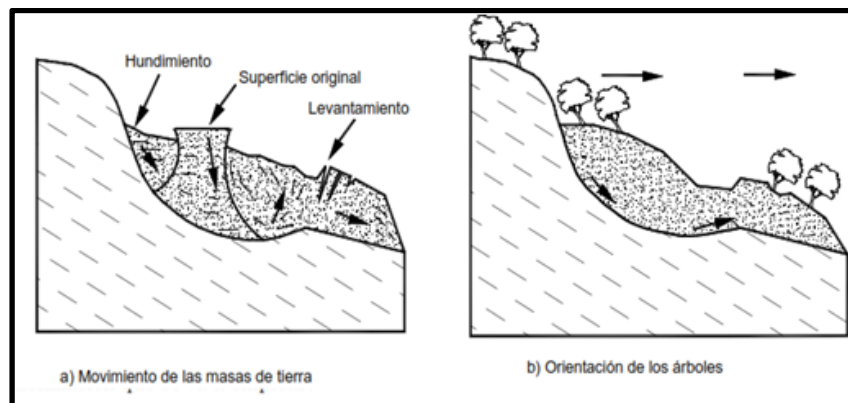
#### 5.1.1 Movimiento en Masa

La remoción en masa, es el desplazamiento de grandes volúmenes de material superficial ladera abajo (a favor de la pendiente) por acción directa de la fuerza de gravedad, hasta volver a encontrar un nuevo punto de reposo como se puede observar en la figura 1.

Normalmente este terreno, en su parte superficial, presenta rocas fragmentadas por acción de la meteorización física, química o biológica, sola o combinada así como también puede presentar un estrato superficial de suelo grueso o delgado con o sin vegetación.

Los movimientos de masa se presentan, sobre todo, en la época de lluvia o durante una actividad sísmica<sup>16</sup>.

Figura 1 Procesos de Remoción en Masa



Fuente: Ocampo, M. (2015). <https://goo.gl/69oDOV>

<sup>16</sup> BLANCO BALLESTEROS Julio. Remoción de Masa .Geología Ambiental. Trabajo de grado. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2011.

### 5.1.1.1. Causas de los Movimientos en Masa

Para una ladera o talud determinado, el movimiento en masa se presenta cuando los esfuerzos que actúan dentro de la masa de suelo o roca son mayores que su resistencia.<sup>17</sup>

Los factores que causan movimientos en masa se pueden clasificar en factores condicionantes, que hacen susceptibles a los taludes o laderas sin llegar a provocar el movimiento; y detonantes que hacen que un talud pase de un estado marginalmente estable a inestable.

Dentro de los factores que causan deslizamientos se encuentran las condiciones del terreno, los procesos físicos naturales y los procesos artificiales.<sup>18</sup>

### 5.1.1.2 Sistemas de clasificación de los movimientos en masa

Para el estudio y control de movimientos en masa en Colombia, se ha propuesto por García (1986) La adopción del Sistema de Clasificación de Varnes (1978) que se conserva en esencia por Cruden y Varnes (1996). Los criterios principales usados en dicho sistema se refieren ante todo al tipo de movimiento y en segundo lugar al tipo de material.

En esta clasificación, los tipos de movimientos de falla de taludes se dividen en seis grandes grupos:

- Caídas
- Volcamientos
- Deslizamientos
- Propagación lateral
- Flujos
- Movimientos complejos<sup>19</sup>

Los cinco primeros son básicos o simples, mientras que el sexto se refiere a casos en los que se combinan dos o más de los anteriores.

Los materiales se dividen en dos clases: *roca* y *suelo*, este último se subdivide en *detritos* y *tierra*, correspondiendo a los primeros un contenido de gruesos (partículas de más de 2 mm de diámetro) mayor del 50%.

---

<sup>17</sup> Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Especialización en Evaluación de Riesgos y Prevención de Desastres. Módulo I, Lecturas Escogidas, Profesor Manuel García. Notas de Clase. Bogota D.C. 2001.

<sup>18</sup> Popescu, M.E. Landslide Causal Factors And Landslide Remediation Options Illinois Institute of Technology, Chicago, USA. 1997

<sup>19</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Manual de estabilidad de taludes. Fenómenos de inestabilidad de taludes. Bogotá D.C.:1998. 33 p. ISBN 958-95941-2-3

En el siguiente cuadro guía de la clasificación de Varnes se indican los términos descriptivos de los componentes de un deslizamiento. En general, son frecuentes en Colombia los casos de caídas de roca, los deslizamientos trasnacionales y rotacionales, los flujos de tierra, detritos o lodos, y los casos combinados o complejos como el hundimiento-flujo de tierras y los deslizamientos múltiples retrogresivos.

Los movimientos en masa se pueden manifestar según el tipo de movimiento, el material y otros factores en: caídas, vuelcos o volcamientos, deslizamientos (rotacional, traslacional, en cuña, compuestos), propagaciones o corrimientos laterales, flujos, deformaciones laterales y movimientos complejos y/o compuestos.

Tabla 1 Tipos de movimientos de falla de taludes.

<b>Tipo de Movimiento</b>	<b>Roca</b>	<b>Detritos</b>	<b>Tierra</b>
<p><b>Caídas:</b> La masa en movimiento viaja la mayor parte de la distancia por el aire, incluye caídas libres, brincos y rebotes.</p>	<p><b>Caídas de rocas</b></p> 	<p><b>Caídas de detritos</b></p>	<p><b>Caídas de tierra</b></p> 
<p><b>Deslizamiento Rotacional:</b> Movimiento debido a fuerzas que causan un giro alrededor de un punto situado arriba del centro de gravedad. La superficie de rotura es cóncava hacia arriba.</p>	<p><b>Hundimiento de roca</b></p> 	<p><b>Hundimiento de detritos</b></p>	<p><b>Hundimiento de tierra</b></p>  <p><b>(Skinner &amp; Porter, 1992)</b></p>

Tabla 1. (Continuación)

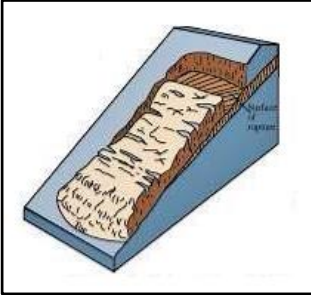
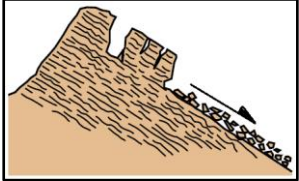
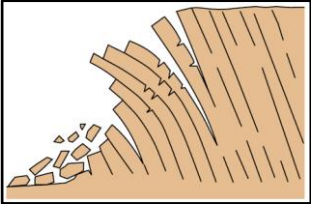
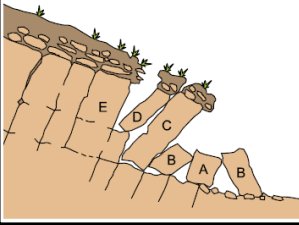

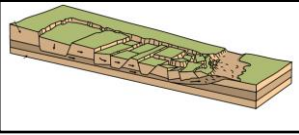
<b>Tipo de Movimiento</b>	<b>Roca</b>	<b>Detritos</b>	<b>Tierra</b>
<p><b>Deslizamiento Traslacional:</b> Ocurre a lo largo de las superficies planas, de ondulación suave con frecuencia controlado por superficies débiles, como fallas, diaclasas, estratificación y por variaciones en resistencia al corte entre capas de depósitos.</p>	<p><b>Deslizamiento de bloques</b></p> 	<p><b>Deslizamiento de detritos</b></p>	<p><b>Deslizamiento de bloque de tierra</b></p> 
<p><b>Volcamiento:</b> El movimiento es debido a fuerzas que causan un momento de volcamiento alrededor de un punto de pivote situado bajo el centro de gravedad.</p>	<p><b>Volcamiento de roca</b></p> 	<p><b>Volcamiento de detritos</b></p>	<p><b>Volcamiento de tierra</b></p> 
<p><b>Propagación Lateral:</b> El movimiento se distribuye extendiéndose lateralmente en una masa fracturada.</p>	<p><b>Propagación lateral de rocas</b></p> 		<p><b>Propagación lateral de Tierras</b></p> 

Tabla 1. (Continuación)

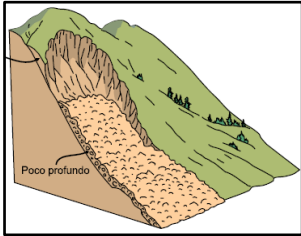
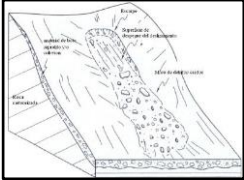

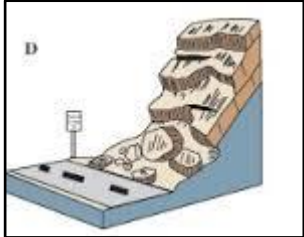
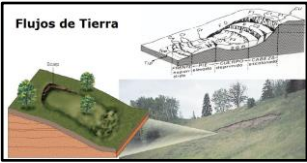
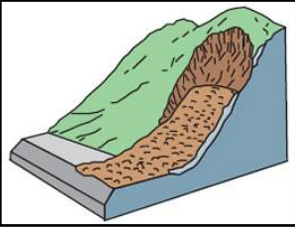
<b>Tipo de Movimiento</b>	<b>Roca</b>	<b>Detritos</b>	<b>Tierra</b>
<p><b>Flujos en roca:</b> Incluye deformación continua en el espacio y la fluencia lenta superficial y profunda, abarca movimientos diferenciales lentos en extremo.</p>	<p><b>Flujos en roca</b></p> 	<p><b>Flujo de detritos</b></p>	
<p><b>Flujos en suelo:</b> Movimiento dentro de la masa deslizada tal que la forma tomada por el material desplazado a la distribución aparente de velocidades y desplazamientos semeja la de fluidos viscosos.</p>	 <p>Fuente: Tagliaferro, M. (2012). <a href="https://goo.gl/npQ0M5">https://goo.gl/npQ0M5</a></p>	<p><b>Flujo de detritos</b></p>	<p><b>Flujo de lodo, arena húmeda o tierras:</b></p> 
<p><b>Complejos:</b> Consiste en una combinación de uno o más tipos de movimientos.</p>	<p><b>Deslizamiento y caída de roca:</b></p> 	<p><b>Hundimiento y volcamiento</b></p>	<p><b>Hundimiento-Flujo de tierras:</b></p> 

Tabla 1. (Continuación)

<b>Tipo de Movimiento</b>	<b>Roca</b>	<b>Detritos</b>	<b>Tierra</b>
<p><b>Avalancha o avenidas torrenciales:</b>                      Consiste en el movimiento muy rápido de masas de materiales gruesos, tales como grandes bloques de roca, cascajo y arena, con ciertas cantidades de suelos más finos como limo y arcilla junto con agua y aire atrapado.</p>	<p><b>Avalancha:</b></p> 		

Tomado y adaptado del Manual de estabilidad de taludes INVIAS<sup>20</sup>

Para poder profundizar en el tema de las Avenidas Torrenciales, es necesario tener en cuenta los siguientes conceptos:

### 5.1.2. Flujos

Consiste en una colada con elevada concentración de materiales detríticos, que se mueven hacia los valles con velocidades que pueden alcanzar y, en algunos casos, superar los 10 m/s. El material transportado tiene una granulometría muy variable, y un fenómeno singular se manifiesta frecuentemente con oleadas sucesivas ("pulsaciones") debido a la obstrucción temporal del canal de transporte.

#### 5.1.2.1 Movimientos lentos, de reptación o "creep"

La reptación se manifiesta como un desplazamiento muy lento de la parte superficial del terreno, aun en taludes de pendiente moderada y con cobertura vegetal. El fenómeno puede pasar inadvertido puesto que tiene velocidad promedio cercana a 1 cm/año. Como se muestra en la figura 2 el movimiento

<sup>20</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Op.cit. p.35

llega a evidenciarse por la deformación del terreno, la formación de pliegues en las formaciones rocosas.

Figura 2 Movimiento de Reptación

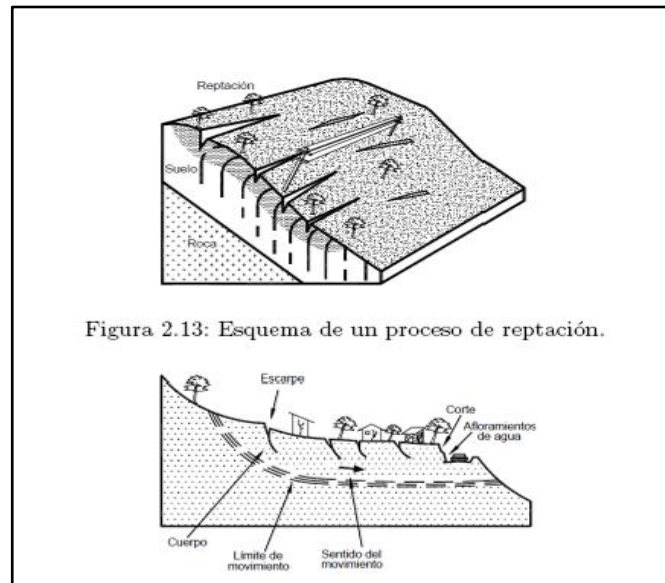


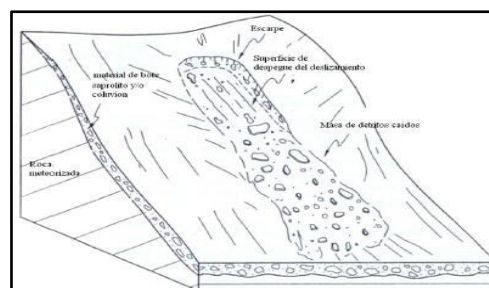
Figura 2.13: Esquema de un proceso de reptación.

Fuente: <https://goo.gl/HhbFfQ>

### 5.1.2.2. Flujos de detritos y flujos de tierras

Por lo general son movimientos de velocidad variable entre rápidos o muy rápidos o muy lentos para los detritos y lentos, de carácter viscoso. En la figura 3 se muestra la formación de flujos en materiales provenientes de meteorización de rocas, que pierden su estabilidad estructural por el efecto del agua.<sup>21</sup>

Figura 3 Flujos de detritos y flujos de tierras



Fuente: Tagliaferro, M. (2012). <https://goo.gl/npQ0M5>

<sup>21</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Op.cit. p.47

### 5.1.2.3. Flujos de lodo

Es común que se formen cuando una masa de detritos se ablanda por acción del agua hasta tener una consistencia blanda y fluida, poniéndose en movimiento y alcanzando velocidades altas, según la intensidad y duración de las lluvias y de la pendiente del terreno. En la figura 4 se puede evidenciar como el movimiento de los flujos de lodo es debido por completo a la gravedad y su velocidad depende en alto grado de la pendiente del terreno sobre el cual se mueven y de la viscosidad del lodo.<sup>22</sup>

Figura 4 Flujo de lodos



Fuente: Instituto Geofísico. (2012). <https://goo.gl/7FZwG7>

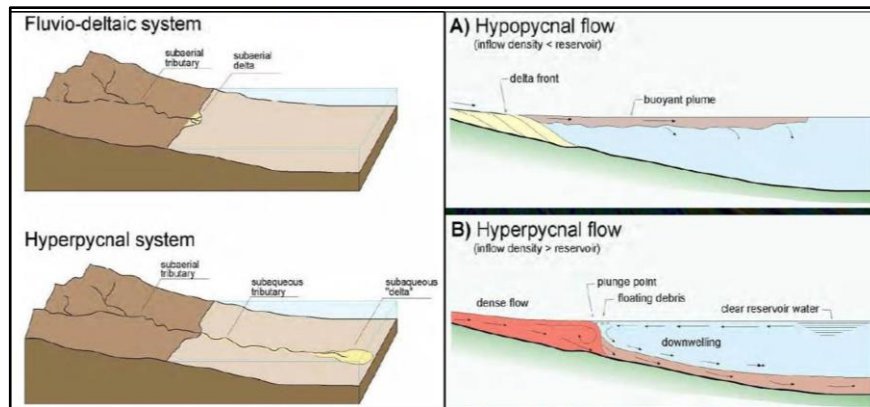
### 5.1.2.4. Flujos Hiperconcentrados

Es un flujo que posee concentraciones entre 5% y 70% de sedimentos en peso. En este tipo de flujo el comportamiento es controlado por el agua y la diferencia conceptual con relación al comportamiento de un flujo de agua no es sustancial. Grandes volúmenes de arena son transportados en suspensión dinámica y éste transporte depende de la velocidad del flujo y su turbulencia. A mayor turbulencia hay mayor transporte de materiales gruesos. El porcentaje máximo de sedimentos de un flujo hiperconcentrado, depende de las cantidades de limo y arcilla en la mezcla. Como se puede evidenciar en la figura 5 los depósitos de flujos hiperconcentrados hay muy poca clasificación de los materiales y los cambios texturales no son abruptos. Los materiales son más consolidados que los depósitos de inundaciones.<sup>23</sup>

<sup>22</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Op.cit. p.49

<sup>23</sup> SUAREZ, Jaime. Los Flujos. En: Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico. Bucaramanga, Colombia, Ingeniería de Suelos Ltda., 1998. p. 176

Figura 5 Flujo Hiperconcentrado



Fuente: Guillote (2005). <https://goo.gl/e1MIWW>

### 5.1.3. Avalanchas

Según el INVIAS una avalancha; “Consiste en el movimiento muy rápido de masas de materiales gruesos, tales como grandes bloques de roca, cascajo y arena, con ciertas cantidades de suelos más finos como limo y arcilla junto con agua y aire atrapado. Se le da nombre de avalancha de detritos (Figura 5), cuando dicha masa contiene una cantidad apreciable, por ejemplo mayor del 50%, de materiales de tamaño superior al de las arenas.”<sup>24</sup>

Figura 6 Avalancha



Fuente: Yepes, V. (2015). <https://goo.gl/sE1WU6>

#### 5.1.3.1. Factores y variables influyentes cuando ocurre una avalancha

El INVIAS<sup>25</sup> menciona que Para que se produzcan las avalanchas deben reunirse una serie de circunstancias, En primer lugar debe existir una provisión de materiales en posibilidad de deslizarse (zona de suministro o fuente de los materiales), cuyas características los lleven a que sufran alteraciones serias

<sup>24</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Op.cit. p.51

<sup>25</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Op.cit. p.52

desde el momento en que comienzan a desplazarse. Estas características pueden consistir en ser frágiles, sensibles o colapsables, y se deben al origen mismo de los depósitos o a los procesos de transformación de los suelos residuales. En segundo lugar actúan las diferencias de nivel y las condiciones del relieve a lo largo de la trayectoria del movimiento, las cuales influyen en la energía y velocidad que pueden adquirir. En tercer término, no menos importante la acción del agua, necesaria para que los materiales pierdan resistencia, se ablanden y fluyan, alcanzando con seguridad mayor capacidad de movimiento y más energía al desplazarse.

El conjunto de materiales puede contener una parte más débil formada por terrones de arena, arcilla y limo, y por fragmentos de roca deleznable, y una parte más resistente que la constituyen los bloques de roca dura. Cuando se produce el derrumbe de la masa en el sitio de la fuente de esos materiales, y ocurre el desplazamiento siguiendo depresiones o cañadas del terreno, la parte más débil se desintegra o desmorona, sufre procesos de alteración o remoldeo que hacen aumentar el porcentaje de finos. Si a esto se le suma el aumento en el contenido de agua por aporte de las quebradas y laderas que desaguan hacia el cauce ocupado, entonces el conjunto se tornará más fluido. Si a esto se le agrega la alta pendiente que puede tener ese cauce o canal por donde se desplazan los materiales, se explica cómo dicho conjunto alcanza gran movilidad, alta velocidad, y puede entonces adquirir mayor poder de arrastre, lo que le permite incorporar materiales sueltos o que desprende del fondo y paredes del canal.<sup>26</sup>

#### **5.1.3.2. Efectos que producen las avalanchas**

Cuando se habla de las consecuencias que puede generar una avalancha o avenida torrencial se pueden nombrar varios factores tanto directos como indirectos, entre ellos se pueden encontrar: Víctimas humanas, Afectación en las vías de comunicación o bloqueo de caminos, las vías fluviales se bloquean creando el riesgo de grandes inundaciones, pérdida de la productividad agrícola forestal e industrial y pérdida de infraestructura. Si estos factores se producen en conjunto llegan a formar un gran impacto social.

#### **5.1.4. Resumen de las clases de deslizamiento**

En la tabla 2 se mostrará un resumen de las clases de deslizamientos y sus características:

---

<sup>26</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Op.cit. p.54

Tabla 2 Resumen de clase de deslizamiento, con criterios para el reconocimiento en el campo de los mecanismos que intervienen

<b>Tipo de movimiento</b>	Flujo de lodos; Flujo de detritos; Avalanchas o Avenidas Torrenciales	Flujo de tierra rápido; flujo de arcillas sensibles; flujo húmedo de arenas o limos.	Flujo de tierras; deslizamiento de lodos
<b>Mecanismo de transporte</b>	Flujo de una lechada no cohesiva (flujo viscoso) extremadamente rápido		Flujo plástico cohesivo; limitado por superficies de corte laterales discretas
<b>Localización y geometría</b>	Taludes de pendiente fuerte a moderada en laderas y cauces	Laderas de pendiente suave. Pueden ocurrir en cauces.	Laderas de pendiente alta, moderada y baja
<b>Material Parental</b>	Coluviones y partes de otros deslizamientos (suelos ingenieriles)	Depósitos no consolidados de arcilla, limo y arena.	Depósitos no consolidados en matriz arcillosa y suelos ingenieriles.
<b>Humedad</b>	Muy húmedo a húmedo; originado en fuertes aguaceros	Muy húmedo a húmedo; relacionada con lluvias fuertes o con precipitación acumulada en el periodo lluvioso	Húmedo a moderadamente húmedo; relacionada con lluvias o acumulaciones estacionales.
<b>Características de la cicatriz</b>	En cauces de fuerte pendiente deja lechos socavados limpios; con menos pendiente puede pasar el flujo sin socavar ni depositar.	Corona arqueada; pueden presentar apariencia de "cuello de botella" en planta.	Corona arqueada; grietas de corte laterales bien desarrolladas; comúnmente sin escape claro en la corona

Tabla 2. (Continuación)

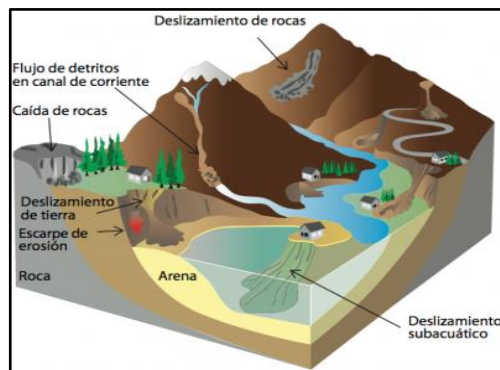
<b>Características del depósito</b>	Depósitos acordonados en cauces confinados; depósitos en abanico y laminares en taludes no confinados de baja pendiente.	Abanico y depósitos laminares (de consistencia muy blanda recién ocurridos); pueden presentar una superficie ondulada.	Pata lobulada, pendiente con lomos transversales y grietas radiales; puede haber lomos longitudinales; grietas de desgarre
<b>Origen de daños</b>	Impacto lateral; presión lateral; inundación; enterramiento; flotación.	Falla de fundaciones; inundación y enterramiento	Falla de fundaciones; presiones laterales.
<b>Disparadores comunes</b>	Deslizamiento en materiales saturados; deslizamientos hacia cuerpos de agua o subacuáticos; terremotos; erupciones; volcánicas; lluvias	Terremotos u otras cargas dinámicas; cambios químicos en el agua intersticial.	Sobrecarga; cortes en la pata; elevación del nivel freático.

Tomado y adaptado de Campbell, y et al, 1984.

### 5.1.5. Esquemas de movimientos en masa

En la figura 7 se muestran las diferentes clases de movimientos en masa, deslizamientos, flujos y caídas.

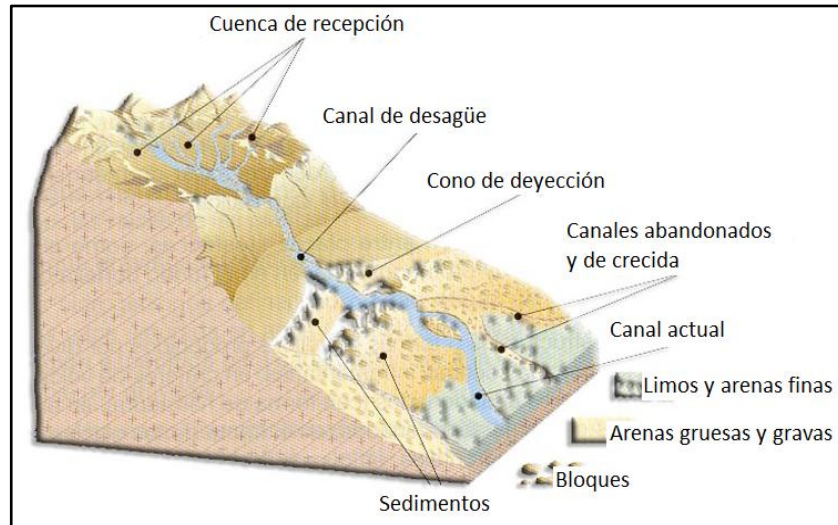
Figura 7 Clases de movimientos masa



Fuente: <https://goo.gl/fEROc7>

Mientras que en la figura 8 se puede evidenciar un esquema más detallado de cada una de las partes de un movimiento torrencial.

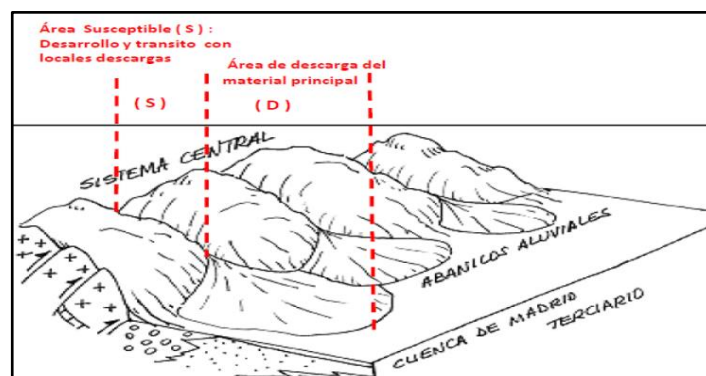
Figura 8 Partes de un movimiento torrencial



Fuente: Anexó B, Gestión del Riesgo.(2014).<https://goo.gl/UzxSQt>

En el siguiente esquema (Figura 9) se puede ver la delimitación de áreas de manifestación por avenidas torrenciales, el sistema central, los abanicos aluviales, y como cada una de estas partes se relacionan formando un área de susceptibilidad a eventos torrenciales.

Figura 9 Delimitación de áreas de manifestación por avenidas torrenciales



Fuente: Anexó B, Gestión del Riesgo. (2014).<https://goo.gl/UzxSQt>

### 5.1.6. Avenida Torrencial

La Avenida Torrencial es una combinación entre un proceso fluvial y un proceso de movimiento en masa, sucede cuando por una corriente baja un fluido con mucha más cantidad en agua que un flujo de lodo o que un flujo de escombros, que normalmente va a tener la capacidad de mover por torrencialidad grandes cantidades de masa, como bloques grandes de madera, la diferencia con los flujos de lodo y flujos de escombros radica en que la avenida torrencial tiene una matriz fundamentalmente arenosa, mientras que los lodos y escombros son limos arcillosos.

Figura 10 Avenida Torrencial, Huila



Fuente: AFP- El país. (2017). <https://goo.gl/XJMvyi>

Las avenidas torrenciales constituyen la categoría principal. Caballero, en su investigación manifiesta entenderlas como “un tipo de movimiento en masa que se desplazan generalmente por los cauces de las quebradas, llegando a transportar volúmenes importantes de sedimentos y escombros, con velocidades peligrosas para los habitantes e infraestructura ubicados en las zonas de acumulación, de cuencas de montaña”<sup>27</sup>.

#### 5.1.6.1. Origen y Causas de las Avenidas Torrenciales

“Las avenidas torrenciales se generan por causas hidrometeorológicas (lluvias concentradas), sísmicas (enjambres de deslizamientos cosísmicos), de inestabilidad de vertientes (bloqueo de un cauce por un deslizamiento y posterior ruptura del dique), o por erupciones volcánicas y deshielo o por acumulación de capas gruesas de cenizas sueltas. Las avenidas torrenciales también se pueden presentar por otras causas como son deshielo al final del invierno o lluvias concentradas asociadas a ciclones tropicales”<sup>28</sup>.

---

<sup>27</sup>CABALLERO. Op. cit. p. 04

<sup>28</sup> Ibíd. . p. 07.

### **5.1.6.2. Características de las Avenidas Torrenciales**

Son uno de los tipos más comunes de amenazas y son extremadamente peligrosas debido a su naturaleza rápida. Sus características son: corta duración, pequeña extensión de área de influencia, alto caudal pico y flujo rápido generalmente causantes de daños importantes a la propiedad. Ocurren a causa de tormentas de alta intensidad, en áreas de altas pendientes en las cuencas y cobertura vegetal pobre y se ven afectadas de manera importante cuando el índice de infiltración se reduce por tormentas previas. Se pueden subdividir de acuerdo con el material de arrastre de la corriente.<sup>29</sup>

### **5.1.6.3. Amenazas por eventos de Torrencialidad**

Las avenidas torrenciales son fenómenos naturales que, aunque tienen una ocurrencia relativamente baja, por su gran potencial destructivo, son de particular interés para evaluar los riesgos naturales a los que se encuentra sometida una determinada cuenca. Entre las razones que existen para que este tipo de evento sea tan dañino están su naturaleza casi impredecible, la rapidez a la cual ocurre, su corta duración y su largo período de retorno, así como su distribución poco uniforme en el espacio y el tiempo.<sup>30</sup>

Existen diferentes causas que dan origen a una avenida torrencial; entre ellas se pueden mencionar una alta precipitación que genera una serie de deslizamientos, un deslizamiento de gran magnitud que origine represamiento en el flujo, la ocurrencia de sismos que produzcan deslizamientos, o la ocurrencia de erupciones volcánicas.

Normalmente no se cuenta con estimaciones de umbrales entre intensidad de la precipitación y generación de deslizamientos. Los umbrales para la generación de avenidas torrenciales de orígenes diferentes a altas precipitaciones son de difícil definición, de igual manera se dice que los flujos de lodos generados son de difícil modelación, teniendo en cuenta los parámetros como la densidad de la mezcla, el volumen de sedimentos, el caudal de la avenida son de difícil estimación, como estimación de volúmenes de sedimentos asociados a un evento con cierta probabilidad de ocurrencia.

---

<sup>29</sup> Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Guía técnica para la formulación de los planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas, (POMCAS). Bogotá D.C. 2014.

<sup>30</sup> J. González, O. Chávez, and M. Hermelín, «Aspectos geomorfológicos de la avenida torrencial del 31 de enero de 1994 en la cuenca del río Fraile y sus fenómenos asociados,» Desastres de origen natural en Colombia 1979-2004, M. Hermelín, ed., Medellín: Universidad Eafit, 2005.p.1

Aún no se ha establecido una modelación matemática del todo para este proceso<sup>31</sup>.

#### **5.1.6.4 Metodología para la evaluación de amenaza por Avenida Torrencial**

Según el decreto 1807 esta metodología debe basarse en los siguientes criterios:

Artículo 10. Estudios básicos de amenaza por avenidas torrenciales. Para determinar las condiciones de amenaza por avenida torrencial en suelos urbanos, de expansión urbana y rural, los estudios básicos tienen las siguientes especificaciones mínimas<sup>32</sup>:

- **Área de estudio:**

Todos los cauces presentes o con influencia en el municipio o distrito, que por sus condiciones topográficas puedan tener un comportamiento torrencial.

