



PROYECTO ACTUALIZACIÓN DEL COMPONENTE DE GESTIÓN DEL RIESGO PARA  
LA REVISIÓN ORDINARIA Y ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE ORDENAMIENTO  
TERRITORIAL

ANEXO TÉCNICO No. 3A

ESTUDIOS BÁSICOS  
“AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES Y/O CRECIENTES SÚBITAS EN LA  
ZONA RURAL”

INSTITUTO DISTRITAL DE GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO CLIMÁTICO – IDIGER  
SUBDIRECCIÓN DE ANÁLISIS DE RIESGOS Y EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO  
Grupo de Trabajo Temático Avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas

Bogotá D. C, mayo de 2021

## ÍNDICE GENERAL

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
2.1.	Objetivo general.....	13
2.2.	Objetivos específicos .....	14
<b>3.</b>	<b>ALCANCES Y LIMITACIONES .....</b>	<b>14</b>
<b>4.</b>	<b>CONTEXTO DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES Y/O CRECIENTES SÚBITAS.....</b>	<b>14</b>
<b>5.</b>	<b>ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>15</b>
<b>6.</b>	<b>RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DISPONIBLE .....</b>	<b>20</b>
6.1.	Información generada por Universidad Nacional de Colombia sede Medellín en convenio con Corantioquia, Alcaldía de Medellín, Municipio de Envigado y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.....	20
6.2.	Información generada por evaluación Cornare en convenio con la Gobernación de Antioquia.....	25
6.3.	Información generada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM.....	27
6.4.	Información generada por la CAR .....	27
6.5.	Actualización POMCA Río Bogotá - Consorcio HUITACA .....	27
6.6.	POMCA Río Sumapaz y Rio Blanco .....	30
6.7.	Información generada por la EAAB – ESP .....	30
6.8.	Información generada por la SDA .....	30
6.9.	Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE) hoy Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) .....	30
6.10.	Información generada por el grupo de estudios Subdirección de Investigación Y Desarrollo Dirección de Prevención y Atención de Emergencias – DPAE en el año 2007	31
6.11.	Conceptos técnicos emitidos para el Programa de Reasentamiento - Avenidas torrenciales (2013-2015) por el IDIGER .....	31
6.12.	Información generada por otras entidades.....	33
<b>7.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>33</b>
7.1.	Estado del arte .....	33

7.1.1.	Información generada para International Journal of Geomatics and Geosciences Volume 2, No 2, 2011 por Koshak.N, Dawod.G 2011.....	33
7.1.2.	Información generada para el Arabian Journal of Geoscience (2014), por S. Bajabaa, M. Masoud, N. Al-Amri (2013).....	34
7.1.3.	Información generada para el Open Journal of Modern Hydrology, 2016, 6, 79-100, por Yahya Farhan, Omar Anaba (2016).....	34
7.2.	Esquema metodológico .....	34
<b>8.</b>	<b>INSUMOS.....</b>	<b>36</b>
8.1.	Cartografía base .....	36
8.1.1.	Sistemas de coordenadas.....	36
8.1.2.	Escala .....	36
8.1.3.	Geodatabase Secretaría Distrital de Planeación SDP.....	36
8.2.	Modelo digital del terreno .....	37
8.3.	Geología.....	38
8.4.	Geomorfología .....	41
8.5.	Inventario de procesos morfodinámicos.....	45
<b>9.</b>	<b>EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES Y/O CRECIENTES SÚBITAS.....</b>	<b>48</b>
9.1.	Análisis hidrológico .....	48
9.1.1.	Cuencas Hidrográficas .....	51
9.1.2.	Morfometría.....	60
9.1.3.	Pendiente .....	61
9.1.3.1.	Orden de corriente .....	61
9.1.3.2.	Longitud de Flujo .....	62
9.1.4.	Susceptibilidad a un evento torrencial .....	63
9.1.5.	Modelo Lluvia – Escorrentia.....	70
9.2.	Análisis de sedimentos .....	76
<b>9.3.</b>	<b>Análisis hidráulico.....</b>	<b>81</b>
9.3.1.	Modelo Digital de terreno corregido.....	81
9.3.2.	Resultados de Modelación .....	83
9.4.	Análisis de amenaza.....	85
<b>10.</b>	<b>ZONIFICACIÓN Y MAPA DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES Y/O CRECIENTES SÚBITAS EN SUELO RURAL.....</b>	<b>86</b>
<b>11.</b>	<b>AMENAZA EN LOS NODOS DE EQUIPAMIENTOS Y SERVICIOS Y VIVIENDA RURAL CAMPESTRE .....</b>	<b>88</b>



12.	CONSIDERACIONES PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO POR AVENIDAS TORRENCIALES Y/O CRECIENTES SÚBITAS .....	96
12.1.	Priorización de estudios detallados por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas	96
13.	ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO	97
14.	REFERENCIAS.....	98

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 8-1. Zona rural del Distrito capital respecto a las localidades</i> .....	17
<i>Figura 8-2. Delimitación inicial del Área de Estudio</i> .....	18
<i>Figura 8-3. Área de Estudio Final cauces presentes o con influencia en el distrito</i> .....	19
<i>Figura 8-4. Amenaza por avenidas torrenciales para las zonas priorizadas (POMCA, 2017).</i> .....	30
<i>Figura 8-5. Esquema metodológico</i> .....	35
<i>Figura 8-1. Modelo Digital del Terreno</i> .....	38
<i>Figura 8-2. Mapa Geológico Rural</i> .....	39
<i>Figura 8-3. Mapa Geomorfológico Rural</i> .....	42
<i>Figura 8-4. Localización de los Procesos Morfodinámicos Identificados en el Área Rural del Distrito Capital</i> .....	46
<i>Figura 8-5. Representación Gráfica de los Tipos de Procesos Morfodinámicos Identificados en el Área Rural del Distrito Capital. Fuente: Proyecto POT</i> .....	47
<i>Figura 9-1. Modelo de Elevación Digital Tamaño de Celda 12 m Proyectado</i> .....	49
<i>Figura 9-2. Buffer de 10 kilómetros del perímetro del distrito capital</i> .....	50
<i>Figura 9-3. Modelo de Elevación Digital Tamaño de Celda 12 m Proyectado extraído con buffer de 10 kilómetros del perímetro del distrito capital</i> .....	50
<i>Figura 9-4. Sistema Hídrico Proyectado</i> .....	51
<i>Figura 9-5. Sistema Hídrico Línea Proyectado extraído con buffer de 10 kilómetros del perímetro del distrito capital</i> .....	51
<i>Figura 9-6. Corrección DEM mediante red de drenaje tipo línea</i> .....	53
<i>Figura 9-7. Corrección DEM mediante red de drenaje tipo polígono</i> .....	53
<i>Figura 9-8. Modelo de Elevación Digital Hidrológicamente Corregido</i> .....	53
<i>Figura 9-9. Dirección de Flujo</i> .....	53
<i>Figura 9-10. Acumulación de Flujo</i> .....	54
<i>Figura 9-11. Red de Drenaje Generada Tipo Ráster</i> .....	54
<i>Figura 9-12. Red de Drenaje Generada Tipo Ráster Vinculada</i> .....	54
<i>Figura 9-13. Cuencas hidrográficas Tipo Ráster</i> .....	54
<i>Figura 9-14. Cuencas hidrográficas Tipo Polígono</i> .....	55
<i>Figura 9-15: Red de Drenaje Generada Tipo Línea</i> .....	55
<i>Figura 9-16. Cuencas hidrográficas Acumuladas Tipo Polígono</i> .....	55
<i>Figura 9-17. Puntos de cierre de cuencas Rurales en limite urbano</i> .....	56
<i>Figura 9-18. Puntos de cierre de cuencas Rurales en limite urbano</i> .....	56
<i>Figura 9-19. Vinculación Puntos de Cierre Con Acumulación de Flujo</i> .....	57
<i>Figura 9-20. Cuencas tipo Raster</i> .....	57
<i>Figura 9-21. Cuencas tipo Polígono</i> .....	57
<i>Figura 9-22. Cuencas tipo Polígono Nombres de Corriente Principal</i> .....	57
<i>Figura 9-23. Cuencas tipo Polígono Nombres de Corriente Principal Perímetro Urbano y Rural</i> .....	58
<i>Figura 9-24. Cuencas hidrográficas Seleccionadas</i> .....	59
<i>Figura 9-25. Cuenca Río Fucha</i> .....	60
<i>Figura 9-26. Río Fucha Cuencas Modelaciones</i> .....	60
<i>Figura 9-27. Río Fucha Drenaje Modelaciones</i> .....	60
<i>Figura 9-28. Río Fucha Orden Drenaje Modelaciones</i> .....	60
<i>Figura 9-29. Ráster de Pendientes</i> .....	61

<i>Figura 9-30. Ráster de Orden de la Corriente.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 9-31. Ráster de Longitud de Flujo .....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 9-32: Tiempo de concentración (horas) cuencas hidrográficas seleccionadas .....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 9-33: Tiempo al pico (horas) cuencas hidrográficas seleccionadas .....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 9-34: Indicador de amenaza de crecidas torrenciales con base en tiempo de concentración (IACTC) cuencas hidrográficas seleccionadas.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 9-35: Indicador de amenaza de crecidas torrenciales con base en tiempo al pico (IACTP) cuencas hidrográficas seleccionadas .....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 9-36: Distribución de la susceptibilidad por áreas según IACTC .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 9-37: Distribución de la susceptibilidad por áreas según IACTP .....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 9-38: Distancia centroide cuencas hidrográficas seleccionadas a estaciones con IDF estudio de tormentas EAB.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 9-39: Precipitación Media Anual .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 9-40: Precipitación Media Anual cuencas hidrográficas seleccionadas.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 9-41: Precipitación máxima en 24 horas.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 9-42: Precipitación máxima en 24 horas cuencas hidrográficas seleccionadas .....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 9-43: Número de días de precipitación medio anual .....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 9-44: Número de días de precipitación medio anual cuencas hidrográficas seleccionadas ..</i>	<i>73</i>
<i>Figura 9-45: Numero de curva.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 9-46: Numero de curva cuencas hidrográficas seleccionadas .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 9-47: Caudal Pico cuencas hidrográficas seleccionadas .....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 9-48: Concentración media en volumen según proceso .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 9-49: Concentración media en volumen según procesos de las cuencas hidrográficas seleccionadas. ....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 9-50: Modelo de Elevación Digital Tamaño de Celda 5 m a partir del modelo de elevación digital de 12 m y 1 m .....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 9-51: Modelo de Elevación Digital Tamaño de Celda 5 m a partir del modelo de elevación digital de 12 m y 1 m con corrección red de drenaje .....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 9-52: Muestra del buffer de 100 m corriente a considerar .....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 9-53: Modelo de Elevación Digital Tamaño de Celda 5 m a partir del modelo de elevación digital de 12 m y 1 m con corrección red de drenaje extraído con buffer de 100 m corriente a considerar.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 9-54: Resultados modelación vectores de velocidad .....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 9-55: Resultados modelación máxima profundidad de flujo .....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 9-56. Flujograma metodológico.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 10-1: Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas categorizado para el suelo rural.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 11-1. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Guaymaral (escala 1:5.000) .....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 11-2. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Concepción (escala 1:5.000).....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 11-3. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Animas (escala 1:5.000) .....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 11-4. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Pasquillita (escala 1:5.000) .....</i>	<i>90</i>

*Figura 11-5. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Santa Ana (escala 1:5.000)..... 90*

*Figura 11-6. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Raizal (escala 1:5.000)..... 91*

*Figura 11-7. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Auras (escala 1:5.000)..... 91*

*Figura 11-8. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Quiba Alta (escala 1:5.000) ..... 92*

*Figura 11-9. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Vegas (escala 1:5.000) ..... 92*

*Figura 11-10. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos El Uval (escala 1:5.000) ..... 93*

*Figura 11-11. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Hacienda el Carmen (escala 1:5.000)..... 93*

*Figura 11-12. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Norte (escala 1:5.000) ..... 94*

*Figura 11-13. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Universidad Antonio Nariño (escala 1:5.000)..... 94*

*Figura 11-14. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Santa Rosa (escala 1:5.000) ..... 95*

*Figura 11-14. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el polígono de Vivienda Rural Campestre (escala 1:5.000)..... 96*



## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 8.1. Conceptos técnicos emitidos para el programa de reasentamiento</i> .....	32
<i>Tabla 8.2. Total Viviendas/Familias recomendadas por el programa</i> .....	32
<i>Tabla 8.1. Modelos Digitales de Terreno</i> .....	37
<i>Tabla 8.2 Unidades geológicas presentes en la zona rural del Distrito Capital</i> .....	39
<i>Tabla 8.3 Jerarquización de las unidades geomorfológicas diferenciadas en el área rural del Distrito Capital</i> .....	42
<i>Tabla 8.4. Identificación de los Tipos de Procesos Morfodinámicos en el Área Rural del Distrito Capital</i> .....	47
<i>Tabla 9.1. Indicador de amenaza de crecidas torrenciales con base en tiempo de concentración (IACTC)</i> .....	67
<i>Tabla 9.2. Indicador de amenaza de crecidas torrenciales con base en tiempo al pico (IACTP)</i> .....	67
<i>Tabla 9.3. Parámetros del método de Vargas para la región Andina</i> .....	71
<i>Tabla 9.4. Comportamiento del flujo de sedimentos como función de la concentración de sedimentos (O'Brien, 2014)</i> .....	77
<i>Tabla 9.5. Esfuerzo cortante y viscosidad como función de la concentración de sedimentos (O'Brien, 2014)</i> .....	80
<i>Tabla 9.6. Matriz de amenaza definida por la intensidad del proceso y su probabilidad de ocurrencia. (Matjaž, 2013)</i> .....	85



## GLOSARIO DE TÉRMINOS

### LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ATS: Anexo Técnico de Soporte  
CAR Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca  
CORANTIOQUIA Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia  
CORNARE Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare  
CT: Concepto Técnico  
CDI: Centro de Documentación e Información del IDIGER  
DTS: Documento técnico de soporte  
DI: Diagnóstico Técnico  
DPAE: Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá (ahora IDIGER)  
EAAB: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá  
FONDIGER: Fondo Distrital para la Gestión de Riesgo y Cambio Climático  
FOPAE: Fondo de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá (ahora IDIGER y FONDIGER)  
IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales  
IDIGER: Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático  
IDU: Instituto de Desarrollo Urbano  
NUSE: Número Único de Seguridad y Emergencias 123  
OPES: Oficina de Prevención y Atención de Emergencias (ahora IDIGER)  
PDPAE: Plan Distrital de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá  
PDGR-CC: Plan Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático  
POT: Plan de Ordenamiento Territorial  
SDA: Secretaría Distrital de Ambiente  
SDP: Secretaría Distrital de Planeación (antes DAPD)  
SDPAE: Sistema Distrital de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá  
SDGR-CC: Sistema Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático  
SGC: Servicio Geológico Colombiano (antiguo INGEOMINAS)  
SIG: Sistemas de Información Geográfica  
SIRE: Sistema de Información para la Gestión de Riesgos y Cambio Climático  
UAECD: Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital  
UNGRD: Unidad Nacional de Gestión de Riesgos de Desastre  
UPES: Unidad para la Prevención y Atención de Emergencias (ahora IDIGER)  
UPZ: Unidades de Planeamiento Zonal

## DEFINICIONES

**Almacenamiento de la llanura de inundación:** Volumen de agua que se puede almacenar en la llanura de inundación. (WMO & UNESCO, 1998)

**Avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas:** Las avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas son crecidas repentinas producto de fuertes precipitaciones que causan aumentos rápidos del nivel de agua de los ríos y quebradas de alta pendiente. Estas crecientes pueden ser acompañadas por flujo de detritos de acuerdo a las condiciones de la cuenca. El flujo de detritos se define como un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos, que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce empinado. Adaptado de: (Gemma, 2007) Página 140

**Caudal:** Volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en una unidad de tiempo. (WMO & UNESCO, 1998)

**Caudal sólido:** Caudal de sedimentos en una sección transversal dada de una corriente de agua. (WMO & UNESCO, 1998)

**Concentración de sedimentos:** Relación entre el peso seco de los materiales sólidos y el peso total de una muestra de agua y sedimentos. (WMO & UNESCO, 1998)

**Control de crecidas:** Detención y/o derivación del agua durante episodios de crecida con el fin de reducir el caudal o la inundación de las zonas aguas abajo. (WMO & UNESCO, 1998)

**Crecida:** 1) Elevación, generalmente rápida, del nivel de agua de un curso, hasta un máximo a partir del cual dicho nivel desciende a una velocidad menor. 2) Flujo relativamente alto medido como nivel o caudal. (WMO & UNESCO, 1998)

**Crecida repentina:** Crecida de corta duración con un caudal máximo relativamente elevado. (WMO & UNESCO, 1998)

**Cuenca:** Área que tiene una salida única para su escorrentía superficial. (WMO & UNESCO, 1998)

**Curva intensidad-duración-frecuencia:** Curva que muestra la relación entre la precipitación en una zona y la frecuencia con la que ocurre para diferentes duraciones. (WMO & UNESCO, 1998)

**Detritos:** Acumulación de materiales sueltos que se produce por la alteración de las rocas o por materiales de origen antrópico. (WMO & UNESCO, 1998)

**Dique lateral:** Obra construida para retener el flujo de agua de un río dentro de un tramo determinado de su cauce o para prevenir inundaciones debidas a mareas u ondas. (WMO & UNESCO, 1998)

**Escorrentía superficial:** Parte de la precipitación que fluye por la superficie del suelo. (WMO & UNESCO, 1998)

**Flujo de agua y roca:** Flujo de lodo en el que predomina el material de grano grueso. (WMO & UNESCO, 1998)

**Flujo hiperconcentrado:** Flujo de una mezcla de agua concentrada de sedimentos y detritos de forma tal que la masa fluyente es espesa y viscosa. (WMO & UNESCO, 1998)

**Hidrograma:** Gráfico que muestra la variación temporal de variables hidrológicas tales como el nivel de agua, el caudal, la velocidad y la carga de sedimentos. (WMO & UNESCO, 1998)

**Hietograma:** Distribución de la intensidad de lluvia a lo largo del tiempo. (WMO & UNESCO, 1998)

**Inundación:** 1) Desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua. 2) Acumulación de agua procedente de drenajes en zonas que normalmente no se encuentran anegadas. 3) Encharcamiento controlado para riego. (WMO & UNESCO, 1998)

**Inundación pequeña:** Inundación de poca importancia causada por lluvias intensas o deshielo (WMO & UNESCO, 1998)

**Llanura de inundación:** Terreno adyacente a una corriente de agua que se inunda sólo cuando el caudal es mayor que la capacidad máxima del cauce. (WMO & UNESCO, 1998)

**Malecón:** Muro construido para confinar cursos de agua a fin de prevenir inundaciones. (WMO & UNESCO, 1998)

**Mapa de isoyetas:** 1) Mapa que representa la distribución temporal o espacial de la precipitación. 2) Gráfico que muestra la intensidad de la precipitación en función del tiempo. (WMO & UNESCO, 1998)

**Morfología fluvial:** Ciencia que estudia la formación de diversas acumulaciones de sedimentos en los lechos, llanuras de inundación y cauces por la acción del agua. (WMO & UNESCO, 1998)

**Número de curva:** Parámetro empírico que varía entre 0 y 100 que se utiliza para estimar el coeficiente de escorrentía de un episodio de lluvias a partir de la altura de precipitación y las propiedades de drenaje de la cuenca. (WMO & UNESCO, 1998)



**Precipitación:** 1) Elementos líquidos o sólidos procedentes de la condensación o sublimación del vapor de agua que caen de las nubes o son depositados desde el aire en el suelo. 2) Cantidad de precipitación caída sobre una unidad de superficie horizontal por unidad de tiempo. (WMO & UNESCO, 1998)

**Protección de elementos situados en zona inundable:** Técnicas para reducir los daños por crecidas en zonas con riesgo de inundación. (WMO & UNESCO, 1998)

**Sedimento:** Material transportado por el agua en suspensión o como arrastre de fondo desde su lugar de origen al de depósito. (WMO & UNESCO, 1998)

**Zona inundable:** Área que se inunda de forma ocasional. (WMO & UNESCO, 1998)

**Zonificación de la llanura de inundación:** Clasificación de la llanura de inundación en zonas para diferentes propósitos. (WMO & UNESCO, 1998)

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente informe corresponde al Anexo Técnico de Soporte – ATS del mapa normativo de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para la zona rural a escala 1:5000, elaborado por el Instituto Distrital para la Gestión del Riesgo y el Cambio Climático - IDIGER en el marco del proyecto de actualización del componente de gestión del riesgo para la revisión ordinaria del plan de ordenamiento territorial de Bogotá D.C.

Para la generación del mapa se tienen en cuenta las consideraciones del Decreto Nacional 1807 de 2014 (compilado por el Decreto Nacional 1077 de 2015), por lo que el documento se desarrolla en una secuencia que evidencia el cumplimiento de dicha normatividad. Se resalta la consulta, análisis y evaluación de bases de datos e información del IDIGER especialmente la relacionada con instrumentos de gestión del riesgo como Conceptos y Estudios de amenaza y riesgo. La consulta a otras entidades del Distrito como la Secretaría Distrital de Planeación (SDP), la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), entre otras, entidades nacionales como el Servicio Geológico Colombiano y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), que permitieron incorporar información conforme al esquema metodológico planteado.

El ATS se divide en capítulos dentro de los que se encuentra un contexto de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas de la ciudad, la consulta de información disponible, el planteamiento de un esquema metodológico soportado en la información existente, la selección de metodologías de evaluación de amenaza, la descripción e implementación del modelo de análisis de amenaza, los insumos utilizados.

Finalmente, se muestran los criterios utilizados para obtener el mapa definitivo de zonificación de las áreas en amenaza baja, media y alta por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el suelo rural a escala 1:5000.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

Generar un mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para la zona rural de Bogotá Distrito Capital en cumplimiento del Decreto 1807 de 2014 (compilado por el Decreto 1077 de 2015 o Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio), cuya delimitación y zonificación obtenida servirá como una herramienta para la identificación de condiciones de amenaza potenciales, y para definir medidas de intervención que orienten a establecer los condicionamientos y/o restricciones del uso y la ocupación del territorio que debe tenerse en cuenta

en la revisión y actualización del instrumento de planificación territorial Plan de Ordenamiento Territorial – POT.

## 2.2. Objetivos específicos

- Realizar el inventario de cauces que permita priorizar las cuencas susceptibles a la amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas.
- Implementar la metodología seleccionada a los cuerpos de agua de Bogotá Distrito Capital, con el fin delimitar y zonificar las áreas de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas.
- Delimitar y zonificar la amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas, a partir de la metodología seleccionada para el suelo rural.
- Generar el mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas a escala 1:5000 para el suelo rural.
- Definir áreas con condición de amenaza para las zonas objeto de desarrollo y las áreas con condición de riesgo del suelo rural con el fin de definir la priorización de acciones de reducción de riesgo a implementar en el suelo rural.

## 3. ALCANCES Y LIMITACIONES

La información plasmada en este documento, tiene como alcance dar un soporte técnico a las distintas actividades ejecutadas para la generación del plano normativo de Amenaza por Avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el suelo rural, el esquema metodológico planteado para lograr los objetivos se enmarca y se limita al cumplimiento de lo establecido en el Decreto 1807 de 2014 (compilado por el Decreto Nacional 1077 de 2015) para los estudios básicos y aunque describe de manera clara cómo se llegó a la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas, su uso o réplica en otros municipios o distritos debe verse con especial cuidado, toda vez que su estructuración tuvo en cuenta información e insumos específicos disponibles.

## 4. CONTEXTO DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES Y/O CRECIENTES SÚBITAS

La amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas en la ciudad es una problemática que ha sido abordada con el fin de evitar impactos no deseados en los ciudadanos e infraestructura aferente a los cuerpos de agua que puedan presentar esta condición de amenaza. La ubicación geográfica de la ciudad y el efecto que la variabilidad climática produce sobre la intensidad de los eventos extremos de precipitaciones hacen que la problemática de avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas en la ciudad tome relevancia debido a la necesidad de ampliación en suelos con condiciones naturales. Igualmente, los cambios de cobertura de las cuencas de alta montaña generan el incremento de concentración de volúmenes de agua que aumentan los caudales esperados en las corrientes. Por estas razones la ciudad ha incrementado los esfuerzos que permitan



realizar el análisis de esta problemática y de esta forma permitir el asentamiento seguro de sus ciudadanos.

Los suelos rurales que presentan alta pendiente tienen condiciones naturales que permiten la generación de avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas, adicionalmente las precipitaciones que se presentan en las dos temporadas de lluvias de la región producen volúmenes de agua suficientes que pueden ocasionar flujos torrenciales, estas condiciones naturales incrementan la susceptibilidad de la ciudad a este tipo de amenaza. Adicionalmente a las condiciones naturales existen condiciones antrópicas de ocupación de cauces y cambios de coberturas de las cuencas que aumentan la susceptibilidad de la ciudad al impacto de este tipo de amenaza.

De acuerdo con lo anterior se han realizado algunas aproximaciones con el fin de estudiar la amenaza presente en el Distrito Capital y conocer el comportamiento de estos fenómenos en algunas zonas donde el impacto de este tipo de amenaza puede ser mayor. Como resultado de estos procesos la ciudad ha adquirido un aprendizaje que permite profundizar en el conocimiento de esta amenaza con el fin de hacer frente al reto de generar el primer mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas a nivel del área total de la ciudad, lo cual permitirá tomar decisiones sobre los lugares prioritarios para realizar estudios detallados.

Por último, la delimitación y zonificación de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas permitirá establecer las zonas prioritarias para la aplicación de los procesos de gestión del riesgo (conocimiento, reducción y manejo de emergencias). De igual manera, por medio del ordenamiento del territorio, se delimitarán las zonas que deben restringirse o condicionarse a su uso en función de las condiciones de amenaza o riesgo que presente el suelo rural.

## 5. ÁREA DE ESTUDIO

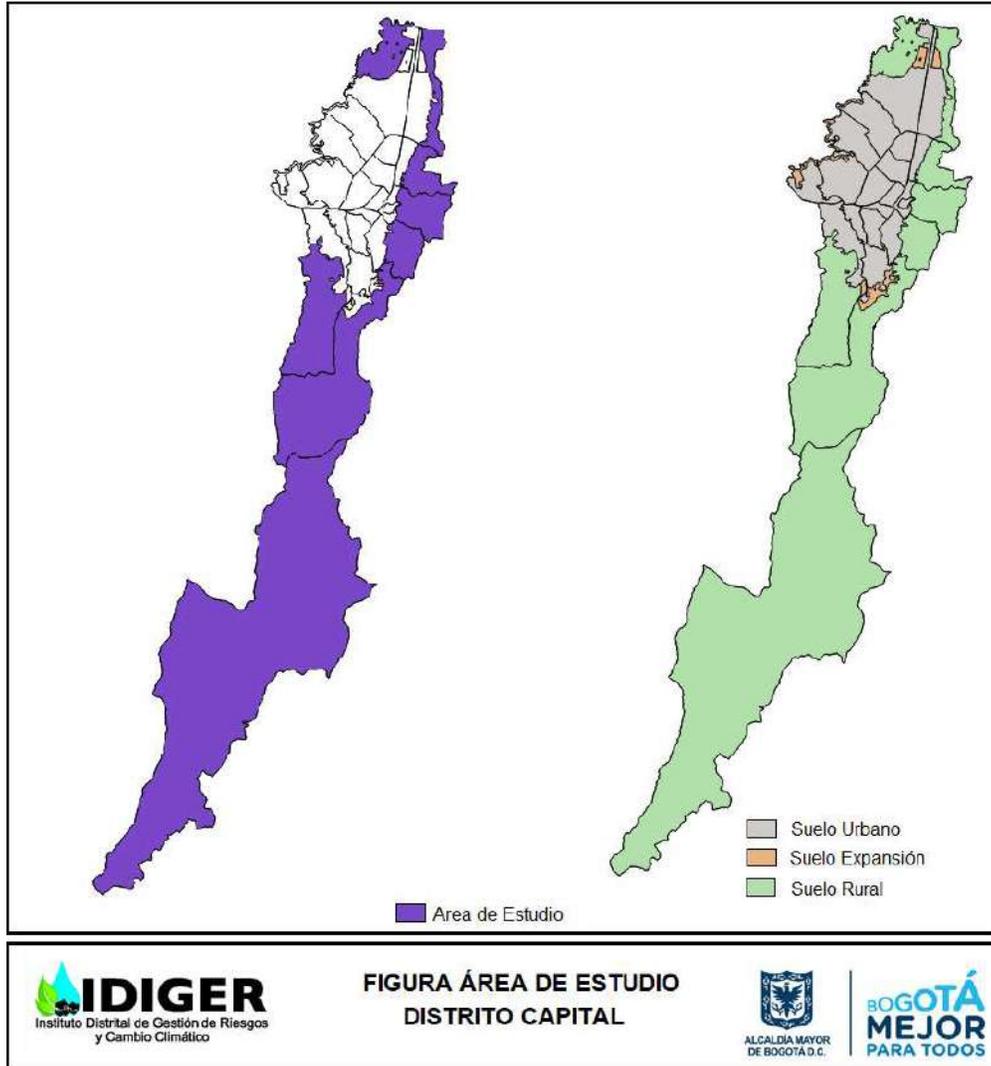
Para la generación del mapa normativo de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas se define el área de estudio conforme lo establece el Decreto 1807 de 2014 (compilado por el Decreto 1077 de 2015) y corresponde con todos los cauces presentes o con influencia en el municipio o distrito, que por sus condiciones topográficas puedan tener un comportamiento torrencial.

El área rural de Bogotá D.C actualmente está ubicada en la periferia de la zona urbana y la conforman 13 de 20 las localidades del Distrito entre las que se encuentra principalmente: Usme, Ciudad Bolívar, San Cristóbal, Santafé, Chapinero, Usaquén y Suba y la totalidad de la localidad de Sumapaz, no obstante, en la revisión del Plan de Ordenamiento Territorial – POT se proyecta una zona aferente al río Bogotá como suelo rural.



En la *Figura 8-1* se muestra la zona rural del Distrito. Con un área de 124.154 ha para la zona rural, de las cuales 118.520,96 ha corresponden a la categoría de suelo de protección, quedando únicamente el 0.99% de todo el suelo rural a las categorías de desarrollo restringido (incluyendo los 11 centros poblados Quiba Bajo, Mochuelo Alto, Pasquilla, El Destino, Nazareth Betania, San Juan, La Unión, Nueva Granada, Chorrillos y Alto de Serrezuela).

Con el fin de analizar a nivel de cuencas los cauces presentes o con influencia en el distrito, el área de estudio inicial comprende un área mayor que pretende incluir las cuencas en su totalidad. Esta área de estudio inicial es de 513.731 ha y se obtuvo a partir de realizar un buffer de 10km sobre el límite del distrito (ver Figura 8-2). Luego se realizó la respectiva delimitación de cuencas que permitió ajustar el área, y de esa manera incluir sólo las cuencas cuyos cauces presentes o con influencia en el distrito, que por sus condiciones topográficas y naturales pudieran tener un comportamiento torrencial abarcando finalmente 157.351 ha (Ver Figura 8-3).