- **Insumos:**

Se debe utilizar como mínimo los siguientes insumos:

- ✓ Geomorfología
- ✓ Estudio hidrológico de la cuenca, orientado al flujo torrencial, considerando el ciclo de sedimentos.

- **Análisis hidráulico del área a zonificar**

Teniendo en cuenta factores detonantes como precipitación o movimientos en masa.

- **Base Cartográfica**

La base cartográfica que se emplee en la zonificación corresponderá a una escala 1:2.000.<sup>33</sup>

#### **5.1.7. Procesos sedimentarios**

Son todos los procesos que tienen que ver con la producción, movilidad, depósito y acumulación de sedimentos y que intervienen en la formación de rocas sedimentarias, forman parte del ciclo de las rocas (o más específicamente del ciclo de sedimentos). Ocurren sobre la superficie terrestre o a poca profundidad de la superficie terrestre. Entre estos procesos se pueden encontrar los siguientes:

---

<sup>31</sup> MONTOYA, Luis. SILVA, Sandra. GONZALES, Juan. Evaluación de zonas de amenaza por avenidas Torrenciales utilizando metodologías cualitativas. Caso de aplicación a la quebrada doña maría. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín, julio-diciembre de 2009, vol 8, No. 15, p 13 - ISSN 1692-3324.

<sup>32</sup> COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto 1807 de 2014. Op. cit. p. 4.

<sup>33</sup> COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto 1807 de 2014. Op. cit. p...8-9.

#### **5.1.7.1. Intemperismo**

Descomposición y desgaste (desintegración, destrucción) de las rocas debido a la acción de la intemperie.

El grado y velocidad de intemperismo dependen principalmente entre otros factores del tipo de roca y del clima: la composición del material parental o roca original, la superficie expuesta al intemperismo: tamaño de partículas, diaclasas o fracturas (textura y estructura de la roca).

#### **5.1.7.2. Erosión**

Disgregación y desgaste de las rocas debido a la acción de agentes como el agua, el aire, el viento, la gravedad y de las partículas sólidas inmersas en tales agentes.<sup>34</sup>

#### **5.1.7.3. Transporte**

Movimiento de partículas separadas de las rocas por acción de la gravedad y la de algún medio de transporte como el viento, el agua de corrientes fluviales, marinas y el hielo.

Erosión y transporte son dos procesos que ocurren simultáneamente, de manera que la capacidad de carga y transporte de partículas y la forma de viaje de ellas son objeto de estudio de la sedimentología y mecánica de fluidos.

#### **5.1.7.4. Depósito**

Asentamiento de las partículas en movimiento (suspensión de la acción de transporte) debido a un cambio de velocidad en el medio de transporte. De acuerdo al tamaño de las partículas la velocidad de transporte, algunas partículas se depositan primero en tanto que otras puede continuar en movimiento.

#### **5.1.7.5. Acumulación**

Formación de capas debido a eventos sucesivos de depósito. Si el depósito, la acumulación son suspendidas, se puede producir erosión y la formación de discordancias. El depósito y acumulación ocurre en diferentes sitios, ambientes y medios.

---

<sup>34</sup> C. Caballero. «Guía de estudio de Procesos Sedimentarios para el curso de Ciencias de la Tierra» Procesos Sedimentarios .Ciudad de México: Universidad UNAM, 2012.

#### 5.1.7.6. Litificación

Procesos que convierten los materiales depositados en roca consolidada, ocurren una vez enterrados los sedimentos, son los siguientes:

- **Compactación:** Reducción de espacios porosos. Resulta en desecación y reducción de volumen de los espesores de capas acumuladas.
- **Cementación:** Depósito, precipitación o cristalización de materiales cementantes (calcita o aragonita:  $\text{CaCO}_3$ ; sílice:  $\text{SiO}_2$ , óxidos de hierro o hematita:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en los espacios porosos o vacíos de las rocas).

#### 5.1.7.7. Diagénesis

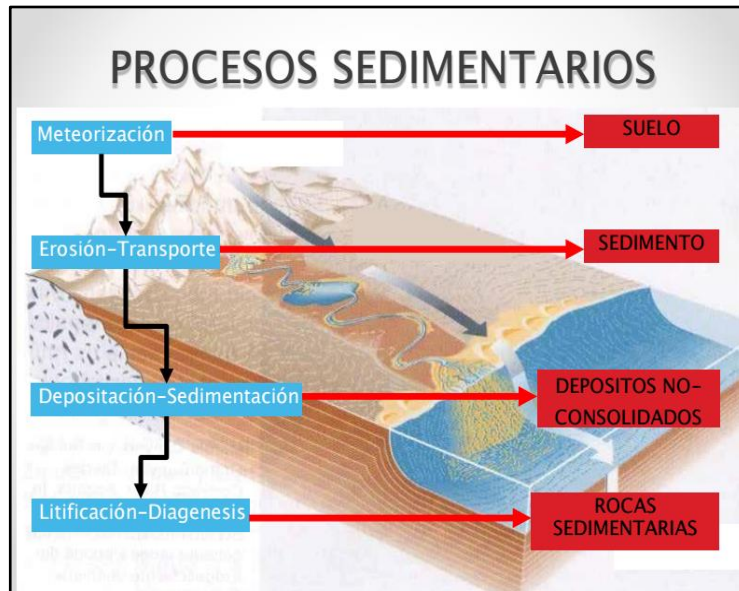
Cambios físicos, químicos y biológicos, debidos a la presión, temperatura (< 200° C), circulación de fluidos, cambios de pH, en condiciones de enterramiento. Pueden ser:

- Disolución.
- Recristalización.
- Reemplazamiento de minerales.
- Cristalización autigénica.

#### 5.1.7.8. Ciclo de sedimentos

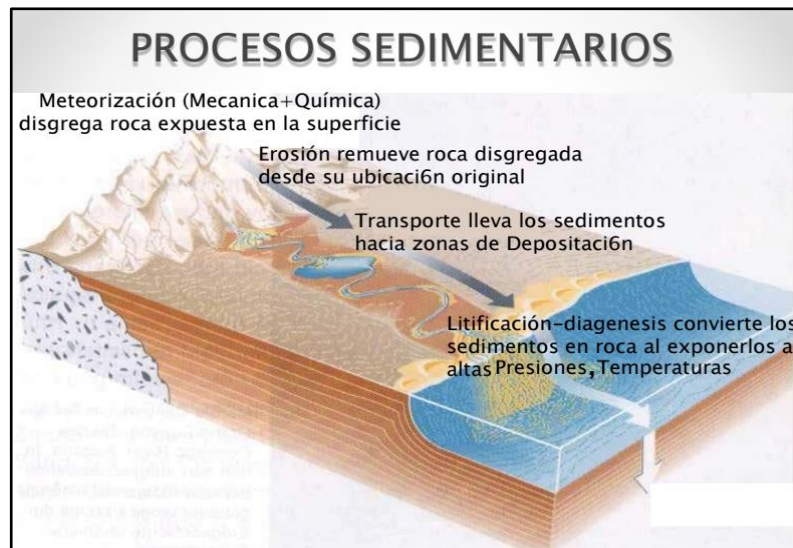
En las siguientes figuras (figura 11 y figura 12) se da a conocer el ciclo de sedimentación de las rocas que hace referencia a un ciclo que comprende la meteorización de una roca existente seguida de su erosión, transporte y sedimentación. Los sedimentos del primer ciclo se caracterizan por la presencia de minerales y fragmentos de roca menos resistentes. Si este material es retrabajado durante un segundo ciclo, los minerales o fragmentos de roca menos resistentes serán eliminados. Cuantos más ciclos sedimentarios sufre un sedimento, éste se hace más maduro y estará dominado por minerales resistentes, bien redondeados.

Figura 11 Ciclo de sedimentos



Fuente: Padilla, A. (Mecánica de Rocas). <https://goo.gl/mqiB3o>

Figura 12 Ciclo de Sedimentos



Fuente: Padilla, A. (Mecánica de Rocas). <https://goo.gl/mqiB3o>

### 5.1.7.9. Geomorfología de la cuenca

Estudia y pretende cuantificar determinados rasgos de la superficie terrestre. La cuenca actúa como un colector que recibe las precipitaciones y las transforma en escurrimientos, esta función se realiza con ciertas pérdidas cuya interrelación con los factores hidrológicos, el clima y configuración del terreno es muy compleja.

### **5.1.8. Estudio Hidrológico de una Cuenca**

El contenido de un estudio hidrológico generalmente no suele variar. Siempre se elaborará según las herramientas que tanto los entes territoriales como las Autoridades Ambientales requieren crear políticas de planeamiento y ordenamiento territorial, en cuanto a la restricción en el asentamiento de las comunidades dentro de las zonas de protección de las fuentes hídricas, las cuales han sido invadidas haciéndolas susceptibles a inundaciones, generando numerosos daños y pérdidas tanto materiales como humanas en las épocas de invierno y precipitaciones máximas.<sup>35</sup>

#### **5.1.8.1. Hidrología**

Cuando se habla de Avenidas Torrenciales es necesario tener en cuenta también el estudio hidrológico de la cuenca donde se desarrolla el evento natural, estudio en el que se tiene en cuenta que el curso fluvial aguas arriba no tiene otros cursos que sobre el que viertan sus aguas, diremos que no hay subcuencas. Si las hay, se contabilizarán también dentro de la cuenca. Posteriormente hay que calcular el umbral de escorrentía, que es el porcentaje de precipitaciones que acaban en el curso respecto de las que infiltradas en el terreno. Para el cálculo de este valor se deberá calcular un coeficiente para cada zona de la cuenca, diferenciando si hay vegetación, tipo de suelo, asfalto, entre otros.

#### **5.1.8.2. Hidráulica**

Para el estudio hidrológico es fundamental tener una buena cartografía en formato digital para modelar el terreno. En caso de que no exista cartografía previa de detalle, es muy recomendable ir al campo para tomar mediante equipos de topografía una serie de perfiles aguas arriba y en la zona de estudio. Una vez se cuente con una buena cartografía, se podrá pasar a modelar el terreno, que servirá después para trabajar con software que simule el comportamiento de las precipitaciones sobre el terreno. Este tipo de programas requieren calcular los coeficientes de Manning, que se suele hacer mediante tablas. Este coeficiente de Manning depende del tipo de material.

#### **5.1.8.3. Modelación Hidráulica**

La modelación hidráulica es la reproducción, a escala reducida, de fenómenos, estados o procesos relevantes del flujo del agua. Las magnitudes físicas o

---

<sup>35</sup> BECERRA O.Y QUIROGA D. Estudio hidrológico de la cuenca del río chipalo. Trabajo de grado Especialización. Bogotá D.C. Universidad Católica De Colombia Facultad De Ingeniería.2014. 14 p.

hidrodinámicas en el “modelo hidráulico” deben corresponder a las magnitudes en la naturaleza, bajo determinadas leyes, que reciben el nombre de “escalas”. La acertada la selección de las magnitudes más relevantes en la representación del fenómeno hidráulico analizado, permitirá una aplicación inmediata de los resultados en la solución de los problemas de saneamiento básico.

Un modelo hidráulico satisface los requerimientos de la similitud geométrica, de la similitud cinemática y, en último término, de la similitud dinámica. En la mayoría de los casos de la ingeniería hidráulica, no es factible económica ni técnicamente la similitud dinámica completa; sin embargo, es posible y científicamente justificable el utilizar los criterios de la similitud dinámica restringida. Esto significa, que el ingeniero debe seleccionar las fuerzas predominantes en determinado fenómeno hidráulico y garantizar, con el diseño y la operación en el modelo, que exclusivamente dichas fuerzas se encuentran simuladas en la escala correspondiente y en forma apropiada. La técnica que estudia el proceso de selección se denomina Análisis Dimensional y Teoría de la Similitud Dinámica, y forma parte no sólo de la ingeniería hidráulica sino de todas las ramas de la ingeniería civil.

Es inevitable, sin embargo, la existencia de fenómenos de importancia secundaria que en el modelo no pueden ser simulados en forma exacta. Esta aparente limitación en la técnica de la modelación hidráulica se conoce como “efectos de escala”, y marca diferencias entre los resultados del modelo con el comportamiento real en el prototipo. El análisis de los efectos de escala es de igual manera parte relevante de la preparación y de la operación de los ensayos experimentales en laboratorio. Los problemas para la modelación hidráulica se relacionan con la garantía de la similitud geométrica, cinemática y dinámica. Estos problemas están interrelacionados y, en la mayoría de los casos, la similitud dinámica es única y exclusivamente una consecuencia del grado alcanzado en las similitudes geométrica y cinemática.<sup>36</sup>

#### **5.1.9. Estudio geológico y geotécnico de una cuenca**

La caracterización geotécnica de suelos representa una valiosa información de las propiedades que éstos tienen frente condiciones como la variación de la humedad ante fenómenos hidrológicos, los vacíos en el suelo o la facilidad con que el agua los atraviesa, todos estos fenómenos tienen que ver con el balance hídrico en una cuenca, por lo que el estudio de los suelos y su relación con

---

<sup>36</sup> M. Castro. «Sobre la Modelación Hidráulica en obras de saneamiento hídrico .Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, 2010.

parámetros hidrológicos es importante en procesos de aplicación de caracterización geotécnica.

Al realizar una caracterización geotécnica de materiales representativos en una cuenca, se puede conocer más detalladamente las condiciones de los suelos a través de parámetros geotécnicos básicos y fáciles de establecer, para poder tenerlos en cuenta dentro del balance hídrico y generar así un nuevo conocimiento que relacione las características del suelo de una cuenca rural con la variación del agua dentro de la misma.<sup>37</sup>

#### **5.1.10. Sistema de información geográfica (SIG) para Zonificación de amenazas por eventos de Torrencialidad**

Un sistema de información geográfica (SIG) es un sistema empleado para describir y categorizar la Tierra y otras geografías con el objetivo de mostrar y analizar la información a la que se hace referencia espacialmente<sup>38</sup>. Para eventos de torrencialidad las herramientas utilizadas para la integración y análisis de datos existentes son:

##### **5.1.10.1. Sistema de Información Geográfico Global Mapper**

Global Mapper es un software de procesamiento de datos SIG (Sistema de Información Geográfica) con todo tipo de información cartográfica y de mapas. El programa puede ejecutarse de forma autónoma o bien integrada como un módulo en otras herramientas GIS, y tiene capacidad para acceder a gran cantidad de repositorios de imágenes, datos topográficos y archivos DEM/DSM.

##### **Características de Global Mapper:**

- Soporte para más de 200 formatos: datos *raster*, de vectores, de elevación, entre otros.
- Importa y exporta desde bases de datos espaciales.
- Incluye soporte para datos KML y KMZ nativos de Google Earth.
- Permite descargar de forma masiva MDT de todo el mundo.
- Transformación de Coordenadas.
- Herramientas de Cálculo de áreas

---

<sup>37</sup>ROJAS NESTOR et al. Caracterización geotécnica de una cuenca para correlación con parámetros del modelo hidrogeológico de Thomas. Trabajo de investigación. Boyacá, Colombia. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2013. 2p.

<sup>38</sup> ESRI. Características ArcGIS (en línea). <<https://www.arcgis.com/features/features.html>> (citado en 14 de marzo de 2017)

- Generación de Curvas de Nivel.
- Análisis de Cuenca Visual.
- Generación de Perfiles Longitudinales.
- Simulaciones de Inundaciones / Subida del Nivel del Mar.
- Análisis de Cuencas de Captación y Red de Drenaje.

#### **5.1.10.2. Sistema de Información Geográfico ArcGIS**

ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG), ArcGIS es utilizada por personas de todo el mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, la empresa, la ciencia, la educación y los medios. ArcGIS permite publicar la información geográfica para que esté accesible para cualquier usuario. El sistema está disponible en cualquier lugar a través de navegadores Web, dispositivos móviles como smartphones y equipos de escritorio.

El SIG ArcGIS funciona como en una infraestructura para elaborar mapas y poner la información geográfica a disposición de los usuarios dentro de un departamento, por toda una organización, entre varias organizaciones y comunidades de usuarios o en Internet, para cualquier usuario interesado en acceder a ella.

Spatial Analyst. Es una de las herramientas que hacen parte de este software y proporciona una amplia posibilidad de recursos relacionados con el análisis espacial de datos. Con esta herramienta se pueden crear, consultar y analizar datos ráster; combinar varias capas ráster; aplicar funciones matemáticas, construir y obtener nueva información a partir de datos ya existentes, etc. Spatial Analyst nos permite: obtener información nueva de los datos existentes; hallar ubicaciones adecuadas; realizar análisis de distancia y coste del trayecto; identificar la mejor ruta existente entre dos puntos; realizar análisis estadísticos e Interpolar valores de datos para un área de estudio determinada.<sup>39</sup>

#### **5.1.10 Metodologías de análisis de susceptibilidad por torrencialidad**

De acuerdo con Ayala Caicedo et al, 2002 el análisis de la susceptibilidad a movimientos de ladera de un zona busca establecer en un área, la propensión

---

<sup>39</sup>ESRI. Características ArcGIS (en línea). <<https://www.arcgis.com/features/features.html>> (citado en 14 de marzo de 2017)

a los movimientos de ladera basado en un análisis de los diferentes factores condicionantes de estos movimientos.<sup>40</sup>

Existen diversos métodos para la evaluación de la susceptibilidad de ocurrencia de eventos de torrencialidad por medio del Sistema de Información Geográfico – SIG, entre los cuales se distinguen los siguientes: Geomorfológica, Determinística, Heurística, Estadísticas e Inventario.

#### **5.1.11.1 Metodología Geomorfológica**

Establece las condiciones de inestabilidad de las laderas con el empleo de técnicas geomorfológicas y cartográficas<sup>41</sup> que deben contener subunidades geomorfológicas, deslizamientos y flujos de detritos antiguos y recientes y se puede trabajar a escala regional (1:100000), media (1:25000) y grande (1:10000)<sup>42</sup>. La desventaja es la subjetividad alta y el análisis depende del experto.

#### **5.1.11.2 Metodología Mapa de Combinación Cualitativo o Heurístico**

Se basa en el conocimiento de los factores que producen la inestabilidad en la ladera objeto del estudio, los cuales son organizados y se les dan los pesos de acuerdo a lo que se espera del flujo de detritos, es decir, el método tiene alto grado de subjetividad por depender de los expertos (Guzzetti, Carrara, Cardinali, & Reichenbach, 1999). Este método requiere de la siguiente información: Subunidades geomorfológicas, inventario de deslizamientos recientes, modelo digital del terreno, mapa de pendientes, mapa de dirección de la pendiente, longitud de la pendiente, convexidades y concavidades, litología, geología estructural, infraestructura reciente, uso de la tierra reciente y drenaje y se trabaja en escala regional y media.<sup>43</sup>

#### **5.1.11.3 Metodología estadística**

Se basa en la relación de los factores condicionantes y la distribución de los movimientos en masa en el tiempo y es aplicable cuando se cuenta con gran cantidad de información cualitativa y cuantitativa y se pueden utilizar los métodos univariados y multivariados.

---

<sup>40</sup>AYALA, F. J et al (2002). Mapas de susceptibilidad a movimientos de ladera usando técnicas SIG, publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España (ITGE), Madrid.

<sup>41</sup>GARCÍA, M. (2009). Guía para la elaboración de mapas de inventario y susceptibilidad de movimientos de ladera. España: IGME.

<sup>42</sup>WESTEN, R. S. (1996). SLOPE INSTABILITY: THE ROLE OF REMOTE SENSING AND GIS IN RECOGNITION, ANALYSIS AND ZONATION. International Institute for Aerospace Surveys and Earth Sciences 7500 Enschede AA, The Netherlands

<sup>43</sup> WESTEN, R. S. Op. cit. p .17

La confiabilidad y exactitud del método depende de calidad y cantidad de los datos adquiridos<sup>44</sup>. La información con que deben contar los métodos estadísticos es la siguiente: Subunidades geomorfológicas, inventario de deslizamientos recientes, modelo digital del terreno, mapa de pendientes, mapa de dirección de la pendiente, longitud de la pendiente, convexidades y concavidades, litología, geología estructural, infraestructura reciente, uso de la tierra reciente y drenaje.<sup>45</sup> La base de este tipo de evaluaciones es el inventario de movimientos en masa. Su aplicación está dada para evaluaciones de escala intermedia a grande, resultando ventajosa su alta objetividad y reproducibilidad, lo que permite verificar los resultados. Con el objetivo de conseguir un mayor grado de objetividad y que los mapas de susceptibilidad se puedan reproducir por investigadores diferentes se han aplicado técnicas de análisis estadístico en la evaluación de susceptibilidad. El fundamento del método de análisis bivariante se basa en el análisis cruzado de los mapas de variables y en el cálculo de densidad de movimientos en cada posible combinación de variables.

#### **5.1.11.4 Metodología Determinística**

Es utilizado para estudios de inestabilidad en el caso particular de taludes.<sup>46</sup> El método se basa en modelos numéricos y con información primaria obtenida de muestras del suelo por medio de laboratorios de suelos (parámetros geotécnicos).<sup>47</sup> La información necesaria para utilizar este método es la siguiente: Subunidades geomorfológicas, inventario de deslizamientos recientes, modelo digital del terreno, mapa de pendientes, mapa de dirección de la pendiente, longitud de la pendiente, convexidades y concavidades, litología, geología estructural, infraestructura reciente, uso de la tierra reciente y drenaje y se trabaja en escala grande<sup>48</sup>. El método tiene la desventaja que no se puede aplicar para áreas mayores que las laderas analizadas y no se puede realizar una zonificación rápida.<sup>49</sup>

#### **5.1.11.5 Metodología Probabilística**

El análisis probabilista del riesgo tiene como objetivo fundamental determinar las distribuciones de probabilidad de las pérdidas que pueden sufrir en lapsos dados los activos expuestos, como consecuencia de la ocurrencia de amenazas naturales, integrando de manera racional las incertidumbres que existen en las diferentes partes del proceso.

---

<sup>44</sup> GARCÍA. Op. cit. p. 28

<sup>45</sup> WESTEN, R. S. Op. cit. p. 24

<sup>46</sup> GARCÍA. Op. cit. p. 37

<sup>47</sup> Ibid. p. 42.

<sup>48</sup> WESTEN, R. S. Op. cit. p. 30

<sup>49</sup> GARCÍA. Op. cit. p. 43

El procedimiento de cálculo probabilista consiste entonces, en forma resumida, en evaluar las pérdidas en el grupo de activos expuestos durante cada uno de los escenarios que colectivamente describen la amenaza, y luego integrar probabilísticamente los resultados obtenidos utilizando como factores de peso las frecuencias de ocurrencia de cada escenario.

El análisis probabilista de riesgo involucra incertidumbres que no pueden despreciarse y deben propagarse a lo largo del proceso de cálculo. El presente numeral describe las bases generales de cálculo para alcanzar el objetivo planteado.

Considerando el objetivo básico del análisis probabilista del riesgo expuesto anteriormente, es necesario plantear entonces la metodología específica de cálculo de las frecuencias de ocurrencia de niveles específicos de pérdidas asociados a los activos expuestos en lapsos determinados de tiempo y ante la ocurrencia de amenazas naturales. El riesgo por amenazas naturales es comúnmente descrito mediante la llamada curva de excedencia de pérdidas (loss curve) que especifica las frecuencias, usualmente anuales, con que ocurrirán eventos en que se exceda un valor especificado de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como tasa de excedencia, y puede calcularse mediante la siguiente ecuación, que es una de las múltiples formas que adopta el teorema de la probabilidad total:

$$v(p) = \sum_{i=1}^{Eventos} \Pr(P > p | Evento i) F_A(Evento i) \quad \text{Ec.1}$$

En la ecuación anterior  $v(p)$  es la tasa de excedencia de la pérdida  $p$  y  $F_A(Evento i)$  es la frecuencia anual de ocurrencia del evento  $i$ , mientras que  $\Pr(P > p | Evento i)$  es la probabilidad de que la pérdida sea superior a  $p$ , dado que ocurrió el  $i$ -ésimo evento. La suma en la ecuación anterior se hace para todos los eventos potencialmente dañinos. El inverso de  $v(p)$  es el periodo de retorno de la pérdida  $p$ , identificado como  $Tr$ .

En vista de la Ecuación 1, la secuencia de cálculo probabilista de riesgo es la siguiente:

1. Para un escenario, determinar la distribución de probabilidades de la pérdida en cada uno de los bienes de expuestos.
2. A partir de las distribuciones de probabilidad de las pérdidas en cada bien, determinar la distribución de probabilidad de la suma de estas pérdidas, tomando en cuenta la correlación que existe entre ellas.

3. Una vez determinada la distribución de probabilidad de la suma de las pérdidas en este evento, calcular la probabilidad de que esta exceda un valor determinado.

4. La probabilidad determinada en el inciso anterior, multiplicada por la frecuencia anual de ocurrencia del evento, es la contribución de este evento a la tasa de excedencia de la pérdida.<sup>50</sup>

#### **5.1.11.6 Método Bivariado**

El método bivariado es un procedimiento experimental con el que se intenta estudiar la influencia de dos o más variables independientes sobre una variable dependiente.

En los análisis estadísticos de amenaza por avenida torrencial se combinan factores que han generado dichos eventos en el pasado y que se pueden determinar de forma estadística. En el análisis estadístico bivariado cada factor condicionante (como la geología, la geomorfología, la pendiente, la hidráulica, el inventario de procesos y la cobertura vegetal), se combina con una variable muy importante e influyente cuando se habla de una avenida torrencial como lo es el ciclo de sedimentos y se calculan valores ponderados del número de píxeles de la variable ciclo de sedimentos para cada factor condicionante.

Para este método se involucran tres pasos:

- (a) El ciclo de sedimentos
- (b) El mapeo de los parámetros más significativos (factores condicionantes) y
- (c) La definición de los pesos relativos a cada factor asociado a la localización de la avenida torrencial.

Este método asigna un valor de peso determinado  $W_i$  a cada clase de parámetro, por ejemplo, una unidad geológica o una unidad geomorfológica. Se define el valor  $W_i$  como el logaritmo natural de la densidad de la variable ciclo de sedimentos dentro de la clase, dividido por la densidad de la variable ciclo de sedimentos en general en todo el mapa. A continuación, se presenta la expresión utilizada para la calificación de las unidades al interior de los diferentes factores<sup>51</sup>:

---

<sup>50</sup> CONSORCIO EVALUACIÓN DE RIESGOS NATURALES. Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales. Noviembre 21 de 2011

<sup>51</sup> GONZALES, Milena. Comparación entre los métodos heurístico, estadístico univariado y estadístico bivariado, para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000 en el municipio de santa bárbara,

$$W_i = \ln(\text{Densclas} / \text{Densmap}) = \ln \left[ \frac{N_{\text{pix}}(S_i)}{N_{\text{pix}}(N_i)} \frac{\sum N_{\text{pix}}(S_i)}{\sum N_{\text{pix}}(N_i)} \right] \text{ Ec.3}$$

Donde:

$W_i$  = Ponderación de determinado parámetro de clase (peso)

Densclas = Densidad de la variable ciclo de sedimentos dentro del parámetro de clase.

DensMap = Densidad de la variable ciclo de sedimentos dentro de todo el mapa.

$N_{\text{pix}}(S_i)$  = Número de pixeles que contienen la variable ciclo de sedimentos dentro de un determinado parámetro de clase.

$N_{\text{pix}}(N_i)$  = Número total de pixeles en un determinado parámetro de clase.

## 5.2 MARCO LEGAL

Para identificar este marco claramente se enuncian a continuación las distintas normas y decretos que rigen la gestión del riesgo en Colombia y son usadas en los casos de procesos por avenida torrencial.

Tabla 3 Normas y decretos.

<b>Ley, Decreto, Norma</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>
Decreto 1807 / 2014 <sup>52</sup>	Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial.	<b>Art 3.</b> Se deben elaborar estudios en los suelos urbanos, de expansión urbana y rural para los fenómenos de inundación, <b>avenidas torrenciales</b> y movimientos en masa. <b>Art 10.</b> Estudios básicos de amenaza por avenidas torrenciales. Para determinar las condiciones de amenaza por avenida torrencial en suelos urbanos, de expansión urbana y rural, los estudios básicos tienen las

departamento de Antioquia. Trabajo de grado Geólogo. Medellín.: Universidad Eafit. Departamento de ciencias de la tierra, 2015.13 p

<sup>52</sup>COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto 1807 de 2014, Reglamentación del artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012. Bogotá, D.C., 2014. p.4-10

Tabla 3. (Continuación)

<b>Ley, Decreto, Norma</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>
		<p>siguientes especificaciones mínimas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Área de estudio</li> <li>● Insumos</li> <li>● Alcance</li> <li>● Productos</li> </ul> <p><b>Art 11.</b> Delimitación y zonificación de las áreas con condición de amenaza. 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</p>
		<p>proponga su desarrollo.</p> <p><b>Art 12.</b> Delimitación. Y zonificación de las áreas con condición de riesgo. 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.</p> <p><b>Art 13.</b> Determinación de medidas de Intervención. Con base en los resultados de los estudios básicos, se deben determinar las medidas de mitigación no estructurales orientadas a establecer el modelo de ocupación del territorio y las restricciones o condicionamientos para el uso del suelo cuando sea viable, mediante la determinación de normas urbanísticas.</p>

Tabla 3. (Continuación)

<b>Ley, Decreto, Norma</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>
Ley 1523/2012 <sup>53</sup>	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.	<b>Art 55.</b> Desastre. se entiende por desastre el resultado que se desencadena de la manifestación de uno o varios eventos naturales o antropogénicos no intencionales que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en las personas, los bienes, la infraestructura, los medios de subsistencia, la prestación de servicios o los recursos ambientales, causa daños o
		Pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, generando una alteración intensa, grave y extendida en las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad, que exige al Estado y al sistema nacional ejecutar acciones de respuesta, rehabilitación y reconstrucción.
Ley 019/2012 <sup>54</sup>	Por el cual se dictan normas para suprimir o reformar regulaciones, procedimientos y trámites innecesarios existentes en la Administración Pública	<b>Art 189.</b> Se procederá a la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo del plan de ordenamiento territorial o la expedición del nuevo plan de ordenamiento territorial cuando se garantice la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza y la delimitación y zonificación de las áreas con condiciones de riesgo además de la determinación de las medidas específicas para su mitigación, la cual deberá incluirse en la cartografía correspondiente

<sup>53</sup>COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1523 de 2012, Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.

<sup>54</sup> COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 019 de 2012, Por el cual se dictan normas para suprimir o reformar regulaciones, procedimientos y trámites innecesarios existentes en la Administración Pública.

Tabla 3. (Continuación)

<b>Ley, Decreto, Norma</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>
Decreto 1626/2015 <sup>55</sup>	Por medio del cual se reglamenta el procedimiento para las correcciones y precisiones de la cartografía oficial del	<b>Art 4.</b> Procedimiento para las precisiones cartográficas derivadas de los resultados de los estudios de detalle de amenaza, vulnerabilidad y riesgo. Cuando existan estudios de detalle que permitan determinar.
	Plan de Ordenamiento Territorial –POT-, la incorporación cartográfica de los resultados de los estudios de detalle y se asigna una función.	Con mayor exactitud las condiciones jurídicas, geológicas, morfológicas, hidrogeológicas, hidráulicas, hidrológicas, hidrogeológicas y geomorfológicas de los terrenos, se precisará la cartografía oficial.
Decreto 1077 / 015 <sup>56</sup>	Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio	Sección 8 subsidio familiar de vivienda para desastres naturales, calamidad pública o emergencia <b>Art 2.1.1.1.8.1.1.</b> Campo de aplicación. La presente subsección se aplica a los procesos de postulación, asignación y aplicación del Subsidio Familiar de Vivienda Urbano y Rural que otorga, respectivamente, el Fondo Nacional de Vivienda y el Banco Agrario de Colombia S.A., para la atención de hogares que han perdido la totalidad de su vivienda o esta ha sido afectada como consecuencia de una situación de desastre.

<sup>55</sup> COLOMBIA, ALCALDIA DE MEDELLIN, Decreto 1626 de 2015, Por medio del cual se reglamenta el procedimiento para las correcciones y precisiones de la cartografía oficial del Plan de Ordenamiento Territorial – POT.

<sup>56</sup> COLOMBIA, MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1077 de 2015. Bogotá, D.C.,2015.p.105

Tabla 3. (Continuación)

<b>Ley, Decreto, Norma</b>	<b>Descripción</b>	<b>Aplicación</b>
Ley 388 / 1997 <sup>57</sup>	Por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989, y la Ley 3ª de 1991 y se dictan otras disposiciones.	<p><b>Art. 12.</b> Contenido del componente general del plan de ordenamiento. La determinación y ubicación en planos de las zonas que presenten alto riesgo para la localización de asentamientos humanos, por amenazas o riesgos naturales o por condiciones de insalubridad</p> <p><b>Art 30.</b> Clases de suelo. Los planes de ordenamiento territorial clasificará el territorio de los municipios y distritos en suelo urbano, rural y de expansión urbana. Al interior de estas clases podrán establecerse las categorías de suburbano y de protección, de conformidad con los criterios generales establecidos en los artículos siguientes.</p>

Fuente: Elaboración Propia

<sup>57</sup> COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 388 de 1997, por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989, y la Ley 3ª de 1991.

## **6. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **6.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN**

La presente investigación está asociada a un enfoque mixto ya que aborda tanto características de un enfoque cualitativo como cuantitativo dentro de una investigación.

La investigación se da entorno a proponer una metodología para la evaluación de amenaza por eventos de avenida torrencial, aborda un enfoque cualitativo considerando que se tiene como referencia las metodologías ya elaboradas para este tipo de eventos, lo cual ayuda a identificar causas, factores y variables influyentes con el fin de poder plantear una metodología para la zonificación de amenazas por avenidas torrenciales, es decir proponer una metodología con base a las ya existentes.

Por otro lado se puede decir que dicha investigación aborda un enfoque cuantitativo teniendo en cuenta que se utilizara la recolección de datos estadísticos (precipitaciones, índices morfométricos, parámetros determinantes de potencialidad torrencial, etc.) con el fin de analizar lugares y momentos donde recurren las avenidas torrenciales.

### **6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Para este proyecto se establece una investigación de tipo ex-pos-facto, en donde se buscará obtener las causas y efectos de eventos por avenidas torrenciales ocurridos en el pasado, determinar factores y variables que los afectan.

Por otra parte, la investigación tendrá una etapa de tipo de proyectiva, teniendo en cuenta el objetivo general el cual se centra en establecer una metodología para evaluación de la amenaza por eventos de avenida torrencial manejando una escala de trabajo 1:2000, como solución a la necesidad que producen la ocurrencia de estos eventos.

### 6.3 DEFINICIÓN Y OPERACIÓN DE LAS VARIABLES

La tabla 4, permite evidenciar la definición y operación de las variables en el proyecto.

Tabla 4 Variables de operación

Variable	Indicador	Descripción	Medición
Pendientes	Inclinación del terreno en el lugar de estudio.	Se trabaja con base a los rangos Establecidos y al raster de pendientes.	%
	Distribución espacial del área en el lugar de estudio.		
Precipitación	Distribución espacial en el área de estudio de la precipitación.		mm
	Determinación de valores de precipitación pico en pocas horas		
Materiales superficiales	La distribución espacial de los diferentes materiales derivados de acumulaciones o transformaciones de materiales existentes en superficie donde se llevará a cabo estudio.	Mapa de Geomorfología o también denominado como de relieve regional.	
Cobertura y clasificación Morfométrico	La distribución espacial de las áreas destinadas a los diferentes usos, discriminando. Los tipos de uso agrícola.	Mapa de Clasificación Morfométrico.	%

Fuente: Elaboración Propia

### 6.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Teniendo en cuenta el enfoque y el tipo de investigación que se desarrollara, es necesario obtener información secundaria por medio de datos de las siguientes instituciones:

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), es la institución en donde se obtendrán los valores estadísticos de precipitación, niveles de caudales en ríos y cuencas.
- Unidad nacional para la gestión del riesgo de desastres (UNGRD), es sumamente importante conocer información de eventos ya ocurridos por avenidas torrenciales y conocer las causas y las consecuencias.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), es el lugar en donde se encontrará la cartografía necesaria para la zonificación de nivel de amenaza.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), es la entidad en donde podremos solicitar información sobre planes, programas y proyectos sobre medio ambiente y recursos naturales renovables, procedimientos metodológicos para la zonificación de riesgos.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC), solicitaremos la información que sea necesaria para nuestra investigación respecto a datos de investigación científica básica y aplicada del potencial de recursos del subsuelo, para obtener datos e información del subsuelo del territorio nacional, como la información geo científica del subsuelo, para investigar la evaluación, la composición y los procesos que determinan la actual morfología, estructura y dinámica del subsuelo colombiano.

Para la investigación es fundamental hacer uso del Sistema de Información Geográfico (SIG), el software más recomendable es ArcGIS ya que es un sistema empleado para describir y categorizar la tierra, con el objetivo de mostrar y analizar la información a la que hace referencia, permitiendo obtener Modelo Digital de Terreno (MDT) de todo el territorio, curvas de nivel, herramientas para el cálculo de áreas, transformación de coordenadas entre otro tipo de información necesario para el óptimo desarrollo de la investigación.

## **6.5 FASES DE LA INVESTIGACIÓN**

Las fases de investigación se dan a partir de los objetivos específicos, donde se plantea el paso a paso de la investigación para así llegar al objetivo general, como se observa en la tabla 5, propuesta de la siguiente manera:

Tabla 5 Fases de la investigación.

<b>FASES</b>	<b>ACTIVIDADES</b>
<p>1. Identificación de las causas que provocan procesos de avenida torrencial.</p>	<p>1.1. Recopilar información secundaria en entidades nacionales e internacionales, relacionadas con las causas que provocan a las avenidas torrenciales.</p> <p>1.2. Realizar una matriz comparativa teniendo en cuenta las características encontradas tienen parámetros y variables que fueron utilizados y evaluados en las metodologías y antecedentes a nivel nacional e internacional.</p> <p>1.3. Con base en la matriz comparativa realizar una matriz DOFA con el fin de analizar las fortalezas y debilidades y como aprovechar cada una de sus oportunidades,</p>
<p>2. Determinación de los factores influyentes en eventos por torrencialidad.</p>	<p>2.1. Realizar una lista de factores influyentes en la generación de eventos por torrencialidad, teniendo en cuenta la información ya recolectada.</p> <p>2.2. Describir las consecuencias que puede llegar a generar las variables a involucrar en la generación de eventos por torrencialidad.</p>
<p>3. Diagnosticar la interacción entre los factores y variables que pueden causar avenidas torrenciales.</p>	<p>3.1. Analizar los factores y las variables que se consideran generan los eventos por avenida torrencial.</p> <p>3.2. Realizar un análisis de grado de importancia de cada una de las variables teniendo como referencia un rango de alta, media y baja influencia.</p> <p>3.3. Elección y análisis de las variables definitivas que se van a emplear en el planteamiento de la metodología.</p> <p>3.3. Explicación del método bivariado para plantear la metodología.</p>

Tabla 5. (Continuación)

<b><i>FASES</i></b>	<b><i>ACTIVIDADES</i></b>
4. Proponer la metodología para la evaluación de amenaza por eventos de avenida torrencial a escala 1:2000.	4.1. Desarrollo de cada una de las variables con el método bivariado. 4.2. Establecer un flujograma para el desarrollo de la metodología. 4.3. Concluir a que se llega finalmente con la metodología.

Fuente: Elaboración Propia

## **7. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

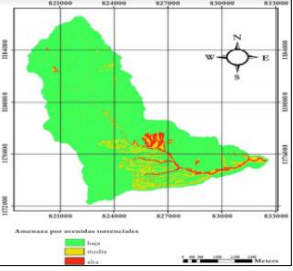
### **7.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS CAUSAS QUE PROVOCAN PROCESOS DE AVENIDA TORRENCIAL**

Para cada una de las metodologías investigadas se realizó una matriz para identificar los factores y variables que fueron evaluados para obtener los mapas de zonificación, de igual manera se explica las conclusiones de cada una de estas metodologías y de qué manera aporta en la propuesta de una metodología para la evaluación de amenaza por eventos de avenida torrencial a escala 1:2000, como se observa en la tabla 6.

#### **7.1.1 Información nacional e internacional**

En la Tabla 6 se describe la información nacional e internacional en orden cronológico, con el fin de tener presente el tiempo en el que se desarrollaron esta metodología.


Tabla 6 Matriz de análisis de información de los artículos recopilados

N º	METODOLOGIA	LUGAR	AÑO	FACTORES Y VARIABLES	MAPA DE ZONIFICACION	CONCLUSION	APOORTE A LA INVESTIGACION
1	Evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales utilizando metodologías cualitativas. Caso de aplicación a la quebrada doña maría <sup>58</sup>	Antioquia , Colombia	2008	Volumen de sedimentos Precipitaciones Geomorfología Topografía Pendiente Distancia a los cauces El flujo acumulado Geología Geomorfología		Se ha presentado la aplicación de una metodología cualitativa de valoración de zonas de amenaza por avenidas torrenciales, en la cual mediante la ponderación de los diferentes factores ya evaluados y el índice de Melton para la microcuenca se identifican zonas de amenaza a avenidas torrenciales.	Esta metodología aporta los datos y variables que se pueden tener en cuenta para la aplicación de un método cualitativo con el fin de asignar el nivel de amenaza sobre la red de drenaje modelada

Fuente: Elaboración Propia

<sup>58</sup> MONTOYA, Luis. SILVA, Sandra. GONZALES, Juan. Evaluación de zonas de amenaza por avenidas Torrenciales utilizando metodologías cualitativas. Caso de aplicación a la quebrada doña maría. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín, julio-diciembre de 2009, vol 8, No. 15, p 13 - ISSN 1692-3324

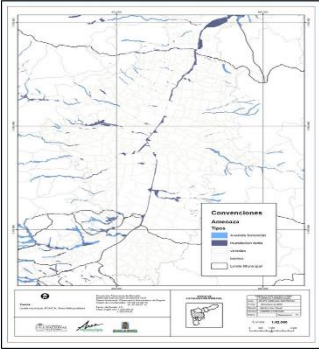
Tabla 6. (Continuación)

Nº	METODOLOGIA	LUGAR	AÑO	FACTORES Y VARIABLES	MAPA DE ZONIFICACION	CONCLUSION	APORTE A LA INVESTIGACION
2	Zonificación de riesgo por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales <sup>59</sup>	Antioquia, Colombia	2012	Clima Zonas de vida Clasificación Morfométrica Precipitación Geomorfología Coeficiente de Compacidad Densidad de Drenaje		<p>Cuando se trata de dar aportes a una metodología para la zonificación de amenaza por avenida torrencial, es necesario tener en cuenta distintos factores, desde la morfometría de la cuenca estudiada hasta pequeños aspectos como el clima, en este caso se encontró que muchos de los eventos ocasionados han sido por la acción humana en el suelo y las fuertes precipitaciones presentadas.</p>	<p>Basados en los factores de la morfometría se pueden evaluar os eventos ocasionados han sido por la acción humana en el suelo y las fuertes precipitaciones presentadas.</p>

Fuente: Elaboración Propia

<sup>59</sup> GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA, CONVENIO CORNARE. Zonificación de riesgo por movimientos en masa inundación y avenidas torrenciales. Atención de áreas afectadas por eventos desastrosos. Municipio de Cocorna. 2012.p.05

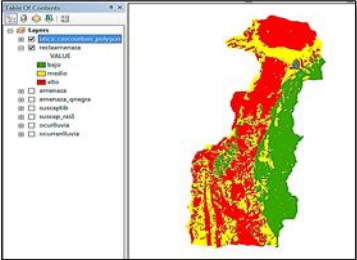
Tabla 6. (Continuación)

Nº	METODOLOGIA	LUGAR	AÑO	FACTORES Y VARIABLES	MAPA DE ZONIFICACION	CONCLUSION	APORTE A LA INVESTIGACION
3	Metodología empleada para la construcción del mapa de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales <sup>60</sup>	Medellín, Colombia	2013	Morfología Precipitación Demografía		Para la clasificación de los niveles de riesgo, se realizó un análisis del mapa de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales a escala 1:2.000, la caracterización de áreas que tienen una probabilidad importante de presentar daños y pérdidas como consecuencia de desbordamientos o avenidas torrenciales en vulnerabilidad global.	Los mapas de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales aportan a la investigación una base de información que puede facilitar la clasificación de niveles de riesgo una zona.

Fuente: Elaboración Propia

<sup>60</sup> ROJAS NESTOR et al. Caracterización geotécnica de una cuenca para correlación con parámetros del modelo hidrogeológico de Thomas. Trabajo de investigación. Boyacá, Colombia. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2013

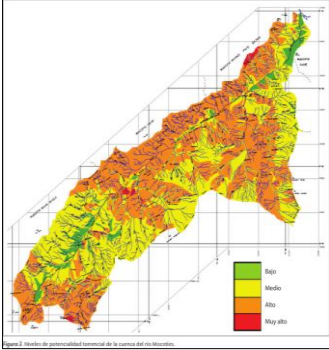
Tabla 6. (Continuación)

Nº	METODOLOGIA	LUGAR	AÑO	FACTORES Y VARIABLES	MAPA DE ZONIFICACION	CONCLUSION	APOORTE A LA INVESTIGACION
4	Metodología para la evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia <sup>61</sup>	Colombia	2015	Geomorfología. Geología. Clima y cobertura vegetal Precipitación Índice de Susceptibilidad		El análisis de susceptibilidad a la ocurrencia de flujo de detritos se realizó mediante la implementación del método estadístico bivariante que se fundamenta en el análisis superpuesto entre el mapa de inventario de flujo de detritos y los mapas de los factores condicionantes considerados.	Los aportes de esta metodología son basados en el análisis estadístico bivariado para la zonificación de la susceptibilidad de deslizamiento comparada cada capa de datos del factor (unidades geomorfológicas, litología, pendientes, etc) con la distribución de deslizamientos presentes.

Fuente: Elaboración Propia

<sup>61</sup> COLOMBIA, ALCALDIA DE MEDELLIN, Decreto 1626 de 2015, Por medio del cual se reglamenta el procedimiento para las correcciones y precisiones de la cartografía oficial del Plan de Ordenamiento Territorial –POT.

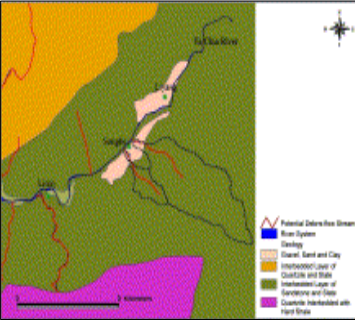
Tabla 6. (Continuación)

Nº	METODOLOGIA	LUGAR	AÑO	FACTORES Y VARIABLES	MAPA DE ZONIFICACION	CONCLUSION	APORTE A LA INVESTIGACION
5	Determinación de niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del río Mocotíes <sup>62</sup>	Mérida, Venezuela	2009	Precipitación Estabilidad Relativa Morfometría Índice de Protección del suelo		La metodología representa una herramienta de apoyo para la identificación y localización de zonas potencialmente torrencial lo cual facilita la aplicación de metodologías específicas para el diseño de medidas en vertientes y obras de corrección de torrentes tendentes a minimizar o mitigar los efectos y consecuencias de las crecidas torrenciales.	Los factores y variables que se tomaron como base de estudio son un importante aporte, ya que permite la identificación y localización de zonas potencialmente torrenciales.

Fuente: Elaboración Propia

<sup>62</sup> RIVAS MARIBEL et al. Determinación de niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del río Mocotíes, Mérida, Venezuela. Trabajo de investigación. Mérida, Venezuela. Revista Forestal Venezolana, Año XLIII, Volumen 53 (1) enero-junio, 2009... 33 p.


Tabla 6. (Continuación)

Nº	METODOLOGIA	LUGAR	AÑO	FACTORES Y VARIABLES	MAPA DE ZONIFICACION	CONCLUSION	APORTE A LA INVESTIGACION
6	Evaluación del riesgo de los flujos de escombros en el arroyo, Taiwan <sup>63</sup>	Taiwan	2011	Precipitación		El riesgo es clasificado teniendo en cuenta tanto la intensidad de la amenaza y probabilidad de ocurrencia. No se tiene en cuenta la vulnerabilidad y el riesgo corresponde a un análisis semicuantitativo, sin tener en cuenta el tipo de afectaciones. Solo aplica para las condiciones de la cuenca del río Songhe Stream en Taiwan.	En esta investigación se considera como factor detonante la intensidad de la lluvia utilizando la fórmula sencilla de caudal pico pero no considera factores contribuyentes como el tipo de roca, topografía, geomorfología, entre otros

Fuente: Elaboración Propia

<sup>63</sup> LIN, J.-Y., YANG, M.-D., LIN, B.-R., & LIN, P.-S. (2011). Risk assessment of debris flows in Songhe Stream, Taiwan. Engineering Geology, 100-112.

Tabla 6. (Continuación)

Nº	METODOLOGIA	LUGAR	AÑO	FACTORES Y VARIABLES	MAPA DE ZONIFICACION	CONCLUSION	APORTE A LA INVESTIGACION
7	Umbral de lluvia para el inicio de flujos de escombros canalizados en una pequeña cuenca basada en la medición in situ <sup>64</sup>	Fenghua, China	2016	Precipitación		La aplicabilidad del método del umbral de lluvia en la predicción del inicio de flujos de escombros canalizados fue investigada para una pequeña cuenca utilizando mediciones de campo de los datos de lluvia y escorrentía.	Se demostró mediante el cálculo del grado GRA que la intensidad de la lluvia era el indicador más importante, otros factores son indispensables para determinar la escorrentía, como la duración y profundidad de la precipitación. La variación de la escorrentía se predijo mediante el uso de tres, los modelos lineales.

Fuente: Elaboración Propia

<sup>64</sup> LAN, H. ZHOU, CH. WANG, LJ. ZHANG, HY. LI, R (2004) Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. Eng Geol 76:109–128.

### **7.1.2 Matriz DOFA con la información de la anterior matriz de análisis de información de los artículos recopilados.**

Para cada una de las metodologías investigadas, se realizó una matriz DOFA donde se expresa las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas, con el fin de usar las fortalezas para aprovechar las oportunidades, minimizar las debilidades aprovechando, usar las fortalezas para reducir las amenazas y minimizar las debilidades para evitar las amenazas, todo esto como se evidencia de la tabla 7 a la tabla 13.

Tabla 7 Matriz DOFA METODOLOGÍA 1

<b>DOFA</b>	<b>FORTALEZAS (F)</b>	<b>DEBILIDADES (D)</b>
<p>METODOLOGIA 1. (EVALUACION DE ZONAS DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES UTILIZANDO METODOLOGIAS CUALITATIVAS. CASO DE APLICACION A LA QUEBRADA DOÑA MARIA.)<sup>65</sup></p>	<p>1. En esta metodología se tuvo en cuenta el estudio de diversas variables como: el tamaño de la cuenca, el intervalo entre la precipitación y la descarga pico, la forma de la cuenca, la localización en altas montañas con relieves abruptos y climas húmedos, la variabilidad en la descarga, y la red de drenajes.</p>	<p>1. En esta metodología, no se pudieron estimar parámetros como la densidad, el volumen de los sedimentos y el caudal de la avenida torrencial ya que los flujos de lodos generados son de difícil modelación. 2. La modelación matemática de los fenómenos descritos en la metodología no se encuentra del todo establecida.</p>
<p><b>OPORTUNIDADES (O)</b> 1. La metodología expuesta involucro un inventario de desastres y el análisis de la cronología de los movimientos en masa y las avenidas torrenciales con la base cartográfica y el MDT. 2. Con la elaboración de la metodología, se obtuvo un mapa de zonificación de amenazas por avenida torrencial y adicional a ello se obtuvieron valores de amenaza para diferentes puntos de control de la cuenca.</p>	<p><b>(FO)</b> Con la recopilación de la información realizada en la creación de la metodología, se puede obtener mapas de zonificación de amenaza, e ir obteniendo nuevas herramientas para dar mejoramiento a la metodología.</p>	<p><b>(DO)</b> Con la elaboración de los mapas de zonificación de amenaza y la implementación de los (SIG), se puede estimar algunos parámetros característicos de la cuenca.</p>

<sup>65</sup> MONTOYA, Luis Op. cit. p.1

Tabla 7. (Continuación)

<b>AMENAZAS (A)</b>	<b>(FA)</b>	<b>(DA)</b>
<p>1. En la metodología planteada, afirman que es difícil asociar una probabilidad de ocurrencia a los fenómenos detonantes de las avenidas, si esto sucede no se podría zonificar las amenazas por avenida torrencial.</p>	<p>Con la información que se obtuvo, los parámetros que se estudiaron, las variables que se manejaron para establecer la metodología, sería posible calcular la probabilidad de que haya amenaza por avenida torrencial.</p>	<p>Para plantear una solución a los problemas presentados en la metodología, se podría entrar a estudiar más parámetros y más variables de las cuencas a estudiar.</p>

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 8 Matriz DOFA METODOLOGÍA 2

<b>DOFA</b>	<b>FORTALEZAS (F)</b>	<b>DEBILIDADES (D)</b>
<p><b>METODOLOGIA 2. (ZONIFICACIÓN DE RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA INUNDACIÓN Y AVENIDAS TORRENCIALES. ATENCIÓN DE ÁREAS AFECTADAS POR EVENTOS DESASTROSOS)<sup>66</sup></b></p>	<p>1. En búsqueda de la protección y el bienestar de la población, CORNARE realizó un proyecto para determinar la amenaza por avenidas torrenciales, inundaciones y movimientos en masa. 2. Esta metodología involucra o tiene en cuenta las zonas de vida donde las divisiones naturales se definen tomando en cuenta las influencias del clima sobre los procesos biológicos.</p>	<p>1. Esta metodología no se centra completamente en avenidas torrenciales, si no que pone su atención también a otros procesos erosivos. 2. Aunque esta metodología tiene en cuenta varios factores para el estudio de amenazas por avenida torrencial (Precipitación, clasificación Morfométrica, geomorfología.), sería necesario también tener en cuenta otras variables como el índice de susceptibilidad, la estabilidad relativa y el índice de protección del suelo.</p>
<p><b>OPORTUNIDADES (O)</b></p> <p>1. Esta metodología se realizó a través de análisis y revisión de información científica disponible, con el fin de conocer la probable ubicación y severidad de los fenómenos naturales peligrosos. 2. La metodología tuvo como resultado la elaboración de un mapa regional de amenazas cada municipio evaluado, los cuales representan un elemento clave para la planificación del uso del territorio y constituyen un insumo imprescindible.</p>	<p><b>(FO)</b></p> <p>En base a las fortalezas planteadas, se puede decir que primero en búsqueda del bienestar de la población , y en base a las herramientas utilizadas y las variables estudiadas, se puede generar una metodología que arroje mapas de zonificación de amenazas en la zona a estudiar</p>	<p><b>(DO)</b></p> <p>Al ver que la metodología no abarca todas las variables y aspectos necesarios , y adicional a ello que no es una metodología solamente enfocada en avenidas torrenciales , se puede decir que si es posible establecer mapas por amenazas de avenida torrencial , pero que es necesario el estudio de otras variables</p>

<sup>66</sup> GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA, CONVENIO CORNARE. Op. cit. p.1

Tabla 8. (Continuación)

<b>AMENAZAS</b>	<b>(A)</b>	<b>(FA)</b>	<b>(DA)</b>
<p>1. Cuando se fueron a mirar las características de forma de las cuencas torrenciales estudiadas, no se pudieron utilizar los SIG, porque los datos de precipitación encontrados mostraban los valores pico para región, pero no los mínimos.</p> <p>2. Al final cuando se fue a generar el mapa de amenaza por torrencialidad, se realizó un algebrada mapa, donde se vieron varias dificultades en el resultado por ejemplo en la clasificación morfométrica de la cuenca, fue la razón por la que se decidió desestimar el resultado de este análisis como un índice de clasificación superficial sectorial del territorio de la cuenca.</p>	<p>En vista de que la metodología establecida , tuvo varias dificultades en cuanto al manejo de los Sistemas de Información Geográfica, esto debido a que no se tuvo toda la información necesaria para poderlos utilizar de la mejor manera y que también se tuvieron varias ventajas en cuanto la información seleccionada, se podría trabajar con la información obtenida completamente para generar el álgebra de mapas con los SIG</p>	<p>Se quiere tratar de evitar malos resultados con el uso de los SIG, es por eso que es muy necesario tener una base de datos completa, que brinde las información necesaria para poder plantear de la mejor manera la metodología para la zonificación de amenazas por avenida torrencial</p>	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9 Matriz DOFA METODOLOGÍA 3

<b>DOFA</b>	<b>FORTALEZAS (F)</b>	<b>DEBILIDADES (D)</b>
<p><b>METODOLOGIA 3. (METODOLOGÍA EMPLEADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MAPA DE AMENAZA POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES)<sup>67</sup></b></p>	<p>1. Se tienen en cuenta factores morfológicos que se presentan en algunas corrientes, en especial al interior del casco urbano.</p> <p>2. Esta metodología parte de la identificación de las áreas ocupadas, urbanizadas o habitadas donde se han presentado eventos que fueron objeto de programas de reasentamiento y que en gran parte se encuentran nuevamente ocupadas con vivienda.</p>	<p>Aunque esta metodología tiene en cuenta factores morfológicos y datos de precipitación falta realizar un estudio para evaluar factores de índice de protección del suelo.</p>
<p><b>OPORTUNIDADES (O)</b></p> <p>1. La metodología fue establecida para determinar avances en la incorporación de la gestión del riesgo en la revisión del pot – mapas de amenaza y riesgo.</p> <p>2. La metodología tuvo como resultado la elaboración de un mapa regional de amenazas, en los años 2009 y 2013 en donde se pueden evidenciar los índices de desbordamientos y escorrentía.</p>	<p><b>(FO)</b></p> <p>Teniendo en cuenta las fortalezas planteadas, se observa que la metodología es de gran utilidad basándonos en la zonificación establecida en sus mapas de amenaza.</p>	<p><b>(DO)</b></p> <p>La metodología se enfocó en tres aspectos principales: análisis y depuración de información secundaria, fotointerpretación multitemporal de las corrientes y el análisis geomorfológico para la definición de los procesos y calificación de la amenaza, lo que permite hacer uso de esta información para realizar los mapas de zonificación.</p>

<sup>67</sup> ROJAS NESTOR et al. Op. cit. p.1

Tabla 9. (Continuación)

<b>AMENAZAS (A)</b>	<b>(FA)</b>	<b>(DA)</b>
<p>1. Teniendo en cuenta que se tomó como punto de partida, la revisión cartográfica y depuración de las manchas de inundación incluidas en el mapa de amenaza elaborado en el 2009, la segunda actualización de la red hídrica del año 2011, los Planes Especiales de Ordenamiento existentes para las principales cuencas del municipio, es posible que la metodología solo sirva para evaluar casos en los que se cuente con esta misma información.</p>	<p>Sabiendo que en la metodología se encontraron falencias en el análisis del mapa de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales que estaba en construcción a escala 1:2.000, se puede realizar una revisión cartográfica que se puedan incluir en este mapa para finalizar su construcción haciendo uso de SIG.</p>	<p>Para poder finalizar con la elaboración del mapa de clasificación en niveles de riesgo es necesario, recopilara más datos basados en más factores influyentes en los procesos de avenidas torrenciales y así poder tener información más precisa.</p>

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10 Matriz DOFA METODOLOGÍA 4

<b>DOFA</b>	<b>FORTALEZAS (F)</b>	<b>DEBILIDADES (D)</b>
<p>METODOLOGIA 4. (METODOLOGIA PARA LA EVALUACION DE RIESGO POR FLUJO DE DETRITOS DETONADOS POR LLUVIA)<sup>68</sup></p>	<p>1. Esta metodología pretende recoger las variables de mayor preponderancia en el contexto colombiano, en cuanto al origen, transporte y depositación del flujo de detritos, buscando ser aplicable en variadas condiciones geológicas y geográficas del territorio nacional.</p> <p>2. Es una metodología que se basa en antecedentes del lugar de estudio, y en sistemas de información geográfica, para generar mapas de vulnerabilidad amenaza y riesgo por flujos de detritos.</p>	<p>La metodología planteada, se basa principalmente en antecedentes de metodologías creadas para la evaluación de la susceptibilidad y no de la amenaza, razón por la cual algunas de las variables que se estudian en ella no se pueden tomar de referencia para la metodología que se quiere plantear.</p>
<b>OPORTUNIDADES (O)</b>	<b>(FO)</b>	<b>(DO)</b>
<p>1. La metodología implementó un modelo multivariado (FLO-2D) donde se simula inundación de agua limpia. Agua sucia y flujos de detritos, con el fin de estudiar el comportamiento de los flujos hiperconcentrados.</p>	<p>Esta metodología permite desarrollar protocolos de actuación en caso de desastre y resulta ser una herramienta útil para los especialistas al momento de diseñar medidas de contención y/o mitigación que contribuyan a reducir pérdidas y escoger posibles localizaciones para la construcción de nuevas infraestructuras.</p>	<p>Con el modelo implementado (FLO-2D), se puede también hacer la evaluación de la cuenca miranda la susceptibilidad que posee frente a inundaciones, para así poder evaluar la amenaza que se puede presentar.</p>

<sup>68</sup> COLOMBIA, ALCALDIA DE MEDELLIN, Decreto 1626 de 2015. Op. cit. p.1

Tabla 10. (Continuación)

<b>AMENAZAS (A)</b>	<b>(FA)</b>	<b>(DA)</b>
<p>1. La metodología desarrollada se apoyó con la utilización de Sistema de Información Geográfico que contó con gran número de funciones que permite tener una elevada operatividad, entre las cuales se destacan las de inclusión de datos y análisis espacial, en la modelación del análisis espacial estas herramientas aceleran los procesos de desarrollo e implementación de modelos hidrológicos, cartográficos, algebra de mapas, entre otros, es decir que si no se cuenta con alguna de estos factores no será posible usar la metodología.</p>	<p>Usar los factores y variables más comunes para el desarrollo de estos procesos con el fin de poder hacer un uso adecuado de la metodología implementando todos los modelos estadísticos planteados.</p>	<p>Tener en cuenta las variables planteadas si son de susceptibilidad o amenaza para poder tener claridad en la problemática y hacer un buen uso en los sistemas de información geográfica y utilizar todas sus funciones.</p>

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 11 Matriz DOFA METODOLOGÍA 5

<b>DOFA</b>	<b>FORTALEZAS (F)</b>	<b>DEBILIDADES (D)</b>
<p>METODOLOGIA 5. (DETERMINACION DE NIVELES DE PONTECIAALIDAD TORRENCIAL DE LA CUENCA DEL RIO MOCOTIES)<sup>69</sup></p>	<p>1. Esta metodología tiene en cuenta que cada tipo de amenaza tiene exigencias de análisis específico atendiendo a su naturaleza. Por lo tanto se basa en la valoración de indicadores de condiciones y sensibilidad ambiental relacionados con elementos geológicos y geomorfológicos, climáticos e hidrológicos, suelos, grado de cobertura vegetal y usos de la tierra, conjuntamente con factores externos o fuerzas de activación de procesos.</p> <p>2. Esta metodología involucra o tiene en cuenta la estabilidad relativa donde se puede analizar las diferentes categorías de áreas estables, potencialmente inestables, e inestables, considerando la influencia que representan cada una de ellas frente a la ocurrencia de crecidas torrenciales.</p>	<p>1. Aunque esta metodología menciona que es necesario disponer de un estudio del medio físico-natural y de sus componentes reales, junto con el inventario de los recursos naturales asociados y la ubicación de amenazas naturales, se evidencian algunos vacíos en el mismo informe de esta información.</p> <p>2. La metodología fue solamente planteada como una herramienta para complementar otras metodologías, razón por la cual carece del estudio de factores como las zonas de vida.</p>