*Figura 8-1. Zona rural del Distrito capital respecto a las localidades*

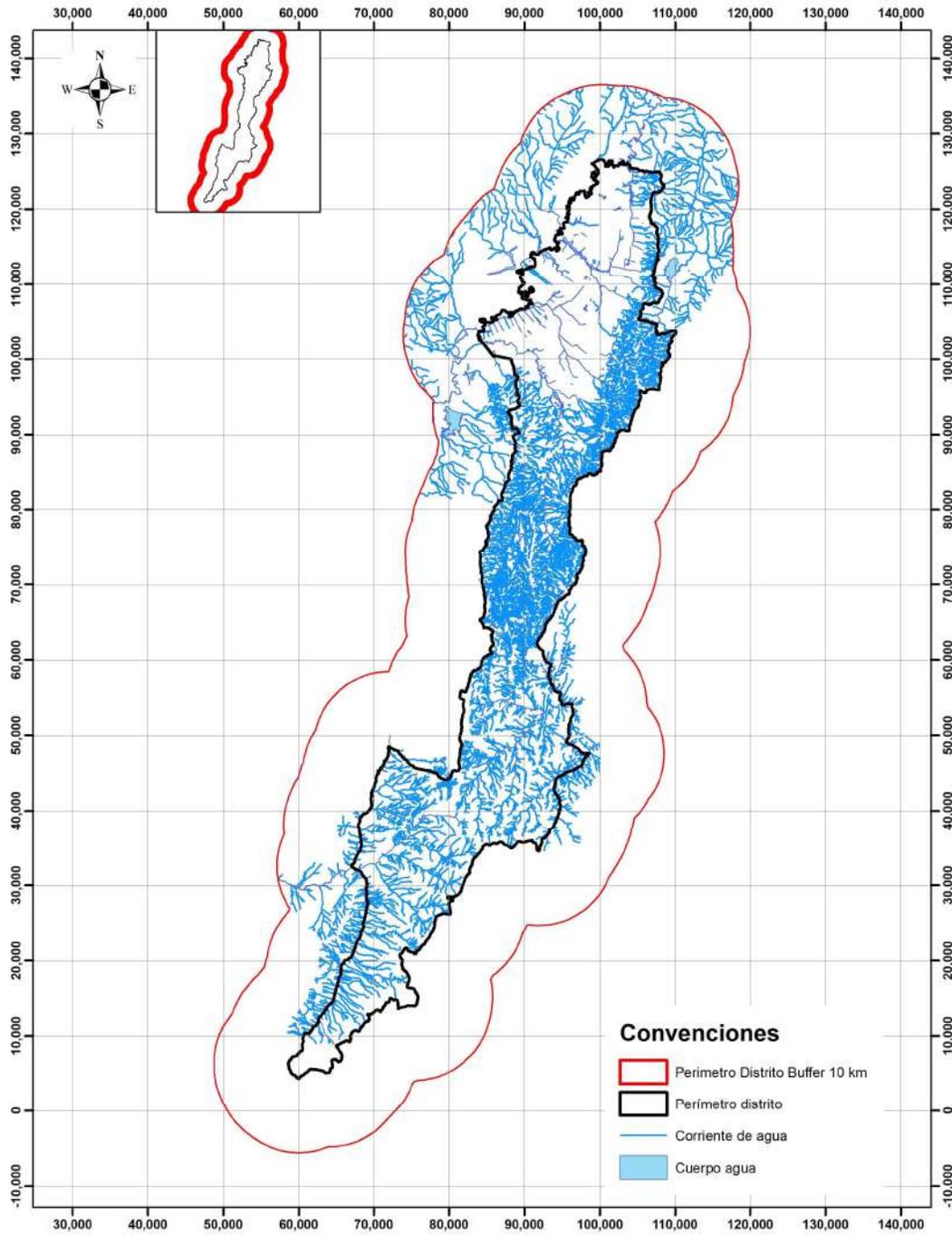


Figura 8-2. Delimitación inicial del Área de Estudio

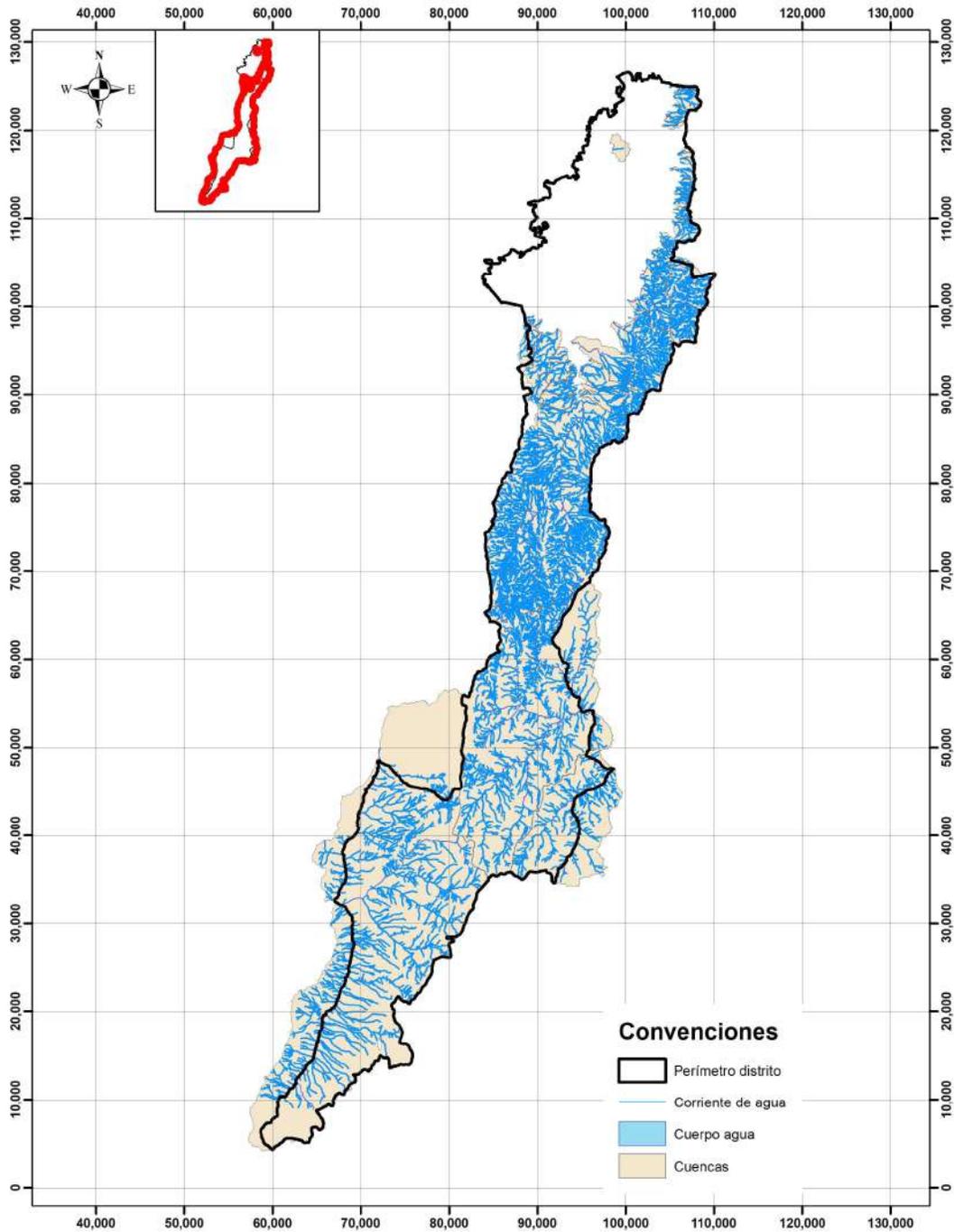


Figura 8-3. Área de Estudio Final cauces presentes o con influencia en el distrito

## 6. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DISPONIBLE

La recopilación de información disponible se ha realizado, de acuerdo con lo establecido en artículo 6 del Decreto 1807 de 2014 (compilado por el Decreto 1077 de 2015), correspondiente a las condiciones técnicas para la elaboración de estudios básicos y detallados, en donde se especifica los parámetros a seguir para el análisis de la información disponible. Para el presente estudio se ha procedido a consultar información técnica relacionada con estudios de amenaza y riesgo, cartografía básica y temática y demás información pertinente que haya sido aprobada y elaborada por autoridades y sectores competentes, además que correspondan al análisis de las áreas de interés ya sea de manera total o parcial, y que cumpla las condiciones técnicas y de detalle establecidas en el mencionado decreto para este tipo de estudio.

### 6.1. Información generada por Universidad Nacional de Colombia sede Medellín en convenio con Corantioquia, Alcaldía de Medellín, Municipio de Envigado y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Se revisó el respectivo documento titulado: *“Zonificación de la Amenaza por Inundaciones y Avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas en el Valle de Aburrá”* publicado en el Julio de 2009 su versión definitiva, donde se realiza una metodología detallada con respecto al fenómeno de avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas e inundaciones rápidas, la cuales se denominan muchas veces como *“crecientes, avalanchas, crecidas, borrasca o torrentes”* las cuales *“son una amenaza muy común en cuencas de alta montaña y debido a sus características pueden causar gran des daños en infraestructura y pérdida de vidas humanas”*.

Se enmarca en el documento el término avenida torrencial en *“un gran número de flujos torrenciales como lo son flujos de lodos y/o escombros, avalanchas, lahares, lavas, flujos hiperconcentrados o súper concentrados, lava torrencial, entre otros (Costa, 1988; Medina, 1991; Coussot y Meunier, 1996; Lavigne y Suba, 2004; Díaz-Onofre, 2008). Estos flujos presentan claras diferencias en cuanto al mecanismo de generación y comportamiento del flujo, así como a la concentración de los sedimentos y densidad del flujo”*

De acuerdo con el documento, *“Estos fenómenos se originan comúnmente en ríos de montaña o en ríos cuyas cuencas presentan fuertes vertientes por efecto de fenómenos hidrometeorológicos intensos cuando en un evento de lluvias se superan valores de precipitación pico en pocas horas. Esto genera la saturación de los materiales de las laderas facilitando el desprendimiento del suelo, produciéndose de esta manera numerosos desgarres superficiales y deslizamientos cuyo material cae al cauce y es transportado inmediatamente aguas abajo o queda inicialmente represado y luego, una vez que se rompe el represamiento, es transportado violentamente de forma repentina (Urrea, 1996, Rendón, 1997; OSSO – La Red, 2003; Castro, 2007). En otros casos puede que no haya desgarres en las vertientes originados por la lluvia, simplemente el material que ya se encontraba*

*en el cauce con mucha anterioridad es arrastrado aguas abajo por la creciente, como lo ocurrido en la quebrada El Barro, Municipio de Bello”.*

*“Aunque la duración de estos eventos varía entre pocos minutos a varios días, su rápida manifestación y altas velocidades le confieren una alta peligrosidad debido a que no dan tiempo de reacción a las personas que se encuentran en el área de influencia del evento generando así situaciones desastrosas con pérdidas de vidas humanas y destrucción de viviendas, estructuras, cultivos, carreteras, etc. (Vásquez, 1993; Urrea, 1996; Flórez y Suavita, 1997; Smith y Ward, 1998; Castro, 2007).”*

En la parte superior de las vertientes o zona de montaña, donde las corrientes están encajonadas, la avenida torrencial afecta usualmente un área pequeña a lo largo del cauce, pero una vez la pendiente disminuye en la zona de transición, el área afectada se incrementa debido a que se genera la depositación del material arrastrado formando los llamados conos o abanicos de depositación. Aunque es factible delimitar estos abanicos por las características geomorfológicas de la zona, no es posible definir un rumbo preciso para el flujo torrencial, ya que las obstrucciones y zonas de depositación que se producen durante el evento ocurren con un rumbo inestable e impredecible (Integral, 1990 en Urrea, 1996).

Las avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas modifican la morfología del cauce; incluyendo cambios en el ancho y profundidad del canal, así como de la competencia y el transporte de los sedimentos (Durán et al., 1985), lo cual se traduce en una modificación de su comportamiento y en algunas ocasiones hasta el curso de las corrientes.

Las avenidas constituyen un fenómeno ligado a la dinámica geológica que, desde un punto de vista integrado, permite la renovación del agua subterránea y de nutrientes de los suelos de las áreas inundables (Morisawa, 1985). Según Durán et al. (1985), la crecida y el desbordamiento de un río no suponen en general, desde el punto de vista geológico, ningún acontecimiento fuera de lo normal. Lo que para el hombre constituye un hecho catastrófico, no tiene el mismo sentido dentro de la evolución del relieve, sino que la catástrofe en geología forma parte de la dinámica natural.

Se caracteriza por lo tanto un flujo torrencial *“Hidráulicamente, por contener un alto porcentaje de material sólido (que incrementa considerablemente la viscosidad y densidad del flujo, disminuyendo su velocidad), recorrer cauces de altas rugosidades y al tas pendientes (superior al 1%). Estos flujos presentan un problema hidráulico complejo que no puede ser resuelto adecuadamente con las ecuaciones clásicas de hidráulica fluvial (Rendón, 1997)”.*

Una de las razones por las cuales es tan difícil definir los flujos torrenciales de manera precisa es que a lo largo del cauce del río y dependiendo de la pendiente del mismo y del material disponible, una avenida torrencial puede cambiar sus características hidráulicas e hidrológicas y por ende recibir diferentes nombres (Costa, 1988). Además, lo anterior también define el tipo de material que es depositado en las márgenes de los drenajes a medida que el flujo va pasando y cambiando su

régimen (Parra, en preparación). *“Cuando se presentan avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas las corrientes aumentan la capacidad para transportar sedimentos gruesos donde además se incorporan restos vegetales y lodo con una zona de influencia amplia de gran potencial destructivo y un área afectada que se ubica paralelamente al flujo principal y otra que corresponde a la zona donde grandes depósitos de flujos de escombros se acumulan”.*

Estos eventos son impredecibles y ocurren de manera rápida, en periodos de tiempo muy cortos, con largos periodos de retorno para un mismo lugar y presentan una distribución temporal y espacial errática, razones que contribuyen al gran desconocimiento que hay sobre ellos, lo cual es muy delicado debido a su alto poder destructivo (Durán et al, 1985; Piedrahíta, 1996; Castro, 2007, Parra, en preparación).

En consecuencia, el flujo torrencial puede ser causa inicialmente, con base en estudios realizados en áreas donde han ocurrido fenómenos similares, por la influencia de factores geológicos y geomorfológicos descritos en el numeral 1.2.3 del estudio de la Universidad Nacional. (Parra et al., 1995; Rúa & Marín, 2006; Aristizábal, 2007; Castro, 2007). Además, otros factores tales como usos del suelo, condiciones climatológicas e hidrológicas, así como intervenciones de tipo hidráulico, interactúan entre sí, propiciando las condiciones que favorecen el desarrollo de tal fenómeno. De esta manera, las causas de las avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas son la combinación de factores geológicos y geomorfológicos de la cuenca (forma, pendiente, masa o material disponible) con factores meteorológicos de lluvias de alta intensidad (Castro, 2007), que pueden generar un aumento de escorrentía y activar en laderas de la cuenca, movimientos en masa que caen al cauce.

Todo lo anterior confluye junto con la extensión del valle para determinar la magnitud del evento y por ende su velocidad y poder destructivo.

Dentro de las principales causas generadoras de avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas sobresalen los eventos de precipitación de alta intensidad de carácter local. Desafortunadamente, en el país son pocos los datos obtenidos durante avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas y los registros de lluvia, en las cuencas donde se han registrado los eventos, son de baja calidad o han sido registrados en estaciones demasiado alejadas de las cuencas afectadas por lo cual los datos no indican las condiciones reales en la zona del evento, ya que en su mayoría reportan la lluvia diaria, mas no la intensidad y duración de esta.

Dentro de los pocos registros de precipitaciones para avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas con los que se cuentan en el Valle de Aburrá, sobresale el del evento de la Quebrada La Llorona en el Municipio de La Estrella, donde Cadavid, (2001) reporta que el día del evento se registraron 62 mm en una estación a 1.5 km de la cuenca afectada. Por su parte, González y Hermelinda, (2004) reportan registros de *“91 mm en estaciones pluviométricas cercanas a la cuenca afectada”.*

Las cuencas que presentan determinados indicadores con respecto a su morfometría presentan más susceptibilidad al evento de avenida torrencial, por lo tanto, de acorde con el estudio, “Las cuencas

torrenciales son entonces aquellas que tienen la capacidad de generar eventos de caudales muy grandes producidos en pocas horas durante los períodos invernales. Durante estos eventos de gran caudal, flujo no uniforme y alta velocidad, la cuenca adquiere una amplia capacidad de arrastre de materiales heterogéneos de gran magnitud, los cuales provienen usualmente de movimientos en masa generados en las márgenes del cauce, que van aumentando gradualmente su poder destructivo al incrementar la cantidad y tamaño del material disponible que puede incluir árboles, sedimentos gruesos, bloques de roca, entre otros.

De esta manera, las masas removidas se convierten en flujos de suelo y roca, donde el material sólido puede constituir hasta el 80% del peso total de la mezcla, que caen pendiente abajo hasta encontrar los cauces donde unidos a otros, aumentan el caudal de la corriente y se convierten en una avenida torrencial (Rendón, 1997; Castro, 2007).

Varios autores han intentado establecer unos indicadores claros que permitan identificar cuales cuencas presentan una mayor susceptibilidad ante este tipo de amenaza socio natural, o incluso de establecer parámetros físicos con unos rangos para los cuales exista la posibilidad o no de ocurrencia del fenómeno (Rico & Benito, 2002), pero dada la esporadicidad de estos fenómenos es muy difícil establecer unos rangos fijos y determinar cuáles factores son o no los necesarios como desencadenantes, ya que estos varían para cada cuenca. Vásquez (1993), mediante el estudio del desastre generado por una avenida torrencial del río Tapartó de 1993, define las características básicas de las cuencas torrenciales, las cuales son en su mayoría cuencas “jóvenes” o en evolución.

Estas características son:

- Cuencas relativamente pequeñas en las cuales los eventos de lluvia pueden cubrir completamente toda al área de captación.
- Cuencas situadas en regiones montañosas fuertemente escarpadas.
- Pendientes escarpadas del lecho o canal del río principal y de sus afluentes.
- Gran capacidad del río para socavar y profundizar su propio lecho.
- Alta capacidad de transporte de rocas y materiales.
- Presencia de valles estrechos en forma de “V” con laderas muy pendientes, propio de drenajes jóvenes.
- Gran variabilidad entre los caudales máximos y mínimos, hasta el punto de que una creciente puede presentar un caudal 100 veces mayor al caudal medio de la corriente.

Dentro de las características antes mencionadas, Riedl y Zachar (1984) destacan el tamaño de la cuenca, afirmando que estos eventos sólo se presentan en cuencas pequeñas, de entre 0,3 km<sup>2</sup> y 150 km<sup>2</sup>, para que ésta pueda ser afectada por una sola lluvia al mismo tiempo, puesto que para áreas más grandes la probabilidad es muy baja de que sean cubiertas en su totalidad por un solo aguacero.

Por su parte González y Hermelinda (2004), amplían este rango hasta 300 km<sup>2</sup>. Varios autores afirman que la forma de la cuenca también es un factor importante, siendo las cuencas circulares las más propensas a presentar avenidas torrenciales (Chorley, et al., 1984; González y Hermelinda, 2004). Estos mismos autores sostienen, que una red densa de drenaje o altamente desarrollada, contribuye significativamente a la reducción del tiempo de concentración favoreciendo la generación de avenidas torrenciales.

De acuerdo a la terminología y elementos conceptuales básicos anteriormente mencionados se desarrolla la metodología que se trabaja con los siguientes lineamientos:

A. Recopilación de información secundaria: la búsqueda se enfocó en los centros de documentación del Área Metropolitana, Biblioteca de Planeación de los municipios del Valle de Aburrá, Aula Ambiental (antes Instituto Mi Río), Universidad Nacional, Universidad EAFIT, planotecas, entre otros.

- Recopilación de estudios existentes: tales estudios incluyen tesis de grado, POMI, PIOM, POMCA, PBOT además de estudios puntuales relativos a una microcuenca en particular.
- Revisión de estudios hidráulicos e hidrológicos para las quebradas con mayores registros de eventos o para aquellas que posean tal información.
- Estudios anteriores relacionados concretamente al tema de inundaciones y avenidas torrenciales en el Área Metropolitana incluyendo estudios en zonas de inundación que especifiquen puntos críticos.
- Revisión de toda la información cartográfica, en papel o medio magnético, como curvas de nivel, hidrografía, geología de las unidades superficiales, entre otros.

B. Análisis geomorfológico por sensores remotos: a partir de la fotointerpretación de fotografías aéreas de múltiples años y de imágenes de satélite multispectrales de diferentes escalas, de los años 1986 y 2000.

C. SIG para validación: Elaboración de un mapa de susceptibilidad a la inundación utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) aplicando lógica difusa.

D. Elaboración para cada municipio de un mapa preliminar de amenaza basado en información secundaria y análisis geomorfológico preliminar.

E. Visitas a campo que permitan verificar, complementar y modificar los datos preexistentes y realizar en cada zona un análisis de susceptibilidad a inundaciones y avenidas torrenciales.

F. Determinación de amenaza por inundación y avenidas torrenciales: En esta etapa se relaciona la información secundaria recopilada con el análisis geomorfológico y el trabajo de campo para generar mapas que incluyen las manchas por inundaciones rápidas y lentas y avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas, así como la ubicación de puntos críticos. Estos mapas incluyen: un mapa de

amenaza por inundación escala 1:10.000 para el Valle de Aburrá, (1:5000 para Medellín) y un mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas escala 1:10.000 para el Valle de Aburrá (1:5000 para Medellín).

G. Verificación de resultados: luego de producir el mapa de amenazas se realizará una verificación de los resultados en tres fases:

- Comparándolos con los mapas de los POT.
- Realizando reuniones con funcionarios expertos de cada municipio para que analicen los mapas resultantes y den sus observaciones.
- Visitas de campo opcionales que permitieran verificar los límites de algunos polígonos.

## 6.2. Información generada por evaluación Cornare en convenio con la Gobernación de Antioquia

Se revisó el documento titulado Zonificación de riesgo por Movimientos en Masa, Inundación y Avenidas torrenciales. Atención de áreas afectadas por eventos desastrosos. Publicado en el año 2012.

De acuerdo al documento, “El mapa de amenaza por avenida torrencial muestra tres niveles de amenaza que responden de cierta manera a la geomorfología predominante en la región. El primer nivel muestra zonas con amenaza alta y se encuentran principalmente hacia el sur representadas por las cuencas de las quebradas La Miel y La Hondita, así como por las demás cuencas tributarias en esta zona al río Buey, las cuales cuentan con un gradiente alto y geoforma encañonada gozando con la posibilidad de aumentar rápidamente la lámina de agua que baja por la cuenca. También se incluye dentro de este nivel la cuenca alta de la quebrada La Agudelo en el escarpe Normandía, la cual en varias ocasiones ha mostrado un comportamiento torrencial.

El nivel de amenaza medio es una franja alargada que abarca la cuenca del río Pantanillo, principal afluente del río Negro, así como las quebradas Las Palmas, Espíritu Santo y Fizebad, las cuales vienen desde la superficie de erosión de Santa Elena y surten el Embalse de La Fe. Por último, se tiene las zonas de menor amenaza que se encuentran en partes relativamente más planas donde el relieve dominante son las superficies de erosión y las quebradas cuentan con valles mucho más amplios, siendo las corrientes un poco más sinuosas, el mejor representante de esta zona es el valle medio del río negro en el sector de Don Diego”.

En el documento se presentan dos tipos de zonificaciones: por vulnerabilidad y por riesgo. De acuerdo a la vulnerabilidad, se tuvieron en cuenta 6 elementos a ser evaluados, Vulnerabilidad Física, Vulnerabilidad Económica, Vulnerabilidad Social, Vulnerabilidad Ambiental, Vulnerabilidad Institucional y por último Vulnerabilidad Política, donde se establecieron unos pesos para cada variable donde se definía si la variable se encontraba de vulnerabilidad baja a Alta.

En el municipio de El Retiro hay un monopolio de vulnerabilidad muy bajo, que permite vislumbrar que es un municipio con una estabilidad categórica frente a cualquier riesgo que pueda generar catástrofes. La evaluación que se hizo en esta zona permitió arrojar un resultado definitivo ante el riesgo y sus dimensiones en este municipio.

Es importante aclarar que más del 95% del territorio del municipio de El Retiro presenta un grado de vulnerabilidad muy bajo, y justo el casco urbano representa el otro 5% de territorio que define un riesgo de vulnerabilidad baja. Hay una zona al norte del territorio municipal que representa el embalse de La Fe, tiene un tratamiento especial y que para asuntos de estudios de vulnerabilidad y riesgos no aplicaría su análisis, pero más sin embargo es importante tener en cuenta las variables sociales, ambientales y económicas que circundan este territorio.

Basado en los modelos de planeación nacional, El Retiro está dividido en 5 núcleos zonales incluyendo zona urbana, y teniendo en cuenta dentro de la valoración estudiada que 1 es muy baja y 5 es muy alta, se tiene que este municipio refleja un índice de vulnerabilidad física baja con un promedio de 2.2, que nos da a entender que hay un buen índice sostenible del espacio físico.

En la vulnerabilidad económica nos encontramos con un índice medio o moderado con promedio de 3.0, lo que representa que las condiciones de sostenimiento financiero y fiscal son aceptables, teniendo en cuenta su cercanía con la capital del departamento y la condición y el uso del suelo de este municipio, esto le ayuda a una estabilidad institucional, social y política que corrobora la muy baja vulnerabilidad en todo el territorio.

En la vulnerabilidad social, que representa un promedio de 3.4, se puede deducir que está en la misma condición de la económica, con una pequeña proporción de estar en alta, debido a la ubicación geográfica y su relación directa con la ciudad de Medellín, puede generar una vulnerabilidad social baja, ya que crea una relación cultural con la metrópoli que le es provechoso para mejorar las condiciones de legitimidad y creatividad frente a los municipios vecinos.

En la vulnerabilidad ambiental hay un promedio de 3.4, que nos da un índice de vulnerabilidad media por razones de ser un municipio entre rural y urbano, y le da el valor del embalse de la fe, que siendo un embalse tiene un tratamiento ambiental especial, por ende, es una fortaleza circunstancial que ayuda a que el riesgo sea menor.

En la vulnerabilidad institucional da un promedio de 2.0, que da un resultado de vulnerabilidad baja, debido a la capacidad financiera y a la diversidad de instituciones que hacen parte del municipio y que ayudan a fortalecer la democracia interna. Esto contribuye a que la variable económica, social y política tenga menos riesgos de ser afectado por alguna situación voluble a estas circunstancias.

En la vulnerabilidad política da un resultado de 1.0 en el promedio, arrojando un riesgo muy bajo de ser afectado. Teniendo en cuenta la dinámica que se hizo para este componente, se deduce que la vulnerabilidad política es la sumatoria de la vulnerabilidad institucional y económica, ya que se

tomó como fuente la distribución de la riqueza para poder medir la capacidad administrativa del municipio, por ende, su vulnerabilidad política.

Con respecto a Riesgo, se evaluaron 3 amenazas físicas como lo son: Movimientos en Masa, Inundaciones y Avenidas torrenciales, a las que se le dieron en una escala cualitativa de Riesgo muy bajo a Riesgo Muy Alto.

### **6.3. Información generada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia – IDEAM**

Se revisó el documento titulado: Estudio de la caracterización climática de Bogotá y Cuenca Alta del río Tunjuelo publicado en el año 2007, donde se hace una recopilación de las características generales que se presentan en la cuenca del río referido, se describen las variables climatológicas, así como su distribución espacio-temporal. Se muestra el análisis de las magnitudes descritas y de los indicadores climatológicos para la cuenca. Se describen los eventos de inundación registrados en el año 2002 y su conexión con la situación climática para la zona tropical en el momento de ocurrencia. En el numeral 6 se hace la clasificación climática de la cuenca de acuerdo con la escala de Thornthwaite. Concluye con las características climáticas de la cuenca estudiada y las recomendaciones para contar con información de mejor calidad.

El documento menciona en el numeral 5 que los eventos de avenidas son frecuentes en los cuerpos de agua ubicados en los cerros orientales en la zona centro y norte de la ciudad, siendo los de mayor impacto: San Cristóbal, Fucha, San Francisco, Arzobispo y quebradas La Vieja, Las Delicias, Chicó, Rosales y Contador.

### **6.4. Información generada por la CAR**

La Corporación Autónoma Regional – CAR, no presenta información directa relacionada con los eventos de avenidas torrenciales. Sin embargo y luego de la búsqueda correspondiente se encontró el documento de ajuste al POT del municipio de Chía, cuya aprobación definitiva se logró en julio de 2016. El documento de ajuste revisado presenta las generalidades de los eventos de avenidas torrenciales. Las escalas sugeridas para los mapas resultantes se indican en 1:25000 para la zona rural y 1:5000 para la zona urbana y de expansión. Menciona que los eventos de avenidas torrenciales son inherentes a cuencas pequeñas, de alta pendiente y representan una amenaza para la vida y la infraestructura. Presenta la caracterización de la quebrada Honda, ubicada en jurisdicción del municipio, evalúa los parámetros morfométricos de la cuenca y asigna factores de ponderación a cada una de las características analizadas concluyendo que la amenaza para el municipio por este tipo de eventos es BAJA.

### **6.5. Actualización POMCA Río Bogotá - Consorcio HUITACA**



Mediante el Contrato 1412 de 2014 adjudicado por el concurso de méritos abierto CM\_20\_2014, suscrito entre la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (en adelante CAR) y el Consorcio HUITACA del 31 de diciembre de 2014, se realizó el documento que tiene por objeto: Ajustar (actualizar) el plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá (código 2120), en el marco del proyecto: “Incorporación del componente de gestión del riesgo como determinante ambiental del ordenamiento territorial en los procesos de formulación y/o actualización de Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas afectadas por el fenómeno de La Niña 2010-2011”. Publicado en el año 2017.

La fase de diagnóstico es la segunda fase de las seis definidas para la elaboración del Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (en adelante POMCA), en esta fase se elabora la caracterización de la cuenca en sus diferentes componentes como el medio físico, biótico, político, administrativo y de igual forma de las condiciones sociales, culturales y económicas de la cuenca, igualmente se realiza una caracterización de riesgo, además de la identificación del nivel jerárquico de los asentamientos urbanos y sus relaciones urbano-rurales y urbano-regionales e identificación de unidades de funcionamiento espacial, así mismo un análisis situacional donde se identifica potencialidades, limitantes, condicionamientos y conflictos de la cuenca.

En el capítulo 2.3.1 del volumen V de Gestión del riesgo, se presenta un resumen del procedimiento utilizado para la evaluación de la susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales el cual se cita a continuación.

En este capítulo se presenta la metodología y los resultados de la evaluación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales en la Cuenca del río Bogotá. Los análisis se realizan de acuerdo con el Protocolo para la Incorporación de la Gestión del Riesgo en los POMCA (MINAMBIENTE, 2014) que establece en primer lugar un análisis y caracterización de eventos torrenciales que han ocurrido, la generación de un mapa de vulnerabilidad por eventos torrenciales IVET , de acuerdo con la metodología del IDEAM (que en realidad más que un mapa de vulnerabilidad corresponde a uno de susceptibilidad de las cuencas a sufrir eventos torrenciales), se realiza un análisis geomorfológico para identificar las unidades relacionadas con eventos torrenciales, se efectúa un análisis de susceptibilidad y finalmente se realiza el análisis de amenaza en las áreas previamente identificadas como críticas.

Teniendo en cuenta que dos de los factores más importantes para evaluar la amenaza son la recurrencia de los eventos y las características morfológicas que dan idea de lo reciente o antiguo de los flujos, la base de datos de eventos históricos debe ser lo suficientemente amplia para que permita realizar un análisis de esta naturaleza. Sin embargo, el número de avenidas torrenciales identificado en la cuenca es muy bajo y por lo tanto puede resultar inapropiada la calificación de los niveles de amenaza exclusivamente con tales criterios. Se optó como método alternativo evaluar, mediante modelación hidráulica simplificada la posible altura y velocidad del flujo para diferentes periodos de retorno y con estos parámetros calcular el ancho de influencia del flujo.

Se encontró que la cuenca presenta en su gran mayoría condiciones de torrencialidad alta que por las características de velocidad y altura del flujo pueden generar muertes y daños graves en las zonas de influencia. Estos anchos de influencia en la zona de alta pendiente están enmarcados por el mismo cauce del río, pero en las zonas de entrega se amplían considerablemente y conforman abanicos y otras geoformas que se pueden identificar a partir de los análisis geomorfológicos.

De la metodología anteriormente expuesta se obtuvo el mapa de amenaza de por avenidas torrenciales de la cuenca del río Bogotá para las zonas priorizadas.

De acuerdo al Mapa de Amenaza por avenidas torrenciales (Figura 5-1), se observa que para el área del distrito se tiene un sector en amenaza alta ubicado hacia los cerros orientales, el cual está asociado a las quebradas cuyas pendientes y gradientes hidráulicos son mayores.

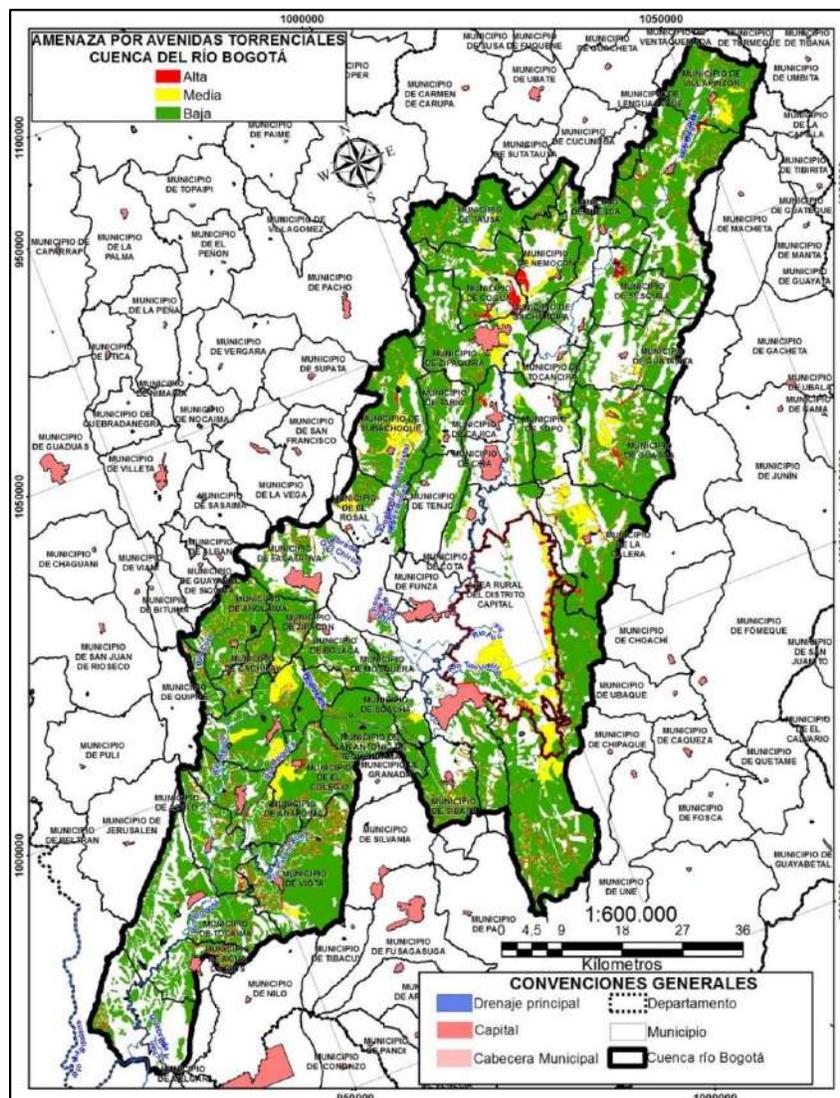




Figura 8-4. Amenaza por avenidas torrenciales para las zonas priorizadas (POMCA, 2017).

## 6.6. POMCA Río Sumapaz y Río Blanco

En los POMCA del río Sumapaz y río Blanco no se ha estudiado esta amenaza. Se espera que en la fase de diagnóstico durante la actualización sea analizada.

## 6.7. Información generada por la EAAB – ESP

El documento Metodología para la Evaluación Regional del Agua (ERA) Documento síntesis, emitido por la EAB en el año 2013, presenta los lineamientos para evaluar los niveles de oferta y demanda del recurso hídrico, realizar la evaluación de la calidad del agua y el análisis del riesgo en la ERA. Finalizando con la presentación de los lineamientos para los indicadores y los sistemas de información del recurso hídrico. Sobre las avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas el documento presenta su relación con la vulnerabilidad del recurso hídrico, las condiciones de las cuencas susceptibles de experimentar el evento. El indicador de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET) de la cuenca es el que representa la susceptibilidad de la misma a experimentar el fenómeno y en el documento se presenta su procedimiento de cálculo.

## 6.8. Información generada por la SDA

La secretaría distrital de ambiente no posee documentos en los cuales el fenómeno de avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas esté cubierto. Sin embargo, el documento Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenibles publicado en 2011 tiene la estructura de un documento técnico de soporte en una estructura más básica que el presente documento.

## 6.9. Fondo de Prevención y Atención de Emergencias (FOPAE) hoy Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER)

Se revisó el documento titulado: “MODELOS CONCEPTUALES, METODOLOGÍAS E INSUMOS PARA LA DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES DE VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO, EVENTOS TORRENCIALES Y VULNERABILIDAD DE LAS INFRAESTRUCTURAS DE PRODUCCIÓN DE AGUA. PRODUCTO 3”, Este informe constituye el Producto 3 del Contrato No 644 de 2013, cuyo objeto es la “Elaboración de las metodologías, procedimientos para la medición y seguimiento de los aspectos identificados en el componente riesgos en la evaluación regional del agua para Bogotá-Región, que son de competencia de la entidad, que alimenten el SIRH en coordinación con las demás entidades del Distrito Capital”. En este, en el numeral 3.2.3 (Pág. 55) se presenta la Amenaza de eventos Torrenciales cuyo Indicador de vulnerabilidad a eventos torrenciales IVET modificado (IAETM) es desarrollado a través del cálculo de 2 Indicadores, El índice de Torrencialidad y el Índice de Vulnerabilidad; Para el primero, se tienen en cuenta 3 parámetros morfométricos fundamentales que son la Densidad de Drenaje, El coeficiente de compacidad y la pendiente media de la cuenca, los cuales son indicativos de la forma como se concentra la escorrentía, la oportunidad de

infiltración, la velocidad y la capacidad de arrastre de sedimentos en una cuenca, la eficiencia o rapidez de la escorrentía y de los sedimentos para salir de la cuenca luego de un evento de precipitación, y por otra parte el Índice de Variabilidad: se obtiene de la curva de duración de caudales; el muestra cómo es la variabilidad de los caudales en una determinada cuenca (IDEAM, Lineamientos conceptuales y metodológicos para los estudios de la ERA, 2013). Una cuenca torrencial es aquella que presenta una mayor variabilidad en sus registros de caudales. Para este índice, la curva de duración de caudales se construye en escala logarítmica.

#### **6.10. Información generada por el grupo de estudios Subdirección de Investigación Y Desarrollo Dirección de Prevención y Atención de Emergencias – DPAE en el año 2007**

Se revisó el documento titulado “CARACTERIZACIÓN DE CUENCAS DEL DISTRITO CAPITAL Y PRIORIZACIÓN PARA ESTUDIOS DE AMENAZA Y SISTEMAS DE ALERTA TEMPRANA DE INUNDACIONES CONTRATO PS 17 DE 2007” elaborado por la Ing. María Carolina Rogelis, en donde se presenta la respectiva metodología la cual se basa en la utilización de imágenes ráster que representan las características fisiográficas que tienen influencia en la respuesta hidrológica de las cuencas de la ciudad de Bogotá y en su susceptibilidad a generar eventos de avenida torrencial, así como para determinar la vulnerabilidad de las mismas.

Las etapas marcadas en esta metodología son La Recopilación y estructura de la información: Información Base EAAB, posteriormente, Procesamiento de información geográfica y análisis: Modelo Digital de Terreno (Componentes de Hidrología, Geología y Geomorfología)(Coberturas Coordinación Informática del FOPAE):a, Cobertura de deslizamientos, diagnósticos técnicos de inundación, usos del suelo, Predios, Equipamientos, Curvas de nivel .Además de lo anterior, se obtuvo información de Incendios, y por último, el Análisis multicriterio. El estudio comienza por realizar la respectiva morfometría de Cuencas, donde se evalúan varios parámetros como: Área, Perímetro, Pendiente, Longitud de la cuenca, Relación de circularidad, Parámetro de forma, densidad de drenaje, Número de Melton. Con base en los parámetros anteriormente relacionados, se realiza posteriormente el respectivo análisis multicriterio para indicar que tan vulnerable es una cuenca dada para que se presentes eventos de Avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas.

#### **6.11. Conceptos técnicos emitidos para el Programa de Reasentamiento - Avenidas torrenciales (2013-2015) por el IDIGER**

En el periodo 2013 – 2015 el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) emitió 18 conceptos técnicos en el cual se analizaron las condiciones de susceptibilidad por avenidas de algunas quebradas de importancia en el Distrito Capital y se realizaron recomendaciones para el programa de reasentamiento, los conceptos técnicos con sus respectivas quebradas se presenta en la *Tabla 8.1*.

El número total de viviendas/familias recomendadas para incluir en el programa de acuerdo al número de concepto se presenta en la *Tabla 8.2* el total de viviendas/familias es de 3413 en el cual se destaca las quebradas Chiguaza, Limas, Trompeta y Peña Colorada con el mayor número de viviendas/familias recomendadas.

*Tabla 8.1. Conceptos técnicos emitidos para el programa de reasentamiento*

ID	NUMERO CT	ADENDA	FECHA	QUEBRADA	LOCALIDAD
1	CT-6948		23-Jul-13	BAUL	CIUDAD BOLIVAR
2	CT-6962		30-Jul-13	GALINDO	CIUDAD BOLIVAR
3	CT-6963		26-Jul-13	INFIERNO	CIUDAD BOLIVAR
4	CT-6964	Adenda CT-7943 (11-JUN-15)	13-Aug-13	TROMPETA	CIUDAD BOLIVAR
5	CT-6971		30-Jul-13	ZANJÓN DE LA ESTRELLA	CIUDAD BOLIVAR
6	CT-6975	Adenda CT-7954 (04-JUN-15)	5-Aug-13	HONDA	CIUDAD BOLIVAR
7	CT-6976	Adenda CT-7984 (15-JUL-15)	20-Aug-13	ZANJÓN DEL AHORACADO	CIUDAD BOLIVAR
8	CT-6977	Adenda CT-8005 (15-JUL-15)	23-Aug-13	ZANJÓN DE LAMURALLA	CIUDAD BOLIVAR
9	CT-7003	Adenda CT-7983 (15-JUL-15)	21-Aug-13	HOYA DEL RAMO	USME
10	CT-7004	Adenda CT-7946 (10-JUN-15)	23-Aug-13	VEREJONES	SAN CRISTOBAL USME
11	CT-7005	Adenda CT-7980 (15-JUL-15)	23-Aug-13	PEÑA COLORADA	CIUDAD BOLIVAR
12	CT-7086	Adenda CT-7930 (10-MAR-15)	21-Nov-13	BRAZO DERECHO DE LIMAS	CIUDAD BOLIVAR
13	CT-7528	Adenda CT-8035 (08-JUN-16)	21-Aug-14	LIMAS	CIUDAD BOLIVAR
14	CT-7663	Adenda CT-8133 (02 FEB-16)	11-Nov-14	CHIGUAZA	RAFAEL URIBE URIBE
15	CT-7725		13-Nov-14	TROMPETICA	CIUDAD BOLIVAR
16	CT-7904		29-Dec-14	PIEDRA DEL MUERTO O PIEDRA DEL ANGEL	CIUDAD BOLIVAR
17	CT-7979		28-Aug-15	QUEBRADA SAN BRUNO	SANTA FÉ Y CANDELARIA
18	DI-8441/ DI-7027		26-Sep-15	RÍO FUCHA	SAN CRISTOBAL

*Tabla 8.2. Total Viviendas/Familias recomendadas por el programa*

ID	NUMERO CT	Adenda	FECHA	QUEBRADA	LOCALIDAD	TOTAL DE VIVIENDAS/FAMILIAS RECOMENDADOS AL PROGRAMA
1	CT-6948		23-jul-13	BAUL	CIUDAD BOLIVAR	27
2	CT-6962		30-jul-13	GALINDO	CIUDAD BOLIVAR	46
3	CT-6963		26-jul-13	INFIERNO	CIUDAD BOLIVAR	88
4	CT-6964	Adenda CT-7943 (11-JUN-15)	13-ago-13	TROMPETA	CIUDAD BOLIVAR	478
5	CT-6971		30-jul-13	ZANJÓN DE LA ESTRELLA	CIUDAD BOLIVAR	16
6	CT-6975	Adenda CT-7954 (04-JUN-15)	05-ago-13	HONDA	CIUDAD BOLIVAR	30
7	CT-6976	Adenda CT-7984 (15-JUL-15)	20-ago-13	ZANJÓN DEL AHORACADO	CIUDAD BOLIVAR	21
8	CT-6977	Adenda CT-8005 (15-JUL-15)	23-ago-13	ZANJÓN DE LAMURALLA	CIUDAD BOLIVAR	88
9	CT-7003	Adenda CT-7983 (15-JUL-15)	21-ago-13	HOYA DEL RAMO	USME	128
10	CT-7004	Adenda CT-7946 (10-JUN-15)	23-ago-13	VEREJONES	SAN CRISTOBAL USME	198
11	CT-7005	Adenda CT-7980 (15-JUL-15)	23-ago-13	PEÑA COLORADA	CIUDAD BOLIVAR	418
12	CT-7086	Adenda CT-7930 (10-MAZ-15)	21-nov-13	BRAZO DERECHO DE LIMAS	CIUDAD BOLIVAR	201
13	CT-7528	Adenda CT-8035 (08-jun-16)	21-ago-14	LIMAS	CIUDAD BOLIVAR	426
14	CT-7663	Adenda CT-8133 (02 FEB-16)	11-nov-14	CHIGUAZA	RAFAEL URIBE URIBE	571
15	CT-7725		13-nov-14	TROMPETICA	CIUDAD BOLIVAR	49
16	CT-7904		29-dic-14	PIEDRA DEL MUERTO O PIEDRA DEL ANGEL	CIUDAD BOLIVAR	27
17	CT-7979		28-ago-15	QUEBRADA SAN BRUNO	SANTA FÉ Y CANDELARIA	33
18	DI-8441/ DI-7027		26-sep-15	RÍO FUCHA	SAN CRISTOBAL	79
<b>Total</b>						<b>2924</b>

## 6.12. Información generada por otras entidades

De la *Guía técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCAS. Anexo B. Gestión del Riesgo* emitido por Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el año 2014, se tiene la identificación de los eventos de Avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas como procesos que representan amenazas por geodinámica externa y deben ser evaluados dentro del ejercicio de formulación de los POMCA, estos eventos pueden ser generados por eventos sísmicos, aunque generalmente ocurren por saturación de los suelos y el tránsito de crecientes. El numeral 2.2.3.1 presenta la descripción de las avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas y menciona que su ocurrencia se localiza en las cuencas pequeñas de alta pendiente con capacidad para generar altos caudales en muy poco tiempo. Señala que es importante, una vez se ha determinado la posibilidad de ocurrencia de este tipo de evento, indicar cuál es la zona que se estima puede resultar afectada por el evento. El documento concluye que la identificación de amenazas de la cuenca debe ser el resultado de la ponderación de los distintos eventos que tienen posibilidad de ocurrir en la cuenca estudiada.

## 7. METODOLOGÍA

Con el fin de construir el esquema metodológico usado en la generación del mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas, se partió de una revisión de las metodologías de evaluación de amenaza enfocado en la armonización tanto en alcance, nivel de información disponible y calidad de los resultados para definir los procedimientos y actividades a ejecutar para lograr un producto cartográfico ajustado a los requerimientos técnicos exigidos en la normatividad vigente (Decreto 1807 de 2014).

### 7.1. Estado del arte

Para establecer el estado del arte de la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas se realizó una revisión extensa de la literatura especializada en la cual se destacan algunos artículos de referencia que se presentan a continuación.

#### 7.1.1. Información generada para International Journal of Geomatics and Geosciences Volume 2, No 2, 2011 por Koshak.N, Dawod.G 2011

Documento titulado *“A GIS morphometric analysis of hydrological catchments within Makkah Metropolitan area, Saudi Arabia”*. En este documento, se intenta mostrar el apoyo de las tecnologías de la información espacial, en particular los Sistemas de Información Geográfica (SIG), y como estos representan herramientas eficaces en la determinación de las propiedades morfométricas de las respectivas cuencas de drenaje. Se calculan determinados parámetros morfométricos los cuales son la base para calcular que tan propensas son determinadas cuencas a eventos de inundación y avenidas torrenciales. Se encontró en este estudio, que de acuerdo a estos parámetros se puede

identificar que tan vulnerable es una cuenca a que se genere un evento de avenida torrencial o inundación. (Koshak & Dawod, 2011).

#### 7.1.2. Información generada para el Arabian Journal of Geoscience (2014), por S. Bajabaa, M. Masoud, N. Al-Amri (2013)

Documento titulado *“Flash flood hazard mapping based on quantitative hydrology, geomorphology and GIS techniques (case study of Wadi Al Lith, Saudi Arabia)”* En este documento se encuentra la respectiva Información guía para la Base de cálculo de parámetros Morfométricos con Herramientas SIG. En este, se implementa el análisis y la combinación de los distintos parámetros descritos que constituyen el recurso para el análisis de la ocurrencia de las Avenidas torrenciales. Los parámetros a calcular acordes con la metodología son: el Área(A), Perímetro (Pr), Orden de la corriente(u), Longitud Máxima de la corriente principal (Lu), Longitud máxima de recorrido del flujo en la cuenca (LB), Pendiente media de la cuenca (Slope), Diferencia de Nivel ente el punto más alto y el más bajo de la cuenca (Rf), Dirección de Flujo, Ancho de la cuenca(W), Relación de Compacidad (Sh), Relación de Textura (Rt), Sinuosidad (Si), Densidad de Drenaje(D), Coeficiente de Compacidad(Kc), Frecuencia de Drenaje (F). De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta la geomorfología de la zona como entrada básica, se relacionan estos parámetros para identificar la ocurrencia de avenidas torrenciales. (Bajabaa, Masoud, & Al-Amri, 2014).

#### 7.1.3. Información generada para el Open Journal of Modern Hydrology, 2016, 6, 79-100, por Yahya Farhan, Omar Anaba (2016)

Documento titulado *“Flash Flood Risk Estimation of Wadi Yutum (Southern Jordan) Watershed Using GIS Based Morphometric Analysis and Remote Sensing Techniques”* el cual sirve como guía para la Base de cálculo de parámetros Morfométricos Y Geomorfológicos con Herramientas SIG. En el respectivo documento, se implementa el análisis y la combinación de los distintos parámetros que constituyen el recurso para análisis de inundaciones. En esta metodología, se propone dar pesos a los diferentes parámetros y luego realizar una sumatoria por subcuenca, de la cual se entra a clasificar en 3 distintas clases las cuencas, que sería: (Farhan & Anaba, 2016)

- Susceptibilidad baja inundaciones (30 - 40).
- Susceptibilidad intermedia inundaciones (41 a 49).
- Susceptibilidad alta inundaciones (50 - 60).

## 7.2. Esquema metodológico

El esquema metodológico se divide en tres análisis principales: (Ver Figura 4-5)

- Análisis Hidrológico.
- Análisis Sedimentos.

- Análisis Hidráulico.

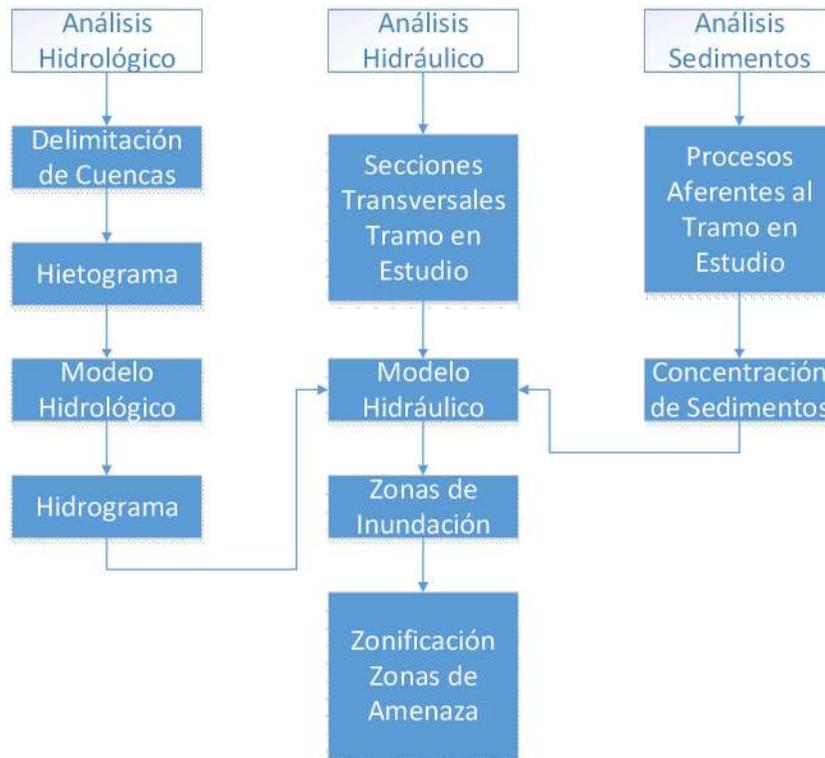


Figura 8-5. Esquema metodológico

El primer paso del análisis hidrológico es delimitar las cuencas aferentes al tramo de río o quebrada que se desea analizar a partir del modelo de elevación digital de la cuenca, posteriormente se estima el hietograma de precipitación bajo un escenario de periodo de retorno determinado el cual será el insumo de entrada del modelo hidrológico que proporciona los hidrogramas de entrada del modelo hidráulico.

El análisis de sedimentos parte del mapa de procesos geomorfológicos identificados que se encuentran cerca del tramo de río o quebrada que se desea analizar, la concentración de sedimentos se determina de acuerdo a la literatura especializada asignando un valor promedio a cada tipo de proceso.

El análisis hidráulico toma como entrada el hidrograma resultado del análisis hidrológico y la concentración de sedimentos del análisis de sedimentos, con estas variables de entrada transita el hidrograma en el modelo de elevación digital del terreno del tramo de río o quebrada que se desea analizar, obteniendo como resultado las velocidades y profundidades máximas alcanzadas en cada



una de las celdas del modelo de elevación digital del tramo en estudio, estos valores de velocidad y profundidad se categorizan de acuerdo a la condición de amenaza que representan.

## 8. INSUMOS

### 8.1. Cartografía base

Para la cartografía base utilizada tal como lo establece el Decreto 1807 de 2014 (compilado por el Decreto 1077 de 2015), se verificó que contuviera entre otros: coordenadas, curvas de nivel, drenajes, red vial, infraestructura y equipamientos, asentamientos humanos. A partir de lo anterior para la cartografía se tiene lo siguiente:

#### 8.1.1. Sistemas de coordenadas

Sistema de Coordenadas Proyectadas - Cartesianas: Magna Bogotá

Proyección: Transversal de Mercator

Falso Este: 92324,879

Falso Norte: 109320,965

Longitud Meridiano Central: -74,14659167

Latitud de origen: 4,680486111

Factor de escala: 1

Sistema de Coordenadas Geográfica GCS CarMAGBOG

Meridiano de Greenwich

Datum CGS\_CARMAGBOG

Elipsoide: GRS80 Mod

Semieje Mayor: 6380687

Semieje Menor: 6359293,764473119

Achatamiento: 298,257222101

#### 8.1.2. Escala

De acuerdo al artículo 10 del decreto 1807 de 2014 (compilado por el Decreto 1077 de 2015) La base cartográfica que se emplee en la zonificación corresponderá a una escala 1:2.000, sin embargo dado que la información en esta escala para la zona de estudio es insuficiente se adopta la escala de trabajo para el área urbana y de expansión de 1:5000, teniendo en cuenta que en el mencionado artículo se establece *“En todo caso, los análisis se realizan en función de la magnitud de la amenaza, su intensidad, consecuencias y la disponibilidad de información”*.

#### 8.1.3. Geodatabase Secretaría Distrital de Planeación SDP

La cartografía base fue tomada de la geodatabase con la información geográfica de la Secretaría Distrital de Planeación.

## 8.2. Modelo digital del terreno

Se realizó la recolección de modelos digitales de terreno disponibles para el área de estudio, la cual se resume a continuación:

Tabla 8.1. Modelos Digitales de Terreno

Nombre	Fuente	Año	Resumen
Modelo digital de terreno MDT	Catastro – DEM ALOS	-	Pixel de 12.5 m
	Acueducto- DEM EAB	2016	Pixel de 9 m
	Acueducto- DEM EAB	2015	Pixel de 1 m

De acuerdo con la información suministrada se reportan alturas desde 2504,03 m hasta 3337,08 m. Adicionalmente, con este modelo se han generado las curvas de nivel a 1 metro, 2 metros y 2.5 metros; el ráster de pendientes (con la clasificación del IGAC) para la edición de la geología urbana; al igual que se ha utilizado para generar la red hídrica del área urbana.

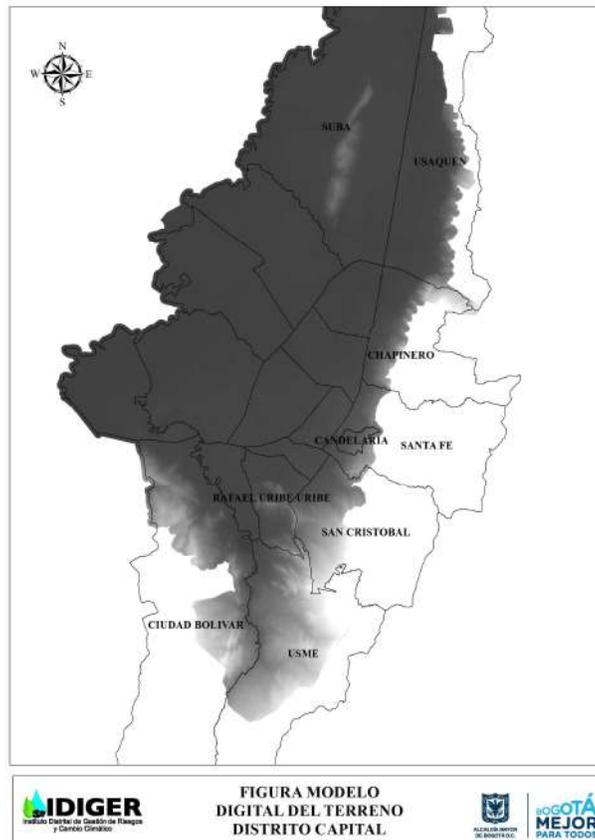


Figura 8-1. Modelo Digital del Terreno

### 8.3. Geología

Para la zona rural se cuenta con la Geología elaborada para la zonificación de amenaza por movimientos en masa, donde se identificaron diferentes formaciones y depósitos, en este orden de ideas, las formaciones aflorantes son de origen sedimentario y edades que abarcan desde el Paleozoico hasta el Cretácico – Terciario, representadas por las Formaciones Capas rojas del Guatiquía, Fómeque, Une, Chipaque, Grupo Guadalupe, Guaduas, Cacho, Bogotá, Fusagasugá, Regadera y Usme; de otra parte los depósitos son de origen Fluvial, Glaciar, Coluvial y Antrópicos y son nombrados como Marichuela, Tunjuelito, Siecha, Sabana, Aluviales, Coluviales, Morrenas del Sumapaz, Chía y Chisacá entre otros.

A continuación, en la Figura 4-7 y en la Tabla 4.4 se presentan las formaciones aflorantes en el área rural de Bogotá D.C.

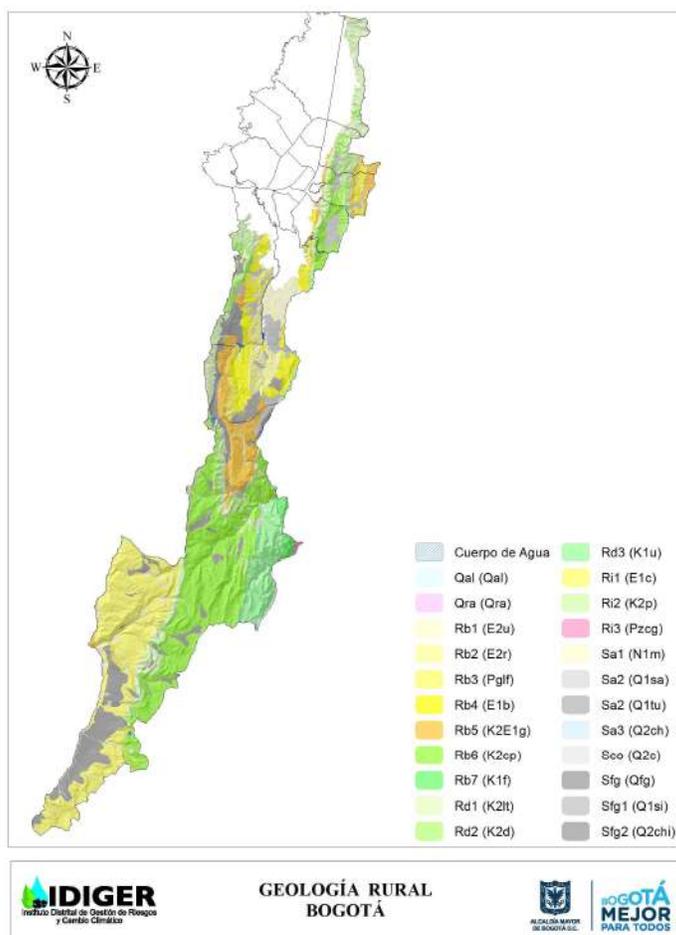


Figura 8-2. Mapa Geológico Rural

Tabla 8.2 Unidades geológicas presentes en la zona rural del Distrito Capital

Acrónimo	Descripción
<b>Formaciones Rocosas</b>	
<b>Pzcg</b>	Formación Capas Rojas del Guatiquía: Niveles de Limolitas que alternan con areniscas rojizas a verdosas, las cuales a su vez presentan intercalaciones de areniscas gruesas a conglomeráticas de forma lenticular y algunos niveles calcáreos.
<b>K1f</b>	Formación Fómeque: Niveles de lutitas negras a gris oscuras que alternan con areniscas y capas de calizas (delgadas)
<b>K1u</b>	Formación Une: Se pueden diferenciar tres secciones (inferior, media y superior), la primera está conformada por cuarzo-areniscas blanco amarillentas de grano fino a medio y algunos niveles delgados de conglomerados y lodolitas (en su parte alta); la segunda, se caracteriza por sucesiones de lodolitas negras dispuestas en capas delgadas que alternan con areniscas cuarzosas grises a blancas y de grano fino a medio, forjando capas delgadas a medias; la tercera de las secciones reúne areniscas cuarzosas grises a blancas, con tamaño de grano fino a medio, cemento síliceo arregladas en capas delgadas a gruesas.
<b>K2cp</b>	Formación Chipaque: Capas gruesas de lutitas oscuras con intercalaciones delgadas de limolitas síliceas, calizas arenosas, arenitas de grano fino y hacia la parte inferior algunos mantos de carbón.
<b>K2d</b>	Formación Arenisca Dura: Secuencia predominante de areniscas gris claras, grano fino ocasionalmente grano medio a grueso, duras, en estratos delgados a muy gruesos, con intercalaciones menores de limolitas.
<b>K2p</b>	Formación Plaeners: Secuencia caracterizada por la interestratificación de estratos delgados de arcillolitas síliceas, liditas, limolitas síliceas y arcillolitas, generalmente fracturadas.
<b>K2lt</b>	Formación Arenisca Labor – Tierna: Secuencia de areniscas blancas a gris claras, con tamaño de fino a grueso, dispuestas en capas gruesas a muy gruesas, friables y con intercalaciones de capas muy delgadas de arcillolitas y Limolitas.
<b>K2E1g</b>	Formación Guaduas: Secuencia en la que predominan arcillolitas de color gris claro y abigarradas, intercaladas con cuarzo arenitas de colores claros, de tamaños finos a medios y en conformando capas medias a delgadas; adicionalmente se presentan esporádicas capas de limolitas y mantos de carbón.
<b>E1c</b>	Formación Cacho: Areniscas conglomeráticas dispuestas en capas gruesas, tabulares y cuneiformes, son de composición cuarzosa y algo ferruginosa, el tamaño de grano varía de medio a fino y en friables.