<sup>69</sup> RIVAS MARIBEL et al. Op. cit. p.1

Tabla 11. (Continuación)

<b>OPORTUNIDADES (O)</b>	<b>(FO)</b>	<b>(DO)</b>
<p>1. Al comparar los resultados con los torrentes que se activaron en eventos de precipitación anteriores se obtuvo una alta correlación entre lo ocurrido y lo obtenido con la aplicación de la presente metodología</p> <p>2. La metodología tuvo como resultado la elaboración de un mapa de niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del río Mocotíeso, que representa amenaza muy alta, alta, media y baja en la cuenca.</p>	<p>Teniendo en cuenta que la metodología abarcó estudios tanto hidrológicos, como geológicos y geotécnicos, se puede utilizar este amplio estudio para generar los mapas de niveles de potencialidad torrencial y a la vez de amenaza por avenidas torrenciales.</p>	<p>En base a que la metodología tuvo gran relación con eventos de torrencialidad ocurridos anteriormente, se podrían utilizar esos datos de antes para empezar el estudio que ha faltado de algunas características de la cuenca.</p>
<b>AMENAZAS (A)</b>	<b>(FA)</b>	<b>(DA)</b>
<p>1. Como la metodología solo funciona como una herramienta para complementar otras, si se quiere utilizar para el diseño de medidas en vertientes y obras de corrección de torrentes tendientes a minimizar los efectos y consecuencias de las crecidas torrenciales sería necesario hacer modificaciones a la misma con metodologías más complejas.</p>	<p>En vista de que la metodología establecida, tiene carencias y en ocasiones solo puede funcionar como una herramienta para la ayuda de otras metodologías, a partir del estudio de variables expuestas en las fortalezas se puede complementar la metodología, para que pueda estudiar aspectos más complejos.</p>	<p>El objetivo estaría enfocado a tratar de complementar la metodología existente, con la información obtenida durante el estudio, para aplicarla en procesos de torrencialidad.</p>

Tabla 12 Matriz DOFA METODOLOGÍA 6

<b>DOFA</b>	<b>FORTALEZAS (F)</b>	<b>DEBILIDADES (D)</b>
<p>METODOLOGIA 6. (EVALUACION DEL RIESGO DE LOS FLUJOS DE ESCOMBROS EN EL ARROYO, TAIWAN)<sup>70</sup></p>	<p>1. La metodología abarcó diversas variables para poder realizar la modelación en el programa (FLO-2D), esas variables fueron las siguientes: En la siguiente simulación, se han adoptado información del terreno, parámetros geológicos, coeficiente de rugosidad de Manning y coeficiente de resistencia al flujo laminar.</p> <p>2. Para definir la metodología, se implementó el uso del software GIS que se empleó para procesar la línea de contorno, el aspecto de pendiente y gradiente de pendiente para el análisis básico del área de investigación.</p> <p>3. Se obtuvieron los valores de la profundidad máxima del sedimento, la velocidad promedio, la profundidad promedio del sedimento, el volumen de sedimento y el área de sedimento para la primera y segunda ramas del arroyo Songhe.</p>	<p>1. La metodología planteada, se basa principalmente en antecedentes de metodologías creadas para la evaluación del riesgo y no de la amenaza, razón por la cual algunas de las variables que se estudian en ella no se pueden tomar de referencia para la metodología que se quiere plantear.</p>

<sup>70</sup> LIN, J.-Y., YANG, Op. cit. p.1

Tabla 12. (Continuación)

<b>OPORTUNIDADES (O)</b>	<b>(FO)</b>	<b>(DO)</b>
<p>1. La metodología implemento un el programa numérico FLO-2D que fue adoptado para simular las condiciones de flujo de escombros en el área de Songhe, incluyendo profundidades de flujo, velocidades de flujo y deposiciones de sedimentos.</p> <p>2. Este estudio clasificó el grado de riesgo de las áreas de flujo de residuos peligrosos en tres categorías, incluyendo alta, media y baja, según el método de clasificación de Desastres Suizo, consistente en influyentes parámetros de intensidad y probabilidad de ocurrencia.</p> <p>3. El enfoque propuesto genera el mapa de distribución de riesgos que puede utilizarse para establecer una estrategia de mitigación de desastres para el área de Songhe.</p>	<p>Con base a los programas utilizados, software y modelo digital de terreno, se pueden no solo obtener datos característicos de la cuenca y su comportamiento si no que se puede establecer mapas que sirven como herramienta para la zonificación de riesgos por flujos de escombros.</p>	<p>Teniendo en cuenta que esta metodología fue planteada para la evaluación del riesgo, es importante anotar que se podrían realizar estudios más avanzados de otras variables, para así poder definir la metodología en función de la amenaza.</p>
<b>AMENAZAS (A)</b>	<b>(FA)</b>	<b>(DA)</b>
<p>1. Al comparar los datos de campo con los resultados de simulación, este documento define un Índice de precisión para examinar la precisión de la simulación. Ignorando la influencia de las casas en los aluviones.</p>	<p>La metodología planteada, no tuvo en cuenta en su estudio las casas del área, esto podría mitigarse con la implementación de las casas en el software FLO-2D, de esa manera se obtendrían valores más reales para realizar los mapas de zonificación.</p>	<p>Cuando se trata de una metodología, para la evaluación del riesgo por flujo de detritos y además que no tiene en cuenta las viviendas, se puede decir que se pueden realizar algunas modificaciones.</p>

Tabla 13 Matriz DOFA METODOLOGÍA 7

<b>DOFA</b>	<b>FORTALEZAS (F)</b>	<b>DEBILIDADES (D)</b>
<p>METODOLOGIA 7. (UMBRAL DE LLUVIA PARA EL INICIO DE FLUJOS DE ESCOMBROS CANALIZADOS EN UNA PEQUEÑA CUENCA BASADA EN LA MEDICION IN-SITU)<sup>71</sup></p>	<p>1. El método de predicción propuesto para el flujo de desechos combinó el umbral empírico con el modelo de proceso físico.</p> <p>2. El análisis relacional gris permitió clasificar la influencia de los diversos factores que afectaron las variaciones en la escorrentía.</p> <p>3. En esta metodología se llevó el estudio de diversos factores como: la disponibilidad de material sólido suelto y su tamaño medio de grano, el gradiente de pendiente, las características geométricas y morfológicas de un sitio y, sobre todo, la descarga de escorrentía.</p>	<p>1. La mayoría de los umbrales críticos manejados eran umbrales empíricos que se basaban únicamente en la relación estadística entre la precipitación y los flujos de escombros.</p>

<sup>71</sup> LAN, H. ZHOU, CH. WANG, LJ. ZHANG, HY. LI, Op. cit. p.1

Tabla 13. (Continuación)

<b>OPORTUNIDADES (O)</b>	<b>(FO)</b>	<b>(DO)</b>
<p>1. Esta metodología abarca el estudio del denominado "umbral de precipitación" que separa la zona en la que ocurre el flujo de escombros de aquellos en los que no ocurre.</p> <p>2. Se han sugerido varios umbrales de precipitación para el inicio del flujo de escombros, tales como el modelo de precipitación de intensidad y duración (ID) (Cannon y Ellen, 1985, Cannon et al., 2008, Aleotti, 2004, Dai y Lee, 2001), el modelo de precipitación pluviométrica-acumulativa (AR-R) antecedente (Wieczorek y Guzzetti, 1999), el modelo de lluvia-precipitación acumulativa (AER-R) (Baum y Godt, 2010) El modelo de precipitación pluviométrica acumulativa por hora (IMAX-R) (Guzzetti et al., 2007, Guzzetti et al., 2008)</p> <p>3. Las características morfológicas de la cuenca se calcularon con ArcMap utilizando los datos ASTER GDEM (Modelo de Elevación Digital Global ASTER). La resolución de los DEM (Modelos Digitales de Elevación) Además, también se verifico el ángulo de la pendiente usando un ranger láser.</p>	<p>Esta metodología, utiliza otras clases de métodos, y otras clases de estudios que en consecuencia pueden arrojar excelentes herramientas para la evaluación y zonificación de flujos de escombros.</p>	<p>Dado a que es una metodología trabajada desde datos empíricos, es importante tener en cuenta la implementación software y programas para dar la caracterización adecuada a la zona de investigación.</p>

Tabla 13. (Continuación)

<b>AMENAZAS</b>	<b>(A)</b>	<b>(FA)</b>	<b>(DA)</b>
<p>1.El método Moving Least Squares (MLS) que fue el implementado en la metodología se utiliza con frecuencia para tratar las cuadrículas irregulares de puntos de datos acumulados durante sucesivas iteraciones (Breitkopf et al., 2005). En este método se utiliza una aproximación local que sólo considera los puntos más cercanos al óptimo actual.</p>	<p>Con la implementación de software y programas como el análisis relacional gris, se puede tratar la necesidad existente frente al hecho de que solo se estudien estos fenómenos en un área local.</p>	<p>Es necesario, obtener no solo datos empíricos, sino al contrario entrar a realizar mediciones de datos, para lograr mitigar la dificultad que hay en cuanto el estudio solamente en áreas locales.</p>	

Fuente: Elaboración Propia

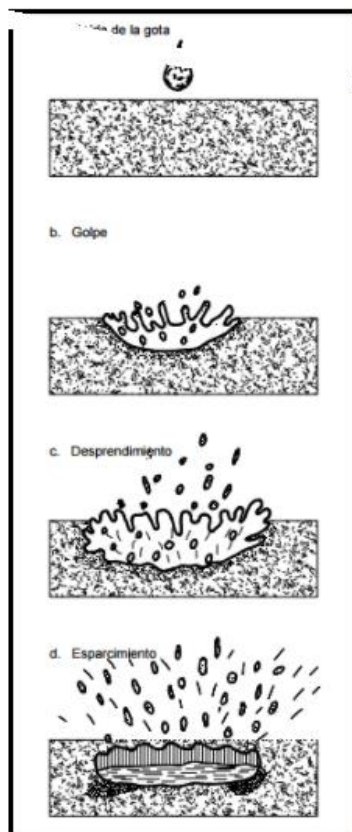
## 7.2 FACTORES Y VARIABLES INFLUYENTES EN EVENTOS POR AVENIDA TORRENCIAL

Teniendo en cuenta las metodologías estudiadas anteriormente y conociendo las amenazas, fortalezas y debilidades se establecen los factores y variables que se consideran influyentes en estas metodologías en cuanto a la generación de eventos por avenida torrencial.

### 7.2.1 Lista de los factores influyentes en eventos por torrencialidad

❖ Precipitación: La erosión por golpeo de la lluvia (Splash erosion) ocurre por el impacto de las gotas de agua sobre una superficie desprotegida, el cual produce el desprendimiento y remoción de capas delgadas de suelo (Figura 13). Este impacto rompe la estructura del suelo y lo separa en partículas relativamente pequeñas. La precipitación es un factor de gran importancia para determinar la potencialidad torrencial que presentan los cursos de agua, ya que constituye un agente activador de fenómenos torrenciales.

Figura 13 Erosión por golpeo de una gota de lluvia



Fuente: <https://goo.gl/BvNhYr>

- ❖ Estabilidad Relativa: Toma en consideración el estudio de las diferentes categorías de áreas estables, potencialmente inestables, e inestables, considerando la influencia que representan cada una de ellas frente a la ocurrencia de crecidas torrenciales.
- ❖ Morfometría: El análisis morfométrico está constituido por un sin número de índices y coeficientes, se utilizan el Índice de Compacidad o de forma de Gravelius, la pendiente media y la densidad de drenaje, que en conjunto definen la facilidad para concentrar la escorrentía, la oportunidad de infiltración, la velocidad y capacidad de arrastre de sedimentos, la eficiencia o rapidez de la escorrentía y de los sedimentos para salir de la cuenca luego de un evento de precipitación y con ello inferir cuál podría ser el nivel de susceptibilidad a las crecidas.
- ❖ Índice de protección del suelo: Permite determinar el grado de protección que la vegetación brinda al suelo, donde la vegetación densa constituye la protección más eficaz. Se estima con base en el mapa de Cobertura Vegetal.
- ❖ Morfología: Evalúa los parámetros de forma, de determinada cuenca hidrográfica, dentro de dichos parámetros, se encuentran: área de la cuenca, longitud del cauce principal, pendiente promedio, pendiente del cauce principal, precipitación media de la cuenca, densidad de drenaje, y caudal medio Q para varios años de registro.
- ❖ Demografía: se enfoca en el estudio de la población humana aledaña a la zona de estudio y su distribución según la evolución histórica.
- ❖ Geomorfología: Las unidades geomorfológicas se encuentran íntimamente relacionadas con la litología como el factor principal de formación del relieve, con los procesos erosivos y la meteorización diferencial como agentes modeladores del paisaje. Por eso con la geomorfología se pueden agrupar en diferentes unidades los distintos tipos de roca, así como los diversos depósitos superficiales presentes ya que bajo la acción de distintos procesos morfogenéticos a lo largo del tiempo, han dado origen a diversos paisajes.
- ❖ Geología: Permite examinar la evolución que ha tenido el suelo en determinada zona por medio del estudio de los materiales terrestres.
- ❖ Clima y Cobertura: Dentro de estas variables se estudia el cambio que se ha generado por la temperatura, y la variación del suelo consecuencia de los

cambios en la cobertura vegetal. Como los cambios en el clima, temperatura, aumento o disminución de lluvias, han afectado o modificado la cobertura vegetal en áreas determinadas.

❖ Índice de Susceptibilidad: Con este índice se puede estimar la susceptibilidad a movimientos del terreno, en un área determinada y bajo un clima específico.

❖ Zonas de Vida: Se definen teniendo en cuenta la influencia del clima sobre procesos biológicos (bioclima) dentro de ciertos límites de temperatura y precipitación promedio.

❖ Coeficiente de Compacidad: se refiere a la cantidad de drenajes expresada en términos de longitud, sobre la superficie de una cuenca con unidades de área. Principalmente se utiliza para determinar la disponibilidad hídrica de la cuenca en cada uno de sus sectores, asumiendo directa proporcionalidad entre la densidad, la disponibilidad de agua y la energía de arrastre en un área determinada.

❖ Volumen de Sedimentos: Cuando se quiere realizar una metodología para la zonificación de amenaza por avenida torrencial, es necesario estudiar factores como el número de sedimentos que rueda cuando por elevadas precipitaciones se generan deslizamientos que en conjunto con el agua pueden generar avalanchas, el volumen de sedimentos que acarrear dichas avalanchas es un factor importante no solo para la zonificación, si no para la amenaza, tanto natural, cultural como a nivel de infraestructura.

❖ Topografía: El estudio topográfico del área a trabajar es fundamental para establecer características importantes del terreno, como lo es la pendiente y tipo de terreno; montañoso, ondulado, escarpado o socavado.

❖ Pendiente: Con el estudio de pendientes, se puede determinar la inclinación del terreno y así de esta manera se puede clasificar y determinar en qué lugares hay terrenos de escurrimiento de agua.

### **7.2.1 Consecuencias que puede llegar a generar las variables involucradas en eventos por torrencialidad**

Teniendo en cuenta la lista de factores realizada anteriormente se tomaron las variables de referencia que se consideran son influyentes en la generación de eventos por avenida torrencial.

❖ La precipitación es una de las variables más influyentes en la generación de eventos por torrencialidad teniendo en cuenta que facilita la determinación de potencialidad torrencial que presentan los cursos de agua, ya que constituye un agente activador de fenómenos torrenciales, de esta manera se hace posible obtener la distribución de precipitación en el área de una cuenca que sea objeto de estudio evitando la generación de crecientes en los ríos que a su vez ocasionan inundaciones, desbordamientos y desprendimientos de tierra, que producen grandes consecuencias para las comunidades que habitan en estas zonas.

❖ Los mapas de estabilidad relativa son fundamentales en este tipo de investigaciones en donde es necesario conocer los problemas de flujos de tierras y el tipo de flujo de masas que se puede producir en una zona. En estos mapas se pueden identificar tipos de contacto horizontal entre rocas de diferente estabilidad, de igual manera se pueden identificar las rocas con mayor facilidad a sufrir procesos de erosión, como puede ser erosión por socavamiento los cuales pueden producir el sobre empinamiento de las rocas más resistentes originando deslizamientos de tierras, que unido con la combinación de aspectos geológicos, geomorfológicos, de pendiente y precipitación pueden ocasionar innumerables daños en las comunidades que habitan zonas donde se presentan este tipo de eventos.

❖ Aunque en la mayoría de los casos los eventos por torrencialidad no se pueden evitar, con el estudio de factores como la morfología y morfometría se pueden implementar varios métodos para minimizar el peligro y el daño que pueden provocar estos eventos, generando un análisis morfométrico por medio del Índice de Compacidad o de forma de Gravelius, lo que en conjunto con el estudio de la pendiente media y la densidad de drenaje se puede definir la facilidad con la que se puede concentrar la escorrentía, la oportunidad de infiltración del agua, la velocidad y capacidad de arrastre de sedimentos de la cuenca luego un evento de precipitación y así poder reducir la posibilidad de un fallo de pendiente por medio de un drenaje en la superficie con el fin de reducir el peso del material con posibilidades de deslizarse.

❖ Las áreas de relieve escarpado, montañoso y ondulado, con pendientes iguales o superiores a cinco grados, más los taludes marginales de cauces, así como las zonas planas que puedan recibir los efectos de los eventos por torrencialidad. por esto es importante considerar aquellas zonas urbanas y de expansión urbana que, con una pendiente inferior a cinco grados hayan presentado problemas de inestabilidad y subsidencia debido a problemas geotécnicos al desarrollo de actividades antrópicas.

❖ El análisis hidrológico de la cuenca objeto de estudio es fundamental y se puede hacer utilizando cartografía de hidrología con el fin de conocer los lugares en donde presentan mayores precipitaciones con el fin de reducir riesgos por inundaciones.

## **8. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACION DE AMENAZA POR EVENTOS DE AVENIDA TORRENCIAL A ESCALA 1:2000**

A continuación se describe la metodología general para la zonificación de amenazas por avenida torrencial a escala 1:2000, en base a los factores y variables explicados anteriormente se establecieron las variables y factores que son considerados necesarios para desarrollar la metodología.

Para establecer las variables y factores necesarios para el desarrollo de la metodología se realizó el siguiente análisis:

### **8.1 ANÁLISIS DE LOS FACTORES Y LAS VARIABLES QUE SE CONSIDERAN GENERAN LOS EVENTOS POR AVENIDA TORRENCIAL.**

Las avenidas torrenciales son eventos que usualmente se generan cuando existe la confluencia de los siguientes factores, topografía, cartografía, geología para ingeniería, geomorfología, hidrología, flujo hiperconcentrado y topografía batimétrica.

Para elaborar la Zonificación se debe contar con la cartografía básica, el modelo digital del terreno y los sensores remotos (fotografías aéreas, orto fotos, imágenes de satélite, entre otros) disponibles, todos a la escala adecuada. Así mismo es necesario desarrollar ensayos de campo con el fin de poder establecer la granulometría y conocer el tamaño de los sedimentos del cauce.

#### **8.1.1 Topografía**

La topografía es un factor determinante, ya que indica la representación de la superficie terrestre de manera detallada y precisa, con base a la georreferenciación de la zona a nivel nacional. Para la zonificación es necesario realizar un análisis de las pendientes y formas del terreno, a partir de esto se puede obtener la siguiente información:

- ✓ Curva de nivel (cada 2 metros las intermedias y cada 10 metros las maestras, Figura 14).
- ✓ Diagrama de pendientes se obtiene los grados de inclinación de la zona (cuenca), con base a unos rangos específicos, se clasifica el terreno desde plano hasta muy inclinado. (Figura 15).
- ✓ Georreferenciación de la zona con GPS o mojones materializados en campo con su debido post-proceso y certificados por el IGAC.

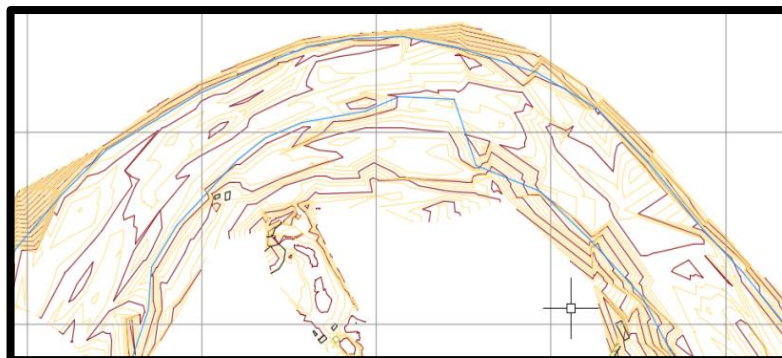
✓ Un modelo digital de terreno (MDT) en el cual se puede hacer todo tipo de análisis.

Existen diversas tecnologías para la obtención de esta información, levantamientos topográficos con aerofotografías a escala 1:2000 o levantamientos Lidar de precisión utilizando drones. Para ambos casos es necesario tener puntos fijos en el terreno llamados mojones, con el fin de tener un control y un ajuste en la georreferenciación se recomienda tener mínimo dos mojones en campo.

Es necesario tener en cuenta que para todo levantamiento Geodésico, topográfico y/o Batimétrico debe ser enlazado a la Red Geodésica Nacional, cuya precisión debe ser igual o mayor al orden B, de acuerdo a los parámetros de precisión para Geodesia Satelital utilizados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, ente rector de la cartografía nacional.

En el posicionamiento de las estaciones se emplea el método estático, utilizando como referencia un GPS fijo en el punto base, con un total de 120 épocas por estación la cual equivale a 10 minutos.

Figura 14 Curvas de nivel con grilla de coordenadas.



Fuente: Elaboración propia

En la figura 15 se puede observar la tabla de pendientes que se va a utilizar para el desarrollo de la metodología, esta clasificación se realizó basados en la información consignada en el capítulo 5 del libro deslizamientos: análisis geotécnico de Jaime Suarez<sup>72</sup>.

---

<sup>72</sup> SUAREZ, Op. cit. p.175

Figura 15 Tabla de caracterización del terreno a partir de las pendientes

TABLA DE PENDIENTES	
	> 100% Muy alta (más de 45 grados)
	100% - 50% Alta (27.1 a 45 grados)
	50% - 30% Media (17.1 a 27 grados)
	30% - 0% Baja (0.0 a 17 grados)

Fuente: Tomado y adaptado de SUAREZ, Op. cit.

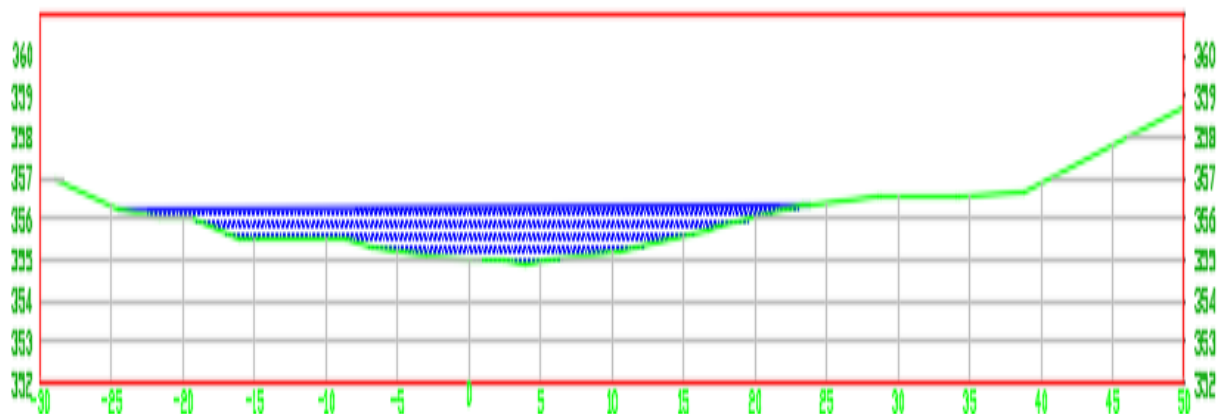
### 8.1.2 Topo batimetría:

Una batimetría se refiere al levantamiento topográfico del relieve de superficies del terreno cubierto por el agua, sea este el fondo del mar o el fondo de los lechos de los ríos, ciénagas, humedales, lagos, embalses, etc. es decir, la cartografía de los fondos de los diferentes cuerpos de agua.

Es importante tener en cuenta la topo batimetría para la generación de la metodología, ya que con ella se obtiene el perfil longitudinal del cauce principal para conseguir la pendiente promedio del mismo.

El objetivo es generar las secciones transversales del cuerpo de agua en estudio y analizar la altura máxima de la lámina de agua, basado en el estudio hidrológico.

Figura 16 Sección transversal de una batimetría



Fuente: Elaboración Propia

Para el levantamiento topobatimétrico es necesario hacer una poligonal abierta con coordenadas y cotas reales, esto a partir de un sistema de posicionamiento global (GPS) y utilizando puntos geodésicos establecidos. Es necesario tomar distancias y ángulos (vertical y horizontal) para las respectivas correcciones en oficina. Para el desarrollo del levantamiento topográfico es necesario una Estación Total, que almacene la información y sea fácil su procesamiento.

Esto en tiempo real se realiza sobre el cauce del río o quebrada, para las secciones transversales se contempló que a partir de la escala de trabajo se realizarán cada 20 metros con una zona de zanja de 35 metros a partir de la lámina de marea máxima como se establece en el Decreto 1449 “Cobertura Boscosa dentro del predio, las Áreas Forestales Protectoras, en una faja no inferior a 30 metros de ancho, paralela a las líneas de mareas máximas, a cada lado de los cauces de los ríos, quebradas y arroyos, sean permanentes o no y alrededor de lagos o depósitos de agua<sup>73</sup>.”

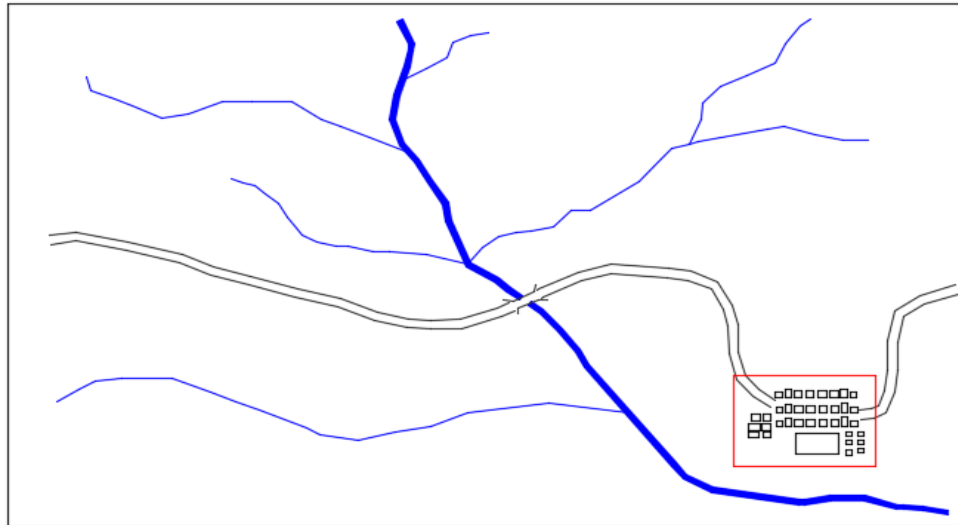
### **8.1.3 Cartografía**

La cartografía es una parte fundamental para el desarrollo de la metodología teniendo en cuenta que facilita la organización espacial del territorio haciendo uso de Sistemas de Información Geográfica, SIG. Con las cartografías se obtiene información clara y precisa sobre los cuerpos de agua y sus vertientes (cauces principales y secundarios), vías existentes (férreas, pavimentadas, en afirmado, etc), usos dotacionales (escuelas, hospitales, centros sanitarios, etc), infraestructura (puentes, viaductos, edificios, etc), zonas rurales. Para la metodología se debe contar con cartografías a escala 1:2000 facilitadas por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) ò con orto fotos y hacer una digitalización a manera de detalle involucrando cada uno de los detalles mencionados anteriormente, de esta forma se obtiene una caracterización de las zonas afectadas por una avenida torrencial como se puede observar en la figura 17.

---

<sup>73</sup> REPUBLICA DE COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto 1449 de 1977, Reglamentación del inciso 1 del numeral 5 del artículo 56 de la Ley número 135 de 1961 y el Decreto-Ley número 2811 de 1974.

Figura 17 Cartografía a escala 1:2000



Fuente: Elaboración propia.

#### 8.1.4 Geología

De acuerdo con la guía metodológica para elaboración de mapas de Geología para Ingeniería del Servicio Geológico Colombiano “un mapa de geología para ingeniería es un tipo de mapa geológico que muestra información sobre la distribución y propiedades físicas y mecánicas de las rocas y los suelos, el agua subterránea, las características del relieve y los procesos geodinámicas actuales, que son considerados los componentes básicos del ambiente geológico, de suma importancia en estudios de geología aplicada a la ingeniería”.<sup>74</sup>

Los mapas de geología para ingeniería se pueden elaborar a partir de las Unidades de Geología para Ingeniería (UGI), que son el insumo más importante desde el punto de vista de homogeneización de las características ingenieriles de los materiales del área de estudio. Las UGI permiten diferenciar tres aspectos fundamentales para obtener los modelos que permitan realizar los análisis de estabilidad:

- 1) diferenciar los materiales aflorantes entre suelos y rocas.
- 2) definir los espesores de suelo o las características estructurales del macizo rocoso.
- 3) caracterizar los materiales de acuerdo con sus propiedades mecánicas.

<sup>74</sup> SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO; Guía metodológica para estudios de amenaza vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá D.C. 2015. P 36. ISBN: 978-958-99528-5-6.

Es importante porque se puede dar una clasificación de las unidades geológicas superficiales, para saber con qué suelo se está interactuando a la hora de hacer un estudio, de esta manera se podrá obtener algunas de las características nombradas en la siguiente tabla.

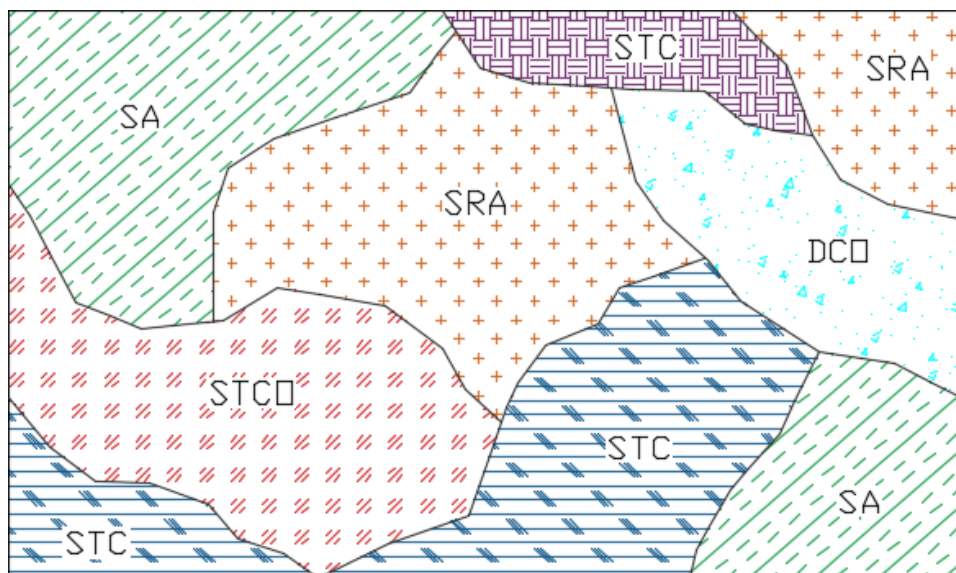
Tabla 14 Unidades geológicas de ingeniería según su origen

ORIGEN DE LA UGI	TIPO DE UGI
Derivadas de roca In Situ	Roca Inalterada Saprolito Suelo Residual
Depósitos Aluviales	Aluviones recientes o de lecho de río Llanuras Aluviales Abanicos o conos aluviales Terrazas Aluviales Depósitos fluvio torrenciales
Depósitos lacustres y paludales	Planicie lacustrina, artesa lagunar, plano anegadizo.
Depósitos de ladera , de vertiente o coluviales	Coluviones Talus Flujos (de lodo, tierra y de escombros) Derrubios de pendiente
Depósitos Costeros	Deltas, barras, playas, etc.
Depósitos volcánicos	Tefras Surges Flujos de piroclastos Ignimbritas Flujos de lodos volcánicos Lahares Cenizas Coladas de lava
Depósitos eólicos	Dunas, medanos Loess Cenizas Volcánicas
Depósitos glaciares	Morrenas y tillitas Fluvioglaciares, valle glaciario, abanicos
Depósitos Antrópicos	Rellenos sanitarios o de basuras Rellenos de excavaciones Escombreras o botaderos

Fuente: SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Op. cit. p.37

El objetivo es obtener un mapa como el que se observa en la figura 18, donde se observe la clasificación del suelo y cuál es el suelo del lugar que se va a estudiar.