Acrónimo	Descripción
<b>E1b</b>	Formación Bogotá. Arcillolitas abigarradas entre las cuales se intercalan algunos bancos gruesos de areniscas feldespáticas de grano medio a grueso areniscas arcillosas
<b>Pglf</b>	Formación Fusagasugá: Capas de lodolitas y limolitas de colores grises a blancas que alternan con litorenitas.
<b>E2r</b>	Formación Regadera: Areniscas friables de grano fino a conglomeráticas, de coloraciones rojizas a blancas, intercaladas con niveles de lodolitas.
<b>E2u</b>	Formación Usme: Arcillolitas varicoloreadas intercaladas con areniscas de colores amarillentos.
<b>Depósitos de origen glaciar – fluvioglaciar</b>	
<b>Q1sl</b>	Formación Río Siecha: Depósitos conformados por gravas intercaladas con arenas, arcillas orgánicas y paleosuelos.
<b>Qm</b>	Morrenas del Sumapaz: Depósitos de fragmentos de roca de formas subangulares a subredondeadas y de tamaños variados inmersos en una matriz gravo-arenosa
<b>Q2chi</b>	Formación Chisacá: Depósitos morrénicos compuestos por fragmentos de roca subangulares a subredondeadas y tamaños hasta bloques embebidos en una matriz arenosa.
<b>Qfg</b>	Depósitos Fluvioglaciares: Bloques y cantos angulares a subredondeados, de areniscas, provenientes del Grupo Guadalupe, los cuales se encuentran embebidos en una matriz de arena gruesa a arcilla.
<b>Depósitos de origen aluvial</b>	
<b>N1m</b>	Formación Marichuela: Depósitos flujo torrencial conformados por gravas, clastos y bloques de formas subredondeadas inmersos en una matriz arenosa a areno arcillosa. En términos generales presentan colores rojizos u moteados (rojos/blancos).
<b>Q1tu</b>	Formación Río Tunjuelito: Depósitos conformados por bloques, cantos y gravas, formas subredondeadas a redondeadas, intercaladas con niveles de arenas, arcillas orgánicas y turbas.
<b>Q1sa</b>	Formación Sabana: Depósitos conformados por capas de arcillas de color gris, sus límites laterales están constituidos por arenas, arcillas arenosas, turbas y esporádicos delgados niveles de gravas.
<b>Qal</b>	Depósitos Aluviales: Depósitos recientes y no consolidados asociados a cauces y márgenes de drenajes, agrupan bloques, cantos, gravas y arenas de composición heterogénea.
<b>Q2ch</b>	Formación Chía: Secuencia de arcillas varicoloreadas, con presencia local de limos y arcillas orgánicas.
<b>Depósitos de origen coluvial</b>	

Acrónimo	Descripción
Q2c	Depósitos Coluviales: Depósitos de laderas asociados a movimientos de remoción en masa, son de composición heterogénea (bloques y fragmentos angulosos) inmersos en una matriz areno-arcillosa y de espesores variados.
Qft	Depósito de Flujos de Tierra y de Suelos
<b>Depósitos de origen antrópico</b>	
Qra	Rellenos Antrópicos conformados por basuras y/o escombros, especialmente la mayoría se localizan en zonas de explotación y depositación de materiales de canteras abandonadas, las cuales en su momento eran aprovechadas para explotación de arenas o arcillas.

*Fuente: Proyecto POT*

La descripción de las unidades se presenta en el Documento Técnico de Soporte del Mapa de Amenaza por Movimientos en Masa para la Zona Rural.

#### 8.4. Geomorfología

Para la zona rural se cuenta con la Geomorfología a elaborada para la zonificación de amenaza por movimientos en masa para el suelo rural donde se identificaron las diferentes subunidades geomorfológicas asociadas a los siguientes ambientes morfogenéticos: Estructural – Denudativo, Fluvial y Lagunar, Glaciar y Periglaciar y de Origen Antrópico, entre las que están las correspondientes a la llanura de inundación y son presentados en la Figura 4-8. En la Tabla 4.5 se presenta cada una de las unidades geomorfológicas definidas para el área de influencia del estudio.

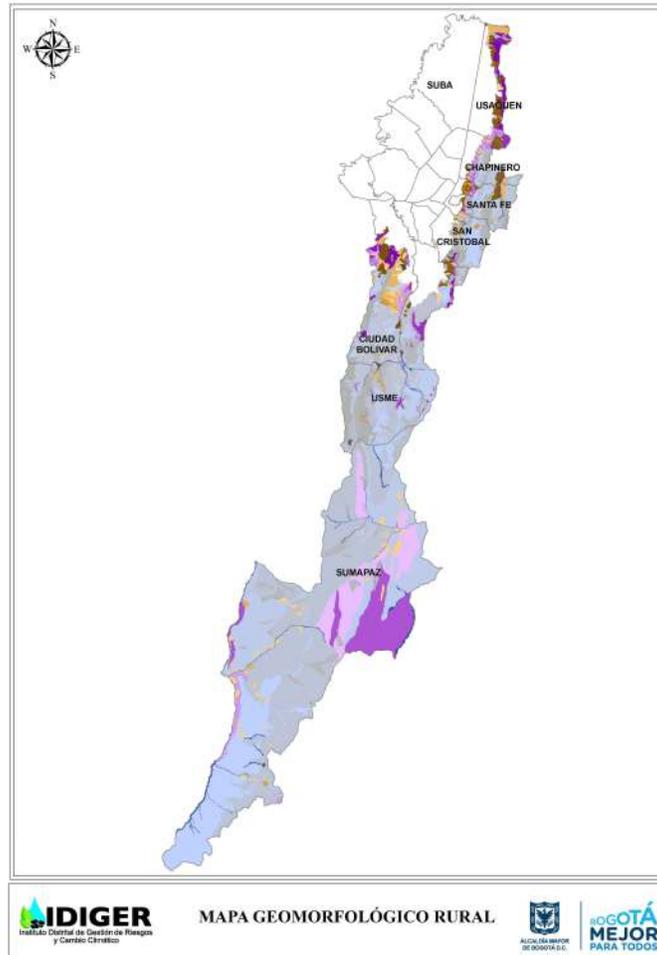


Figura 8-3. Mapa Geomorfológico Rural

Tabla 8.3 Jerarquización de las unidades geomorfológicas diferenciadas en el área rural del Distrito Capital

REGIÓN	UNIDAD	SUBUNIDAD	SÍMBOLO
ANTROPOGÉNICO		Área de Rellenos Sanitarios	Ars
		Área Urbanizada	Aur
		Cantera	Acn
		Canteras Activas	Acna
		Represas	Arp
		Área de Rellenos Antrópicos	Are

REGIÓN	UNIDAD	SUBUNIDAD	SÍMBOLO		
ESTRUCTURAL - DENUDATIVO	Cuesta Estructural Denudada y Residual	Ladera estructural de cuestas denudadas y residuales	Scle		
			Sclp		
	Espinazo Estructural Denudado	Ladera de contrapendiente de espinazo denudado	Selp		
		Ladera estructural de espinazo denudado	Sele		
	Planchas Estructurales Denudadas - Espolones Estructurales	Ladera estructural denudada y residual	Conos y lobulos Coluviales y de Soliflucción	Dco	
			Conos de talus	Dct	
			Flujos torrenciales	Dlfb	
			Cerros Residuales	Dcr	
			Cono de deslizamiento traslacional reciente y antiguo	Dcdta	
			Escarpe erosivo mayor	Deem	
			Conos de deslizamiento rotacional recientes y antiguos	Dcdra	
			Ladera en pendiente y contrapendiente estructural denudada	Dlpd	
			Valles en V	Dva	
			Cerros remanentes o relictos	Dcrm	
			Deslizamiento Rotacional	Conos de deslizamiento rotacional recientes y antiguos	Dcdr
			Sierra Anticlinal Denudada y Residual	Laderas de contrapendiente sinclinal denudada	Domo estructural denudado
	Planchas estructurales	Spe			
	Laderas estructurales anticlinales denudadas y residuales	Ssanl			
	Facetas triangulares	Sft			
	Cornisas estructurales	Scor			
	Sierra Sinclinal Denudada y Residual	Escarpe de línea de Falla	Escarpe de Línea de Falla	Slfp	
			Cerro estructural	Sce	
			Terrazas o bermas de fallamiento	Sbf	
			Laderas estructurales sinclinales residuales	Ssle	
			Conos y lobulos Coluviales y de Soliflucción	Dco	
			Escarpe de línea de Falla	Slfp	

REGIÓN	UNIDAD	SUBUNIDAD	SÍMBOLO
	Sierra Homoclinal Denudada	Ladera de contrapendiente de Sierra Homoclinal Denudada	Sshcp
		Ladera estructural de Sierra Homoclinal Denudada	Sshle
FLUVIAL Y LAGUNAR	Valle Aluvial	Conos de deyección	Fcdy
		Cuencas de decantación fluvial (basines)	Fcd
		Valles Aluviales	Fvi
	Planicie Aluvial	Planicies o llanuras de inundación (Fpi)	Fpi
	Terrazas Fluviales de Acumulación	Terrazas fluviales actuales y recientes	Ftas
GLACIAL Y PERIGLACIAL	Cuesta Estructural Glaciada	Conos y lóbulos de gelifracción	Glb
		Valles o artesas glaciares	Gvfg
		Abanicos fluvio-glaciares	Gafg
		Kames y terrazas de gelifracción	Gts
		Ladera de contrapendiente estructural glaciada	Glcp
		Ladera estructural glaciada	Gle
		Lago glaciar	Gl
		Morrena lateral	Gmf
			Gml
		Morrena terminal	Gmt
		Morrenas de ablación	Gma
		Planchas y espolones estructurales glaciados	Gpeg
		Planicies glaciolacustrinas	Gsg
	Planicies y abanicos de sobrelavado glaciar	Gpl	
	Sierra Homoclinal Glaciada	Circos glaciares y de nivación	Gc
		Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal glaciada	Gshcp
		Ladera estructural de sierra homoclinal glaciada	Gshle
		Conos y lóbulos Coluviales y de Solifluxion	Dco
		Ladera estructural de sierra homoclinal glaciada	Gshle
	Sierra Anticlinal Glaciada	Ladera estructural anticlinal glaciada	Gsanl
		Ladera estructural de espinazo glaciado	Gcleg

REGIÓN	UNIDAD	SUBUNIDAD	SÍMBOLO
	Espinazo Estructural Glaciado	Conos y lóbulos Coluviales y de Solifluxion	Dco
		Ladera estructural de espinazo glaciado	Gelpg
			Geleg

La descripción de las unidades se presenta en el Documento Técnico de Soporte del Mapa de Amenaza por Movimientos en Masa para la Zona Rural.

### 8.5. Inventario de procesos morfodinámicos

Dentro del área rural del Distrito Capital, se realizó la identificación de los procesos morfodinámicos o movimientos en masa recientes, información base para la generación del mapa de amenazas. De acuerdo con la identificación realizada en el área rural del Distrito Capital se identificaron en total 341 procesos significativos distribuidos a largo y ancho del área de estudio (Figura 4-9). En la salida cartográfica de este producto se presenta en detalle cada uno de los procesos morfodinámicos identificados en el área rural del Distrito Capital.

De estos 341 procesos antes mencionados (Tabla 4.6 y Figura 4-10), el 35,78% equivalen a procesos de reptación (Dr), el 25,81% corresponde a flujos de tierras (Dft), el 10,56% están asociados a procesos de erosión de grado ligero a moderado (Derl). Se presentan adicionalmente otros tipos de movimientos en masa tales como: caída y volcamiento, deslizamientos activos e inactivos, rotacionales activos y procesos de erosión en surcos y cárcavas, entre otros, no sobrepasan el 5% del área cada uno.

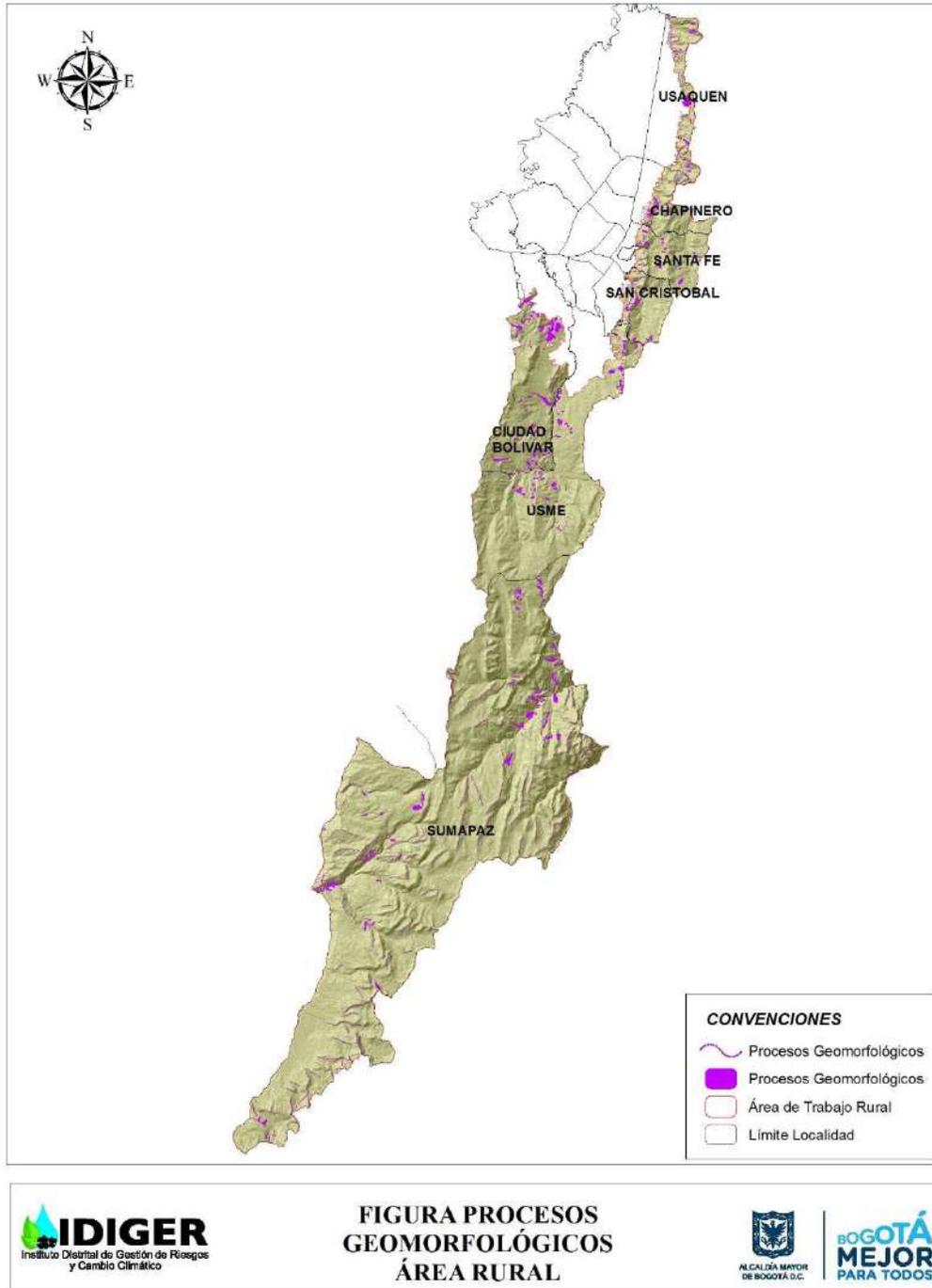


Figura 8-4. Localización de los Procesos Morfodinámicos Identificados en el Área Rural del Distrito Capital

Tabla 8.4. Identificación de los Tipos de Procesos Morfodinámicos en el Área Rural del Distrito Capital

TIPO DE MOVIMIENTO EN MASA	NOMENCLATURA	SUBTOTAL	%
Caída y volcamiento	Dcva	16	4,69
Deslizamiento activo	Ddma	13	3,81
Deslizamiento inactivo	Ddmi	19	5,57
Deslizamiento Rotacional Activo	Ddra	7	2,05
Deslizamiento Rotacional	Ddr	11	3,23
Erosion en Carcavas de Grado Moderado a Severo	Dec	8	2,35
Erosion en Surcos de Grado Moderado a Severo	Des	15	4,40
Erosión laminar de grado ligero a moderado	Derl	36	10,56
Flujo de tierras	Dft	88	25,81
Flujo de detritos	Dfd	5	1,47
Reptación	Dr	122	35,78
Socavación lateral	Dsc	1	0,29
<b>TOTAL</b>		<b>341</b>	<b>100,00</b>

Fuente: Proyecto POT

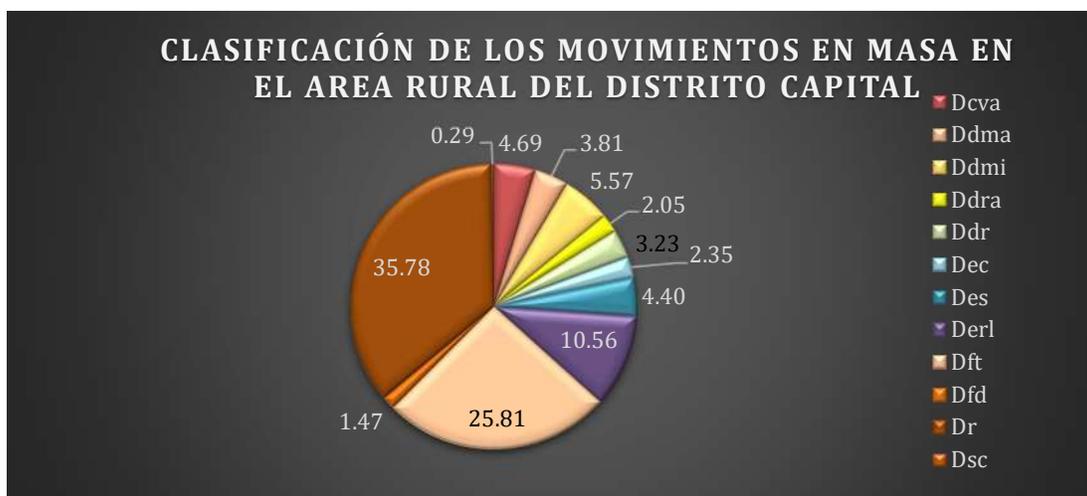


Figura 8-5. Representación Gráfica de los Tipos de Procesos Morfodinámicos Identificados en el Área Rural del Distrito Capital. Fuente: Proyecto POT

Dentro del área de estudio se encontró que los principales procesos morfodinámicos corresponden a procesos de erosión (desde laminar hasta cárcavas), procesos superficiales tipo reptación y flujos de tierras, y demás movimientos en masa, tales como: caída y volcamiento de bloques, deslizamientos activos /inactivos, flujo de detritos y proceso de socavación lateral.

La descripción de cada uno de los diferentes movimientos en masa observados en cada una de las zonas en las que se ha dividido el área rural, se presenta en el Documento Técnico de Soporte del Mapa de Amenaza por Movimientos en Masa para la Zona Rural.

## 9. EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES Y/O CRECIENTES SÚBITAS

Las avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas son crecidas repentinas producto de fuertes precipitaciones que causan aumentos rápidos del nivel de agua de los ríos y quebradas de alta pendiente. Estas crecientes pueden ser acompañadas por flujo de detritos de acuerdo a las condiciones de la cuenca. El flujo de detritos se define como un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos, que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce empinado. Adaptado de: (Gemma, 2007) Página 140.

De acuerdo con el esquema metodológico planteado el capítulo 6.2, a continuación, se presentan los análisis realizados para la obtención de velocidades y profundidades máximas de los flujos en los cauces dentro del perímetro distrital, utilizadas para la categorización de la amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas.

### 9.1. Análisis hidrológico

El análisis hidrológico comprende dos etapas, la primera es la delimitación de las cuencas hidrográficas en el área de estudio y la segunda, el modelo lluvia escorrentía que permite la estimación de hidrogramas que serán la entrada del modelo hidráulico. A continuación, se presenta los pasos seguidos en las dos etapas y sus respectivos resultados.

Para obtener la delimitación de cuencas se parte del Modelo de Elevación Digital (DEM) de la zona de estudio, en este caso se cuenta con un DEM tamaño de celda 12 m proyectado en coordenadas geográficas. Este DEM requiere ser proyectado en coordenadas planas con el fin de tener la geometría plana adecuada para el cálculo de áreas y distancias de las cuencas generadas, la proyección del DEM del área de estudio se puede observar en la Figura 4-11.

El DEM proyectado cubre un área mucho mayor al área de estudio. Con el fin de delimitar solamente las cuencas que drenan a esta área, se generó un buffer de 10 kilómetros del perímetro del distrito capital (Figura 4-12). Este buffer se obtuvo mediante pruebas de sensibilidad con diferentes distancias, con el fin de cubrir el área que hidrológicamente tiene algún aporte a las cuencas que se encuentran dentro del perímetro del distrito y que garantiza que éstas drenen completamente en el modelo hidráulico. Con este buffer de 10 kilómetros, se realizó la extracción del DEM con tamaño de celda de 12 m proyectado (Ver Figura 4-13), con el cual se realizará la delimitación de cuencas.

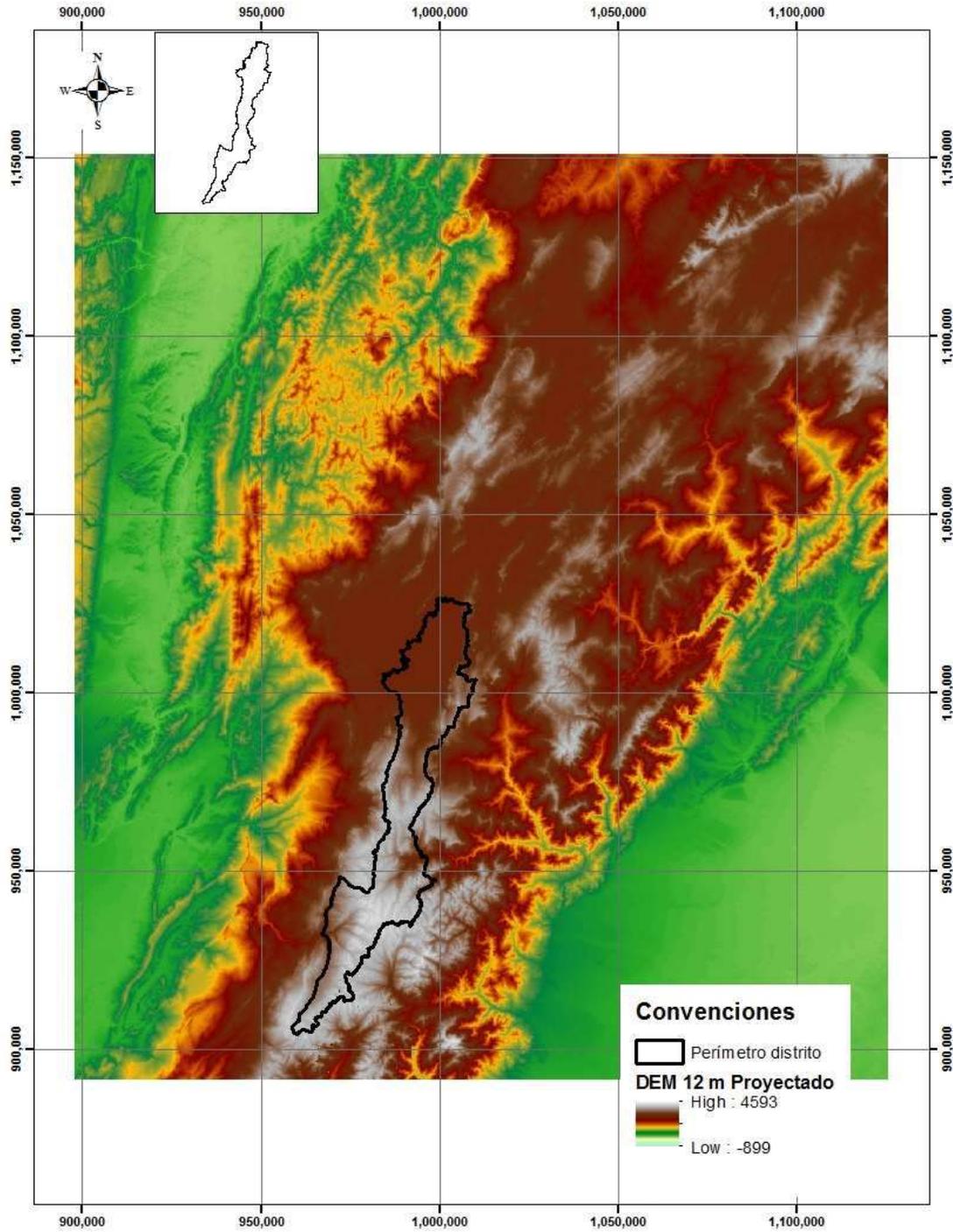


Figura 9-1. Modelo de Elevación Digital Tamaño de Celda 12 m Proyectado

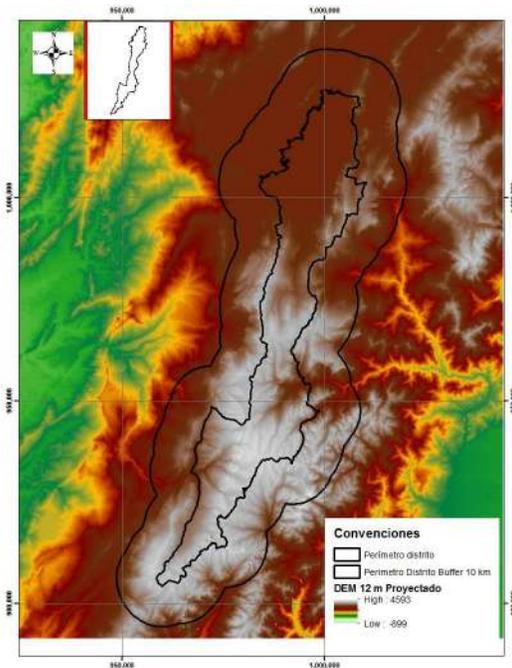


Figura 9-2. Buffer de 10 kilómetros del perímetro del distrito capital

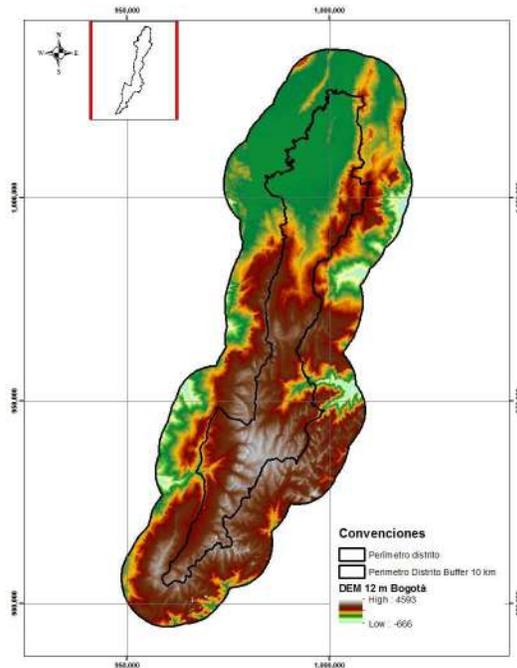


Figura 9-3. Modelo de Elevación Digital Tamaño de Celda 12 m Proyectado extraído con buffer de 10 kilómetros del perímetro del distrito capital

El DEM contiene errores inherentes a este tipo de producto, por tanto, se debe corregir con la cartografía adecuada para que el resultado de la delimitación de cuencas se aproxime a la red de drenaje real. Para lograr este objetivo se cuenta con la cartografía del sistema hídrico en coordenadas geográficas, al igual que se realizó con el DEM, se efectuó la proyección del sistema hídrico (ver Figura 4-14) y se extrae la red hídrica con el buffer de 10 km del perímetro distrital.

Dado que la corrección del DEM se puede realizar con el shape tipo polígono o tipo línea, se ha optado por convertir los polígonos a líneas y de esta forma modificar solo las riberas de los ríos que en la cartografía son representados mediante polígonos, el resultado de la conversión del sistema hídrico de polígonos a línea se puede observar en la Figura 4-15.

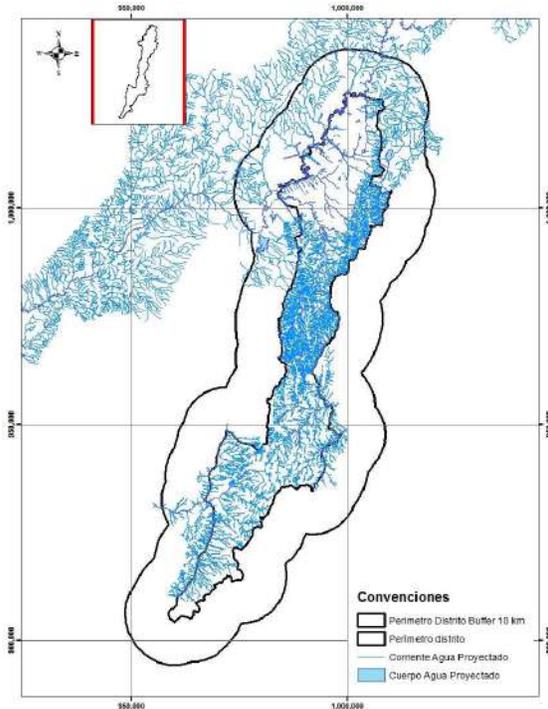


Figura 9-4. Sistema Hídrico Projectado

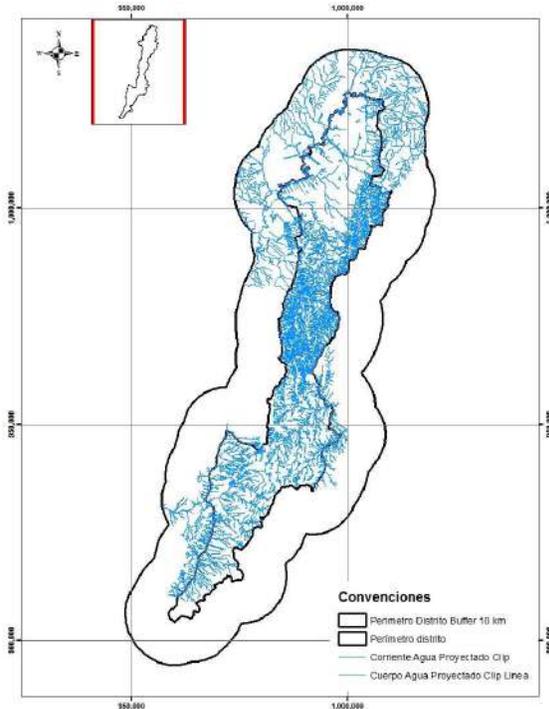


Figura 9-5. Sistema Hídrico Línea Projectado extraído con buffer de 10 kilómetros del perímetro del distrito capital

### 9.1.1. Cuencas Hidrográficas

Teniendo como entrada el DEM y el sistema hídrico ajustados previamente, se construye en ArcGIS el flujo de trabajo de herramientas a utilizar, con el fin de delimitar las cuencas hidrográficas del área de estudio. En este flujo de trabajo se desarrollan los siguientes 11 pasos.

- Para poder generar la red de drenaje a partir del DEM es necesario profundizar el DEM en aquellas zonas donde se encuentran ubicados los ríos de acuerdo a la cartografía. En este paso, se realizó la profundización en las zonas donde se encuentran los ríos dibujados como tipo línea (Figura 4-16).
- Este paso es similar al anterior, sin embargo, la profundización se realizó en las zonas donde se encuentran los ríos dibujados como tipo polígono, pero solo en las riberas convertidas en líneas (Figura 4-17).
- El DEM debe ser hidrológicamente apropiado, es decir, que todas las celdas del DEM drenen a un punto de salida. Para poder generar un DEM hidrológicamente apropiado se deben rellenar los pozos o celdas que no permiten que se genere adecuadamente la red de drenaje (Figura 4-18).
- Teniendo en cuenta la pendiente más favorable para el flujo, se genera un valor de dirección de flujo para cada celda del DEM (Figura 4-19).

- Teniendo en cuenta la dirección de flujo de cada celda es posible calcular el número de celdas que drenan a determinada celda, con estos valores se genera el Ráster de acumulación de flujo (Figura 4-20).
- Un parámetro importante en la definición de corrientes es el número de celdas que generan el inicio de un río, para este análisis hidrológico se tomó el equivalente a 0.5 km<sup>2</sup> como el valor en el cual se genera una corriente (Figura 4-21). Este valor se obtuvo mediante pruebas de sensibilidad buscando el tamaño adecuado de cuencas que se ajustaba a la escala de trabajo.
- Considerando el Ráster de acumulación de flujo y el número de celdas que generan el inicio de un río, se obtuvieron las corrientes hídricas. Posteriormente, se dividen las corrientes teniendo en cuenta que los tramos de las mismas no tengan confluencias con otras corrientes (Figura 4-22).
- De acuerdo a los tramos de ríos obtenidos en el paso anterior, se genera la delimitación automática de cuencas (Figura 4-23).
- El Ráster generado en el paso anterior se debe transformar en formato shape para cálculos posteriores (Figura 4-24).
- La segmentación de corrientes obtenida en el paso 6, se debe transformar en formato shape para cálculos posteriores (Figura 4-25).
- Las cuencas hidrográficas con área aferente acumulada es el resultado final en la delimitación de cuencas del área de estudio (Figura 4-26).

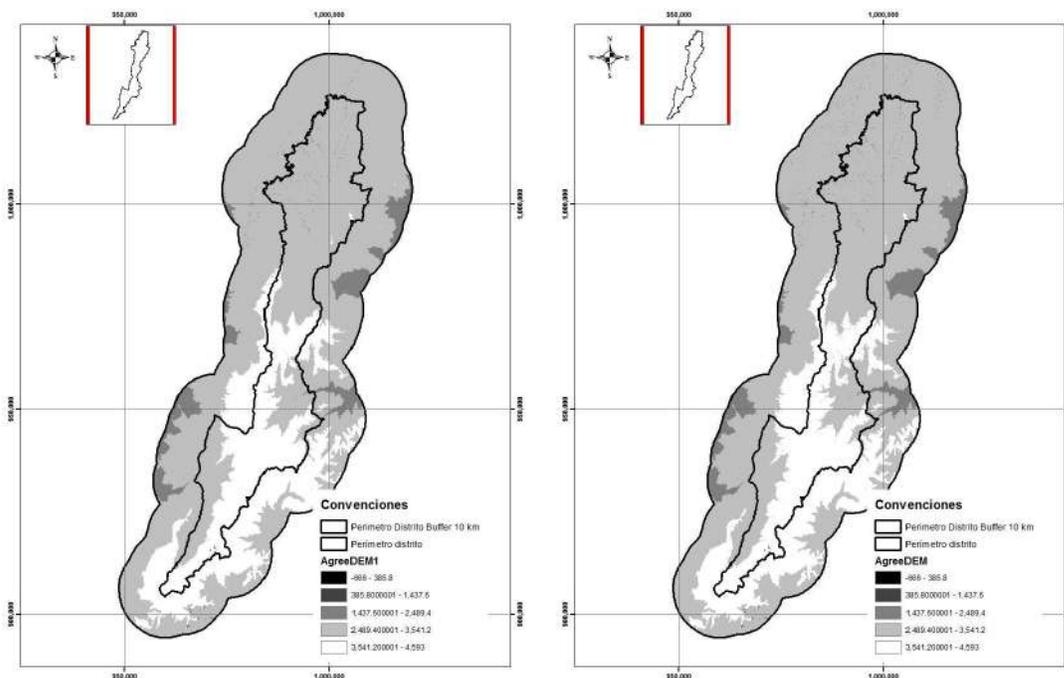


Figura 9-6. Corrección DEM mediante red de drenaje tipo línea

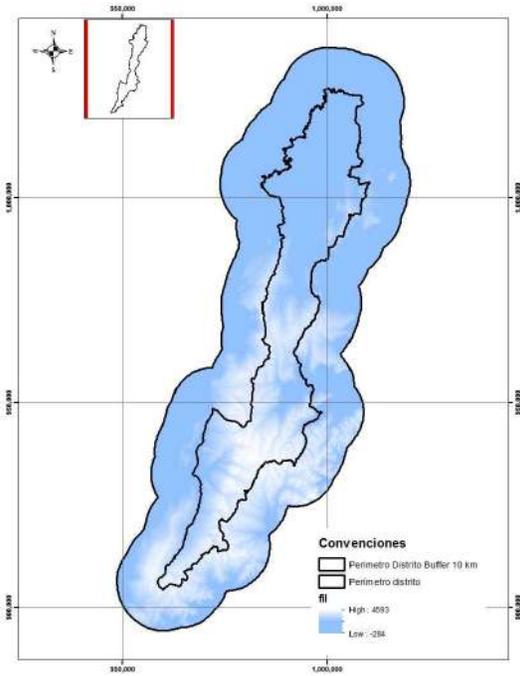


Figura 9-7. Corrección DEM mediante red de drenaje tipo polígono

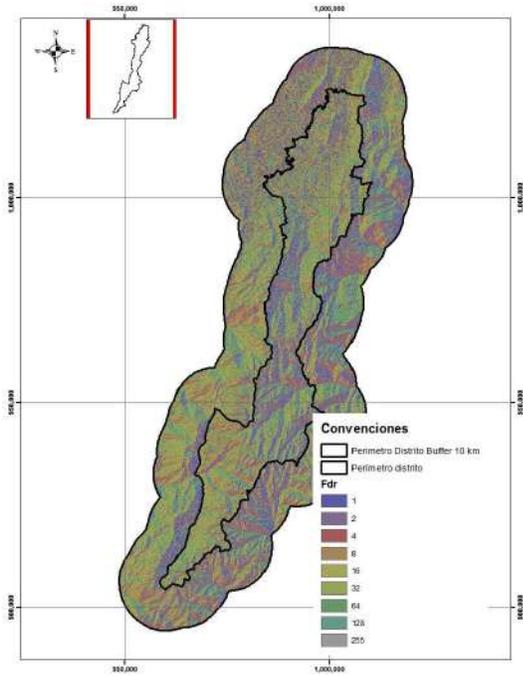


Figura 9-8. Modelo de Elevación Digital Hidrológicamente Corregido

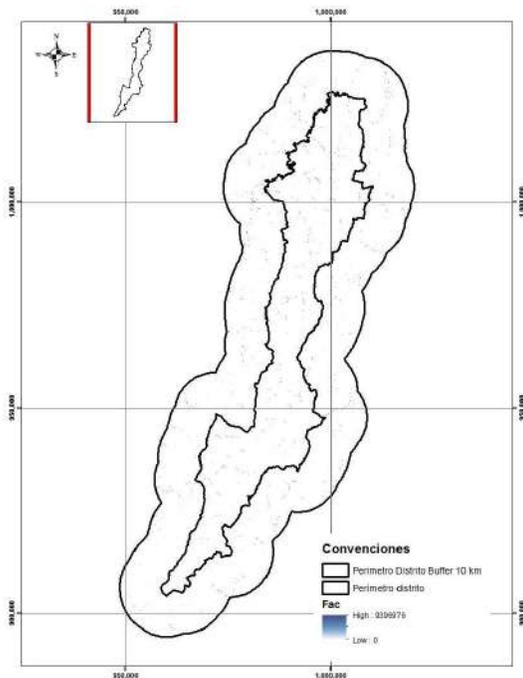


Figura 9-9. Dirección de Flujo

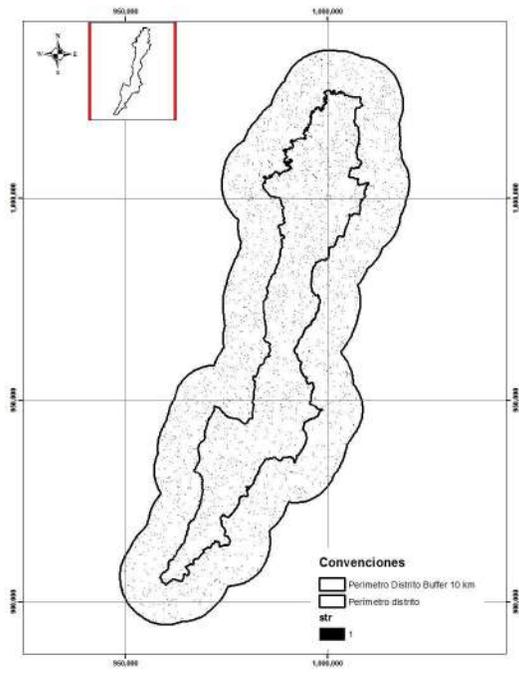


Figura 9-10. Acumulación de Flujo

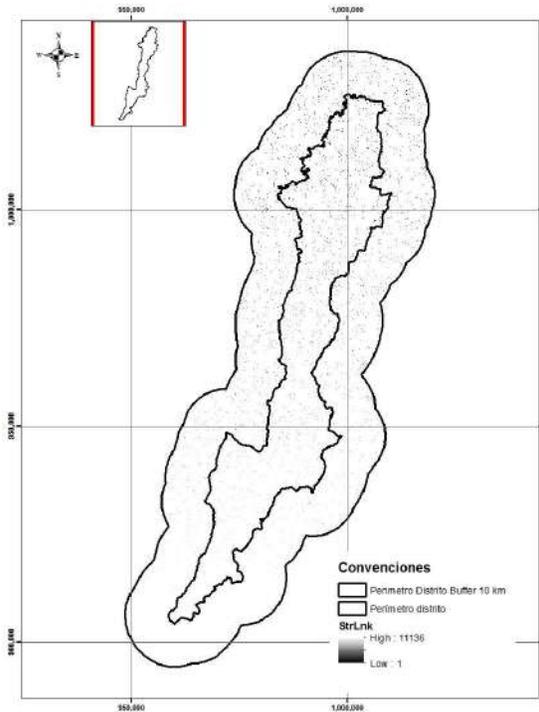


Figura 9-11. Red de Drenaje Generada Tipo Ráster

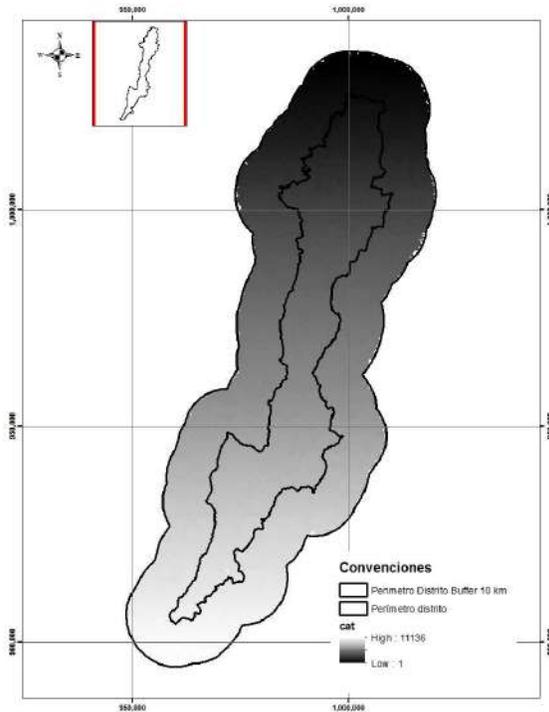


Figura 9-12. Red de Drenaje Generada Tipo Ráster Vinculada

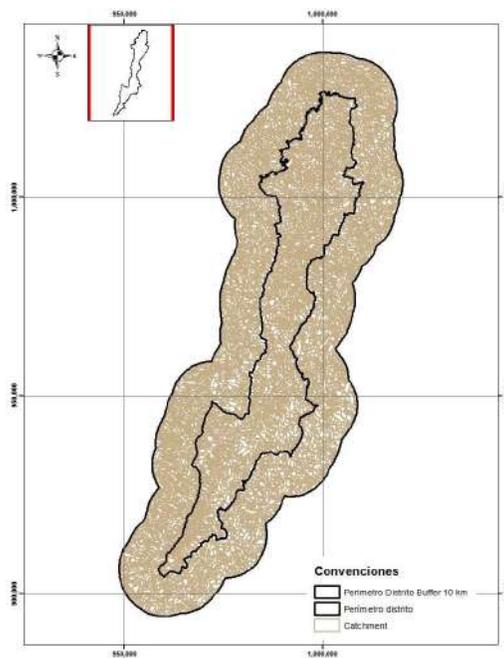


Figura 9-13. Cuencas hidrográficas Tipo Ráster

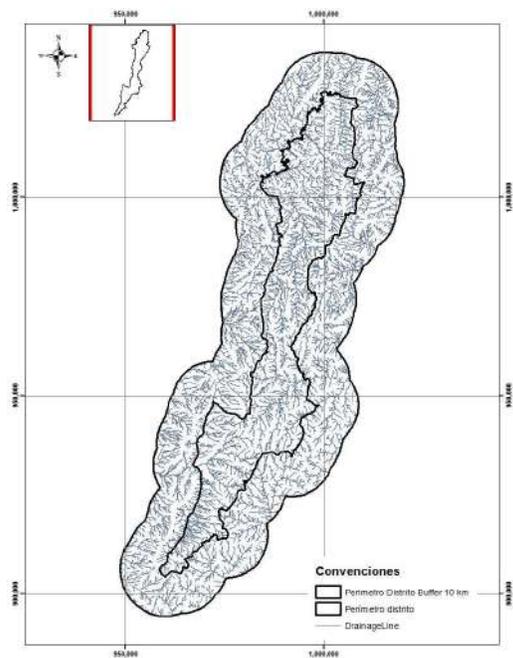


Figura 9-14. Cuencas hidrográficas Tipo Polígono

Figura 9-15: Red de Drenaje Generada Tipo Línea

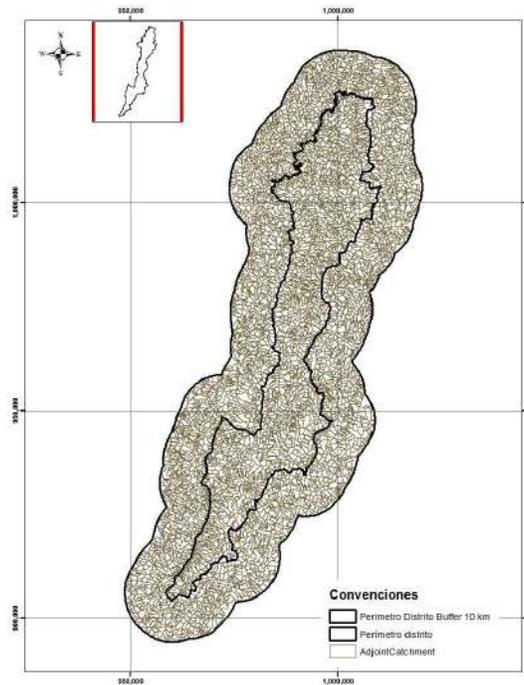


Figura 9-16. Cuencas hidrográficas Acumuladas Tipo Polígono

Para realizar el análisis sólo en las cuencas que se encuentran en el perímetro distrital y dado que el procedimiento anterior no tiene en cuenta los efectos de la urbanización en la red de drenaje, se deben estimar o corregir las cuencas obtenidas de acuerdo a esta consideración. Para ello se determinan los puntos de cierre de cuencas rurales en el límite urbano (Ver Figura 4-27 y Figura 4-28). Los puntos de cierre de las cuencas corresponden a sitios donde el agua de la cuenca se entrega a obras de drenaje urbano o donde se presente un cambio abrupto de pendiente. En la zona rural, los puntos de cierre también dependen del orden de drenaje dentro de la cuenca.

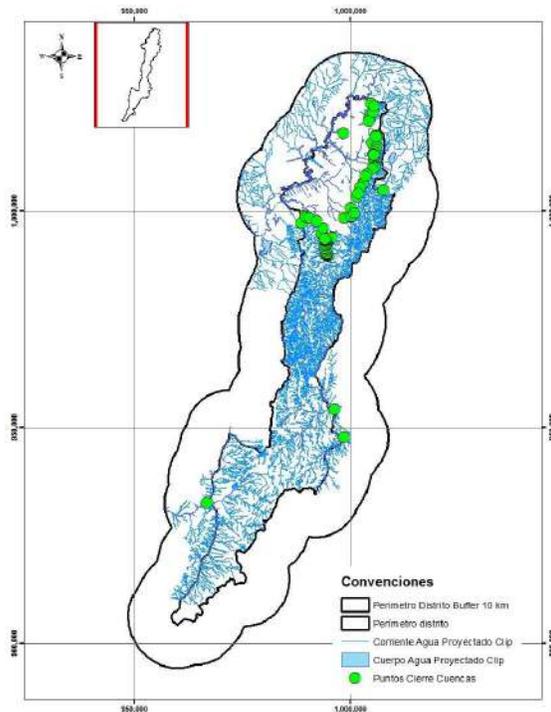


Figura 9-17. Puntos de cierre de cuencas Rurales en limite urbano

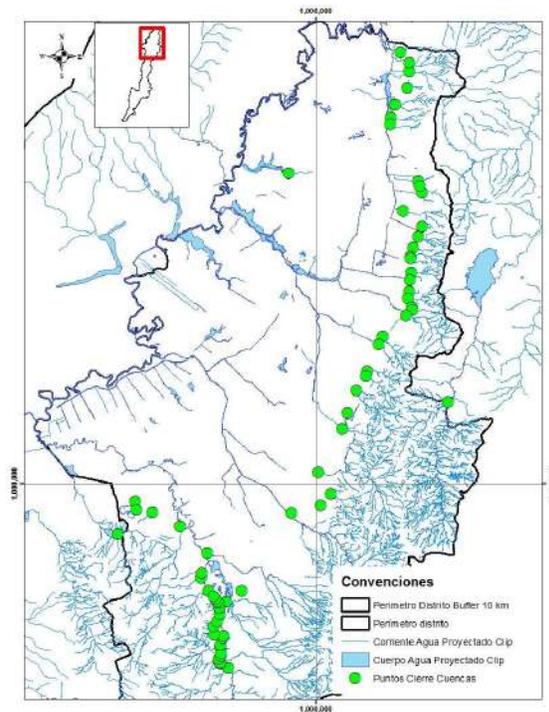


Figura 9-18. Puntos de cierre de cuencas Rurales en limite urbano

Para la generación de cuencas y delimitar el área de estudio se desarrollan los siguientes 4 pasos.

- En el primer paso se vinculan los puntos de cierre de cuencas con el Ráster de acumulación de flujo generado anteriormente (Ver Figura 4-29).
- De acuerdo con el Ráster de acumulación de flujo se recortan las cuencas tipo Ráster (Figura 4-30).
- Las cuencas del paso anterior se convierten en polígonos (Figura 4-31).
- El último paso une las cuencas aferentes que puedan quedar separadas al convertir el Ráster de cuencas a polígono.



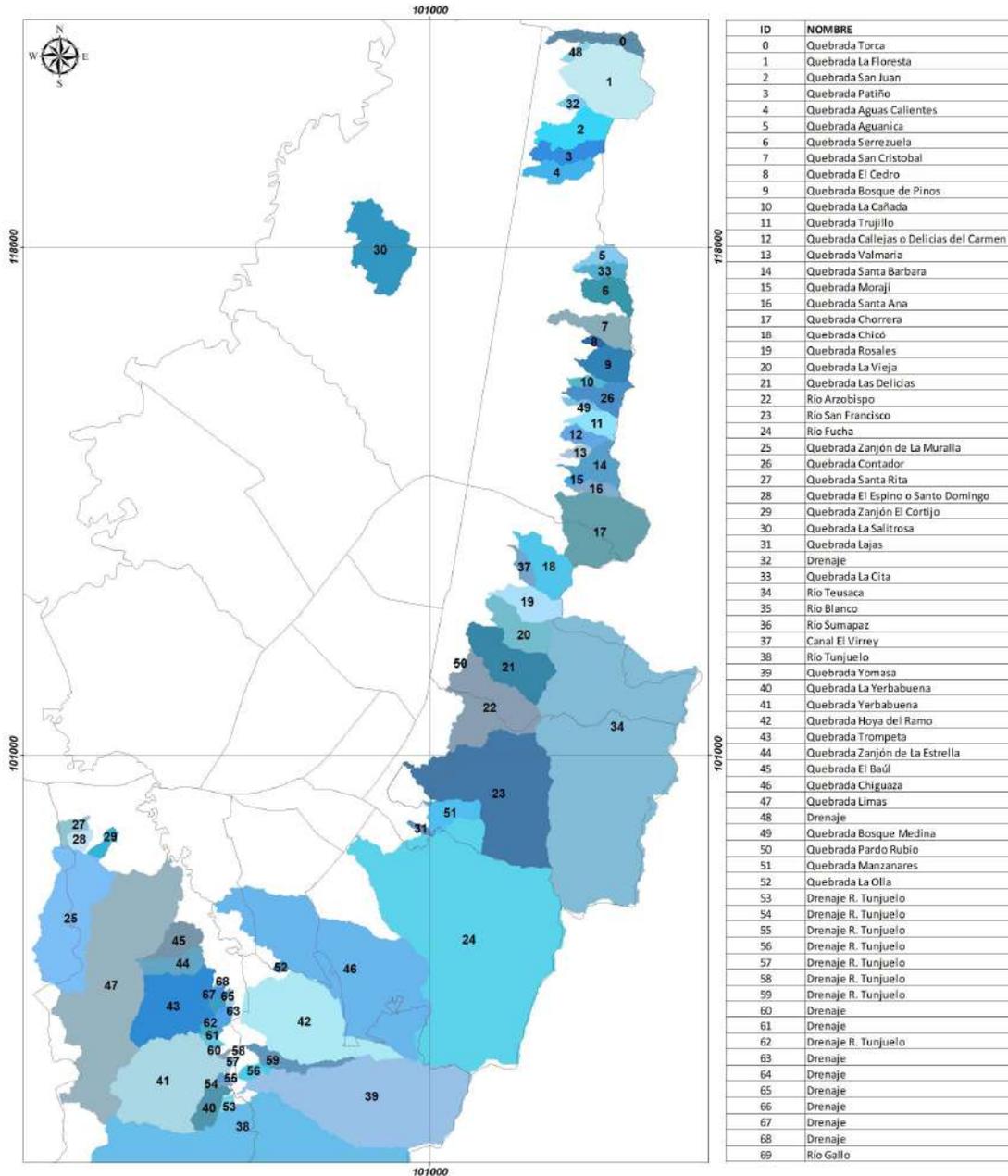


Figura 9-23. Cuencas tipo Polígono Nombres de Corriente Principal Perímetro Urbano y Rural

Teniendo como entrada el modelo de elevación digital tamaño de celda 12 m proyectado extraído con las cuencas que abarcan el área de estudio, se construye en ArcGIS el flujo de trabajo de herramientas a utilizar con el fin de generar las subcuencas hidrográficas del área de estudio. En este flujo de trabajo se desarrollan los mismos 11 pasos que fueron descritos anteriormente.

- Corrección DEM mediante red de drenaje tipo línea.
- Corrección DEM mediante red de drenaje tipo polígono.
- Modelo de Elevación Digital Hidrológicamente Corregido.
- Dirección de Flujo.
- Acumulación de Flujo.
- Red de Drenaje Generada Tipo Ráster.
- Red de Drenaje Generada Tipo Ráster Vinculada.
- Cuencas hidrográficas Tipo Ráster.
- Cuencas hidrográficas Tipo Polígono.
- Red de Drenaje Generada Tipo Línea.
- Cuencas hidrográficas Acumuladas Tipo Polígono.

Cabe aclarar que uno de los parámetros importantes para la definición de las subcuencas es el número de celdas que generan el inicio de un río, para este análisis hidrológico se tomó el equivalente a 0.5 km<sup>2</sup> como el valor en el cual se genera una corriente, el resultado del este procedimiento fue la generación de 1663 subcuencas que cubren el área del perímetro distrital (Ver Figura 4-34).

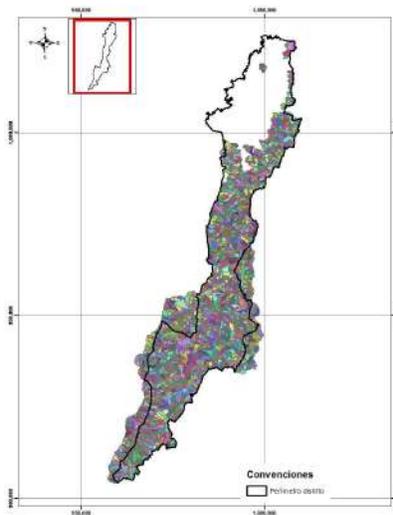


Figura 9-24. Cuencas hidrográficas Seleccionadas

Como ejemplo de la generación de cuencas y la red de drenaje generada en la Figura 4-35 se muestra la cuenca alta del Río Fucha las Subcuencas a modelar hidrológicamente y los tramos a modelar hidráulicamente se presenta en las (Figura 4-36 y Figura 4-37) respectivamente, así como el Orden de Drenaje de los tramos a modelar hidráulicamente (Figura 4-38).

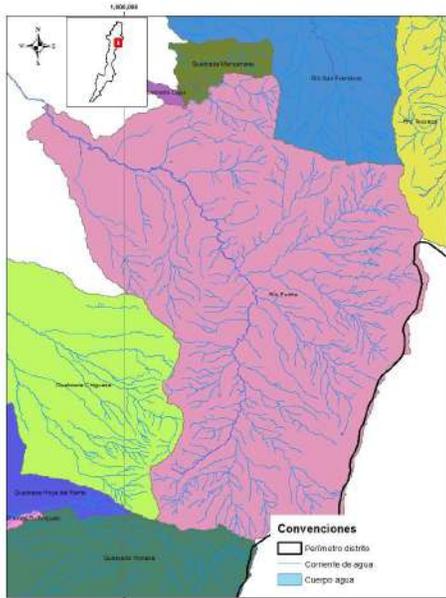


Figura 9-25. Cuenca Río Fucha

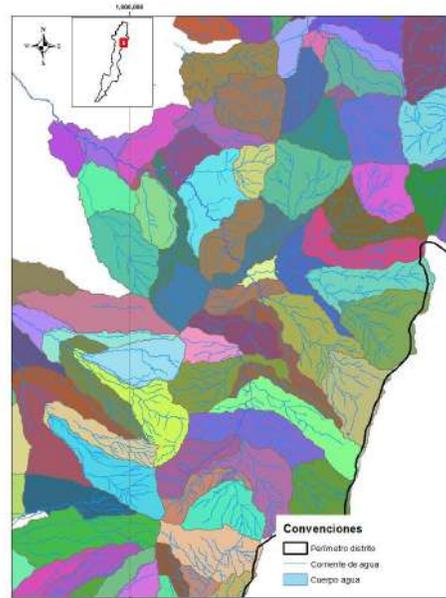


Figura 9-26. Río Fucha Cuencas Modelaciones

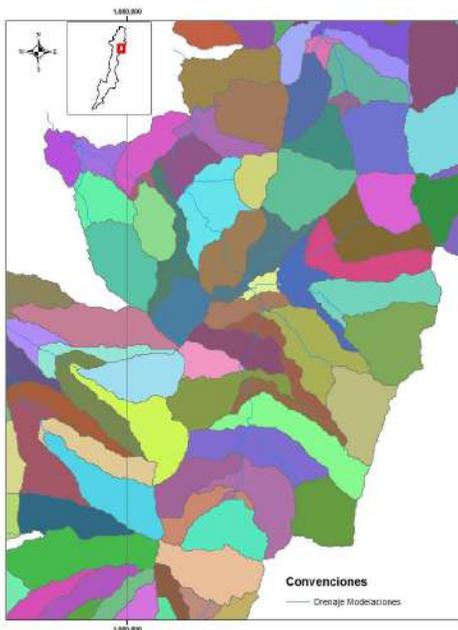


Figura 9-27. Río Fucha Drenaje Modelaciones

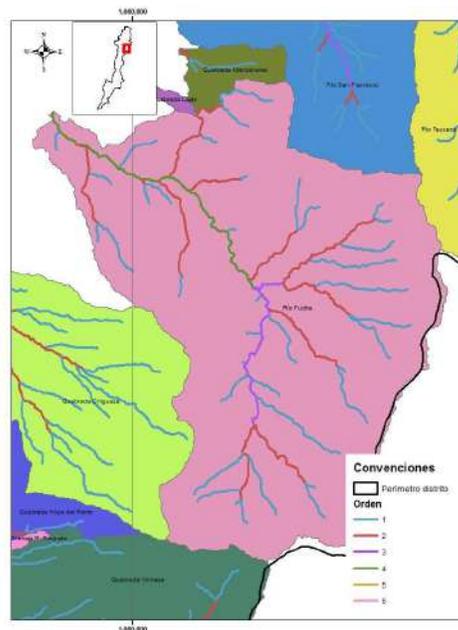


Figura 9-28. Río Fucha Orden Drenaje Modelaciones

### 9.1.2. Morfometría

Para el análisis de susceptibilidad de una cuenca a un evento torrencial, se llevó a cabo la evaluación de varios parámetros morfométricos, teniendo cuenta que estos parámetros son indicadores de las características de la cuenca relacionadas con el pico de las crecientes y su producción de sedimentos.