Figura 18 Unidades Geológicas a escala 1:2000



Fuente: Elaboración propia

### 8.1.5 Geomorfología

En atención a eventos de avenidas torrenciales en la escala de trabajo propuesta se requiere un mapa geomorfológico detallado en lo referente a elementos geomorfológicos del área de estudio, los cuales se consideran un insumo primordial para la homogeneización de las unidades con características de comportamiento geo mecánico similar, junto con el mapa de geología para ingeniería con el fin de poder considerar de manera especial los procesos de morfo dinámica y factores bio-antrópicos en la génesis de las geoformas, se recomienda seguir con las unidades geomorfológicas superficiales con el fin de poder conocer el inventario de procesos de origen ambiental del territorio teniendo como objetivo conocer sus correspondientes materiales (formaciones superficiales) composición y estructura.

A continuación de mencionan cada uno de los ambientes a tener en cuenta en las unidades geomorfológicas superficiales:

### ✓ Ambiente Estructural (S)

El ambiente estructural corresponde a las zonas dominadas por los bloques tectónicos de rocas sedimentarias plegadas y los macizos ígneos – metamórficos sin geoformas marcadas de otros ambientes. En este contexto, tanto la litología como la estructura de deformación de las rocas inciden para favorecer una disección distintiva de los bloques levantados y plegados.

Mientras el grado de plegamiento de las rocas sedimentarias favorece geoformas específicas tales como mesetas y crestas estructurales, la tendencia masiva de las rocas ígneas metamórficas tienden a generar la formación de cuchillas con pendientes similares y patrones de drenaje en función de los sistemas de diaclasas y fallas geológicas. Por tales motivos, los criterios de clasificación se agrupan principalmente en las diferencias litológicas y los controles estructurales de plegamiento y fallamiento que presentan las zonas levantadas. En las rocas sedimentarias plegadas se presentan tres geoformas clásicas en función del buzamiento de las capas de rocas competentes, mesetas, crestas (laderas estructurales)<sup>75</sup>.

### ✓ Ambiente Volcánico (V)

El ambiente volcánico se caracteriza por geoformas construidas a partir de las erupciones magmáticas de carácter lávico y/o explosivo y sus productos. Las geoformas volcánicas se presentan en todos los tamaños desde cráteres de tamaño métrico hasta mesetas lávicas de miles de kilómetros de extensión. También, los distintos tipos de magmas inciden en el comportamiento volcánico, diferenciándose grandes tendencias explosivas de las calderas (riolítica) y lávicas de los volcanes escudo (basáltica) y los procesos mesclados de los estratovolcanes (andesítica). Los sub-ambientes más notorios se relacionan con los distintos procesos volcánicos explosivos y la generación de cráteres, laderas volcánicas, mantos de piroclastos o las coladas de lava. También, las geoformas pueden resultar de procesos combinados tales como los flujos piroclásticos y fluvio-volcánicos<sup>76</sup>.

### ✓ Ambiente Denudacional (D)

La disección de los paisajes por los procesos exógenos se manifiesta en procesos erosivos hídricos y gravitatorios o una combinación de los dos. Bajo

---

<sup>75</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Guía metodológica para la elaboración de mapas Geomorfológicos a escala 1:100.000. Bogotá D.C.: 2013. p.19.

<sup>76</sup> Ibid., p. 20.

condiciones climáticas secas, las formas erosivas relacionadas con disección y pérdida del suelo generan fenómenos de erosión en forma laminar, surcos y cárcavas, es decir terrenos eriales. En cambio, condiciones húmedas favorecen la meteorización del subsuelo y los movimientos gravitatorios con sus deslizamientos y flujos de suelos y escombros. Indudablemente, los dos procesos interactúan para producir un sinnúmero de combinaciones. Aun así, los procesos erosivos hídricos y de remoción en masa, constituyen los dos sub-ambientes dominantes del Ambiente Denudacional.

Dentro del sub-ambiente de flujos torrenciales en la forma de vegas y conos de estabilidad variable, a veces difícil de distinguir de los depósitos de ladera salvo por su forma típicamente de relleno y pendiente menor. Esta morfología también se relaciona con un drenaje complejo de dos o tres cauces secundarios separados por los flujos recientes dentro del mismo valle menor<sup>77</sup>.

#### ✓ Ambiente Glacial (G)

El Cuaternario ha sido periodo dominado por numerosos ciclos glaciales, periodos fríos que ha afectado la cordillera alta de los Andes con los procesos altamente erosivos y de acumulación asociados con la gelifración y abrasión durante el avance de las lenguas glaciares. Como sub-ambientes, se destacan las depresiones semi-circulares llamadas “circos glaciales” con sus lagunas y artesas asociados, seguidos comúnmente por las morrenas glaciales, lomas alargadas de acumulaciones de detritos de gelifración. Ladera abajo, ocasionalmente se puede conservar conos fluvio-glaciales de ablación y evidencias de actividad periglacial.<sup>78</sup>

#### ✓ Ambiente Fluvial (F)

Este ambiente está dominado por la acción de las corrientes de agua y el transporte de sedimentos sobre la superficie terrestre. Los ríos se encargan de transportar sus carga líquida y sólida a lo largo del sistema fluvial generado procesos erosivos y de acumulación en función de su pendiente, caudal y carga de sedimentos. Estos procesos conllevan a la formación de las geoformas características del sistema fluvial, principalmente los Abanicos de piedemonte, las Vegas aluviales de divagación, los Albardones (o dique aluvial), las Llanuras aluviales de inundación, las Terrazas aluviales, los Conos torrenciales, y las Ciénagas fluviales. Para los anteriores geoformas, la

---

<sup>77</sup> Ibid., p. 21

<sup>78</sup> Ibid., p. 23

composición de los sedimentos varia significativamente, aspectos que pueden analizarse para la reconstrucción de los ambientes de acumulación.

La disección de piedemonte puede asociarse con los ríos principales o en casos de disección avanzada incluir hasta las quebradas y caños superficiales, un fuerte indicio de su inactividad y edad antigua de formación. En general, sobre los abanicos activos se observan comúnmente orillares u otras evidencias de la migración reciente de los ríos sobre la superficie mientras los abanicos antiguos solo presentan superficies disectadas y suelos superficiales más evolucionadas.<sup>79</sup>

#### ✓ Ambiente Marino (M)

Las geoformas dominantes de la zona costera son el resultado de la interacción de los procesos marinos de oleaje y mareas sobre los elementos continentales tales como la estructura y litología local, los aportes fluviales en los deltas y la actividad biológica de las formaciones arrecifales. Las geoformas marinas, también llamadas "litorales", reflejan estos sub-ambientes erosiónales tales como los Acantilados y los sub-ambientes relacionados los procesos exógenos de viento y oleaje en las Playas litorales, Marismas y ciénagas litorales, Terrazas marinas, Barreras coralinas y Deltas litorales.

Las playas, también conocidos como cordones litorales, corresponden a geoformas de acumulación arenosa a gravillosa y pueden subdividirse por unidades de playas activas e inactivas (sub-recientes). En cambio, las terrazas marinas pueden ser generadas por procesos de abrasión (erosión) o sedimentación y corresponder a variaciones eustáticas del nivel del mar o movimientos tectónicos locales o regionales de la zona costera. Los acantilados también pueden ser de tipo activo si están expuestos a la acción del oleaje o inactivo (fósil) si corresponden a una antigua línea costera.<sup>80</sup>

#### ✓ Ambiente Cárstico (C)

El ambiente cárstico es tal vez uno de los ambientes más restringidos ya que se relaciona casi exclusivamente con los procesos de disolución de las rocas carbonatadas. El grado de desarrollo cárstico varía en función del tipo de roca, su espesor y plegamiento y la disponibilidad de agua. Las geoformas comunes incluyen disolución parcial con dolinas, valles cársticos y paisajes residuales de torres. Son comunes los sistemas de drenaje interno con la formación de

---

<sup>79</sup> Ibid., p. 24

<sup>80</sup> Ibid., p. 27

cavernas y la recristalización calcárea en la forma de estalactitas y estalagmitas, geoformas internas no apreciables en superficie.<sup>81</sup>

✓ Ambiente Eólico (E)

El ambiente eólico abarca el conjunto de procesos asociados con la erosión, transporte y sedimentación por el viento. Los procesos erosivos incluyen deflación y abrasión, es decir el arranque inicial de los materiales superficiales mientras los procesos de acumulación se relacionan con la formación de las distintas geoformas eólicas, en especial las Dunas eólicas y los Mantos eólicos o de loess. Estos procesos generalmente requieren condiciones de aridez, poca cobertura vegetal y material superficial erodable. Aunque este ambiente no se presenta comúnmente en la actualidad, dadas las variaciones climáticas del Cuaternario, varias zonas del país se encuentran cubiertas por estos tipos de depósitos y geoformas tales como grandes sectores de los Llanos Orientales y el sector norte del Litoral Caribe.<sup>82</sup>

✓ Ambiente Antrópico (A)

Este ambiente se caracteriza por presentar geoformas generadas por la alteración significativa de la superficie terrestre por la acción del hombre. Dentro de estos procesos se destacan los rellenos artificiales, rellenos sanitarios y las excavaciones, generalmente asociados con la minería a cielo abierto y los embalses artificiales. Aunque las zonas urbanas también representan una modificación notable de la superficie terrestre, en especial la permeabilidad del suelo urbano, por el momento se considera como una alteración secundaria de la morfología básica del terreno, aspecto para tratarse en levantamientos más detallados.<sup>83</sup>

### **8.1.6 Cobertura Vegetal**

Para la parte de cobertura vegetal, es importante tener en cuenta la metodología (corine land cover) con la que se puede realizar el inventario de la cobertura de la tierra. La base de datos de Corine Land Cover Colombia (CLC) permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (Landsat), para la construcción de mapas de cobertura a diferentes escalas.

---

<sup>77</sup> Ibid., p. 29

<sup>82</sup> Ibid., p. 29

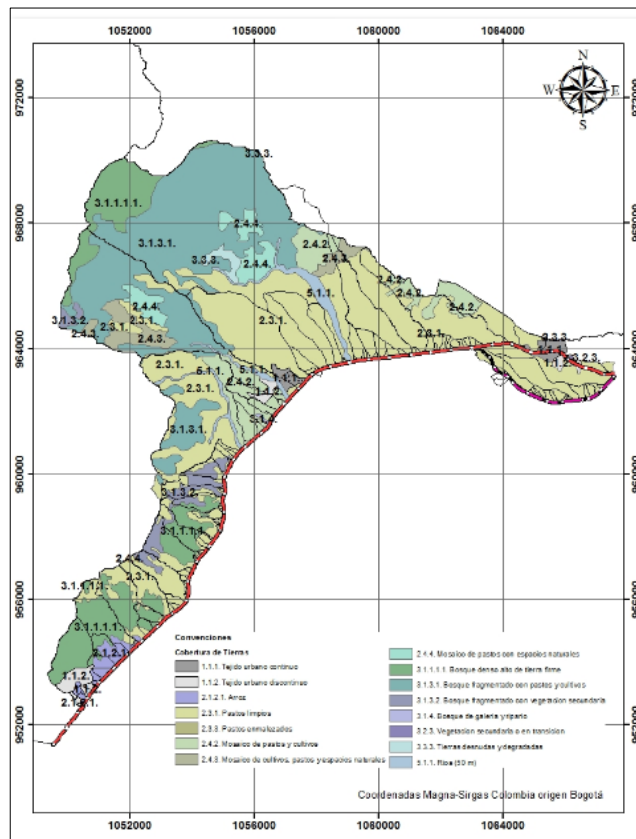
<sup>83</sup> Ibid., p. 31

Se tienen en cuenta las siguientes categorías:

- **Territorios Artificializados** (Tejido urbano, zonas industriales, aeropuertos, red vial).
- **Territorios Agrícolas** (Cultivos transitorios, cultivos permanentes, pastos).
- **Bosques y Áreas seminaturales** (Bosque denso, Bosque abierto, bosque fragmentado).
- **Áreas Húmedas** (Zonas pantanosas, vegetación acuática).
- **Superficies de Agua** (Aguas continentales, lagunas, ríos).

La razón por la que es importante el tema de cobertura vegetal en el planteamiento de la metodología, es porque con esta clasificación se puede conocer la localización vegetal del lugar estudiado como se muestra en la figura 19 y se puede observar con mayor claridad en el anexo A.

Figura 19 Mapa cobertura vegetal



Fuente: Proyecto 4G Ilanos

### 8.1.7 Hidráulica

Esta variable hace referencia a los patrones de drenaje definiéndose estos como configuraciones en las redes hídricas que presentan ciertos arreglos geométricos o irregulares. Se refiere al arreglo, en vista aérea (en un mapa) de un río y sus tributarios. Presenta predominantemente un patrón de drenaje dentritico y paralelo controlado por la estructura geológica.

En cuanto a la Densidad de drenaje su importancia radica en la Indicación de la capacidad que presenta una cuenca para evacuar las aguas que discurren por su superficie. Este parámetro se expresa en Km/Km<sup>2</sup> y está definido por la fórmula:

$$Dd = \frac{\sum Lc}{Ac} \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

Lc: Longitud total de los cursos de agua (perennes o intermitentes) en Km.

Ac: Área de la cuenca (Km<sup>2</sup>)

Este es un índice importante, puesto que refleja la influencia de la geología, topografía, suelos y vegetación, en la cuenca hidrográfica, y está relacionado con el tiempo de salida del escurrimiento superficial de la cuenca y hace posible la generación de mapas de inundación en la zona de estudio.

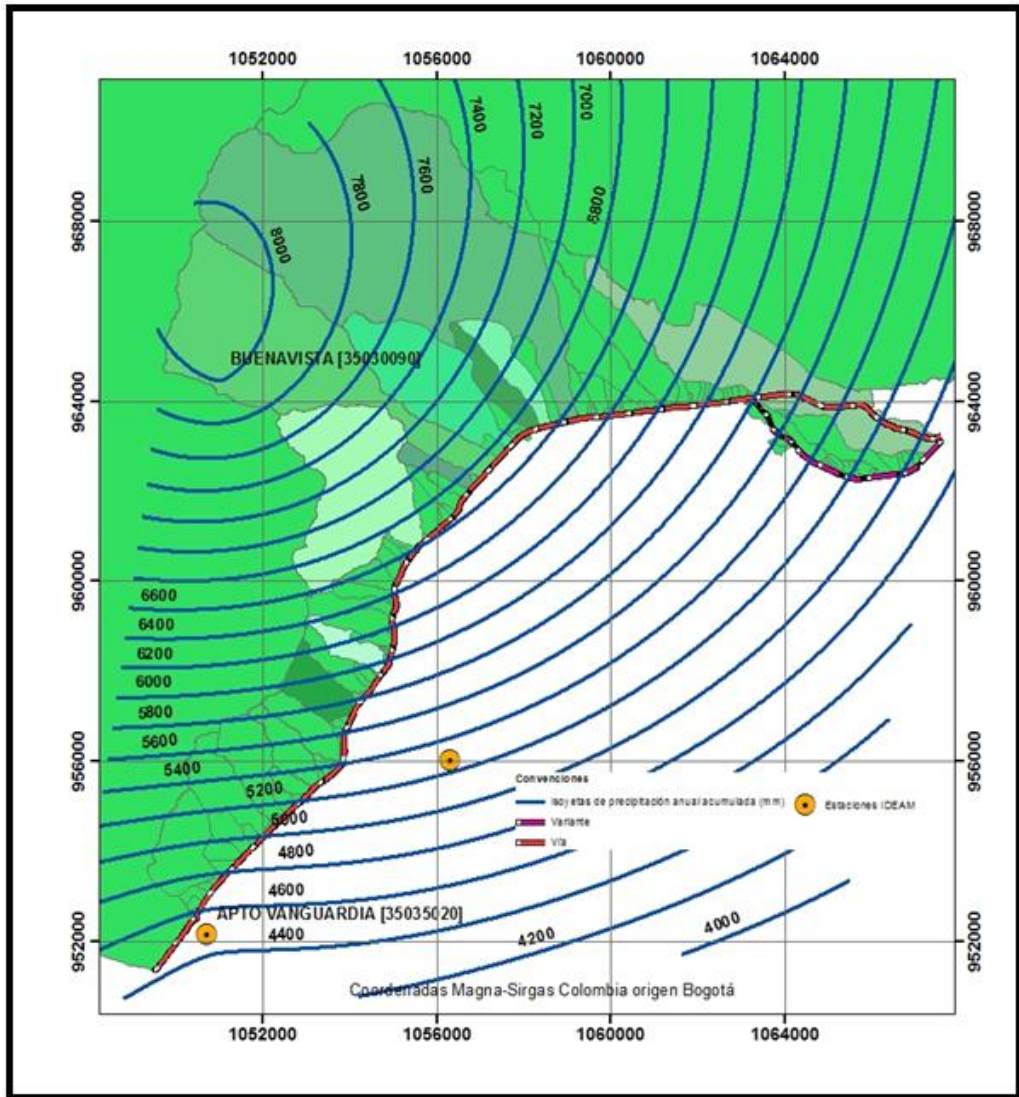
### 8.1.8 Hidrología

En este ítem se hace referencia al análisis del ciclo hidrológico, teniendo en cuenta la circulación interrumpida del agua en la tierra. Es importante para la creación de la metodología, porque es con esta herramienta que se podrá dar estudio a las precipitaciones presentadas en una zona estudiada.

El estudio hidrológico de las precipitaciones se realizará con el método de las isoyetas. Este método genera isolíneas que representan puntos de igual precipitación (isoyetas). A estos puntos se les determina su área de influencia dentro de la cuenca y se establece un promedio ponderado de las isoyetas con sus áreas de influencia.

El objetivo con la realización de las isoyetas, será obtener las áreas donde se generan mayores índices de precipitación y de la misma manera donde las precipitaciones no son tan altas.

Figura 20 Ejemplo de diagrama de Isoyetas



Fuente: Proyecto 4G llanos

### 8.1.9 Flujo Hiperconcentrado

Es un flujo que contiene más del 5% de sedimentos en volumen. En este tipo de flujo el comportamiento es controlado por el agua y la diferencia conceptual con relación al comportamiento de un flujo de agua no es sustancial. Grandes volúmenes de arena son transportados en suspensión dinámica y éste transporte depende de la velocidad del flujo y su turbulencia. A mayor turbulencia hay mayor transporte de materiales gruesos.

El porcentaje máximo de sedimentos de un flujo hiperconcentrado, depende de las cantidades de limo y arcilla en la mezcla. Los materiales son más consolidados que los depósitos de inundaciones.<sup>84</sup>

Con el fin de poder elaborar el mapa de flujo de sedimentos es necesario enlazar los mapas obtenidos de granulometría e inundación. Para la realización del mapa de inundaciones se deben conocer variables como el caudal y el número de Manning, este último se obtendrá en base a los valores descritos en la Tabla 15:

Tabla 15 Rugosidades del cauce para el modelamiento de flujos de tierra (Xu y Feng, 1979).

Tipo de flujo	Características del cauce	Pendiente	Valores de n (Manning) para Diferentes Profundidades			
			0.5 m	1.0 m	2.0 m	4.0 m
Flujos no viscosos predominan los materiales de partículas gruesas.	Canal angosto y empinado con gradas y contracciones. El material del lecho son piedras de 0.5 a 2.0 m.	0.15 - 0.22	0.20	0.25	0.33	0.50
	Canal con muchas curvas y gradas. El material del lecho son piedras de 0.3 a 0.5 m.	0.08 - 0.15	0.10	0.125	0.167	0.25
	Canal ancho y recto. El material del lecho es piedra de hasta 0.3 m., arena y grava.	0.02 - 0.08	0.056	0.071	0.10	0.125
	Canal angosto empinado y meándrico. El material del lecho son piedras grandes, arena y grava, que forman bloqueos y gradas.	0.12 - 0.16	0.056	0.067	0.083	0.10
Flujos viscosos predominan los materiales de partículas finas (limos y arcillas)	Canal comparativamente recto. El material del lecho son piedras, arena y grava.	0.08 - 0.12	0.036	0.042	0.05	0.06
	Canal ancho y recto. El material del lecho son piedras de menos de 0.3 metros, arena y grava.	0.04 - 0.08	0.029	0.036	0.042	0.05

Fuente: SUAREZ, Op. cit. p.180.

### 8.1.10 Inventario de procesos por Eventos de Torrencialidad

Los eventos de torrencialidad, han sido avenidas torrenciales que han sucedido a lo largo del tiempo en diferentes lugares, son funcionales en el sentido de que brindan registro histórico y detallado de los sucesos anteriormente nombrados. Es de esta manera que se puede tener idea del comportamiento del cauce estudiado, de los sedimentos existentes en el mismo y de cómo ha cambiado a través del tiempo.

<sup>84</sup> SUAREZ, Op. cit. p.176

## 8.2 MÉTODO BIVARIADO

El método bivariado es un procedimiento experimental con el que se intenta estudiar la influencia de dos o más variables independientes sobre una variable dependiente.

En los análisis estadísticos de amenaza por avenida torrencial se combinan factores que han generado dichos eventos en el pasado y que se pueden determinar de forma estadística. En el análisis estadístico bivariado cada factor condicionante (como la geología, la geomorfología, la pendiente, la hidráulica, el inventario de procesos y la cobertura vegetal), se combina con una variable muy importante e influyente cuando se habla de una avenida torrencial como lo es el ciclo de sedimentos y se calculan valores ponderados del número de píxeles de la variable ciclo de sedimentos para cada factor condicionante.

Para este método se involucran tres pasos: (a) el ciclo de sedimentos (b) El mapeo de los parámetros más significativos (factores condicionantes) y (c) la definición de los pesos relativos a cada factor asociado a la localización de la avenida torrencial.

Este método asigna un valor de peso determinado  $W_i$  a cada clase de parámetro, por ejemplo, una unidad geológica o una unidad geomorfológica. Se define el valor  $W_i$  como el logaritmo natural de la densidad de la variable ciclo de sedimentos dentro de la clase, dividido por la densidad de la variable ciclo de sedimentos en general en todo el mapa. A continuación, se presenta la expresión utilizada para la calificación de las unidades al interior de los diferentes factores<sup>85</sup>:

$$W_i = \ln(Dens_{clas} / Dens_{map}) = \ln[N_{pix}(S_i) / N_{pix}(N_i) \sum N_{pix}(S_i) / \sum N_{pix}(N_i)] \quad \mathbf{Ec.3}$$

Donde:

$W_i$  = Ponderación de determinado parámetro de clase (peso)

$Dens_{clas}$  = Densidad de la variable ciclo de sedimentos dentro del parámetro de clase.

---

<sup>85</sup> GONZALES, Milena. Comparación entre los métodos heurístico, estadístico univariado y estadístico bivariado, para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000 en el municipio de santa bárbara, departamento de Antioquia. Trabajo de grado Geólogo. Medellín.: Universidad Eafit. Departamento de ciencias de la tierra, 2015.13 p.

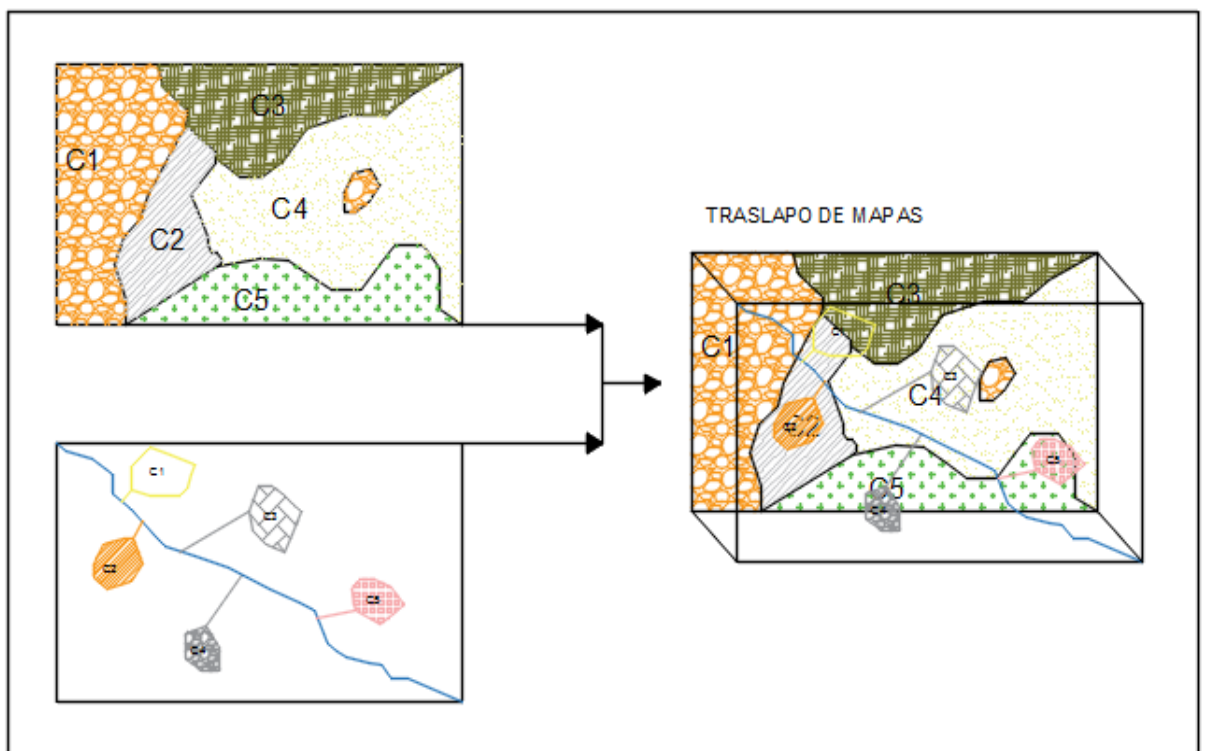
$DensMap$  = Densidad de la variable ciclo de sedimentos dentro de todo el mapa.

$Npix(Si)$  = Número de pixeles que contienen la variable ciclo de sedimentos dentro de un determinado parámetro de clase.

$Npix(Ni)$  = Número total de pixeles en un determinado parámetro de clase.

En la siguiente imagen se muestra un recuento del método bivariado, es fácil identificar el traslape de los mapas, como va a ser el montaje de los dos mapas, para esta metodología se va a manejar la variable sedimentos con cada una de las otras.

Figura 21 Traslape de mapas, método bivariado.



Fuente: Elaboración propia

### 8.2.1 Procedimiento para aplicar el método estadístico bivariado en el SIG

1. Identificar la capa o el archivo de eventos de torrencialidad. Crear Campo o columna de categorización en los atributos de la capa, para eventos activos = 1.
2. Crear campo o columna en los atributos de las capas de las demás variables (Geología, Cobertura del suelo, Geomorfología, Pendientes, Inundación, granulometría), que permita categorizar las clases utilizadas con el método para obtener los pesos.

3. Ejecutar comando con todas las otras variables (Geología, Cobertura del suelo, Geomorfología, Pendientes, Inundación, granulometría) con el fin de volver las capas o archivos una imagen con pixelada que posteriormente permita realizar un conteo de esos pixeles.

El tamaño del pixel que se va a utilizar en la imagen, depende claramente de la escala de trabajo como se puede identificar en la Tabla 16:

Tabla 16 Tamaño de pixeles en función de la escala trabajada

Escala de Trabajo	Tamaño pixel (m)
1:25.000	25
1:10.000	10
1:5000	5
1:2000	2
1:1000	1
1:500	0.50

Fuente: Elaboración Propia

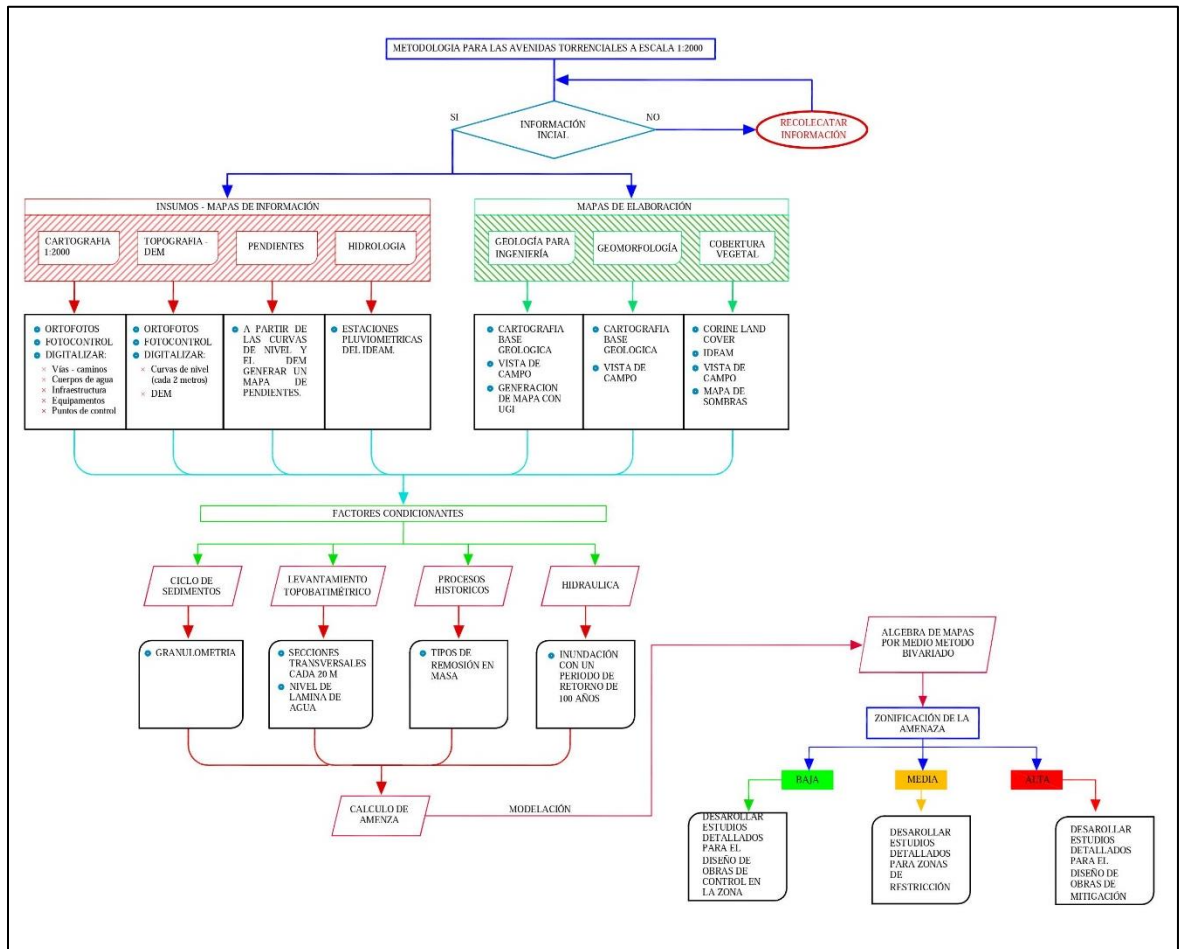
4. Combinar la capa de eventos de torrencialidad con las capas de las demás variables , esto con el fin de poder dar en conteo de pixeles , depende del SIG utilizado , existen algunos que tienen la propiedad de calcular los pesos por ellos mismos . De no ser así se debe mirar en los atributos de cada combinación el número de pixeles de cada variable en la de eventos de torrencialidad, esto se hace basados en la fórmula del método bivariado.
5. Crear un campo en los atributos de todas las variables a comparar, este campo se realizara con el fin de insertar los pesos calculados anteriormente para cada clase de la variable.
6. Utilizar una herramienta del SIG que permita crear una nueva imagen pixelada pero donde se tenga en cuenta los pesos calculados y colocados en la capa.
7. Utilizar una calculadora del SIG que permita sumar todas las imágenes pixeladas para obtener el mapa de amenaza.
8. Clasificar la amenaza en 3 rangos alta, media y baja

9. Calibrar el mapa final en función de los eventos torrenciales, y con las granulometrías.
10. Generar mapa definitivo con la suma de las variables

### 8.2.2 Flujograma para el desarrollo de la metodología para la evaluación de amenaza por eventos de avenida torrencial a escala 1:2000

Para el desarrollo final de la metodología se establece el flujograma mostrado en la Figura 23 con el fin de mostrar un análisis más detallado del proceso que se debe llevar a cabo para que la metodología sea posible. En el anexo B se puede evidenciar con mayor detalle.

Figura 22 Flujograma para desarrolló de la metodología



### **8.3 DESARROLLO DE CADA UNA DE LAS VARIABLES CON EL MÉTODO BIVARIADO**

Para el desarrollo del método bivariado, se tuvieron en cuenta las variables: pendiente, geología, geomorfología, cobertura vegetal, hidráulica e inventario de procesos, estas variables analizadas hacia los eventos de torrencialidad.

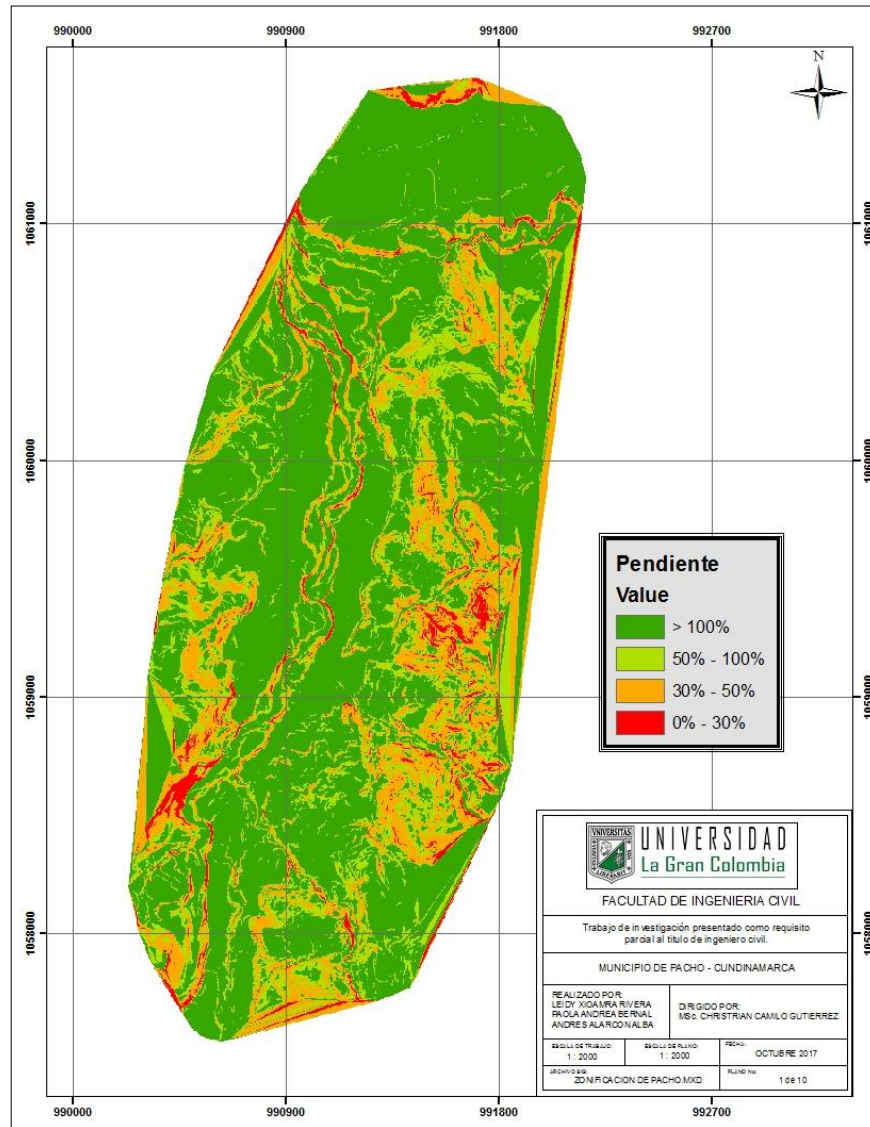
Los eventos de torrencialidad son una de la variable más influyente cuando se habla de avenidas teniendo en cuenta que esta variable nos da una mira a lo que ya ha sucedido anteriormente y de esta manera nos puede ayudar a deducir lo que puede ocurrir, adicional a esto sus clases se dividen en ser activo o inactivo, es la razón por la que se ha escogido para traslapar con las otras variables.

#### **8.3.1. Pendiente:**

Los códigos seleccionados dentro de esta variable fueron:

- Pendiente muy alta: > 100% (más de 45 grados)
- Pendiente alta: 50% - 100% (27.1 a 45 grados)
- Pendiente media: 30% - 50% (17.1° a 27 grados)
- Pendiente baja: 0% - 30% (0° a 17 grados)

Figura 23 Clasificación de Pendientes



En la Tabla 17 se muestran los códigos y clases para la clasificación realizada

Tabla 17 Código y clase para clasificación de pendientes

PENDIENTES	
CODIGO	CLASE
MUY ALTA	C1
ALTA	C2
MEDIA	C3
BAJA	C4

Fuente: Elaboración Propia

### 8.3.2. Geomorfología:

Con base a la guía metodología del IDEAM y teniendo en cuenta la susceptibilidad del suelo, en la Tabla 18 se observa los ambientes que se escogieron para la clasificación. En el anexo B se pueden verificar con mayor descripción:

Figura 24 Clasificación Geomorfológica

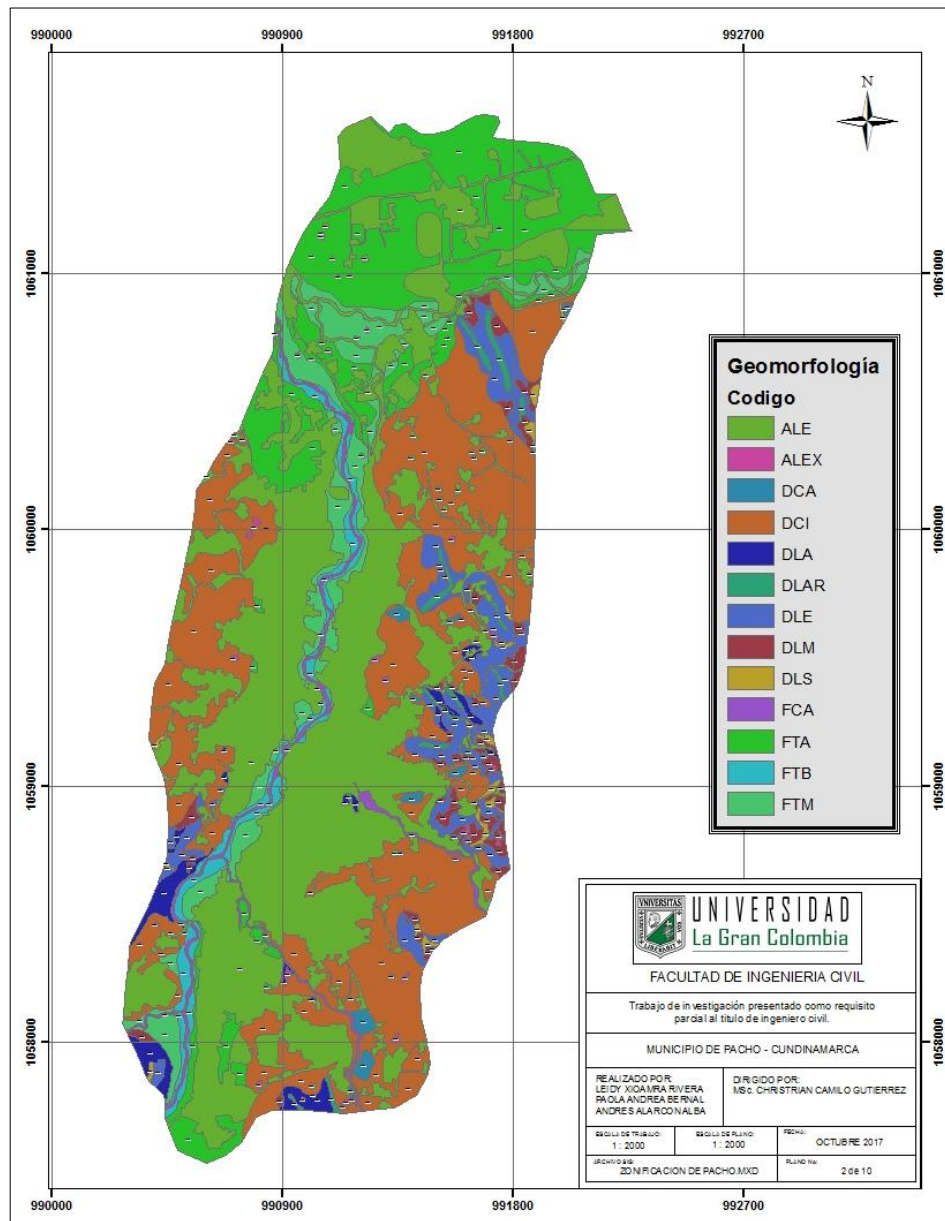


Tabla 18 Código y clase para clasificación de unidades geomorfológicas

GEOMORFOLOGIA	
CODIGO	CLASE
ESTRUCTURAL	C1
VOLCANICO	C2
DENUDACIONAL	C3
GLACIAL	C4
FLUVIAL	C5
MARINO	C6
CÁRSTICO	C7
EOLICO	C8
ANTROPICO	C9

Fuente: Elaboración Propia

### 8.3.3. Procesos de remoción en masa:

Para los procesos de remoción en masa es necesario basarse en eventos históricos, es decir que hayan sucedido ante del evento. Entre estos procesos se encuentran los siguientes:

Figura 25 Inventario Procesos de Remoción en masa

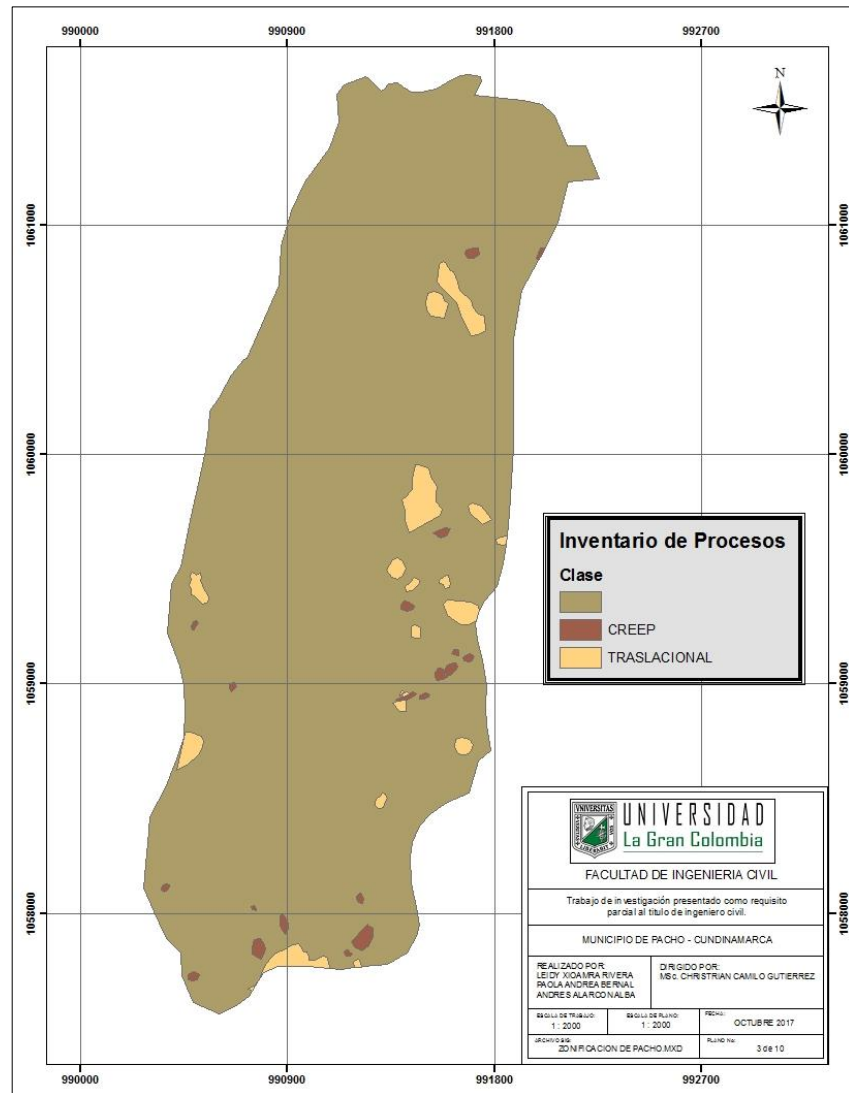


Tabla 19 Código y clase para clasificación de procesos de remoción en masa

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA	
CODIGO	CLASE
ROTACIONAL	C1
CUÑA	C2
VOLTEO	C3
CAIDO	C4
FLUJOS	C5
TRASLACIONAL	C6
CREEP O REPTACIÓN	C7

Fuente: Elaboración Propia

### 8.3.4. Hidrología:

Para la parte de hidrología, se realizó una clasificación de los cauces de acuerdo a su importancia de la siguiente manera:

- Cauces de primer orden: Son los que no tienen tributarios
- Cauces de segundo orden: se forman de la unión de dos cauces de primer orden.
- Cauces de tercer orden: Se forman cuando un cauce se une con otro de orden mayor.
- Cauces de cuarto orden: Es el mismo del cauce principal a la salida.

Figura 26 Clasificación de cauces

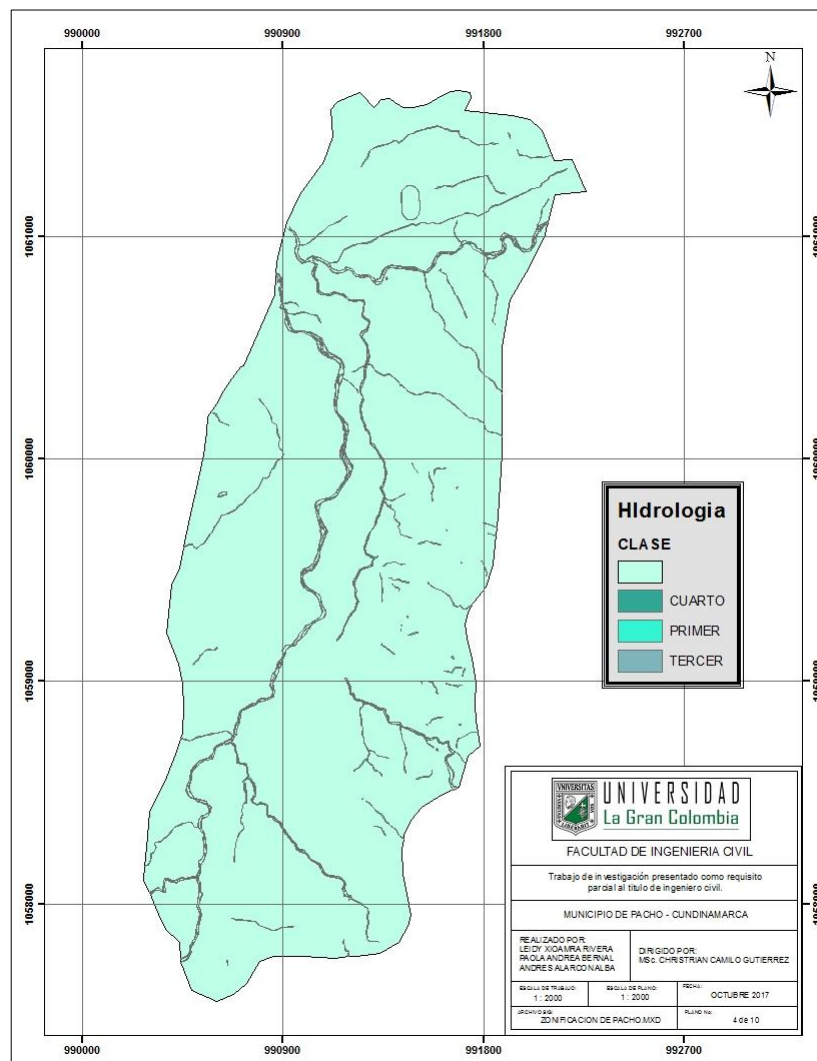


Tabla 20 Código y clase para clasificación de Causas en hidrología

HIDROLOGIA	
CODIGO	CLASE
CAUCE DE PRIMER ORDEN	C1
CAUCE DE SEGUNDO ORDEN	C2
CAUCE DE TERCER ORDEN	C3
CAUCE DE CUATRO ORDEN	C4

Fuente: Elaboración Propia

### 8.3.5. Cobertura Vegetal:

Este ítem se clasificó con base a la metodología corine land cover del IDEAM, en la Tabla 21 se muestran los códigos escogidos. En el anexo C se pueden verificar con mayor descripción:

Figura 27 Clasificación cobertura vegetal

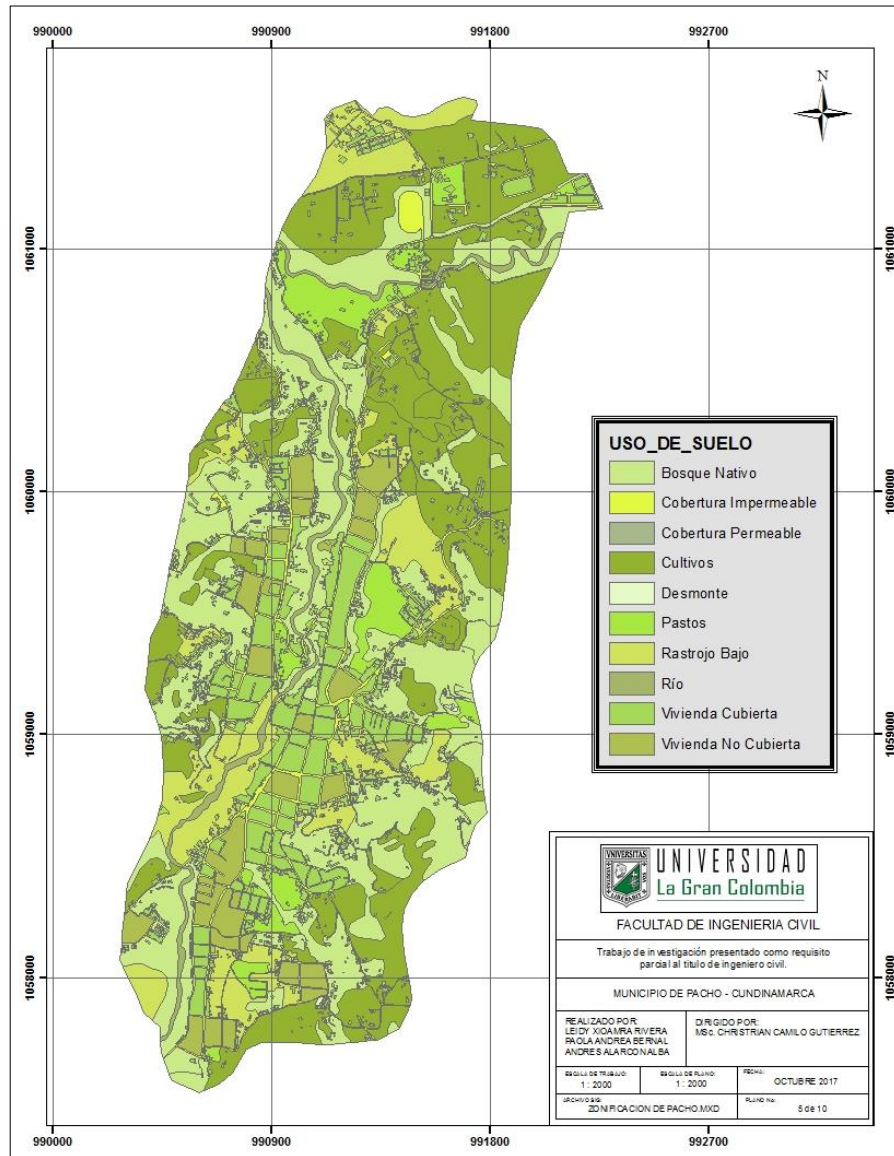


Tabla 21 Código y clase para clasificación en cobertura vegetal

COBERTURA	
CODIGO	CLASE
TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	C1
TERRITORIOS AGRICOLAS	C2
BOSQUES Y AREAS SEMINATURALES	C3
AREAS HUMEDAS	C4
SUPERFICIES DE AGUA	C5

Fuente: Elaboración Propia

### 8.3.6. Geología:

Para las unidades de geología para ingeniería (UGI) se realizó la siguiente clasificación haciendo una división por clases.

Figura 28 Clasificación UGI

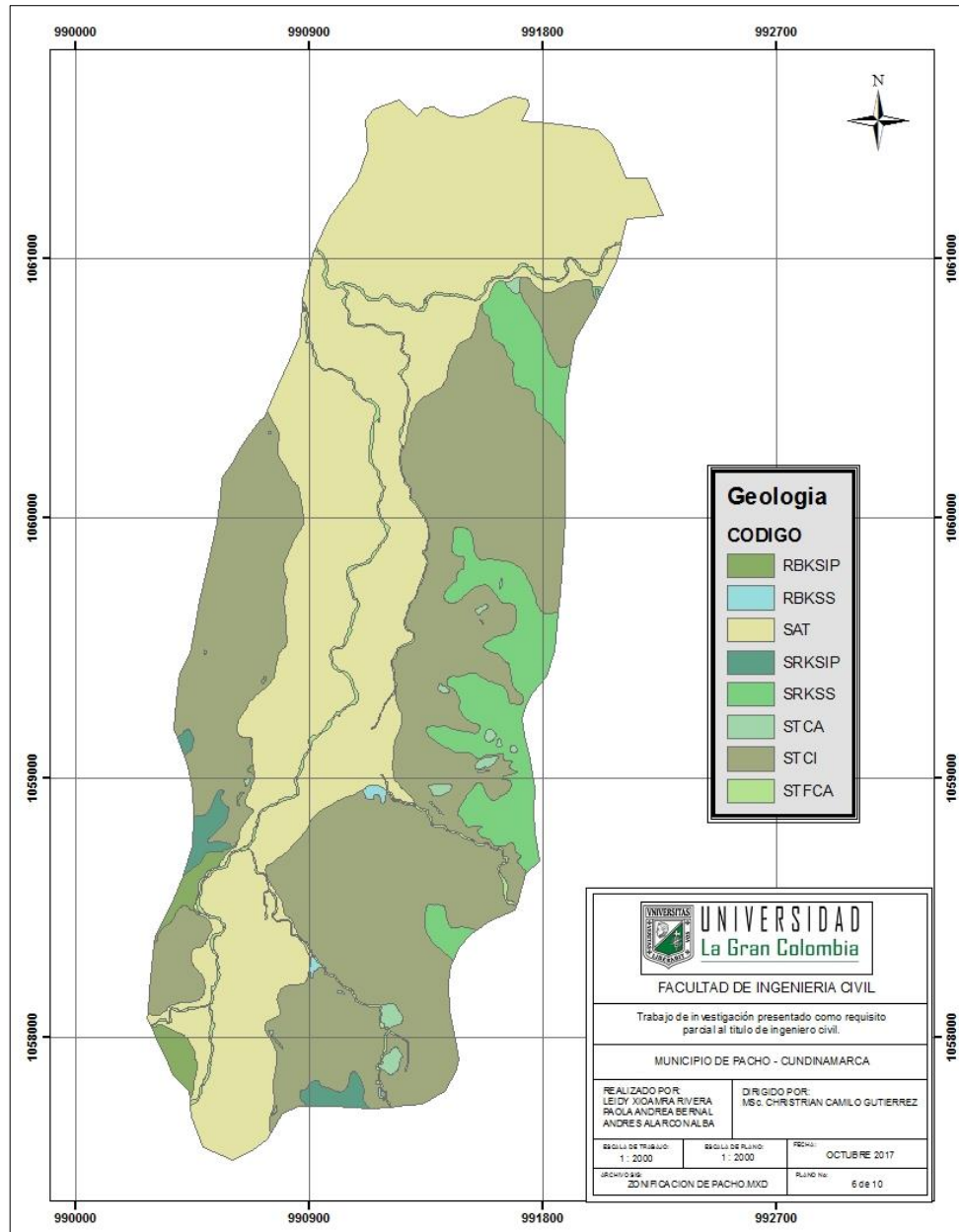


Tabla 22 Código y clase para clasificación de aspectos geológicos

GEOLOGIA	
CODIGO	CLASE
ROCA INSITU	C1
DEPOSITOS ALUVIALES	C2
DEPOSITOS LACUSTRES	C3
DEPOSITOS DE LADERA	C4
DEPOSITOS COSTEROS	C5
DEPOSITOS VOLCANICOS	C6
DEPOSITOS EOLICOS	C7
DEPOSITOS GLACIARES	C8
DEPOSITOS ANTROPICOS	C9

Fuente: Elaboración Propia

### 8.3.7. Sedimentos:

Para el análisis del transporte de sedimentos, es importante tener en cuenta el tamaño de cada uno de los sedimentos, este procedimiento necesariamente requiere de hacer granulometría, así de esta manera se pudo clasificar la variable de la siguiente manera:

Figura 29 Clasificación de sedimentos

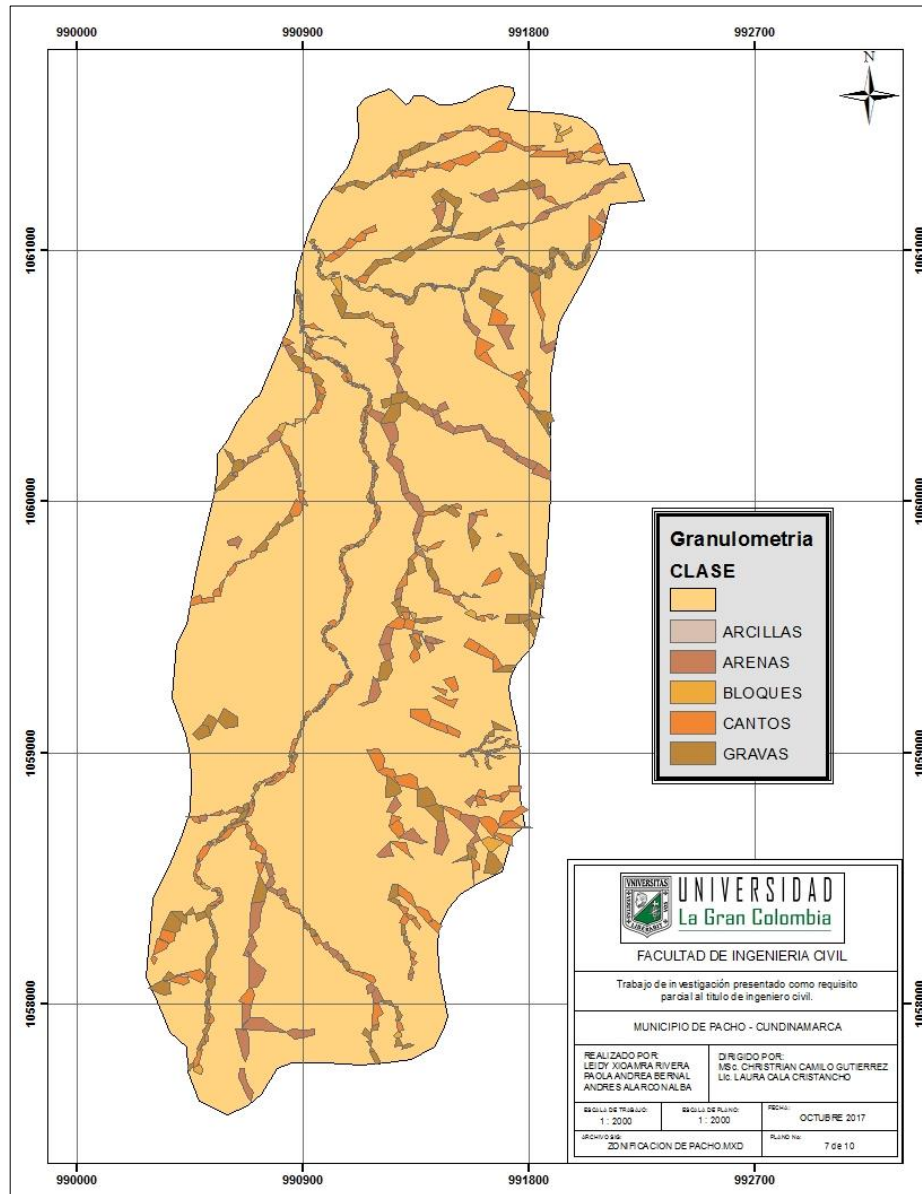


Tabla 23 Código y clase para clasificación para ciclo de sedimentos

SEDIMENTOS	
CODIGO	CLASE
ARCILLAS	C1
ARENAS	C2
GRAVAS	C3
CANTOS	C4
BLOQUES	C5

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla 24 se observan las particularidades para esta clasificación:

Tabla 24 Clasificación granulométrica

	Sedimento	Tamaño	Pasa Tamiz	Retenido Tamiz
1	Arcillas	< 0,002 mm	No 200	-
2	Arenas	0,06 mm - 2mm	No 10	No 200
3	Gravas	2 mm – 60 mm	3"	No 10
4	Cantos	60 mm – 250 mm	Se excluye de la muestra	Se excluye de la muestra
5	Bloques	> 250 mm	Se excluye de la muestra	Se excluye de la muestra

Fuente: SUAREZ, Op. cit. p.182.