A continuación, se describe los parámetros morfométricos calculados y analizados

### 9.1.3. Pendiente

Tiene una influencia significativa en la generación de avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas (Smith, 2003). Esta característica controla en buena parte la velocidad con que se da la escorrentía superficial y afecta, por tanto, el tiempo que requiere el agua lluvia para concentrarse en los lechos fluviales que constituyen la red de drenaje de las cuencas.

En la Figura 4-39 se presenta el ráster de pendientes calculado por medio de la herramienta ArcGIS.

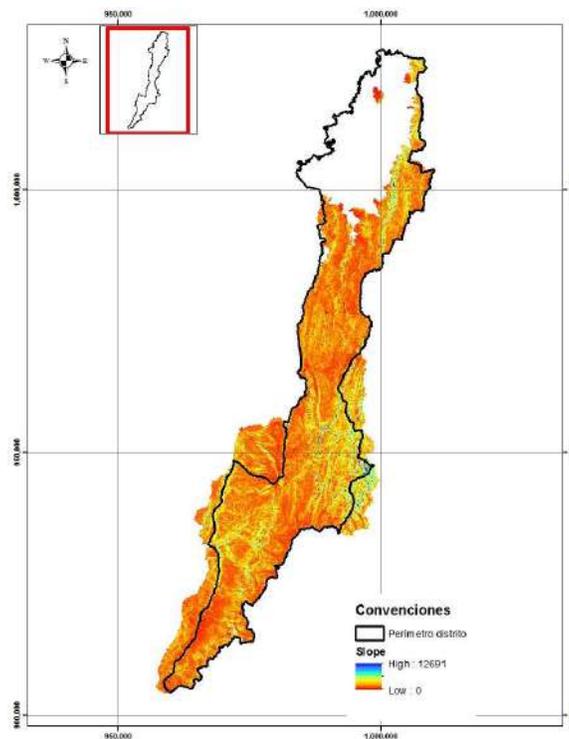


Figura 9-29. Ráster de Pendientes

#### 9.1.3.1. Orden de corriente

En orden de corrientes depende del número de afluente que contenga el cauce principal, por lo tanto, los de primer orden son todos aquellos que no tengan afluentes. Cuando se unen dos cauces de primer orden forman un cauce de segundo orden y así sucesivamente.

En la Figura 4-40 se presenta los resultados obtenidos:

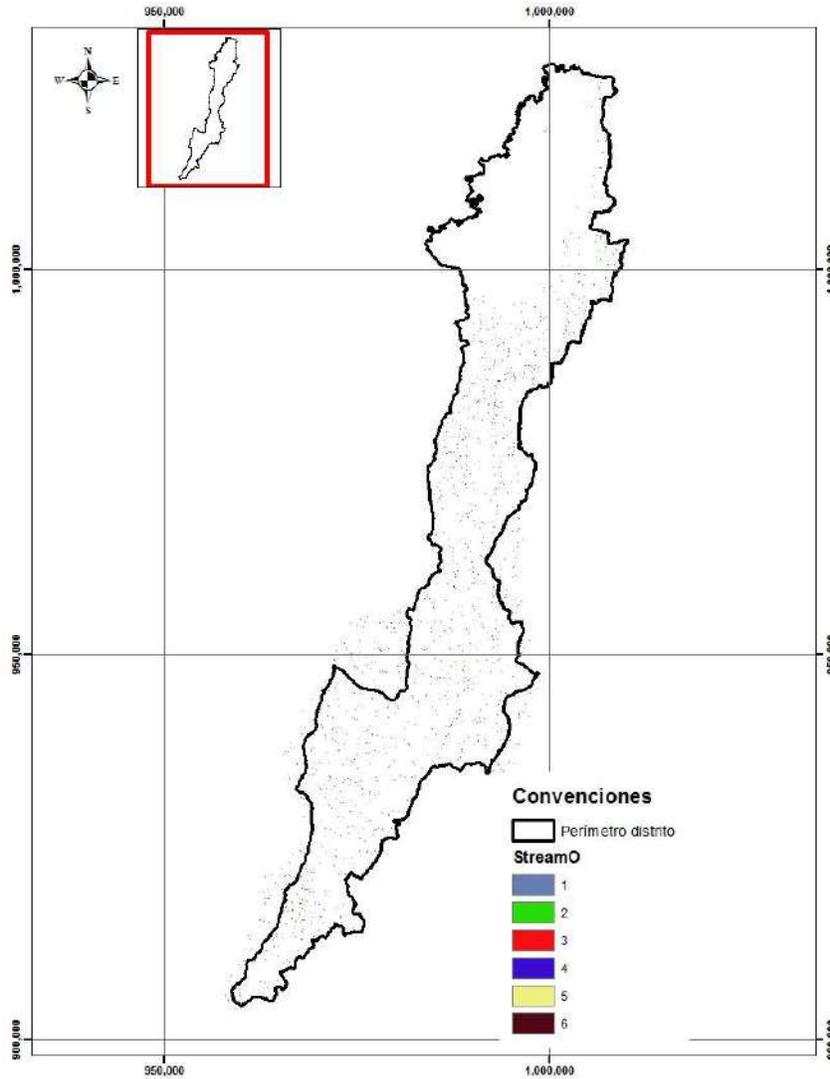


Figura 9-30. Ráster de Orden de la Corriente

### 9.1.3.2. Longitud de Flujo

La Longitud de flujo está definida como la distancia horizontal, medida a lo largo del cauce principal, entre el punto de salida de la cuenca y el límite definido para la cuenca.

En la Figura 4-41 se presenta los resultados obtenidos:

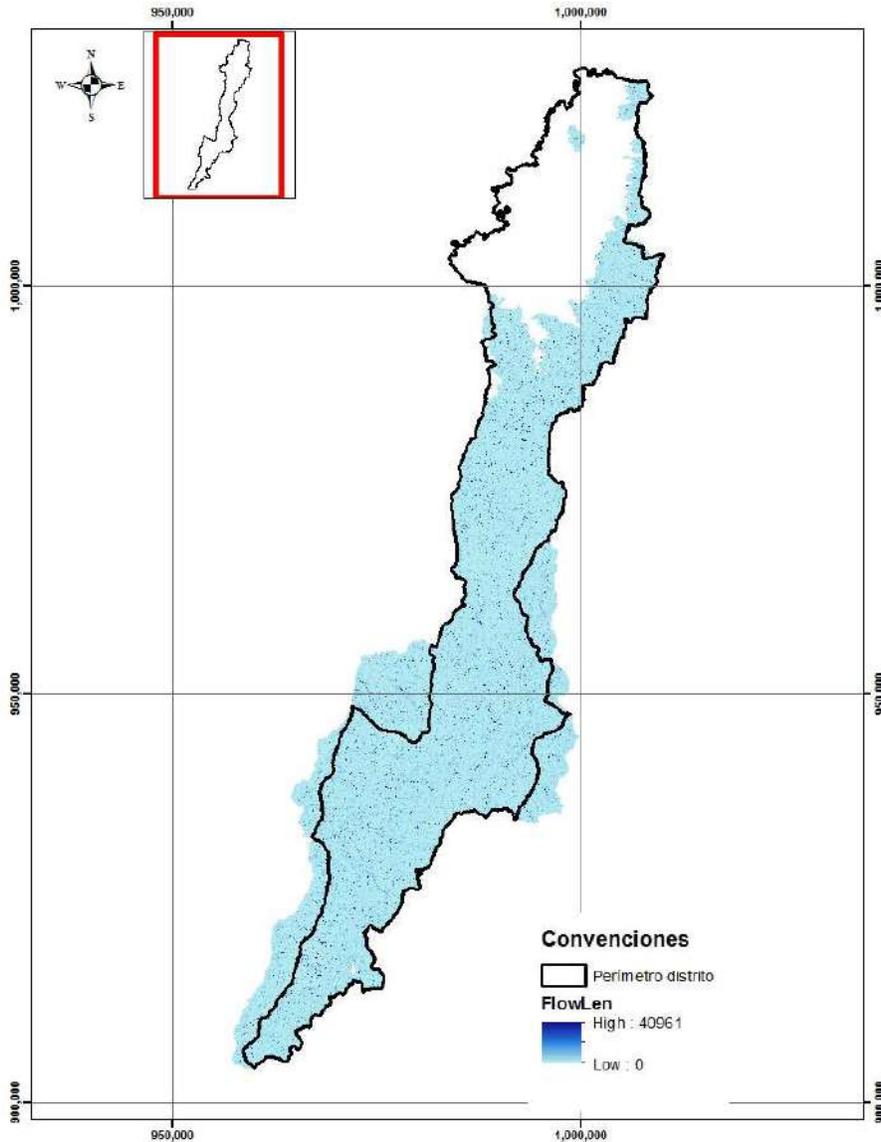


Figura 9-31. Ráster de Longitud de Flujo

#### 9.1.4. Susceptibilidad a un evento torrencial

La susceptibilidad a un evento torrencial se estimó mediante el cálculo del índice de amenaza de crecidas torrenciales (IACT), tal como se expone en el documento “Modelos conceptuales, metodologías e insumos para la definición de los indicadores relacionados con las amenazas y vulnerabilidades al sistema hídrico por variabilidad y cambio climático y de eventos torrenciales” (FOPAE, 2013). El IACT representa el grado de susceptibilidad de una cuenca a presentar crecientes

de carácter torrencial. Para el cálculo de este índice, se toman en cuenta los parámetros morfométricos calculados en el numeral 8.1.2, y se calcula el tiempo de concentración y el tiempo al pico de las cuencas hidrográficas. Con estos dos parámetros se obtiene los indicadores de crecidas torrenciales tal como se explica a continuación.

- **Tiempo de concentración:** Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante. Este puede calcularse mediante la fórmula de Kirpich de la siguiente manera:

$$T_c = \left( \frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,77}$$

Siendo:

T<sub>c</sub>: Tiempo de concentración (minutos).

L: Longitud del río desde su nacimiento hasta el sitio de interés (km).

S: Pendiente longitudinal del cauce entre el nacimiento del río y el sitio de interés (m/m).

En la Figura 4-42 se presenta los tiempos de concentración obtenidos para las cuencas hidrográficas en estudio.

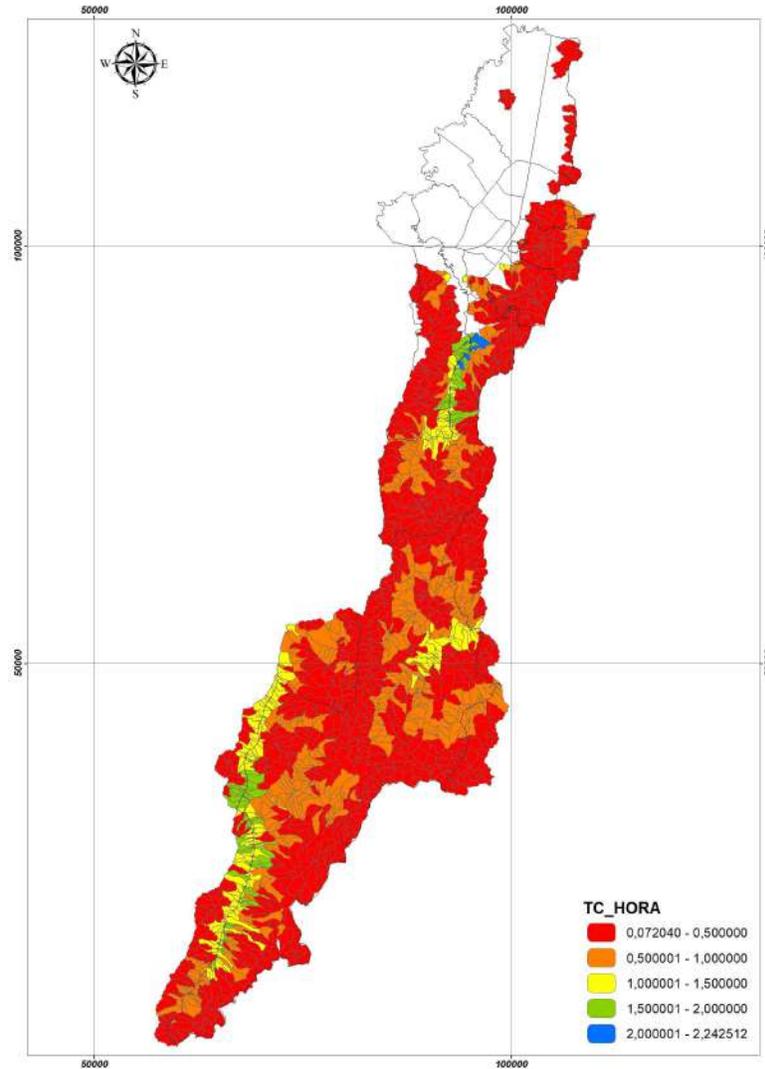


Figura 9-32: Tiempo de concentración (horas) cuencas hidrográficas seleccionadas

- **Tiempo Pico:** Es el tiempo que transcurre desde que se inicia el escurrimiento directo hasta el pico del hidrograma y puede definirse de la siguiente manera:

$$T_p = \frac{T_c}{2} + 0,6 \cdot T_c$$

Siendo:

T<sub>p</sub>: Tiempo al pico (horas).

T<sub>c</sub>: Tiempo de concentración (horas).

En la Figura 4-43 se presenta los tiempos pico obtenidos para las cuencas hidrográficas en estudio.

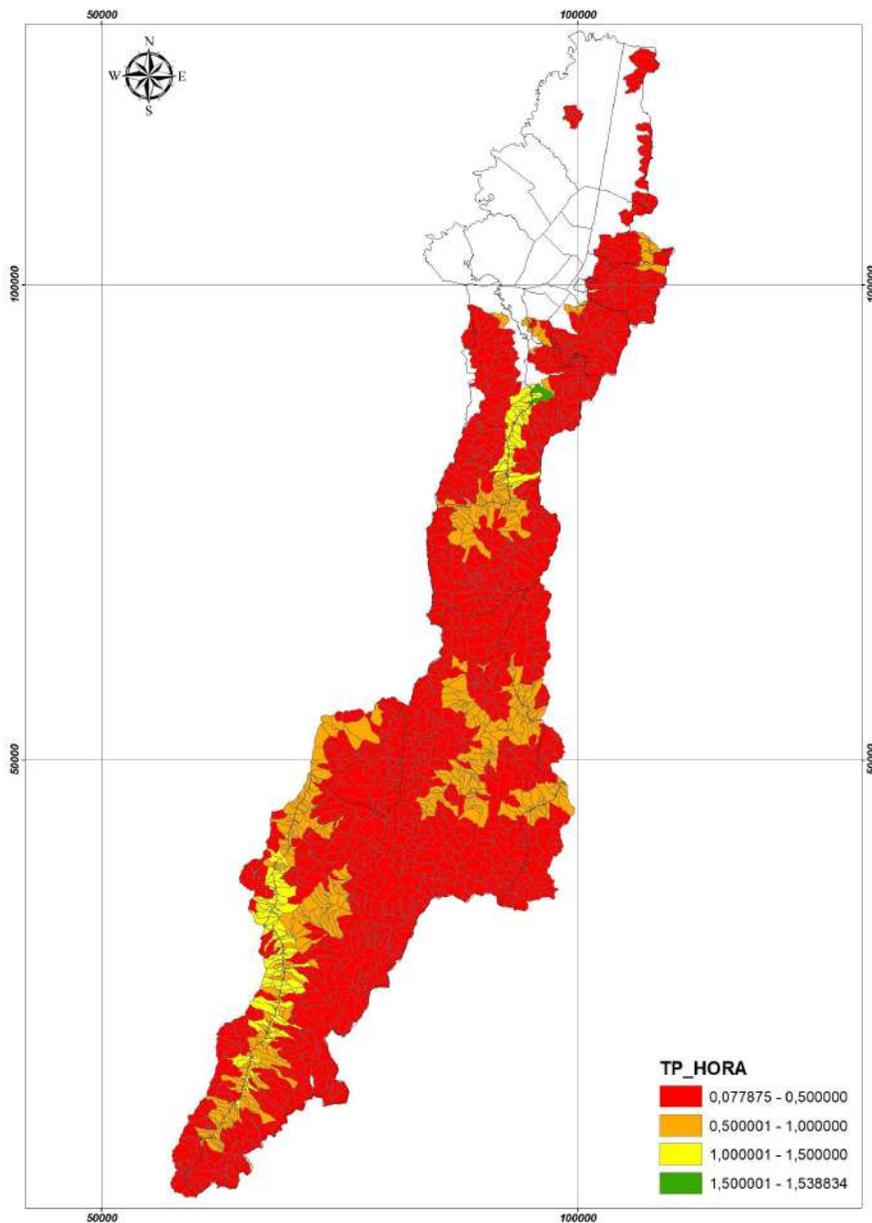


Figura 9-33: Tiempo al pico (horas) cuencas hidrográficas seleccionadas

Con base es estos parámetros se obtienes los siguientes indicadores de crecientes:

- Indicador de amenaza de crecidas torrenciales con base en tiempo de concentración (IACTC), el cual es el doble del tiempo de concentración ( $T_c$ ) medido en horas (Ver Figura 4-44).

Tabla 9.1. Indicador de amenaza de crecidas torrenciales con base en tiempo de concentración (IACTC)

Tiempo de concentración	Índice de amenaza IACTC	Amenaza
$T_c \geq 2,0$ horas	$IACTC \geq 1$	Muy Baja
$1,5 \text{ horas} \leq T_c < 2,0$ horas	$0,75 \leq IACTC < 1,0$	Baja
$1,0 \text{ horas} \leq T_c < 1,5$ horas	$0,50 \leq IACTC < 0,75$	Media
$0,5 \text{ horas} \leq T_c < 1,0$ horas	$0,25 \leq IACTC < 0,50$	Alta
$T_c < 0,5$ horas	$IACTC < 0,25$	Muy Alta
Rango	2	

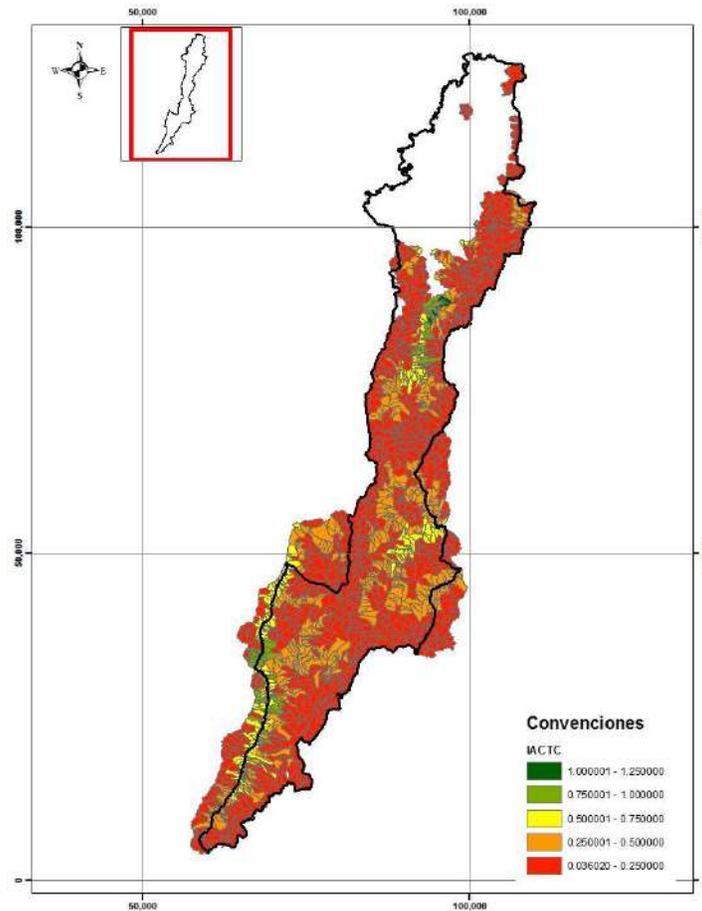


Figura 9-34: Indicador de amenaza de crecidas torrenciales con base en tiempo de concentración (IACTC) cuencas hidrográficas seleccionadas

- Indicador de amenaza de crecidas torrenciales con base en tiempo al pico (IACTP), el cual es el doble del tiempo al pico ( $T_p$ ) medido en horas (Ver Figura 4-45).

Tabla 9.2. Indicador de amenaza de crecidas torrenciales con base en tiempo al pico (IACTP)

Tiempo al pico	Índice de amenaza IACTP	Amenaza
$Tp \geq 2,0$ horas	$IACTP \geq 1$	Muy Baja
$1,5 \text{ horas} \leq Tp < 2,0$ horas	$0,75 \leq IACTP < 1,0$	Baja
$1,0 \text{ horas} \leq Tp < 1,5$ horas	$0,50 \leq IACTP < 0,75$	Media
$0,5 \text{ horas} \leq Tp < 1,0$ horas	$0,25 \leq IACTP < 0,50$	Alta
$Tp < 0,5$ horas	$IACTP < 0,25$	Muy Alta
Rango	2	

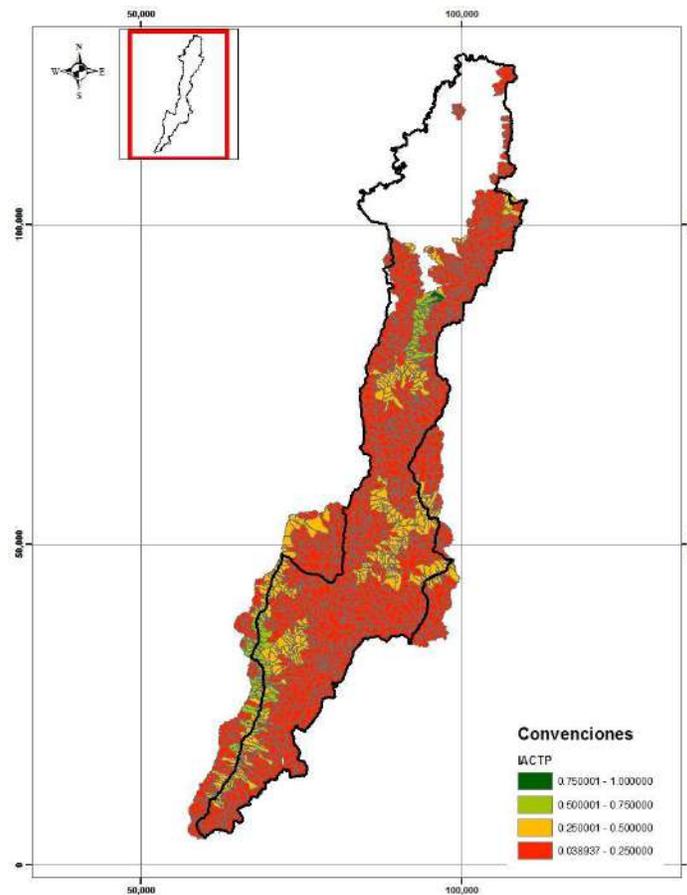


Figura 9-35: Indicador de amenaza de crecidas torrenciales con base en tiempo al pico (IACTP) cuencas hidrográficas seleccionadas

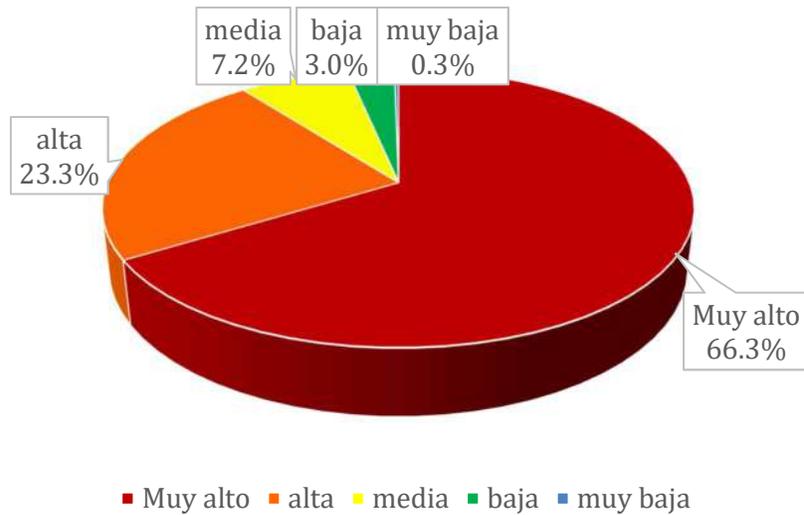


Figura 9-36: Distribución de la susceptibilidad por áreas según IACTC

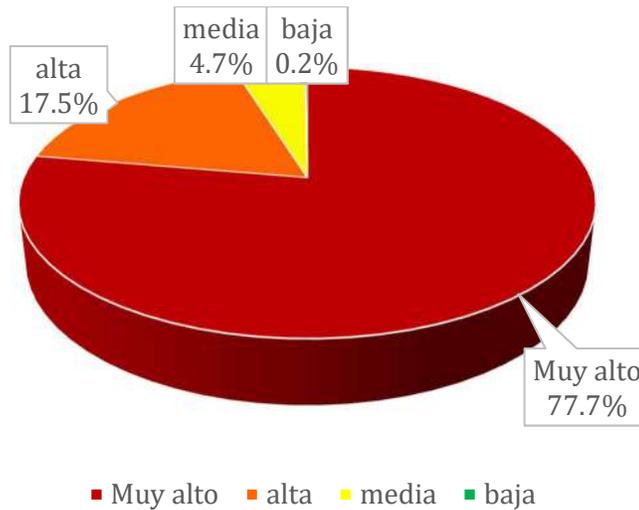


Figura 9-37: Distribución de la susceptibilidad por áreas según IACTP

Como se observa en las figuras 8-34 y 8-35, los resultados obtenidos en las 1663 cuencas presentan susceptibilidad ante eventos de avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas, por lo tanto, los análisis hidrológicos e hidráulicos son desarrollados sobre todas las cuencas delimitadas en el área de estudio.

### 9.1.5. Modelo Lluvia – Escorrentia

La segunda etapa del análisis hidrológico consiste en el cálculo de los hidrogramas a partir del modelo lluvia – escorrentía, este hidrograma servirá de entrada al modelo hidráulico. Para obtener los eventos de precipitación se utilizó la caracterización de tormentas y actualización de curvas de intensidad duración frecuencia IDF desarrolladas por la EAB, para este fin las cuencas se subdividieron en dos grupos, el primero aquellas cuencas cuyo centroide se encontrara a por lo menos una distancia inferior a diez kilómetros de alguna de las estaciones utilizadas en dicho estudio y un segundo grupo en el cual el centroide de las cuencas se encontrara a una distancia superior a diez kilómetros de alguna de las estaciones utilizadas en el estudio de la EAB (Ver Figura 4-48).

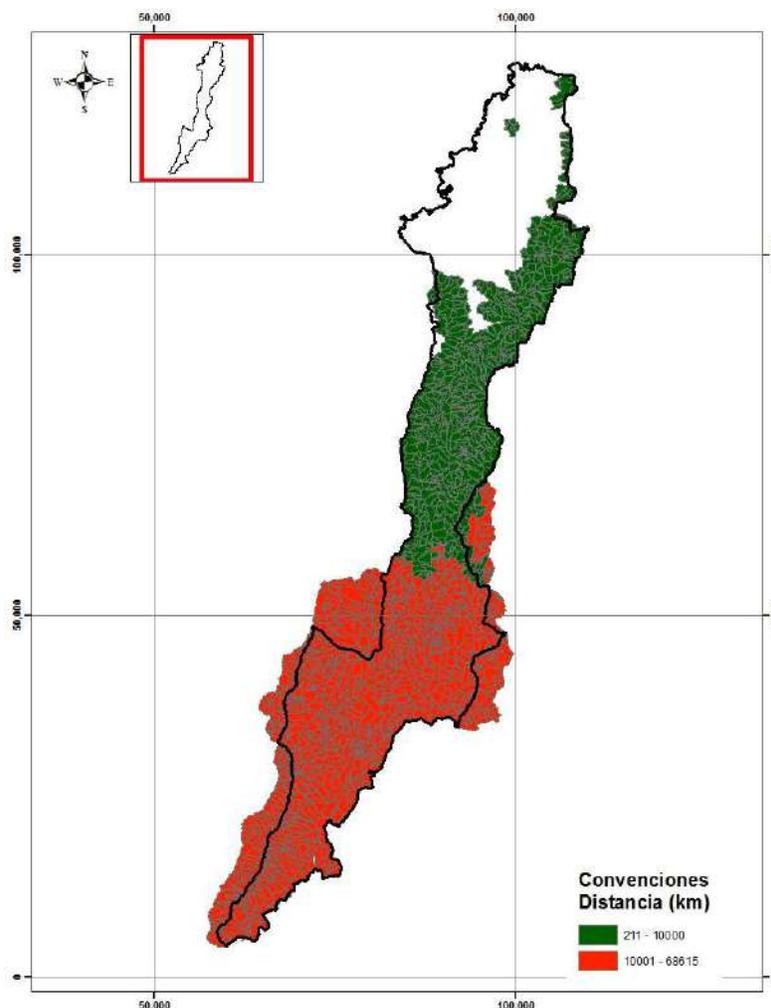


Figura 9-38: Distancia centroide cuencas hidrográficas seleccionadas a estaciones con IDF estudio de tormentas EAB

Para el primer grupo de estaciones se utilizó la curva IDF de la estación más cercana al centroide de la cuenca obtenidos mediante el estudio de la EAB. Para el segundo grupo de estaciones se calculó

las curvas sintéticas IDF asociadas al centroide de la cuenca, siguiendo el método de Vargas (1998), el cual se encuentra específicamente formulado para Colombia y cuya ecuación se enuncia a continuación:

$$I = a \frac{T_r^b}{t^c} M^d N^e P T^f ELEV^g$$

Siendo:

I: Intensidad (mm/h).

Tr: Período de retorno (años).

t: Duración de la precipitación, (horas).

M: Promedio del valor máximo anual de precipitación diaria (mm).

N: Promedio de número de días anuales con precipitación.

PT: Promedio de precipitación media anual (mm).

ELEV: Elevación de la estación meteorológica de medición (msnm).

a, b, c, d, e, f, y g: Son coeficientes propios de la ecuación que varían según la ubicación regional de la estación y de la cantidad de variables disponibles. Para el caso se utilizaron los recomendados por el autor del método.

En la siguiente tabla se presentan los valores correspondientes a cada parámetro calibrado para la región Andina de acuerdo con Vargas (1998).