### 8.3.8 Hidráulica

Para los procesos de inundación es necesario basarse la pendiente en la zona y en un periodo de retorno. Estos procesos se clasifican de la siguiente manera:

Figura 30 Hidráulica

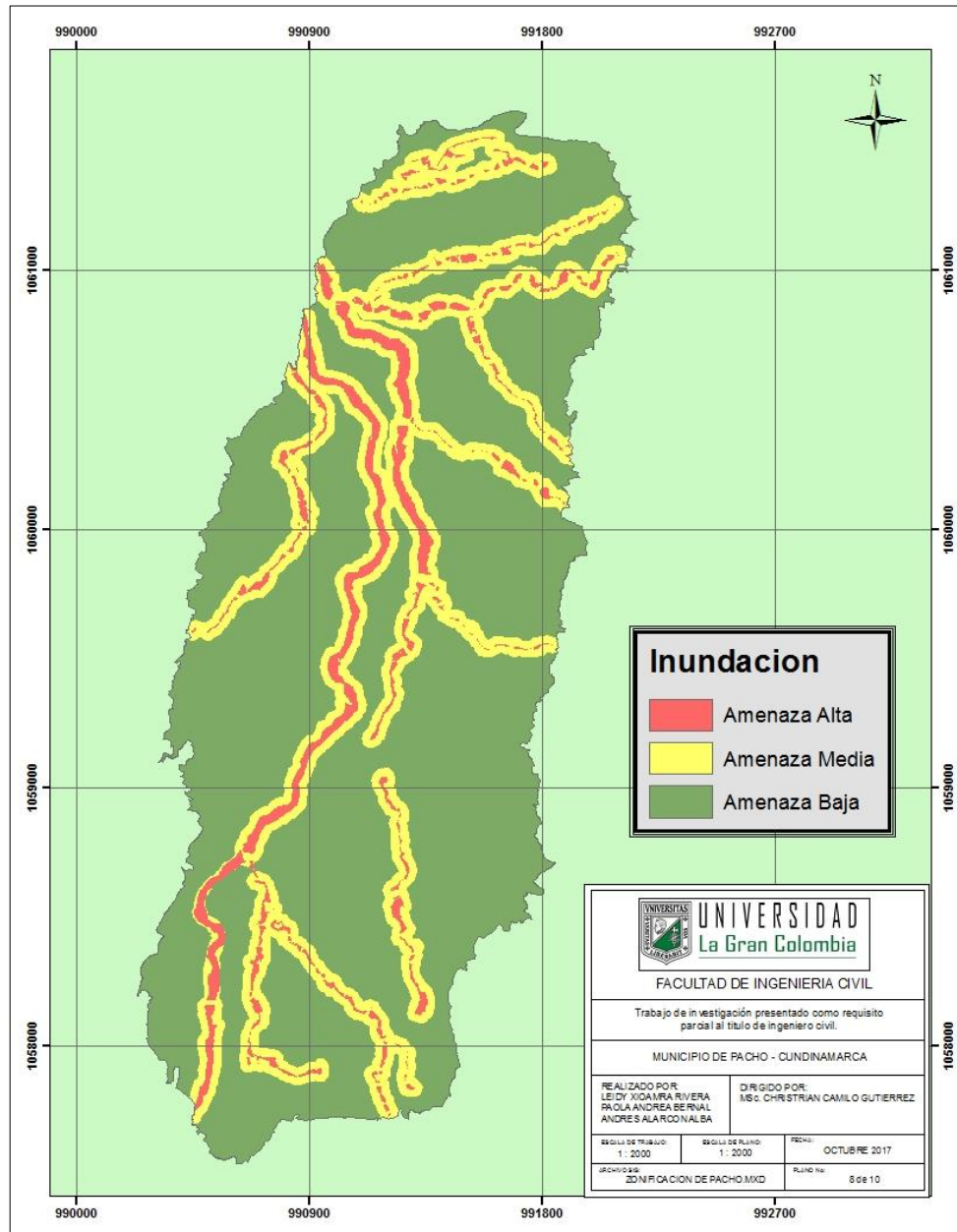


Tabla 25 Código para la clasificación en hidráulica

HIDRÁULICA	
CODIGO	CLASE
ALTA	C1
MEDIA	C2
BAJA	C3

Fuente: Elaboración Propia

### 8.3.9 Inventario de procesos Eventos de torrencialidad

Para los procesos de Eventos de torrencialidad es necesario basarse en eventos históricos, es decir que hayan sucedido ante del evento. Estos procesos se clasifican de la siguiente manera:

Figura 31 Inventario eventos de torrencialidad

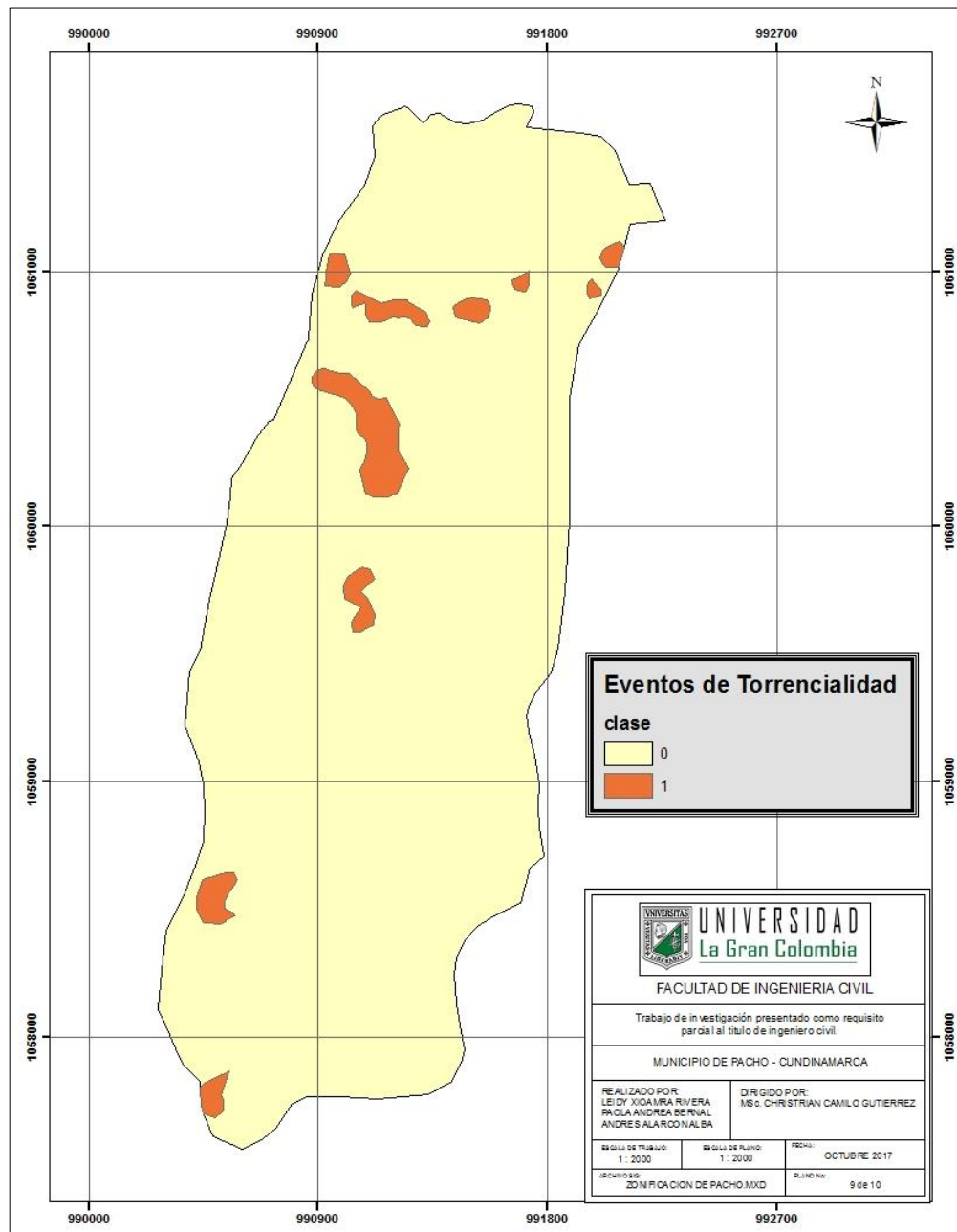


Tabla 26 Clasificación para Eventos de torrencialidad

EVENTOS DE TORRENCIALIDAD	
CODIGO	CLASE
ACTIVO	C1
IN ACTIVO	C2

Fuente: Elaboración Propia

#### 8.4 EJEMPLO DE APLICACIÓN METODOLOGÍA PARA LA EVALUACION DE AMENAZA POR EVENTOS DE AVENIDA TORRENCIAL A ESCALA 1:2000

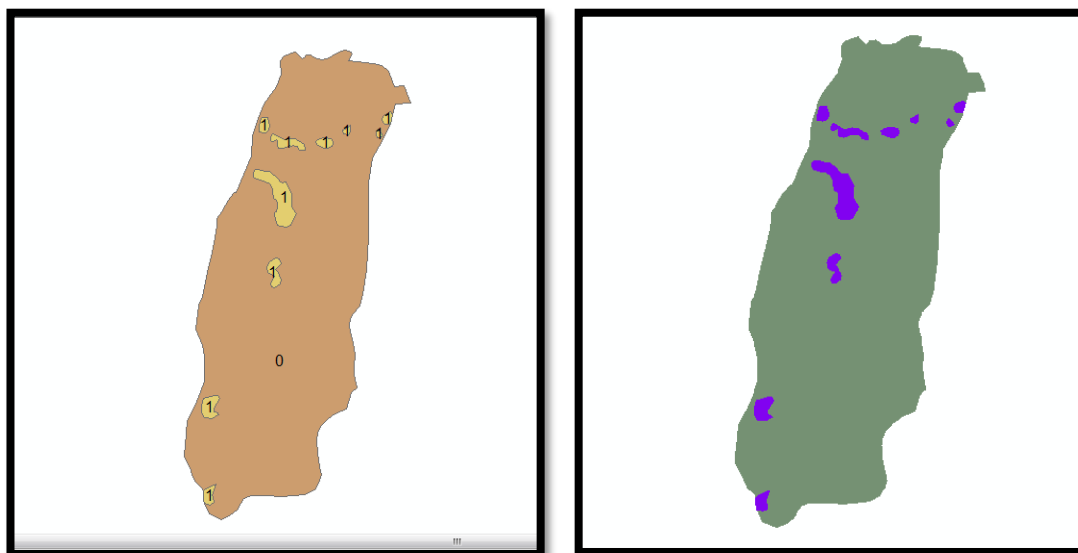
Para la realización del mapa de zonificación se tuvieron en cuenta las variables ya nombradas. La variable eventos de torrencialidad fue la variable central para el análisis de todas las otras. Es importante mencionar que para la calibración de la metodología se realizaron distintas granulometrías, algunas ficticias otra reales con el fin de obtener la mayor precisión posible.

De esta manera con la aplicación del método bivariado en un software de Sistema de Información Geográfica SIG que incluyó la combinación de mapas, conteo de pixeles obtenidos en cada clase de las variables que fueron analizadas para la generación de un algebra de mapas y así de esta manera se pudo obtener la zonificación de amenaza para eventos de avenidas torrenciales clasificándolas en niveles de alta media y baja probabilidad.

En el siguiente ejemplo se quiere mostrar el desarrollo de un mapa de zonificación de amenaza por avenida torrencial a través del método bivariado:

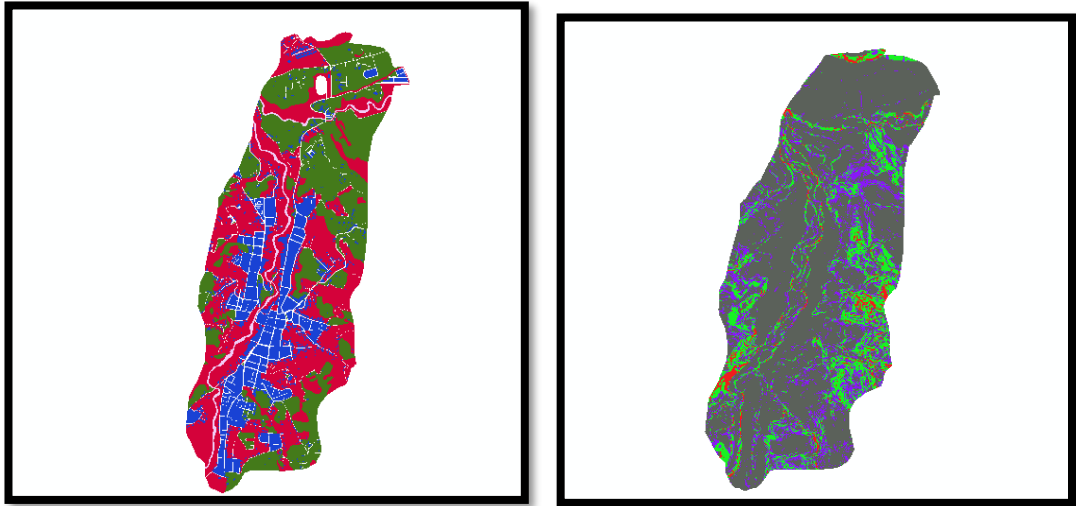
1. Se convirtió la capa de eventos torrenciales a raster

Figura 32 Conversión de capa a raster de la variable principal



2. Volver raster cada una de las otras variables

Figura 33 Raster de cada variable



3. Mirar el número de píxeles en cada clase

Figura 34 Tabla de atributos con píxeles de cada clase

Rowid	VALUE	COUNT
0	1	768982
1	2	185990
2	3	183982
3	4	33349

4. Combinar cada uno de los raster con el raster de eventos torrenciales

Figura 35 Combinación de raster con el de eventos torrenciales



5. Mirar el número de píxeles de cada variable en la variable eventos torrenciales (Desde la combinación realizada anteriormente).

Figura 36 Tabla de atributos con píxeles de eventos torrenciales

A screenshot of a table window titled "Table" with a toolbar. The table is titled "times" and contains the following data:

Rowid	VALUE	COUNT
0	1	27809
1	2	6354
2	3	8208
3	4	3780

6. En un Excel reemplazar la ecuación del método bivariado para cada variable, de manera que se puedan obtener las siguientes tablas con sus pesos correspondientes:

Tabla 27 Aplicación del método bivariado para pendientes

PENDIENTES				
CODIGO	CLASE	Npxi (Ni)	Npxi (Si)	PESO
MUY ALTA	C1	33349	3780	1,0575
ALTA	C2	183982	8208	0,1251
MEDIA	C3	185990	6354	-0,1418
BAJA	C4	768982	27809	-0,0849
$\Sigma$		1172303	46151	

Tabla 28 Aplicación del método bivariado para geología

GEOLOGIA				
CODIGO	CLASE	Npxi (Ni)	Npxi (Si)	PESO
ROCA INSITU	C1	484	1522	4,28557
DEPOSITOS ALUVIALES	C2	538970	39304	0,52154
DEPOSITOS LACUSTRES	C3	0		0,00000
DEPOSITOS DE LADERA	C4	531718	5543	- 1,42370

Tabla 26 (Continuación)

DEPOSITOS COSTEROS	C5	0		0,00000
DEPOSITOS VOLCANICOS	C6	0		0,00000
DEPOSITOS EOLICOS	C7	0		0,00000
DEPOSITOS GLACIARES	C8	0		0,00000
DEPOSITOS ANTROPICOS	C9	0		0,00000
$\Sigma$		1071172	46369	

Tabla 29 Aplicación del método bivariado para hidrología

HIDROLOGIA				
CODIGO	CLASE	Npxi (Ni)	Npxi (Si)	PESO
CAUCE DE PRIMER ORDEN	C1	5622	0	0,00000
CAUCE DE SEGUNDO ORDEN	C2	4407	0	0,00000
CAUCE DE TERCER ORDEN	C3	5455	725	0,00749
CAUCE DE CUATRO ORDEN	C4	11526	2838	0,62410
$\Sigma$		27010	3563	

Tabla 30 Aplicación del método bivariado para geomorfología

GEOMORFOLOGIA				
CODIGO	CLASE	Npxi (Ni)	Npxi (Si)	PESO
ESTRUCTURAL	C1	0	0	0,00000
VOLCANICO	C2	0	0	0,00000
DENUDACIONAL	C3	425454	2507	- 1,89282
GLACIAL	C4	0	0	0,00000
FLUVIAL	C5	285564	35192	1,14760
MARINO	C6	0	0	0,00000
CÁRSTICO	C7	0	0	0,00000
EOLICO	C8	0	0	0,00000
ANTROPICO	C9	474434	8670	- 0,76101
$\Sigma$		1185452	46369	

Tabla 31 Aplicación del método bivariado para remoción en masa

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA				
CODIGO	CLASE	Npxi (Ni)	Npxi (Si)	PESO
ROTACIONAL	C1	0	0	0,00000
CUÑA	C2	0	0	0,00000
VOLTEO	C3	0	0	0,00000
CAIDO	C4	0	0	0,00000
FLUJOS	C5	0	0	0,00000
TRASLACIONAL	C6	37776	47	- 1,99426
CREEP O REPTACIÓN	C7	8610	377	1,56659
$\Sigma$		46386	424	

Tabla 32 Aplicación del método bivariado para cobertura

COBERTURA				
CODIGO	CLASE	Npxi (Ni)	Npxi (Si)	PESO
TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS	C1	221826	1680	- 1,68228
TERRITORIOS AGRICOLAS	C2	395527	6156	- 0,96197
BOSQUES Y AREAS SEMINATURALES	C3	477346	30131	0,43813

Tabla 31. (Continuación)

AREAS HUMEDAS	C4	0	0	0,00000
SUPERFICIES DE AGUA	C5	21121	7479	2,16265
$\Sigma$		1115820	45446	

Tabla 33 Aplicación del método bivariado para sedimentos

SEDIMENTOS				
CODIGO	CLASE	Npxi (Ni)	Npxi (Si)	PESO
ARENAS	C1	1777	714	0,10093
ARCILLAS	C2	779	314	0,10412
GRAVAS	C3	9161	2294	-0,37193
CANTOS	C4	7722	3067	0,08936
BLOQUES	C5	2875	1716	0,49668
$\Sigma$		22314	8105	

HIDRAULICA				
CODIGO	CLASE	Npxi (Ni)	Npxi (Si)	PESO
ALTA	C1	71341	13082	1,53028
MEDIA	C2	259738	25009	0,88607
BAJA	C3	854362	8966	-1,33040
$\Sigma$		1185441	47057	

Tabla 34 Aplicación del método bivariado para la hidráulica

HIDRAULICA				
CODIGO	CLASE	Npxi (Ni)	Npxi (Si)	PESO
Alta	C1	71341	13082	1,53028
Media	C2	259738	25009	0,88607
Baja	C3	854362	8966	-1,33040
$\Sigma$		1185441	47057	

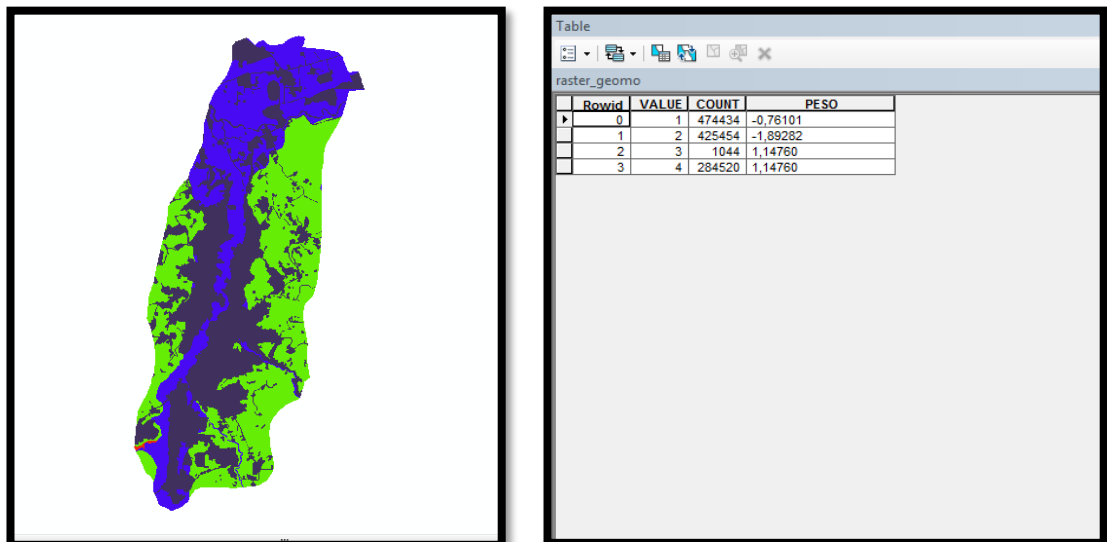
- Se crea un campo en los atributos de cada variable, en este campo se colocan los pesos calculados anteriormente.

Figura 37 campo de pesos en cada una de las variables

FID	Shape *	ID	GRIDCODE	CLASE	peso
0	Polygon	1	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
1	Polygon	2	3	ROCA IN-SITU	4.2855
2	Polygon	3	2	DEPOSITOS ALUVIALES	0.5215
3	Polygon	4	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
4	Polygon	5	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
5	Polygon	6	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
6	Polygon	7	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
7	Polygon	8	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
8	Polygon	9	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
9	Polygon	10	3	ROCA IN-SITU	4.2855
10	Polygon	11	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
11	Polygon	12	3	ROCA IN-SITU	4.2855
12	Polygon	13	3	ROCA IN-SITU	4.2855
13	Polygon	14	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
14	Polygon	15	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
15	Polygon	16	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
16	Polygon	17	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
17	Polygon	18	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
18	Polygon	19	3	ROCA IN-SITU	4.2855
19	Polygon	20	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
20	Polygon	21	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
21	Polygon	22	3	ROCA IN-SITU	4.2855
22	Polygon	23	3	ROCA IN-SITU	4.2855
23	Polygon	24	3	ROCA IN-SITU	4.2855
24	Polygon	25	2	DEPOSITOS ALUVIALES	0.5215
25	Polygon	26	3	ROCA IN-SITU	4.2855
26	Polygon	27	3	ROCA IN-SITU	4.2855
27	Polygon	28	3	ROCA IN-SITU	4.2855
28	Polygon	29	3	ROCA IN-SITU	4.2855
29	Polygon	30	1	DEPOSITOS DE LADERA	-1.4237
30	Polygon	31	2	DEPOSITOS ALUVIALES	0.5215
31	Polygon	32	2	DEPOSITOS ALUVIALES	0.5215
32	Polygon	33	3	ROCA IN-SITU	4.2855
33	Polygon	34	2	DEPOSITOS ALUVIALES	0.5215
34	Polygon	35	2	DEPOSITOS ALUVIALES	0.5215
35	Polygon	36	2	DEPOSITOS ALUVIALES	0.5215
36	Polygon	37	3	ROCA IN-SITU	4.2855
37	Polygon	38	3	ROCA IN-SITU	4.2855
38	Polygon	39	3	ROCA IN-SITU	4.2855
39	Polygon	40	3	ROCA IN-SITU	4.2855

- De nuevo se vuelven a generar los raster de cada variable pero incluyendo los pesos mencionados en el punto anterior.

Figura 38 Raster de cada variable incluyendo los pesos



- Con esta conversión se procede a sumar todos, de manera que se puede obtener el siguiente mapa de zonificación por eventos de avenida torrencial en la Figura 39 se observa un diagrama de torta clasificando los niveles de amenaza en porcentaje y en la Tabla 35 se observa su

descripción para cada porcentaje, en el anexo D se puede observar con mayor claridad.

Tabla 35 Descripción amenaza para zonificación por eventos de torrencialidad

Amenaza	Porcentaje %	Característica física
Bajo	46	Por su parte, el 46% del área de interés se encuentra en una categoría de amenaza por eventos de avenida torrencial baja, la gran mayoría con cobertura vegetal con predominio de zonas de cultivo y vivienda cubierta, sin procesos de erosión activos y pendientes de terreno medias a bajas, con algunas excepciones.
Medio	45	El 45% del casco urbano de municipio se encuentra en una categoría de amenaza por eventos de torrencialidad medio, presentando como material asociado cantos y gravas principalmente sobre zonas de pastos y vivienda no cubierta.
Alto	8	Estas zonas se encuentran ubicadas hacia el norte del municipio, donde se tienen zonas de inventarios de procesos de torrencialidad recientes como antiguos activos y no activos sobre suelos que en su mayoría se conforman de materiales como cantos y bloques que no aportan de manera tan significativa a la estabilidad de la zona

Figura 39 Diagrama de torta para zonificación de amenaza por eventos de torrencialidad

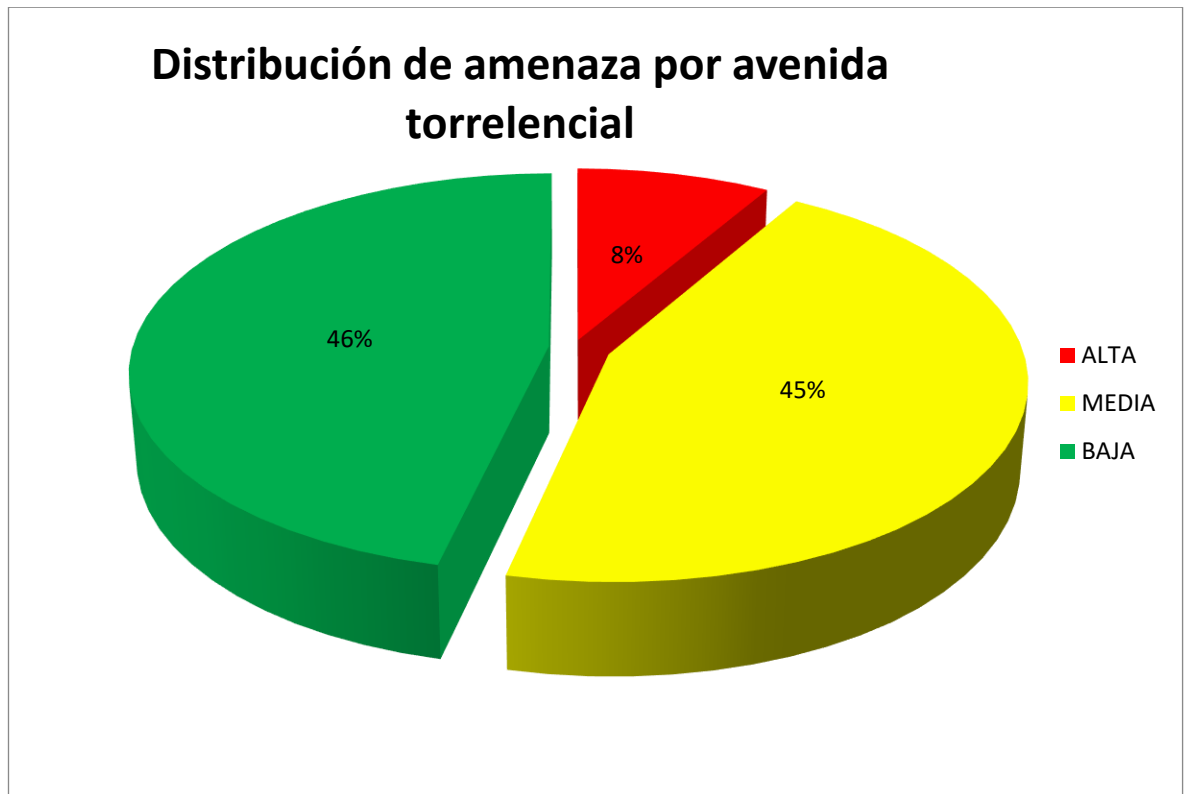
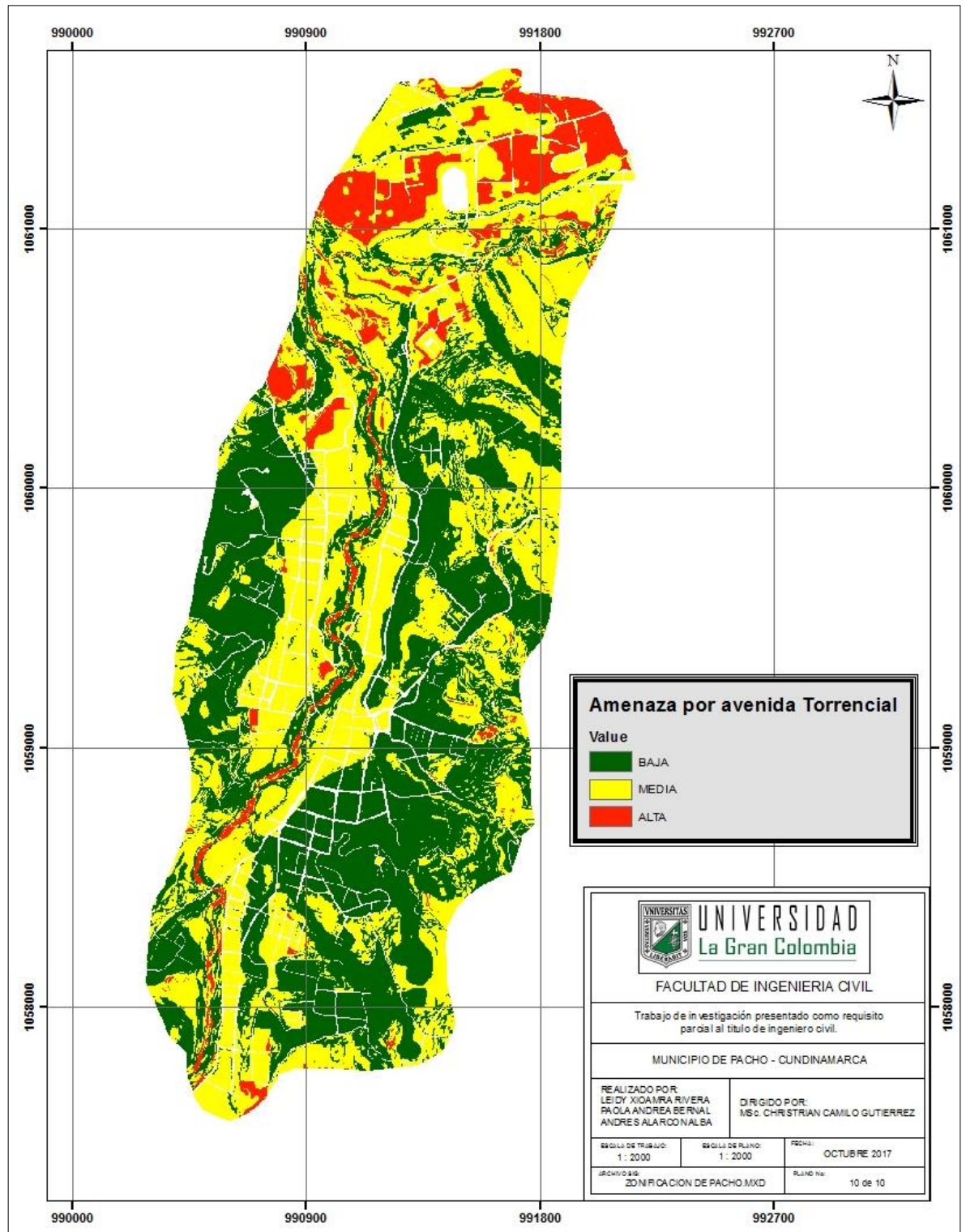


Figura 40 Mapa de zonificación de amenaza por eventos de avenida torrencial



## 9. ANALISIS DE RESULTADOS

El análisis de amenaza a la ocurrencia de eventos por avenidas torrenciales se realizó mediante la implementación del método estadístico bivariante que se fundamenta en el análisis superpuesto entre el mapa de inventario de eventos de Torrencialidad y los mapas de los factores condicionantes considerados.

El modelo de zonificación de amenaza así considerado se generó a partir de las variables: pendiente, geomorfología, cobertura vegetal, geología, hidrología, inventario de procesos de remoción en masa, inundación, sedimentos y el inventario de eventos de Torrencialidad. Para todas las variables, se presentaron clases que tienen relaciones importantes con la ocurrencia de avenidas torrenciales, aunque las clases donde se presentan mayores correlaciones son las de las variables sedimentos e inundación.

Esta clasificación de los eventos de Torrencialidad para validación, en los niveles de amenaza definidos, indica el grado de predicción del método propuesto. De esta forma, cuando la mayor parte de precipitaciones y clasificación de sedimentos quedan clasificados en rangos de amenaza alta, indicará la necesidad de que el trabajo de campo sea completo y se obtengan exactitud en sus resultados, de igual forma se requieren las secciones topo batimétricas con el fin de hacer posible la modelación de todos los cauces eso con el objeto de generar el mapa de manchas de inundación, ya que es fundamental conocer esta información teniendo en cuenta que los sedimentos combinados con esta variable es uno de los factores más detonantes generando procesos de arrastre de material generando eventos de torrencialidad.

## 10. CONCLUSIONES

En la determinación de los factores y variables influyentes usados en las metodologías implementadas para eventos por torrencialidad, se pudo identificar en las siete metodologías estudiadas siendo cuatro de estas nacionales y tres internacionales que la precipitación es uno de los factores más influyentes en la generación de estos eventos y fue en base a esto que se determinó la variable procesos de torrencialidad como variable de comparación con las otras variables establecidas para el desarrollo de la metodología a escala 1:2000 y poder obtener la zonificación final de amenaza.

En la metodología propuesta se tuvieron en cuenta la interacción entre los factores y las variables influyentes para evaluación de eventos por avenidas torrenciales como lo fueron la topografía, cartografía, geología para ingeniería, geomorfología, hidrología, flujo hiperconcentrado y topo batimetría con el fin de poder contar con el beneficio de ser adaptable a otras zonas de estudio, con problemas de eventos por torrencialidad en zonas urbanas manejando una escala de trabajo 1:2000.

En relación con la metodología desarrollada de amenaza física por eventos de avenida torrencial se establecieron lineamientos teóricos necesarios en el desarrollo que apoyados con los resultados de un software SIG, fuera posible identificar las zonas con niveles de amenaza alta, media y baja en la generación de estos eventos.

La metodología para la evaluación de amenaza por eventos de avenida torrencial a escala 1:2000 desarrollada en este trabajo de investigación se apoyó con la utilización de un sistema de información geográfico que cuentan con gran número de funciones que permite tener una elevada operatividad, entre las cuales se destacan las de inclusión de datos y análisis espacial, en la modelación del análisis espacial estas herramientas aceleran los procesos de desarrollo e implementación de modelos hidrológicos, cartográficos, algebra de mapas, entre otros. Fue usado como plataforma para la experimentación rápida de nuevas ideas y conceptos (elaboración de prototipos) para hacer posible el progreso de la metodología y así finalmente corroborar la eficiencia del método usado.

La metodología presentada unifica criterios de evaluación tanto para amenaza por eventos de avenida torrencial a una escala de trabajo 1:2000, que de acuerdo con la revisión bibliográfica, hasta la fecha no se habían

integrado en un documento y solo se habían evaluado aisladamente tanto a nivel nacional como internacional.

## 11. RECOMENDACIONES

El estudio de la metodología para la evaluación de amenaza por eventos de avenida torrencial a escala 1:2000 es una herramienta de gran ayuda que puede ser utilizada por las entidades como Servicio Geológico Colombiano, Alcaldías Municipales, Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo, Universidades para profundizar estudios de investigación en relación a este tipo de eventos.

Con base en los mapas de amenaza es recomendable prever obras de protección y reubicación de las viviendas afectadas, principalmente las que se encuentran construidas sobre los cauces que se puedan ver afectados con los eventos de torrencialidad.

En las poblaciones afectadas deben establecerse sistemas de Alertas Tempranas para disminuir o evitar los daños asociados a este tipo de eventos en cuanto a pérdidas de vidas, y daños en bienes teniendo en cuenta los antecedentes de la ocurrencia de eventos por torrencialidad.

Es importante en una próxima investigación complementar la modelación con otra variable principal que no sean los procesos históricos por eventos de torrencialidad para llegar a una calibración del modelo más rigurosamente.

## BIBLIOGRAFÍA

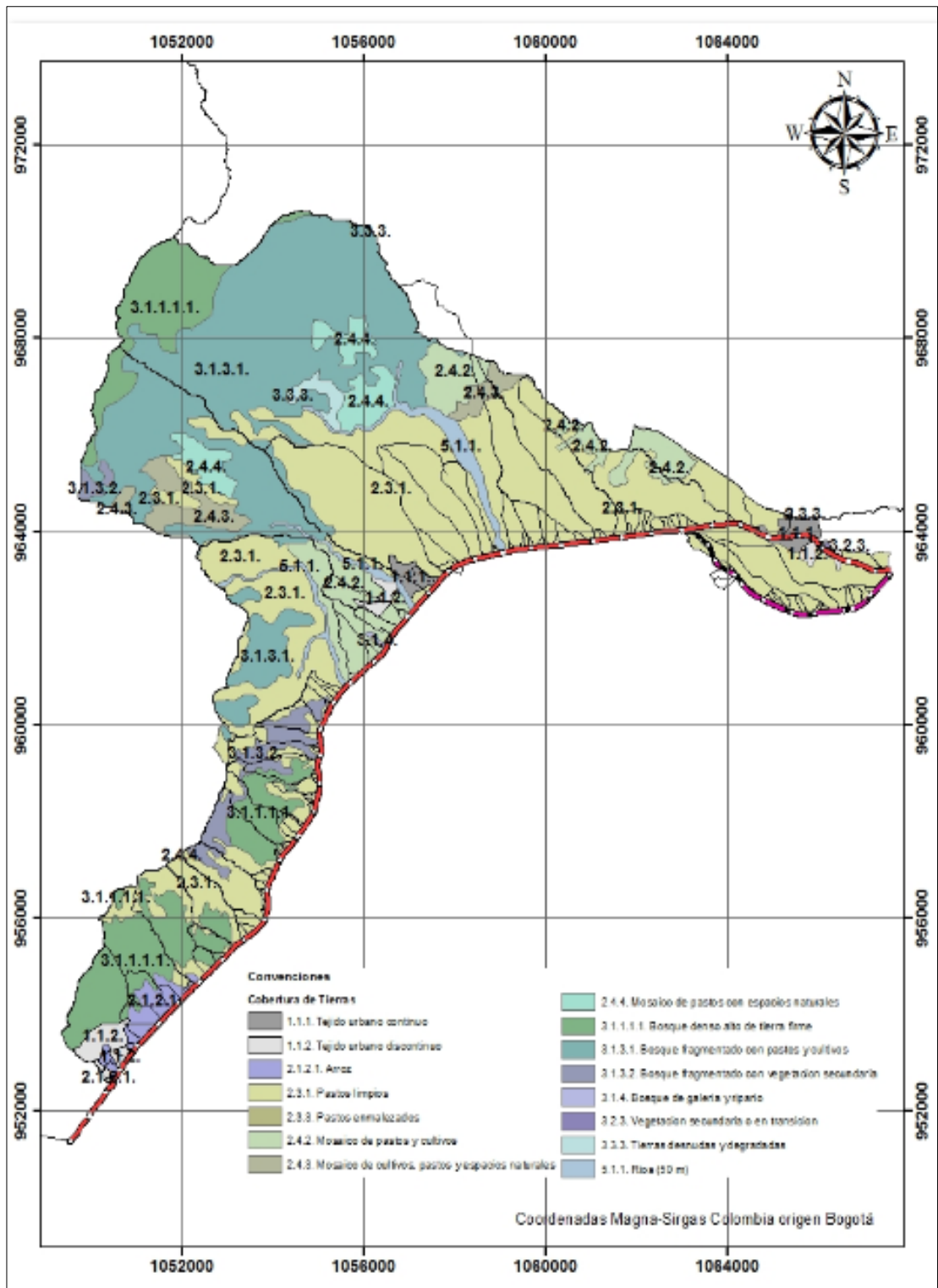
- AYALA, F. J et al (2002). Mapas de susceptibilidad a movimientos de ladera usando técnicas SIG, publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España (ITGE), Madrid.
- BARRIOS M. y OLAYA E. Cálculo y análisis de hidrógrafas para el flujo torrencial ocurrido el 22 de junio de 2006 en la microcuenca el salto. Trabajo de grado de Maestría. Ibagué Tolima. Universidad del Tolima. 2007. 32 p.
- BECERRA O.Y QUIROGA D. Estudio hidrológico de la cuenca del río chípalo. Trabajo de grado Especialización. Bogotá D.C. Universidad Católica De Colombia Facultad De Ingeniería.2014. 14 p.
- BLANCO BALLESTEROS Julio. Remoción de Masa .Geología Ambiental. Trabajo de grado .Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. 2011.
- CABALLERO, José Humberto. Las avenidas torrenciales: una amenaza potencial en el valle de Aburra. En: Revista Gestión y Ambiente, Diciembre 2011.vol. 14, no. 3, p.04.
- COLOMBIA, ALCALDIA DE MEDELLIN, Decreto 1626 de 2015, Por medio del cual se reglamenta el procedimiento para las correcciones y precisiones de la cartografía oficial del Plan de Ordenamiento Territorial –POT.
- COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Decreto 1807 de 2014, Reglamentación del artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012.
- COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 1523 de 2012, Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.
- COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 019 de 2012, Por el cual se dictan normas para suprimir o reformar regulaciones, procedimientos y trámites innecesarios existentes en la Administración Pública.
- COLOMBIA, MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Decreto 1077 de 2015. Bogotá, D.C., 2015.p.
- COLOMBIA, CONGRESO DE LA REPÚBLICA. Ley 388 de 1997, por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989, y la Ley 3ª de 1991.
- CONSORCIO EVALUACIÓN DE RIESGOS NATURALES. Metodología de modelación probabilista de riesgos naturales. Noviembre 21 de 2011
- DUQUE Gonzalo, Manual de geología para ingenieros. Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería Civil, 2003.
- Elaborado con información de USGS (U.S. Geological Survey). The Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides. Circular 1325. Virginia, 2008. (2008) y PMA4 (2007)
- ESRI. Características Argos (en línea). <<https://www.arcgis.com/features/features.html>> (citado en 14 de marzo de 2017).

- GARCIA, M. (2009). Guía para la elaboración de mapas de inventario y susceptibilidad de movimientos de ladera. España: IGME.
- GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA, CONVENIO CORNARE. Zonificación de riesgo por movimientos en masa inundación y avenidas torrenciales. Atención de áreas afectadas por eventos desastrosos. Municipio de Cocorna. 2012.p.05
- GONZALES, Milena. Comparación entre los métodos heurístico, estadístico univariado y estadístico bivariado, para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000 en el municipio de santa bárbara, departamento de Antioquia. Trabajo de grado Geólogo. Medellín.: Universidad Eafit. Departamento de ciencias de la tierra, 2015.13 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Manual de estabilidad de taludes. Fenómenos de inestabilidad de taludes. Bogotá D.C.:1998. 33 p. ISBN 958-95941-2-3.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, Unidades geomorfológicas del territorio colombiano. Bogotá, D.C.:2013. p. 5.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, Guía metodológica para la elaboración de mapas Geomorfológicos a escala 1:100.000. Bogotá D.C.: 2013. p.19.
- J. González, O. Chávez, and M. Hermelinda, «Aspectos geomorfológicos de la avenida torrencial del 31 de enero de 1994 en la cuenca del río Fraile y sus fenómenos asociados,» Desastres de origen natural en Colombia 1979-2004, M. Hermelinda, ed., Medellín: Universidad Exabit, 2005.p.1
- LAN, H. ZHOU, CH. WANG, LJ. ZHANG, HY. LI, R (2004) Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. Eng Geol 76:109–128.
- LIN, J.-Y., YANG, M.-D., LIN, B.-R., & LIN, P.-S. (2011). Risk assessment of debris flows in Songhe Stream, Taiwan. Engineering Geology, 100-112.
- MENDOZA Jesús. Análisis de la vulnerabilidad en la microcuenca Joaquín Herrera por avenidas torrenciales. Tesis de Maestría en gestión integrada de cuencas. Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro. Revista Gestión y Ambiente, 2009. 14 p.
- MINISTERIO DE VIVIENDA CIUDAD Y TERRITORIO. Incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. Decreto 1807 de 2014. República de Colombia.
- MONTOYA, Luis. SILVA, Sandra. GONZALES, Juan. Evaluación de zonas de amenaza por avenidas Torrenciales utilizando metodologías cualitativas. Caso de aplicación a la quebrada doña maría. En: Revista Ingenierías Universidad de Medellín, julio-diciembre de 2009, vol 8, No. 15, p 13 - ISSN 1692-3324 -

- Popescu, M.E. Landslide Causal Factors and Landslide Remediation Options Illinois Institute of Technology, Chicago, USA. .1997.
- RIVAS MARIBEL et al. Determinación de niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del río Mocotíeso, Mérida, Venezuela. Trabajo de investigación. Mérida, Venezuela. Revista Forestal Venezolana, Año XLIII, Volumen 53(1) enero-junio, 2009... 33 p.
- SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO; Guía metodológica para estudios de amenaza vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá D.C. 2015. P 36. ISBN: 978-95899528-5-6
- SUAREZ, Jaime. Los Flujos. En: Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico. Bucaramanga, Colombia, Ingeniería de Suelos Ltda., 1998.
- ROJAS NESTOR et al. Caracterización geotécnica de una cuenca para correlación con parámetros del modelo hidrogeológico de Thomas. Trabajo de investigación. Boyacá, Colombia. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. 2013.
- Universidad de Los Andes. Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Especialización en Evaluación de Riesgos y Prevención de Desastres. Módulo I, Lecturas Escogidas, Profesor Manuel García. Notas de Clase. Bogotá D.C. 2001.
- WESTEN, R. S. (1996). SLOPE INSTABILITY: THE ROLE OF REMOTE SENSING AND GIS IN RECOGNITION, ANALYSIS AND ZONATION. International institute for Aerospace Surveys and Earth Sciences 7500 Enschede AA, The Netherlands

## ANEXOS

### Anexo A Mapa cobertura vegetal Proyecto 4G Llanos



Fuente: Proyecto 4G Llanos

**Anexo B FLUJOGRAMA METODOLOGIA PARA LAS AVENIDAS  
TORRENCIALES A ESCALA 1: 2000**

<b>AMBIENTE</b>	<b>SUBAMBIENTE</b> (Procesos morfogénicos secundarios )	<b>UNIDAD</b> (Edad relativa por morfo-dinámica o disección )	<b>GÉNESIS</b>	<b>ATRIBUTOS</b> (Características descriptivas morfo-méticas y dinámicas (Pendiente, Depósitos superficiales, Litología, Pat. Drenaje, Disección, Procesos actuales))
-----------------	--	--	----------------	--

### Anexo C Clasificación y Definición de Unidades Geomorfológicas

<b>AMBIENTE</b>	<b>SUBAMBIENTE</b> (Procesos morfogénicos secundarios )	<b>UNIDAD</b> (Edad relativa por morfo-dinámica o disección )	<b>GÉNESIS</b>	<b>ATRIBUTOS</b> (Características descriptivas morfo-méticas y dinámicas (Pendiente, Depósitos superficiales, Litología, Pat. Drenaje, Disección, Procesos actuales))
<b>Antrópico</b>	<b>Ao - Embalses o lagos artificiales</b>		Cuerpos de agua de origen antrópico	NA, Lacustre a aluvio-lacustre, NA, Sedimentos finos (limos y arcillas), Nula, Erosión y sedimentación sobre orillas con remoción en masa localizada
	<b>Ar - Rellenos artificiales</b>		Colinas y cerros de origen antrópico	Moderada a Suave, Escombro a variable, NA, Variable, NA, Remoción en masa / subsidencia
	<b>Ax - Explotación minería superficial</b>		Depresiones generadas por minería a cielo abierto	Fuerte, Variable, NA, Variable, NA, Remoción en masa / subsidencia
	<b>Ae - Camaroneras o estanques</b>		Celdas de agua o estanques generados para el cultivo de camarones o peces	NA, Marinos a fluvio-marinas, NA, Sedimentos finos (limos y arcillas), Nula, Sedimentación
	<b>Ad - Diques</b>		Estructuras en cemento o en piedra	NA, NA, NA, NA, NA, Sedimentación y Erosión
	<b>Ac - Canal</b>		Canales para el transporte de agua	NA, Aluvio-lacustre, NA, Sedimentos finos (limos y arcillas), Nula, Sedimentación e Inundaciones
<b>Denudacional</b>	<b>Da - Superficie de aplanamiento</b>	<b>Da1 - Superficies de aplanamiento recientes</b>	Superficies de erosión relacionadas con antiguos niveles de base (niveles inferiores con baja disección)	Muy Baja a baja, saprolita, Dentrítico, Variable, Leve a nula, Erosión laminar

AMBIENTE	SUBAMBIENTE	UNIDAD aluvial muy antigua	GÉNESIS	ATRIBUTOS
			escalonados y disectados relacionados con antiguas llanuras aluviales.	a fino, Variable, Variable, Moderada, Erosión variable
	Fv - Vega de divagación	Fv1 -Vega de divagación activa	Zona de divagación activa de los ríos	Baja a muy baja, Aluvial, Variable, Sedimentos finos (limos y arcillas), Nula, Migración lateral e Inundaciones
		Fv2 -Vega de divagación inactiva	Zonas de divagación desconectadas parciamente de los sistemas aluviales activos actuales	Baja a muy baja, Aluvial, Variable, Sedimentos finos (limos y arcillas), Nula, Inundaciones
		Fv3-Vega de divagación antigua	Zonas de divagación desconectadas de los sistemas aluviales activos actuales y	Baja a muy baja, Aluvial, Variable, Sedimentos finos (limos y arcillas), Nula, Encharcamiento e Inundaciones
	Fs - Escarpe (abanico, cono, terraza, otros)		Escarpes de morfología abrupta en los bordes de los depósitos fluviales como terrazas.	Fuerte a muy fuerte, Roca in situ a coluvial. Materiales heterométricos, NA, Variable, NA, Derrumbes generalizados
Glacial	Gc - Circo glacial		Depresiones erosionales con escarpes fuertes a moderados resultado de gelifración y abrasión	Baja a Fuerte, Variable, Variable, Variable, NA, Derrubios a sedimentación lacustre
	Gf - Cono fluvioglacial		Depósitos de ablación, pobremente seleccionados, subredondeados	Baja, Fluvio-glacial, Distributivo, Variable, Variable, Disección
	Gl - Laderas glaciadas		Laderas planas adyacentes a las morrenas terminales formadas por sedimentos finos a graviliosos	Baja, Fluvio-glacial, Distributivo, Variable, Variable, Disección
	Gm - Morrena		Lomas alargadas convexas de bloques y detritos heterométricos, no estratificados	Moderada a Baja, Material morrenico, Variable, Variable, Variable, Remoción en masa
	Go - Laguna glacial		Cuerpos de agua de origen glacial	NA, Lacustres, NA, Variable, NA, Inundación y sedimentación
	Gp - Planicie glacial		Laderas planas adyacentes a las morrenas terminales formadas por sedimentos finos a	Baja, Fluvio-glacial, Distributivo, Variable, Variable, Disección

	(Procesos morfogénicos secundarios )	(Edad relativa por morfo-dinámica o disección )		(Características descriptivas morfométricas y dinámicas (Pendiente, Depósitos superficiales, Litología, Pat. Drenaje, Disección, Procesos actuales))
			gravillosos	
	<b>Gv - Valle glacial</b>		Valles en U formadas por la ablación glacial. Presenta sedimentos finos a gravillosos	Moderada a Baja, Fluvio-glacial, Variable, Variable, Variable, Disección
<b>Cárstico</b>	<b>Kr - Cárstico residual</b>		Colinas y cerros de origen cárstico	Fuerte, NA, Interna, Calcárea, Solución y colapso, Erosión laminar
	<b>Ks - Superficie cárstica con dolinas</b>		Superficies afectadas por procesos de disolución	Irregular, NA, Interna, Calcárea, Solución y colapso, Solución y colapso.
	<b>Kv - Valles cársticos</b>		Valles generados por procesos de disolución	Plano a inclinado, Variable, Variable, Coluvio-aluviales, Variable, Variable
<b>Estructural</b>	<b>Sc - Cresta</b>	<b>Sc1 - Ladera Estructural</b>	Laderas asimétricas compuestas por rocas sedimentarias competentes / no competentes plegadas	Moderada a Fuerte, Roca en situ a coluvial, Enrejado, Areniscas y conglomerados, NA, Movimientos planares y derrumbes
		<b>Sc2 - Escarpe estructural</b>	Laderas asimétricas compuestas por rocas sedimentarias competentes / no competentes plegadas	Fuerte a muy Fuerte, Roca en situ a coluvial, Enrejado, Areniscas y conglomerados, NA, Movimientos planares y derrumbes
	<b>Ss - Escarpes Tectónicos</b>	<b>Ss1 - Escarpes activos</b>	Escarpes asociados con movimientos corticales	Fuerte a muy Fuerte, Roca en situ a coluvial, Materiales heterométricos, Enrejado, Areniscas y conglomerados, NA, Derrumbes
		<b>Ss2 - Escarpes poco activos</b>	Escarpes asociados con movimientos corticales	Fuerte a muy Fuerte, Roca en situ a coluvial. Materiales heterométricos, Enrejado, Areniscas y conglomerados, NA, Derrumbes
		<b>Ss3 - Escarpes Inactivos</b>	Escarpes asociados con movimientos corticales	Fuerte a muy Fuerte, Roca en situ a coluvial. Materiales heterométricos, Enrejado, Areniscas y conglomerados, NA, Derrumbes
	<b>Sd - Domo</b>		Anticlinal abombado en rocas sedimentarias competentes	Leve a Moderada, Variable, Variable, Areniscas y conglomerados, Superficial, Erosión laminar
	<b>Se - Escarpe estructural</b>		Escarpes de morfología abrupta, derivados de las fuerzas de plegamiento y la resistencia que ofrecen	Fuerte a muy fuerte, Roca en situ, NA, Variable, NA, Derrumbes

<b>AMBIENTE</b>	<b>SUBAMBIENTE</b> (Procesos morfogenéticos secundarios )	<b>UNIDAD</b> (Edad relativa por morfo-dinámica o disección )	<b>GÉNESIS</b>	<b>ATRIBUTOS</b> (Características descriptivas morfométricas y dinámicas (Pendiente, Depósitos superficiales, Litología, Pat. Drenaje, Disección, Procesos actuales))
		<b>micromarial</b>		

	<b>Mx 2- Deltas marinos subrecientes en régimen micromarial</b>	Acumulaciones de origen fluvio-marino con componentes de playa, marismas y albardones. Se encuentran asociados a niveles más altos del mar en el holoceno	Leve, Areno-limosos, Variable, Sedimentos finos (limos y arcillas) a gravillosos, Nula, Erosión y sedimentación
	<b>Mx 3- Deltas marinos antiguos en régimen micromarial</b>	Acumulaciones de origen fluvio-marino con componentes de playa, marismas y albardones. Se encuentran asociados a niveles más altos del mar	Leve, Areno-limosos, Variable, Sedimentos finos (limos y arcillas) a gravillosos, Nula, Erosión y sedimentación
<b>Mm - Marisma litoral de régimen micromarial</b>	<b>Mm1 - Marisma litoral actual de régimen micromarial</b>	Humedales costeros en régimen de oleaje micromarial, con predominio de vegetación de mangle. Se encuentran asociados al actual nivel del mar	Leve, Areno-limosos, Variable, Sedimentos finos (limos y arcillas), Nula, Inundación y sedimentación
	<b>Mm2 - Marisma litoral subreciente de régimen micromarial</b>	Humedales costeros en régimen de oleaje micromarial, con predominio de vegetación de mangle. Se encuentran asociados antiguos niveles del mar durante el holoceno	Leve, Areno-limosos, Variable, Sedimentos finos (limos y arcillas), Nula, Inundación y sedimentación
<b>Mz - Marisma litoral de régimen macromarial</b>	<b>Mz1 - Marisma litoral actual de régimen macromarial</b>	Humedales costeros en régimen de oleaje macromarial, con predominio de vegetación de mangle. Se encuentran asociados al actual nivel del mar	Leve, Areno-limosos, Variable, Sedimentos finos (limos y arcillas), Nula, Inundación y sedimentación
	<b>Mz2 - Marisma litoral subreciente de régimen macromarial</b>	Humedales costeros en régimen de oleaje macromarial, con predominio de vegetación de mangle. Se encuentran asociados antiguos niveles del mar durante el holoceno	Leve, Areno-limosos, Variable, Sedimentos finos (limos y arcillas), Nula, Inundación y sedimentación
<b>Mo - Ciénaga litoral</b>		Humedales costeros en régimen de oleaje micromarial, con predominio de	NA, Areno-limosos, NA, NA, NA, Inundación y sedimentación

## **Anexo D CLASIFICACIÓN CORINE LAND COVER PARA COLOMBIA**

### **1. TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS**

#### **1.1. Zonas urbanizadas**

##### **1.1.1. Tejido urbano continuo**

##### **1.1.2. Tejido urbano discontinuo**

#### **1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación**

##### **1.2.1. Zonas industriales o comerciales**

###### **1.2.1.1. Zonas industriales**

###### **1.2.1.2. Zonas comerciales**

##### **1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados**

###### **1.2.2.1. Red vial y territorios asociados**

###### **1.2.2.2. Red ferroviaria y terrenos asociados**

##### **1.2.3. Zonas portuarias**

###### **1.2.3.1. Zonas portuarias fluviales**

###### **1.2.3.2. Zonas portuarias marítimas**

##### **1.2.4. Aeropuertos**

###### **1.2.4.1. Aeropuerto con infraestructura asociada**

###### **1.2.4.2. Aeropuerto sin infraestructura asociada**

##### **1.2.5. Obras hidráulicas**

#### **1.3. Zonas de extracción minera y escombreras**

##### **1.3.1. Zonas de extracción minera**

###### **1.3.1.1. Otras explotaciones mineras**

###### **1.3.1.2. Explotación de hidrocarburos**

###### **1.3.1.3. Explotación de carbón**

###### **1.3.1.4. Explotación de oro**

###### **1.3.1.5. Explotación de materiales de construcción**

###### **1.3.1.6. Explotación de sal**

##### **1.3.2. Zonas de disposición de residuos**

###### **1.3.2.1. Otros sitios de disposición de residuos a cielo abierto**

###### **1.3.2.2. Escombreras**

###### **1.3.2.3. Vertederos**

###### **1.3.2.4. Relleno sanitario**

#### **1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas**

##### **1.4.1. Zonas verdes urbanas**

###### **1.4.1.1. Otras zonas verdes urbanas**

###### **1.4.1.2. Parques cementerios**

###### **1.4.1.3. Jardines botánicos**

###### **1.4.1.4. Zoológicos**

- 1.4.1.5. Parques urbanos
- 1.4.1.6. Rondas de cuerpos de agua de zonas urbanas
- 1.4.2. Instalaciones recreativas
  - 1.4.2.1. Áreas culturales
  - 1.4.2.2. Áreas deportivas
  - 1.4.2.3. Áreas turísticas

## 2. TERRITORIOS AGRÍCOLAS

- 2.1. Cultivos transitorios
  - 2.1.1. Otros cultivos transitorios
  - 2.1.2. Cereales
    - 2.1.2.1. Arroz
    - 2.1.2.2. Maíz
    - 2.1.2.3. Sorgo
    - 2.1.2.4. Cebada
    - 2.1.2.5. Trigo
  - 2.1.3. Oleaginosas y leguminosas
    - 2.1.3.1. Algodón
    - 2.1.3.2. Ajonjolí
    - 2.1.3.3. Fríjol
    - 2.1.3.4. Soya
    - 2.1.3.5. Maní
  - 2.1.4. Hortalizas
    - 2.1.4.1. Cebolla
    - 2.1.4.2. Zanahoria
    - 2.1.4.3. Remolacha
  - 2.1.5. Tubérculos
    - 2.1.5.1. Papa
    - 2.1.5.2. Yuca
- 2.2. Cultivos permanentes
  - 2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos
    - 2.2.1.1. Otros cultivos permanentes herbáceos
    - 2.2.1.2. Caña
    - 2.2.1.3. Plátano y banano
    - 2.2.1.4. Tabaco
    - 2.2.1.5. Papaya
    - 2.2.1.6. Amapola
  - 2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos
    - 2.2.2.1. Otros cultivos permanentes arbustivos
    - 2.2.2.2. Café

- 2.2.2.3. Cacao
- 2.2.2.4. Viñedos
- 2.2.2.5. Coca
- 2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos
  - 2.2.3.1. Otros cultivos permanentes arbóreos
  - 2.2.3.2. Palma de aceite
  - 2.2.3.3. Cítricos
  - 2.2.3.4. Mango
- 2.2.4. Cultivos agroforestales
  - 2.2.4.1. Pastos y árboles plantados
  - 2.2.4.2. Cultivos y árboles plantados
- 2.2.5. Cultivos confinados
- 2.3. Pastos
  - 2.3.1. Pastos limpios
  - 2.3.2. Pastos arbolados
  - 2.3.3. Pastos enmalezados
- 2.4. Áreas agrícolas heterogéneas
  - 2.4.1. Mosaico de cultivos
  - 2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos
  - 2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
  - 2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales
  - 2.4.5. Mosaico de cultivos y espacios naturales

### 3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURALES

- 3.1. Bosques
  - 3.1.1. Bosque denso
    - 3.1.1.1.1. Bosque denso alto de tierra firme
    - 3.1.1.1.2. Bosque denso alto inundable
      - 3.1.1.1.2.1. Bosque denso alto inundable heterogéneo
      - 3.1.1.1.2.2. Manglar denso alto
      - 3.1.1.1.2.3. Palmares
  - 3.1.1.2. Bosque denso bajo
    - 3.1.1.2.1. Bosque denso bajo de tierra firme
    - 3.1.1.2.2. Bosque denso bajo inundable
  - 3.1.2. Bosque abierto
    - 3.1.2.1. Bosque abierto alto
      - 3.1.2.1.1. Bosque abierto alto de tierra firme
      - 3.1.2.1.2. Bosque abierto alto inundable
    - 3.1.2.2. Bosque abierto bajo
      - 3.1.2.2.1. Bosque abierto bajo de tierra firme

- 3.1.2.2.2. Bosque abierto bajo inundable
- 3.1.3. Bosque fragmentado
  - 3.1.3.1. Bosque fragmentado con pastos y cultivos
  - 3.1.3.2. Bosque fragmentado con vegetación secundaria
- 3.1.4. Bosque de galería y ripario
- 3.1.5. Plantación forestal
  - 3.1.5.1. Plantación de coníferas
  - 3.1.5.2. Plantación de latifoliadas
- 3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva
  - 3.2.1.1. Herbazal denso
    - 3.2.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme
      - 3.2.1.1.1.1. Herbazal denso de tierra firme no arbolado
      - 3.2.1.1.1.2. Herbazal denso de tierra firme arbolado
      - 3.2.1.1.1.3. Herbazal denso de tierra firme con arbustos
        - 3.2.1.1.2.1. Herbazal denso inundable no arbolado
        - 3.2.1.1.2.2. Herbazal denso inundable arbolado
        - 3.2.1.1.2.3. Arracachal
        - 3.2.1.1.2.4. Helechal
    - 3.2.1.2. Herbazal abierto
      - 3.2.1.2.1. Herbazal abierto arenoso
      - 3.2.1.2.2. Herbazal abierto rocoso
    - 3.2.2.1. Arbustal denso
    - 3.2.2.2. Arbustal abierto
      - 3.2.2.2.1. Arbustal abierto esclerófilo
      - 3.2.2.2.2. Arbustal abierto mesófilo
  - 3.2.3. Vegetación secundaria o en transición
    - 3.2.3.1. Vegetación secundaria alta
    - 3.2.3.2. Vegetación secundaria baja
- 3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
  - 3.3.1. Zonas arenosas naturales
    - 3.3.1.1. Playas
    - 3.3.1.2. Arenales
    - 3.3.1.3. Campos de dunas
  - 3.3.2. Afloramientos rocosos
  - 3.3.3. Tierras desnudas y degradadas
  - 3.3.4. Zonas quemadas
  - 3.3.5. Zonas glaciares y nivales
    - 3.3.5.1. Zonas glaciares
    - 3.3.5.2. zonas nivales

## 4. ÁREAS HÚMEDAS

### 4.1. Áreas húmedas continentales

#### 4.1.1. Zonas Pantanosas

#### 4.1.2. Turberas

#### 4.1.3. Vegetación acuática sobre cuerpos de agua

### 4.2. Áreas húmedas costeras

#### 4.2.1. Pantanos costeros

#### 4.2.2. Salitral

#### 4.2.3. Sedimentos expuestos en bajamar

## 5. SUPERFICIES DE AGUA

### 5.1. Aguas continentales

#### 5.1.1. Ríos (50 m)

#### 5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales

#### 5.1.3. Canales

#### 5.1.4. Cuerpos de agua artificiales

##### 5.1.4.1. Embalses

##### 5.1.4.2. Lagunas de oxidación

##### 5.1.4.3. Estanques para acuicultura continental

### 5.2. Aguas marítimas

#### 5.2.1. Lagunas costeras

#### 5.2.2. Mares y océanos

##### 5.2.2.1. Otros fondos

##### 5.2.2.2. Fondos coralinos someros

##### 5.2.2.3. Praderas de pastos marinos someras

##### 5.2.2.4. Fondos someros de arenas y cascajo

#### 5.2.3. Estanques para acuicultura marina

**Anexo E MAPA DE ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR EVENTOS DE  
AVENIDA TORRENCIAL**