*Tabla 9.3. Parámetros del método de Vargas para la región Andina*

a	b	c	d	e	f	g
1,64	0,19	0,65	0,73	-0,13	0,08	-0,01

A continuación, se presentan la Precipitación Media Anual (Figura 4-49 y Figura 4-50) la Precipitación máxima en 24 horas (Figura 4-51 y Figura 4-52) y el Número de días de precipitación medio anual (Figura 4-53 y Figura 4-54) para el área de estudio, cuyos parámetros fueron usados para el cálculo de las IDF por el método anteriormente descrito.

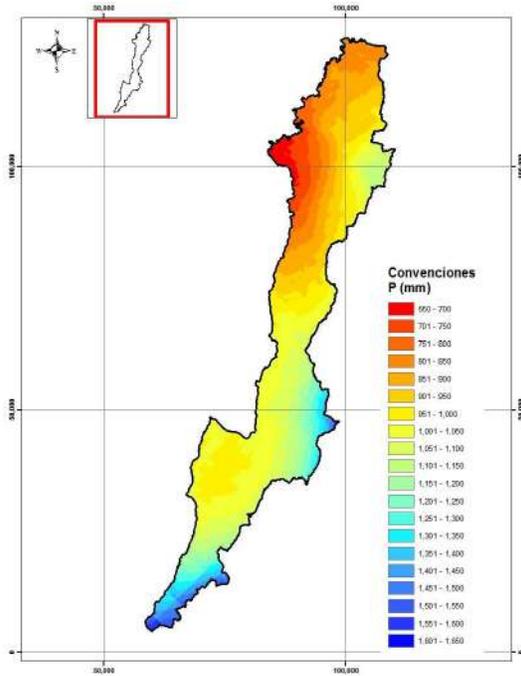


Figura 9-39: Precipitación Media Anual

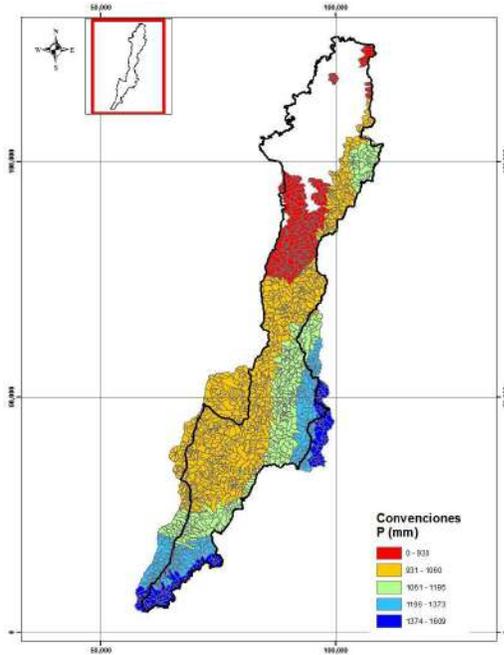


Figura 9-40: Precipitación Media Anual cuencas hidrográficas seleccionadas

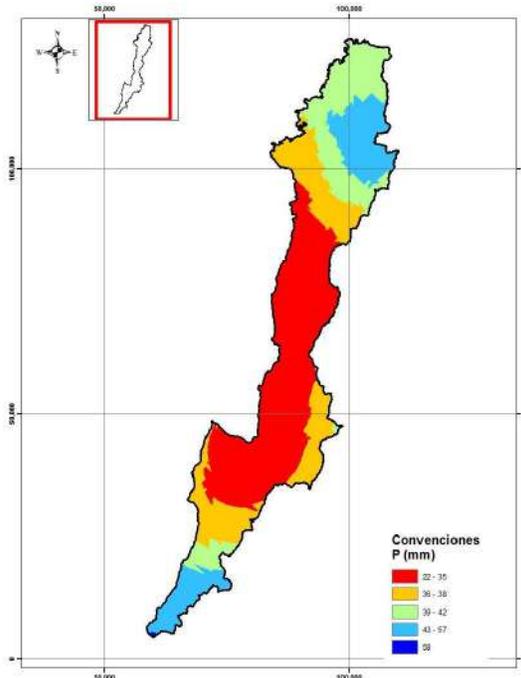


Figura 9-41: Precipitación máxima en 24 horas

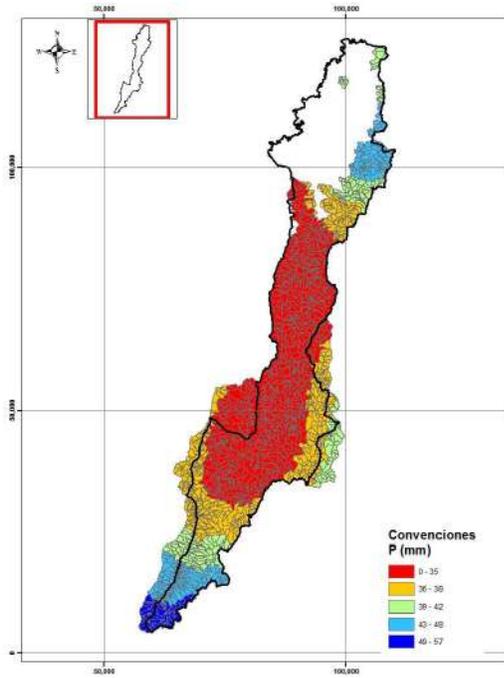


Figura 9-42: Precipitación máxima en 24 horas cuencas hidrográficas seleccionadas

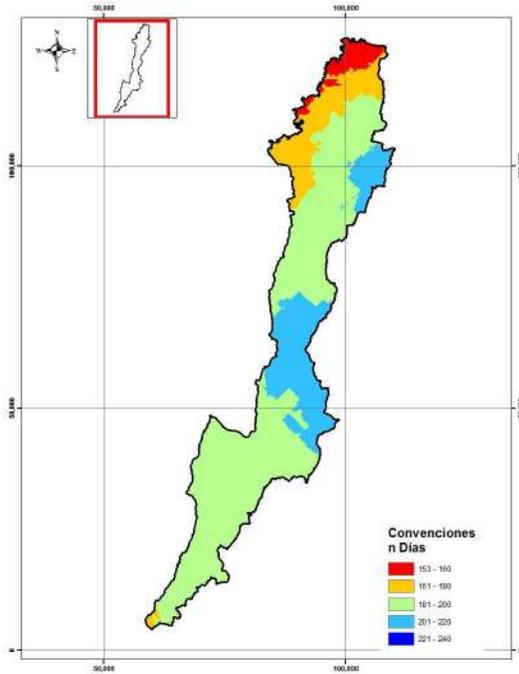


Figura 9-43: Número de días de precipitación medio anual

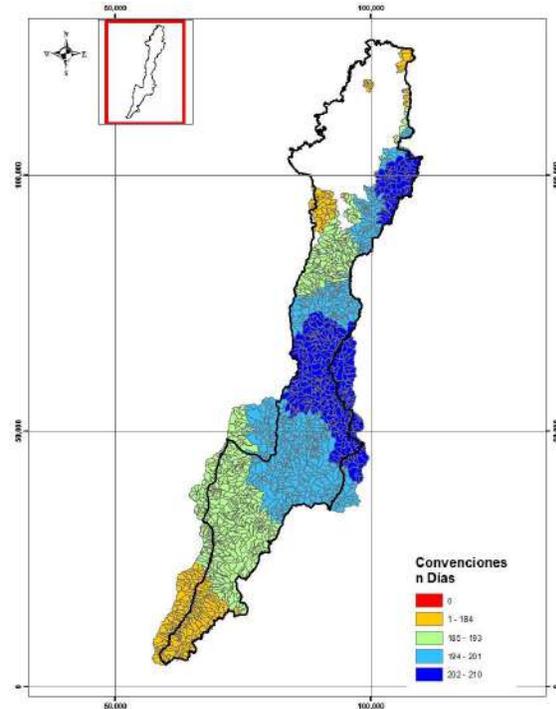


Figura 9-44: Número de días de precipitación medio anual cuencas hidrográficas seleccionadas

Las abstracciones de la precipitación fueron calculadas a partir del método de abstracciones del Soil Conservation Service SCS o Método del Número de curva. Para esto se tuvo en cuenta la cartografía disponible suministrada por SDP en cuanto a coberturas de suelo siguiendo la metodología CORINE Land Cover adaptada a escala 1:10.000 además de la clasificación del grupo hidrológico del suelo, de acuerdo al mapa geológico de la zona de estudio, definidos por tipo según su capacidad de infiltración. El número de curva utilizado por cuenca se presenta en la Figura 8-45 y la Figura 8-46.

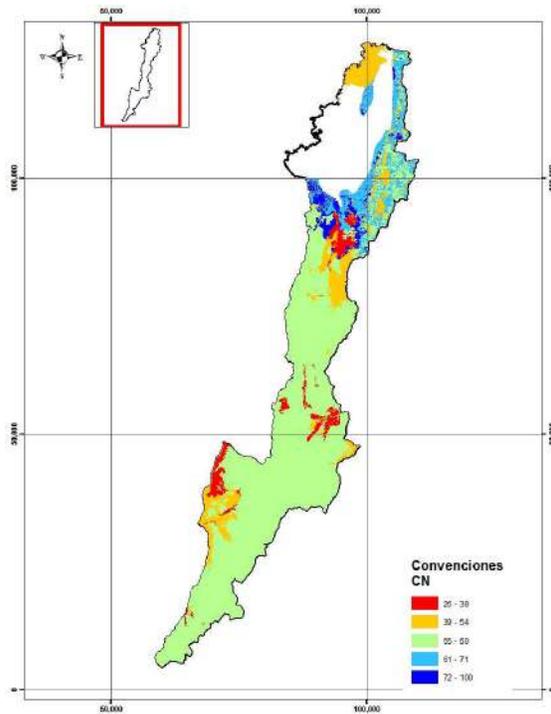


Figura 9-45: Numero de curva

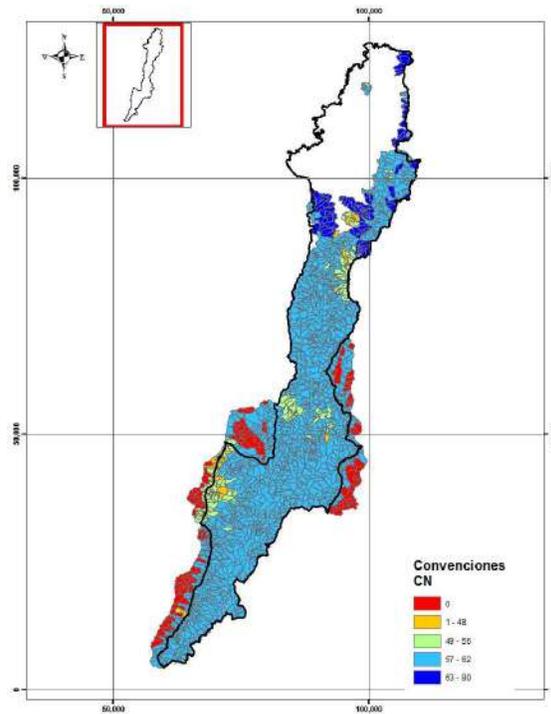


Figura 9-46: Numero de curva cuencas hidrográficas seleccionadas

Con el evento de precipitación obtenido a partir de las curvas IDF utilizando el método de bloque alterno y las abstracciones calculadas con el método de número de curva se obtienen los hidrogramas que servirán de entrada al modelo hidráulico. El Caudal Pico de estos hidrogramas se presenta en la Figura 4-57.

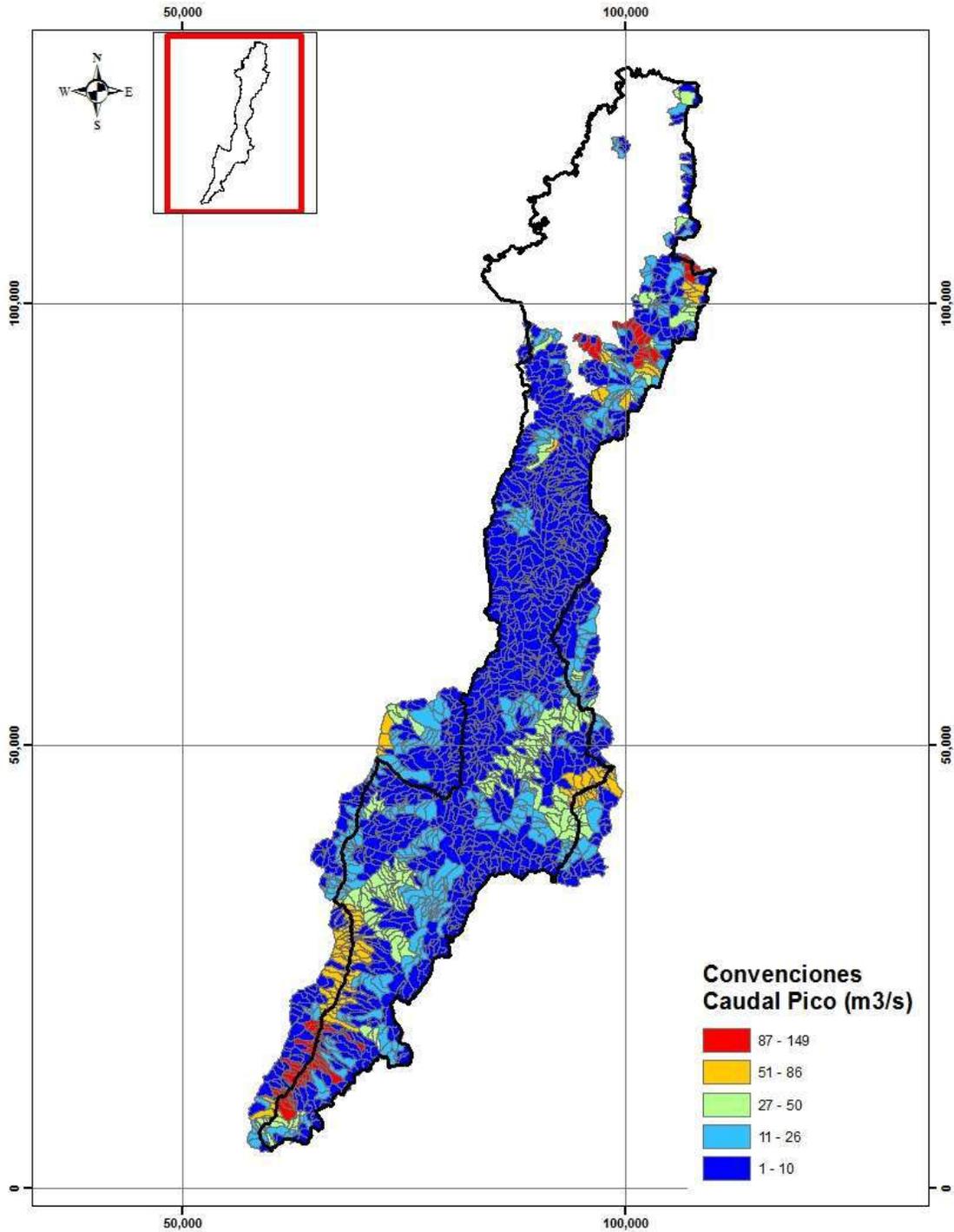


Figura 9-47: Caudal Pico cuencas hidrográficas seleccionadas

## 9.2. Análisis de sedimentos

Dado que el aporte de sedimentos de algunos procesos de movimientos en masa aferentes a los cuerpos hídricos puede contribuir a la carga de sedimentos elevando los volúmenes transportados por la corriente es importante definir los procesos que pueden generar aporte de sedimentos a la creciente súbita, En la Figura 4-58 se presenta el mapa de procesos que sirvió como insumo para el análisis.

Este mapa de procesos corresponde con el inventario de movimientos en masa, el cual se presenta en el Documento Técnico de Soporte “PARTE I MAPA DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ZONA URBANA Y DE EXPANSIÓN ESCALA 1:5000” y Documento Técnico de Soporte “PARTE II MAPA DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ZONA RURAL ESCALA 1:25000 y a partir de la información geotécnica también presentada en los documentos antes mencionados se caracterizó cada proceso definiendo a partir de la información disponible la formación, depósito o tipo de suelo, su granulometría y su incidencia en el aporte de sedimentos conforme su ubicación frente al cuerpo de agua, trabajando como zonas de aporte directas, las aferentes en una faja paralela (buffer) de 100 m a lado y lado del cuerpo de agua. Esta distancia tenía como objeto incluir la mayor cantidad de procesos, teniendo en cuenta que la mayoría de las quebradas no tienen definida su zona de ronda propiamente dicha, sino que se toma la generalidad reglamentada de los 30 m.

Dada las características geológicas, geomorfológicas y el tipo de proceso, se pudo obtener el tipo de material aportante al cauce, y por tanto establecer el parámetro de concentración de acuerdo al tipo de flujo a presentarse según criterio de experto teniendo en cuenta lo presentado en la Tabla 4.10. Las cuencas y la concentración media en volumen asociada a cada tipo de proceso de acuerdo con la Tabla 4.10 se presentan en la Figura 4-59.

Por otra parte, los parámetros reológicos utilizados en las modelaciones se presentan en la Concentración media en volumen según procesos de las cuencas hidrográficas seleccionadas.

Tabla 4.11, donde se establecen las relaciones disponibles del esfuerzo cortante y viscosidad como función de la concentración de sedimento de acuerdo con el estado del arte de la zonificación de amenazas por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas. Para la elección del tipo de relación a utilizar se trató de validar los resultados obtenidos utilizando diferentes reologías con el registro histórico presentado en el estudio detallado de la quebrada Limas “Actualización de la Zonificación de Amenaza de Inundación y Avenidas torrenciales de la Quebrada Limas. Localidad Ciudad Bolívar” Rogelis (2008). Como resultado de esta validación se concluyó que el mejor ajuste se obtenida al seleccionar la reología de Kang & Zhang (1980), y por tanto se toman para el modelo estos parámetros de esfuerzo cortante y viscosidad como función de la concentración de sedimentos.

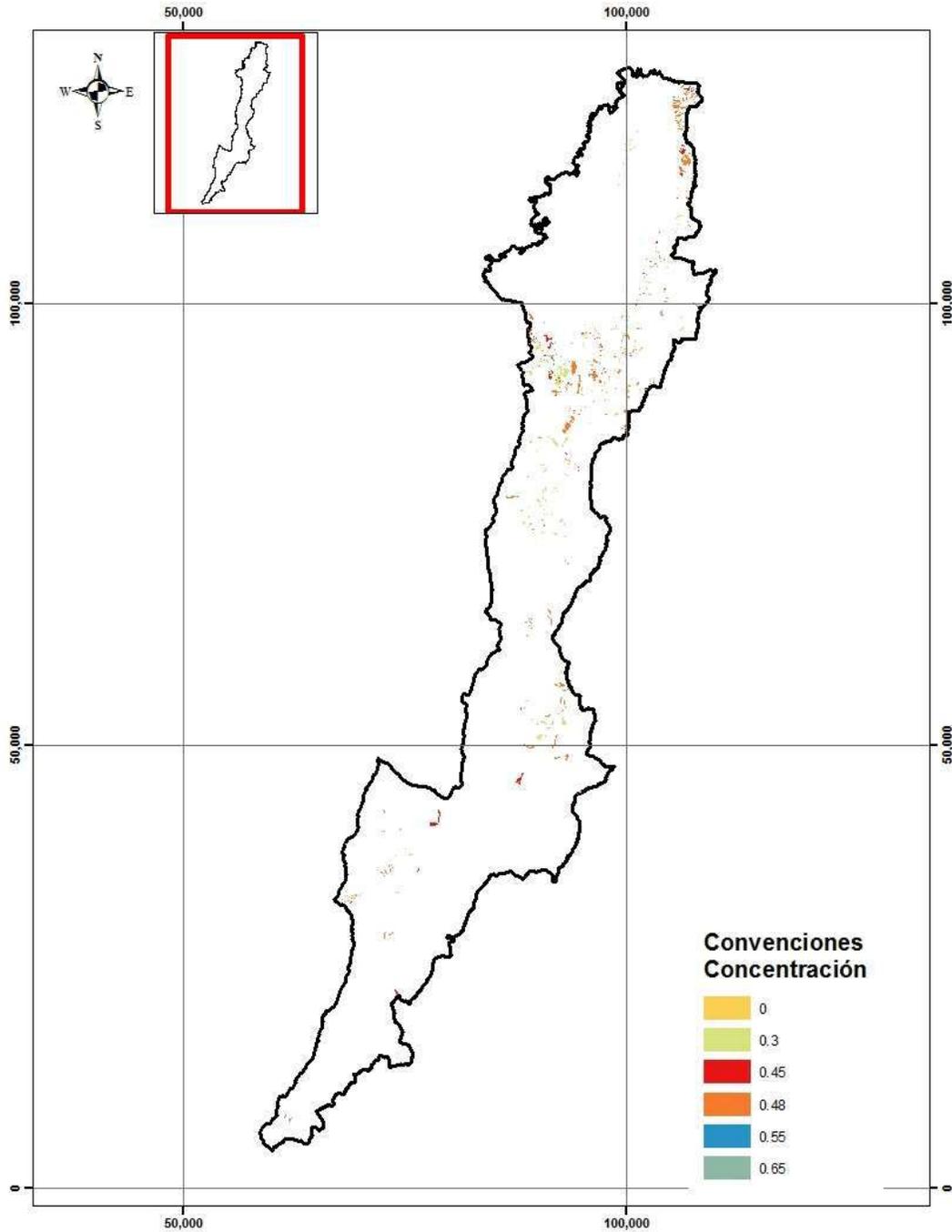


Figura 9-48: Concentración media en volumen según proceso

Tabla 9.4. Comportamiento del flujo de sedimentos como función de la concentración de sedimentos (O'Brien, 2014)

Tipo Proceso	Concentración de Sedimento		Características del flujo
	En Volumen	En Peso	
Deslizamiento	0.65 - 0.80	0.83 - 0.91	No fluye; falla por deslizamiento.
	0.55 - 0.65	0.76 - 0.83	Falla por deslizamiento con deformación interna, creep lento anterior a la falla.
Flujo de lodos	0.48 - 0.55	0.72 - 0.76	Flujo evidente, creep lento; deformación plástica bajo el peso propio del material; cohesivo, no se extiende en superficie nivelada.
	0.45 - 0.48	0.69 - 0.72	El flujo se extiende sobre superficie nivelada; flujo cohesivo; algo de mezcla.
Creciente de lodos	0.40 - 0.45	0.65 - 0.69	El flujo se mezcla fácilmente; muestra propiedades de fluido en deformación; se extiende en una superficie horizontal, pero mantiene una superficie del fluido inclinada; contiene partículas de tamaño considerable; aparecen ondas, pero se disipan rápidamente.
	0.35 - 0.40	0.59 - 0.65	Marcado asentamiento de gravas; se extiende casi completamente en una superficie horizontal; superficie líquida con dos fases del fluido; hay ondas que viajan en la superficie.
	0.30 - 0.35	0.54 - 0.59	Las ondas viajan fácilmente; la mayoría de la arena y grava se mueven como carga de lecho.
	0.20 - 0.30	0.41 - 0.54	Presencia de ondas; superficie fluida; todas las partículas se encuentran en el lecho.
Agua	< 0.20	< 0.41	Creciente de agua con carga en suspensión y de lecho.

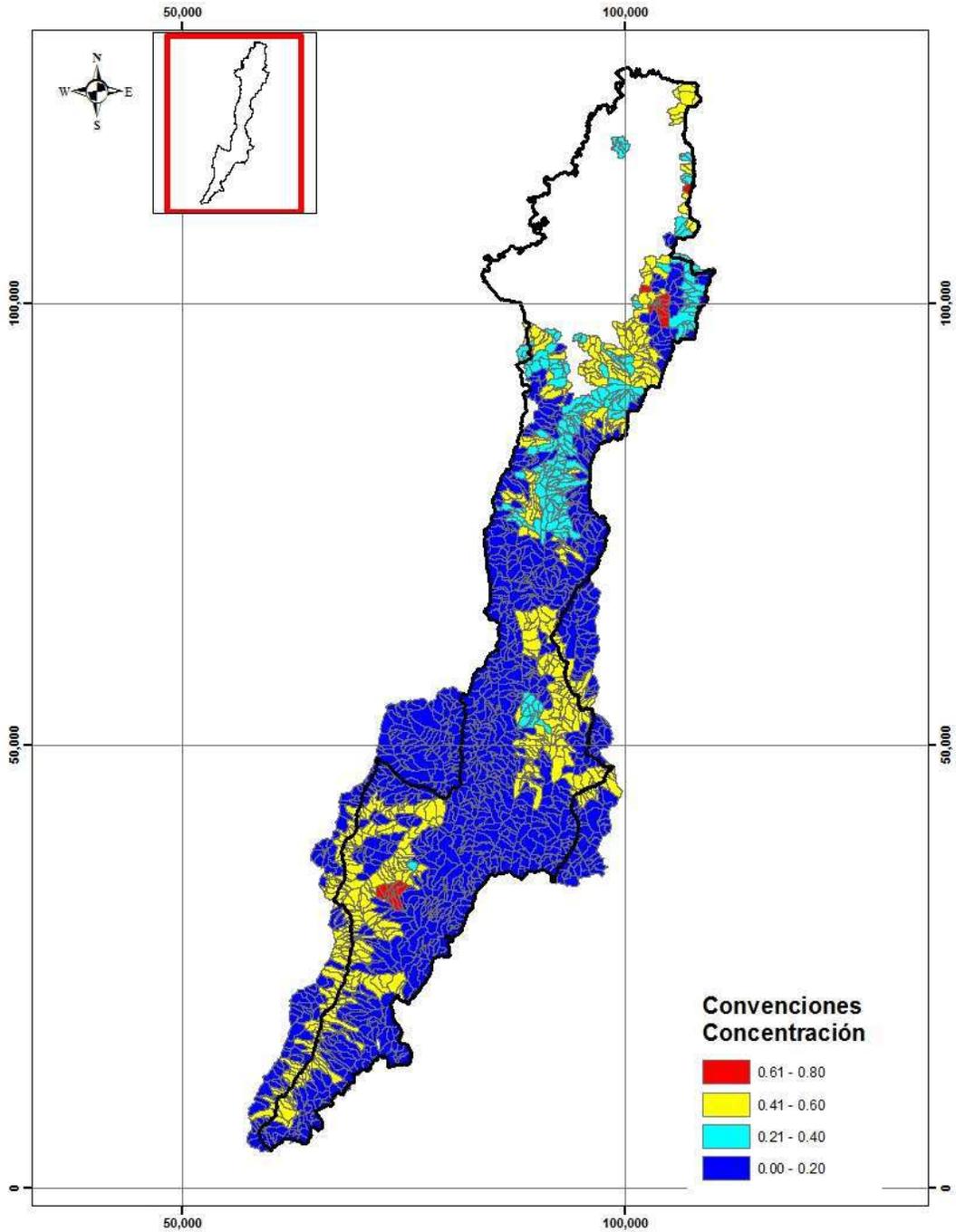


Figura 9-49: Concentración media en volumen según procesos de las cuencas hidrográficas seleccionadas.

Tabla 9.5. Esfuerzo cortante y viscosidad como función de la concentración de sedimentos (O'Brien, 2014)

Yield Stress and Viscosity as a Function of Sediment Concentration				
Source	$\tau_y = \alpha e^{\beta C_v}$		$\eta = \alpha e^{\beta C_v}$	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
Field Data				
Aspen Pit 1	0.181	25.7	0.0360	22.1
Aspen Pit 2	2.72	10.4	0.0538	14.5
Aspen Natural Soil	0.152	18.7	0.00136	28.4
Aspen Mine Fill	0.0473	21.1	0.128	12.0
Aspen Watershed	0.0383	19.6	0.000495	27.1
Aspen Mine Source Area	0.291	14.3	0.000201	33.1
Glenwood 1	0.0345	20.1	0.00283	23.0
Glenwood 2	0.0765	16.9	0.0648	6.20
Glenwood 3	0.000707	29.8	0.00632	19.9
Glenwood 4	0.00172	29.5	0.000602	33.1
Relationships Available from the Literature				
Iida (1938)	-	-	0.0000373	36.6
Dai et al. (1980)	2.60	17.48	0.00750	14.39
Kang and Zhang (1980)	1.75	7.82	0.0405	8.29
Qian et al. (1980)	0.00136	21.2	-	-
	0.050	15.48	-	-
Chien and Ma (1958)	0.0588	19.1-32.7	-	-
Fei (1981)	0.166	25.6	-	-
	0.00470	22.2	-	-

### 9.3. Análisis hidráulico

#### 9.3.1. Modelo Digital de terreno corregido

Para generar el modelo hidráulico bidimensional, es necesario contar con un modelo de elevación digital del terreno con un nivel adecuado de detalle, sobre el cual se realiza la modelación hidráulica, es decir, la simulación del tránsito de un caudal sobre el cauce y el terreno. Debido a que no se cuenta con la información a una escala homogénea, se realiza la adecuación del DEM a partir de un mosaico con diferentes fuentes de información hasta obtener un DEM de tamaño de celda 5 m.

Para la zona del perímetro urbano se cuenta con la información de un DEM con tamaño de celda 1 m que al ser proyectado complementa y mejora la resolución del DEM de 12 m, sin embargo dado el volumen de información para simular todos los tramos de corrientes de la red de drenaje en celdas de 1 m se ha optado por reorganizar el DEM de tamaño de celda de 1 m a un DEM de tamaño de celda de 5 m.

Como resultado se tiene un modelo unificado producto de la unión de los DEM de 5 m, uno proveniente del DEM de 12 m y el otro del de 1 m dando prioridad a este último. En la Figura 4-60 se presenta la corrección del DEM de 5 m y en la Figura 4-61 este DEM con corrección del drenaje.

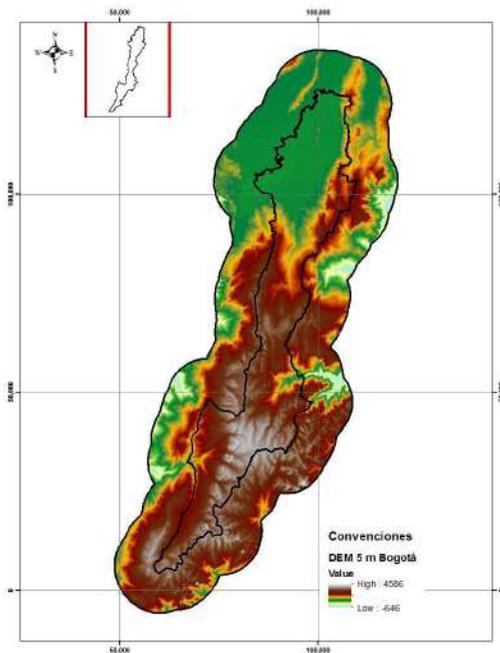


Figura 9-50: Modelo de Elevación Digital Tamaño de Celda 5 m a partir del modelo de elevación digital de 12 m y 1 m

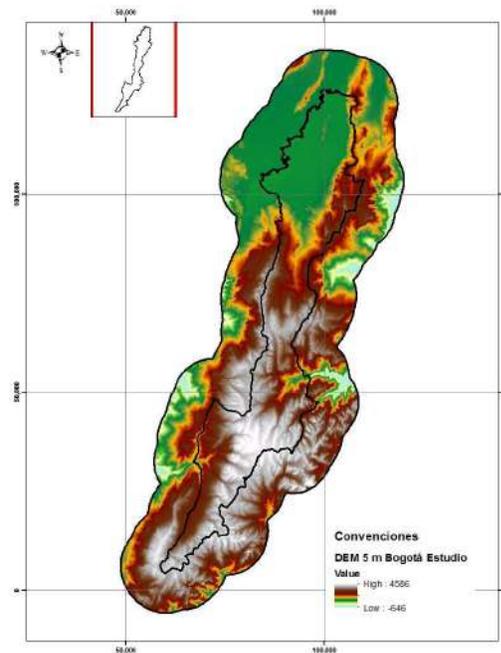


Figura 9-51: Modelo de Elevación Digital Tamaño de Celda 5 m a partir del modelo de elevación digital de 12 m y 1 m con corrección red de drenaje

Teniendo como entrada la información de DEMs disponible, se complementa este DEM respecto al trazado de la corriente, buscando generar un dominio para la modelación hidráulica bidimensional. Para esto se construye en ArcGIS un flujo de trabajo de herramientas de geoprocésamiento para generar el DEM a utilizar en la modelación hidráulica. De manera general se requieren de 3 pasos para la generación del DEM corregido para la modelación, los cuales se describen a continuación:

- Generación de área para el complemento de información para el dominio de la modelación hidráulica: El área sobre la que complementa el DEM corresponde a toda la zona de suelo rural, como se puede observar en la *Figura 9-51*.
- Construcción del mosaico de información de elevación: A partir de la información disponible, se construyó un mosaico con la información de elevación disponible respecto al área para el complemento de la información. Se cuenta con información en entidades tipo raster de 1 m de tamaño de pixel para los tramos precisos que atraviesan los centros poblados, información tipo raster de 5 m de tamaño de pixel para las zonas con curvas de nivel a esta escala y el resto de las áreas es complementada con información raster de tamaño de pixel 12 m, obtenida a través de sensores remotos.
- Corrección del Modelo de Elevación Digital respecto a la escala de trabajo: La corrección se realiza a través de herramientas de hidrología e hidráulica implementadas en sistemas de información geográfica, que permiten corregir y homogenizar la información, para darle sentido físico a los insumos, análisis y resultados.

El anterior procedimiento se realizó para las 1663 cuencas delimitadas para el suelo rural y urbano del Distrito. Por otra parte, se tiene en cuenta un ancho aferente de 100 m a lado y lado del cuerpo de agua, permite contemplar los arrastres de sedimentos dentro del modelo en función de las geometrías definidas en el modelo, así como garantizar que los mismos sean analizados bajo las diferentes subcuencas que van hacer aportes a las concentraciones y que al final contribuirán a generar el modelo integrado de las cuencas del Distrito Capital. Sin embargo, se debe tener en cuenta que este ancho aferente no limita los resultados de las modelaciones hidráulicas. En las Figura 9-52 y Figura 9-53 se presenta una muestra del modelo de elevación respecto al sobreancho propuesto.



Figura 9-52: Muestra del buffer de 100 m corriente a considerar

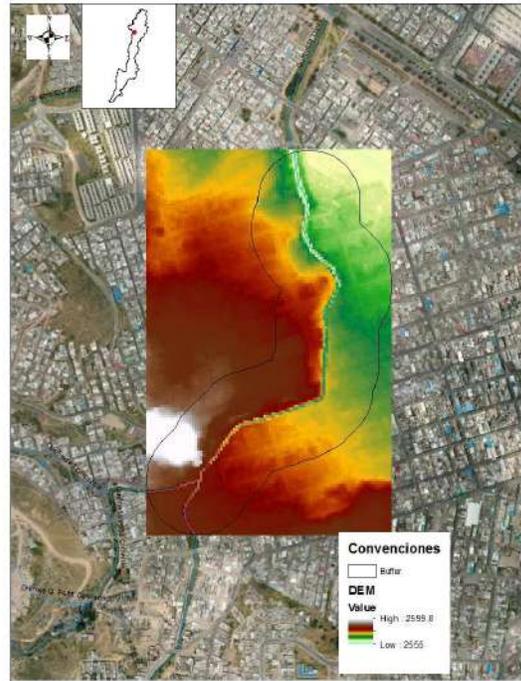


Figura 9-53: Modelo de Elevación Digital Tamaño de Celda 5 m a partir del modelo de elevación digital de 12 m y 1 m con corrección red de drenaje extraído con buffer de 100 m corriente a considerar

### 9.3.2. Resultados de Modelación

Como resultado de la modelación de los cauces identificados con comportamiento torrencial en el Distrito, teniendo en cuenta los análisis hidrológicos y de sedimentos para los diferentes escenarios, se obtuvo los vectores de velocidades y máxima profundidad de flujo asociados a los cuerpos de agua.

Los vectores de velocidad como resultado de la modelación del tramo de ejemplo de la Quebrada Limas se presentan en la Figura 4-64. Así como los resultados de la máxima profundidad de flujo (Figura 4-65).

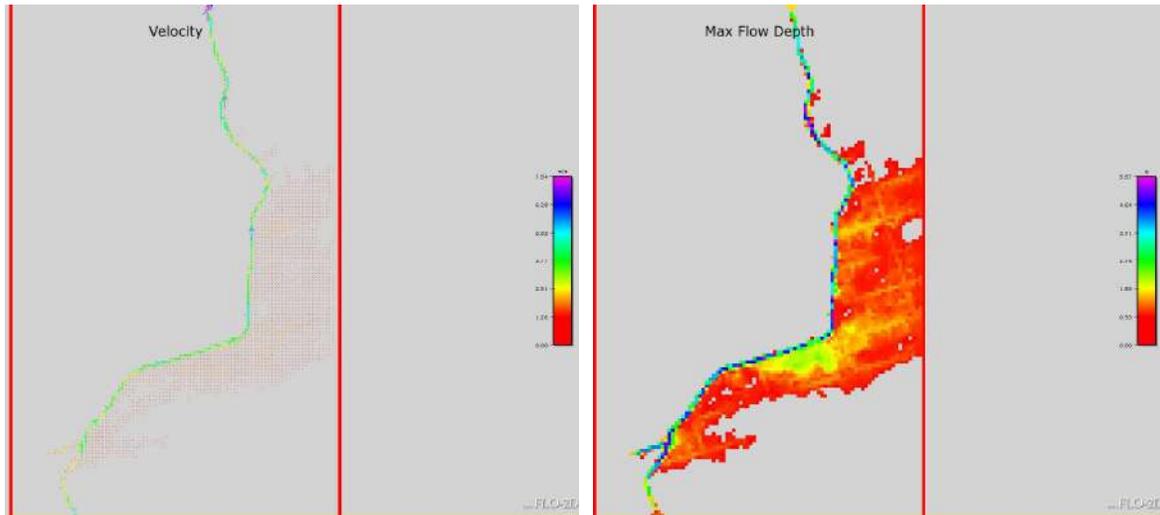


Figura 9-54: Resultados modelación vectores de velocidad    Figura 9-55: Resultados modelación máxima profundidad de flujo

En los resultados obtenidos se destaca la importancia e influencia de la geomorfología, la cual se asocia a la morfodinámica de las laderas en las consideraciones del análisis de sedimentos, así como en los límites considerados para la complementación de la información para la modelación hidráulica (morfometría) cuyos resultados están implícitos en los análisis realizados.

De acuerdo a la metodología utilizada, correspondiente a un análisis determinístico en el que se estiman la profundidad de flujo y la velocidad, los cuales se categorizan para la zonificación de la amenaza no se tienen en cuenta directamente la influencia de la morfogénesis, toda vez que la categorización de la amenaza se hace en función de la profundidad de flujo y la velocidad.

El análisis de sedimentos es fundamental en la definición de la reología del flujo de cada corriente, de acuerdo al análisis de la morfodinámica, con los cuales se definen los parámetros de Concentración en Volumen (Cv).

Por otra parte, en el modelo hidráulico, se involucran los valores del esfuerzo de fluencia y viscosidad del flujo obtenidos, así como los caudales que se transitan por las corrientes, respecto a la pendiente definida implícitamente en el modelo de elevación digital.

Es importante mencionar que se trató de involucrar la geomorfología en demás aspectos mediante análisis estadísticos e históricos la recurrencia de los eventos, pero tal como se indica en el POMCA del río Bogotá, el número de avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas identificado en la cuenca es muy bajo y por lo tanto puede resultar inapropiada la calificación con tales criterios, por lo que los parámetros morfométricos, junto con los procesos morfodinámicos se articularon con modelación hidrológica e hidráulica ya que su incidencia si es factor clave para la valoración de la amenaza.

#### 9.4. Análisis de amenaza

Retomando el flujograma metodológico (Figura 8.56), para la construcción del mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas, partiendo del análisis hidrológico, una vez obtenidos los hidrogramas para las cuencas definidas, estos son incluidos en el modelo hidráulico, el cual es el resultado de la generación de las secciones transversales de cada una de las 1663 cuencas delimitadas. Adicionalmente, a partir de la relación Kang & Zhang (1980) se generan los valores del esfuerzo cortante y viscosidad como función de la concentración de sedimentos los cuales son incluidos en el modelo hidráulico.

Se realiza el procesamiento en el software de elementos finitos de cada una de las 1663 cuencas, obteniendo alturas y velocidades del flujo para cada pixel junto con los caudales de salida que alimentan los pixeles de la cuenca aguas abajo y van generando la integración del modelo hidráulico. Al final se tiene como resultado un ráster con tamaño de pixel de 5m donde se tiene una profundidad y velocidad del flujo.

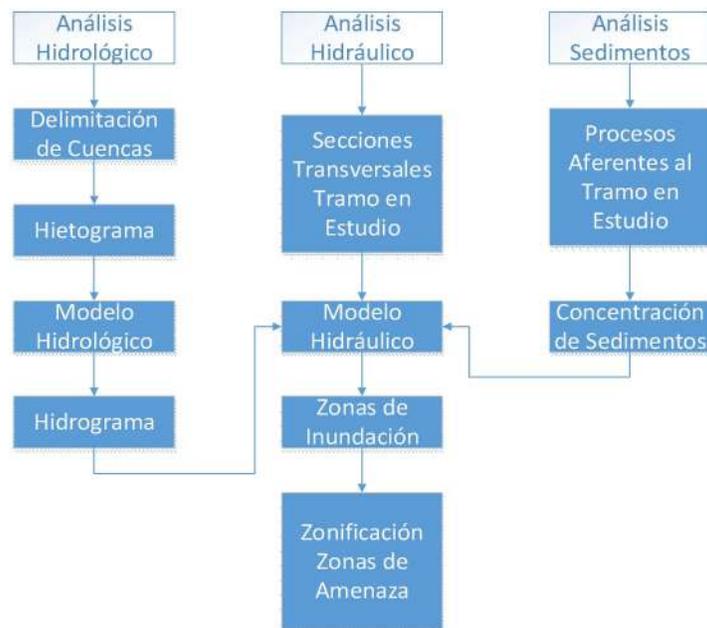


Figura 9-56. Flujograma metodológico

A partir de los resultados de altura y velocidades del flujo obtenidos en el modelo hidráulico se realiza la zonificación de la amenaza de acuerdo con la categorización presentada en la Tabla 4.12.

Tabla 9.6. Matriz de amenaza definida por la intensidad del proceso y su probabilidad de ocurrencia. (Matjaž, 2013)

				Probability of occurrence, <i>P</i>		
	BUWAL (1997)	Rickenmann (2005b)		High	Medium	Low
Intensity, <i>I</i>	$h > 1.0 \text{ m}$ and $v > 1.0 \text{ m/s}$	$h > 1.0 \text{ m}$ or $v > 1.5 \text{ m/s}$	High	High	High	Moderate
	$h < 1.0 \text{ m}$ or $v < 1.0 \text{ m/s}$	$h < 1.0 \text{ m}$ and $0.4 \text{ m/s} < v < 1.5 \text{ m/s}$	Medium	Moderate	Moderate	Low
	non existent	$h < 0.4 \text{ m}$ and $v < 0.4 \text{ m/s}$	Low	Low	Low	Very Low
Not affected areas				Very Low	Very Low	Very Low

De acuerdo con los resultados de modelación presentados en el ítem 8.3 y teniendo en cuenta la metodología descrita anteriormente, se obtuvo la zonificación de amenaza para las cuencas analizadas.

## 10. ZONIFICACIÓN Y MAPA DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES Y/O CRECIENTES SÚBITAS EN SUELO RURAL

De acuerdo con los resultados de evaluación se define la amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas como el área donde existe una probabilidad de ocurrencia de avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas con un periodo de retorno de 100 años, la intensidad del fenómeno se establece a partir de los resultados del modelo hidráulico de los cauces naturales y/o intervenidos que por sus condiciones presentan avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas. El modelo hidráulico desarrollado implementa los resultados de la modelación hidrológica de las cuencas asociadas a estos cauces naturales y cuya área aferente es mayor a 50 ha y la concentración de sedimentos de fenómenos de movimientos en masa que pueden incorporarse a estos cauces.

En la Figura 10-1 se presenta el mapa de zonificación de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el suelo rural del distrito capital, categorizado en amenaza alta, media y baja.

Por otra parte, teniendo en cuenta que el suelo rural está conformado por áreas por fuera de los cauces con posible comportamiento torrencial, asociadas a la sabana principalmente, se identifican estas zonas como Áreas No Zonificables, cuya definición se presenta a continuación:

Área No Zonificable: área del territorio en la que no se presenta una zonificación particular de la amenaza, teniendo en cuenta la definición de Área de Estudio descrita en el Decreto 1807 de 2014 (Compilado en el Decreto 1077 de 2015) y en la cual no se evidencian antecedentes de la amenaza evaluada.

De acuerdo a la solicitud de la CAR y en cumplimiento del Decreto 1807 de 2014 (Compilado en el Decreto 1077 de 2015); y teniendo en cuenta la incertidumbre sobre esta amenaza, se ajusta la representación en el mapa correspondiente a una calificación de amenaza baja en aquellas zonas donde no hay cauce.

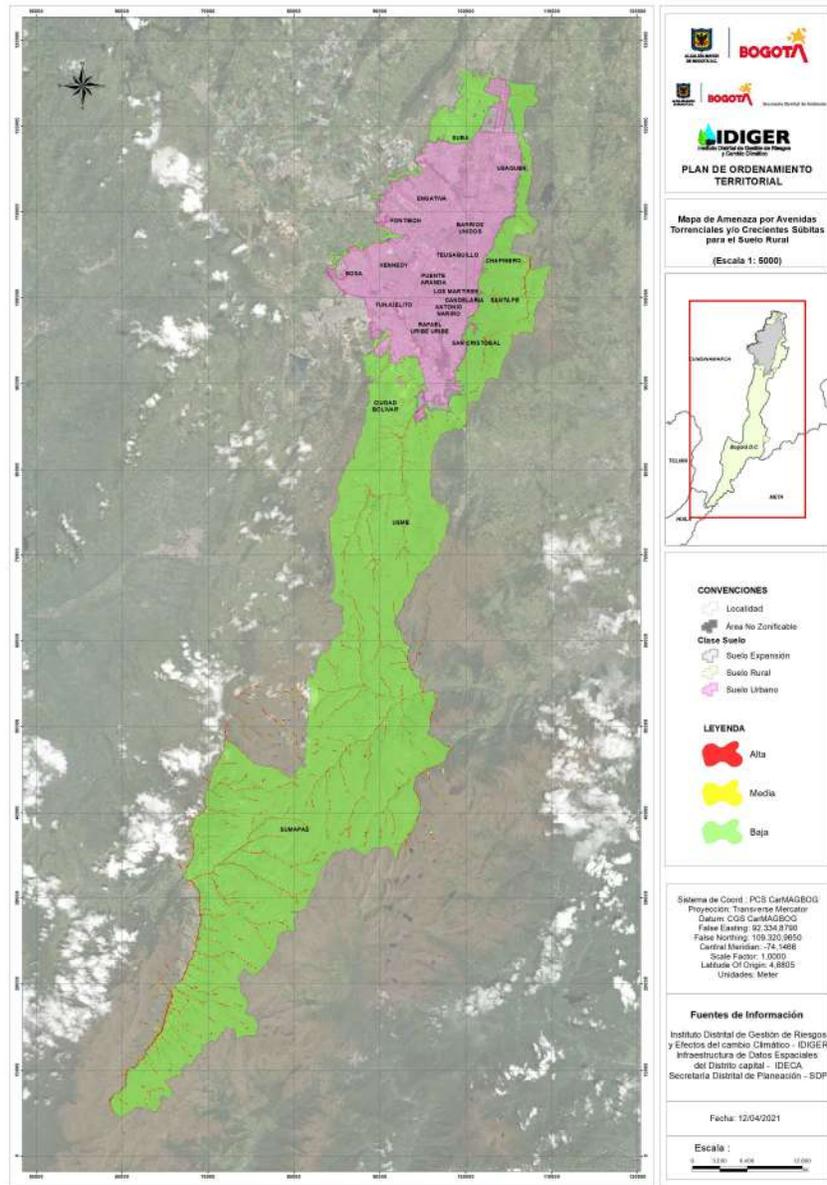


Figura 10-1: Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas categorizado para el suelo rural

Los resultados cartográficos de los estudios básicos realizados en este suelo se presentan en el Anexo Cartográfico.

## 11. AMENAZA EN LOS NODOS DE EQUIPAMIENTOS Y SERVICIOS Y VIVIENDA RURAL CAMPESTRE

En el numeral 7 se describió la metodología de análisis empleado para obtener el “Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas categorizado para el suelo rural” a escala 1:5.000, el cual incluye los nodos de equipamiento.

En el Distrito Capital se proyectan n 15 Nodos de Equipamientos y Servicios, ubicados en suelo rural. La mayoría de nodos no presentan cauces cercanos, sin embargo, de acuerdo a la categorización de la amenaza en el suelo rural, y de acuerdo a la solicitud de la CAR de categorizar todos los tipos de suelo por esta amenaza, se presentan los nodos con algún nivel de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas a escala 1:5.000. A continuación, se presenta un detalle de la zonificación de amenaza para cada uno de los nodos.



Figura 11-1. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Guaymaral (escala 1:5.000)

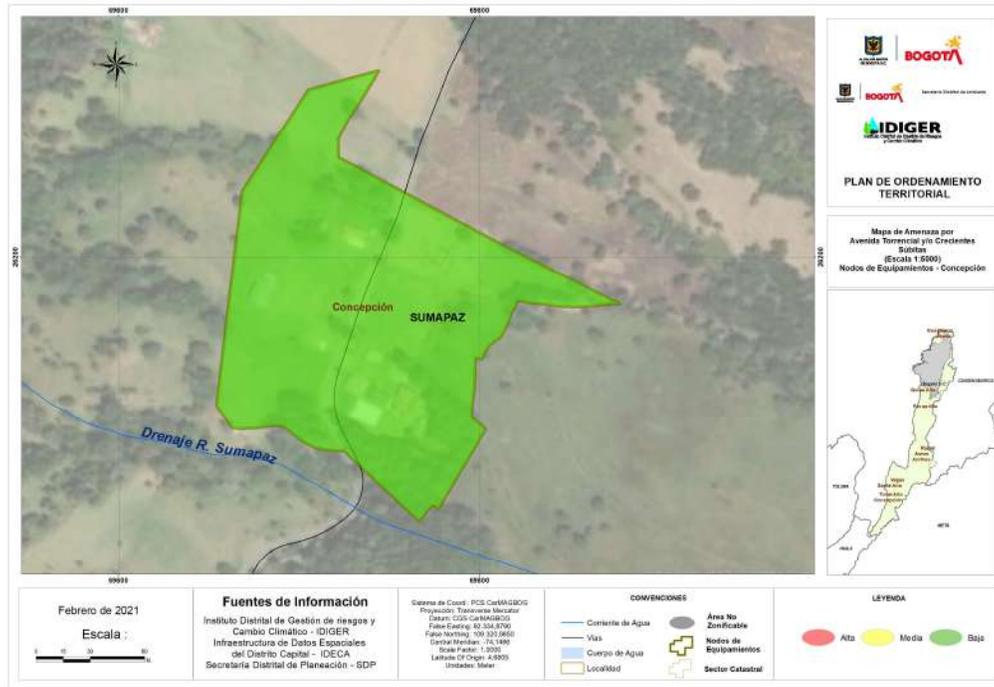


Figura 11-2. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Concepción (escala 1:5.000)

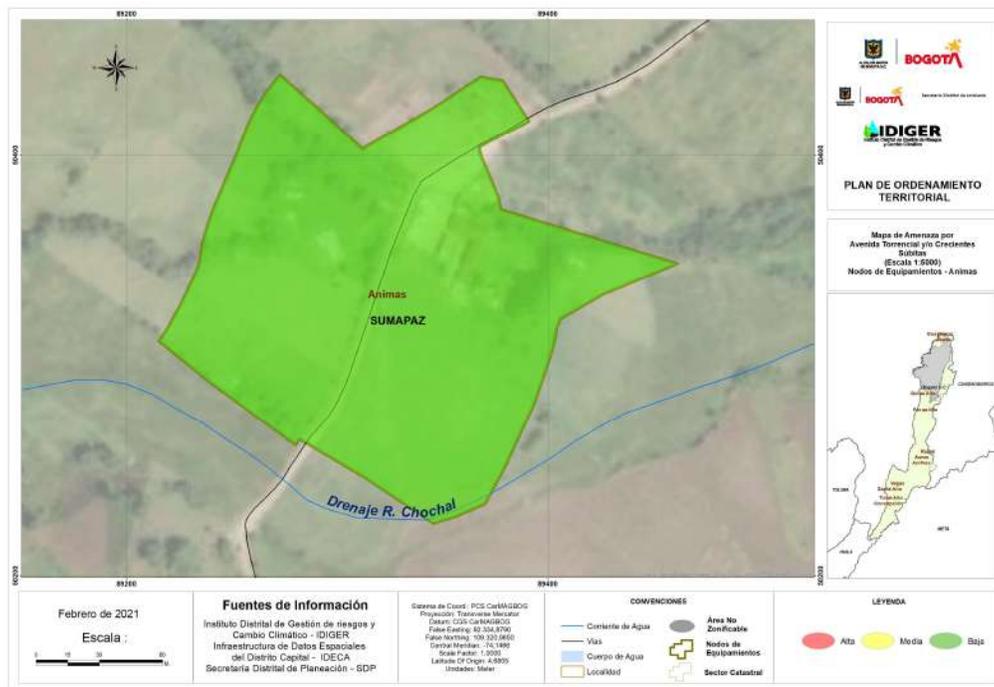


Figura 11-3. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Animas (escala 1:5.000)

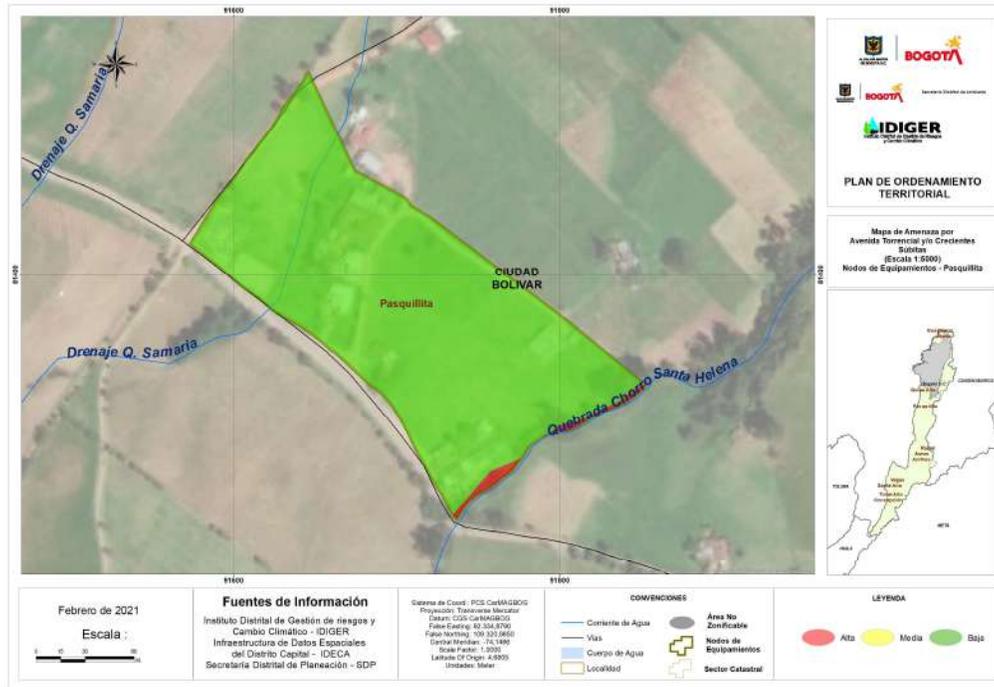


Figura 11-4. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Pasquillita (escala 1:5.000)

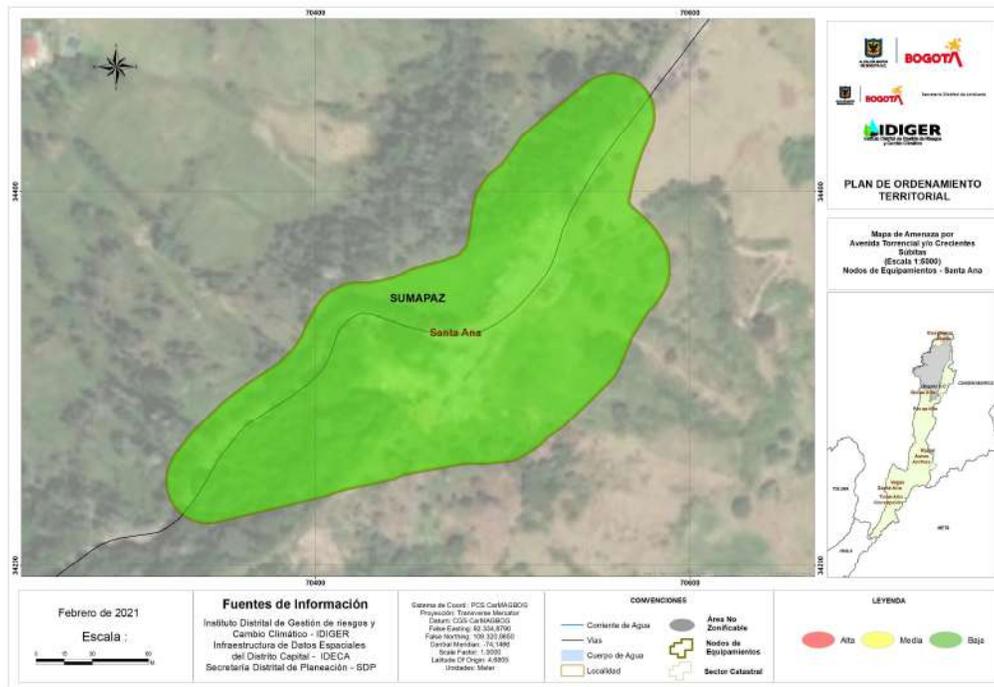


Figura 11-5. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Santa Ana (escala 1:5.000)

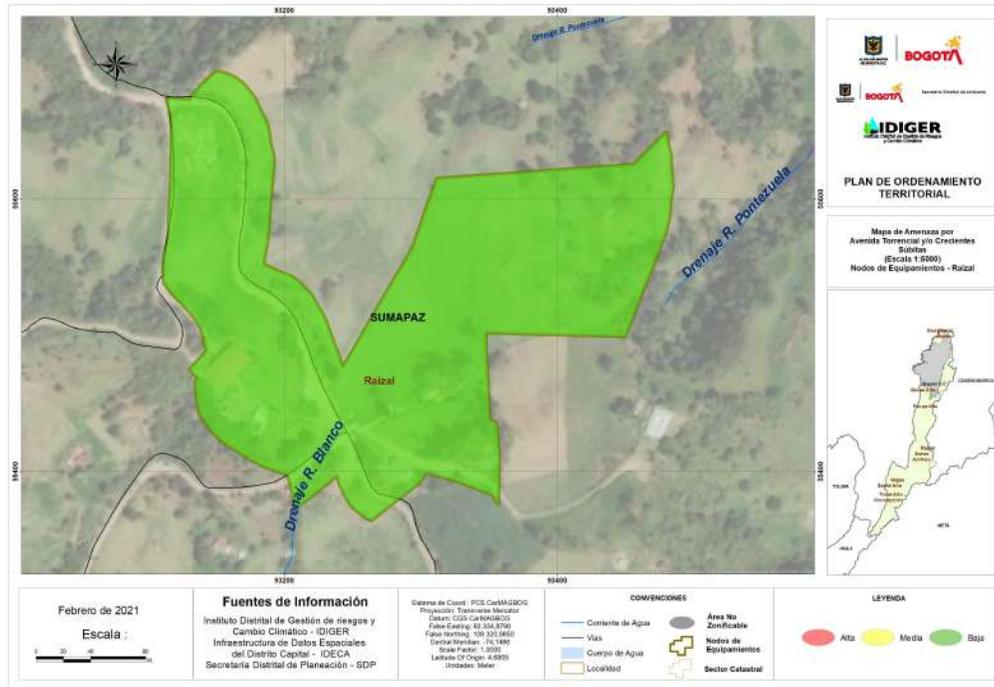


Figura 11-6. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Raizal (escala 1:5.000)

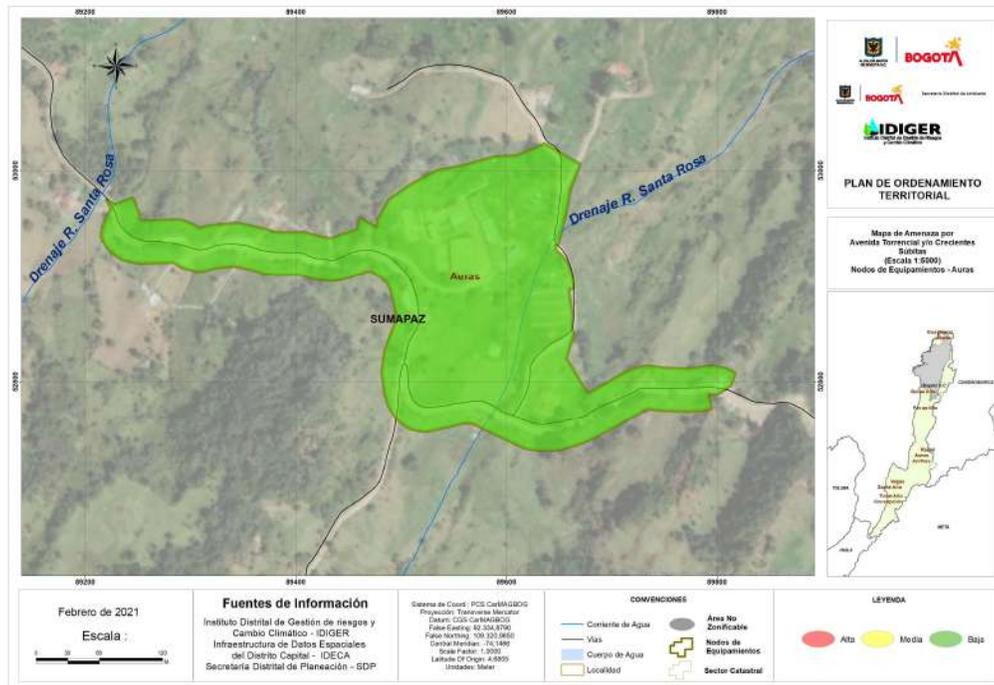


Figura 11-7. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Auras (escala 1:5.000)

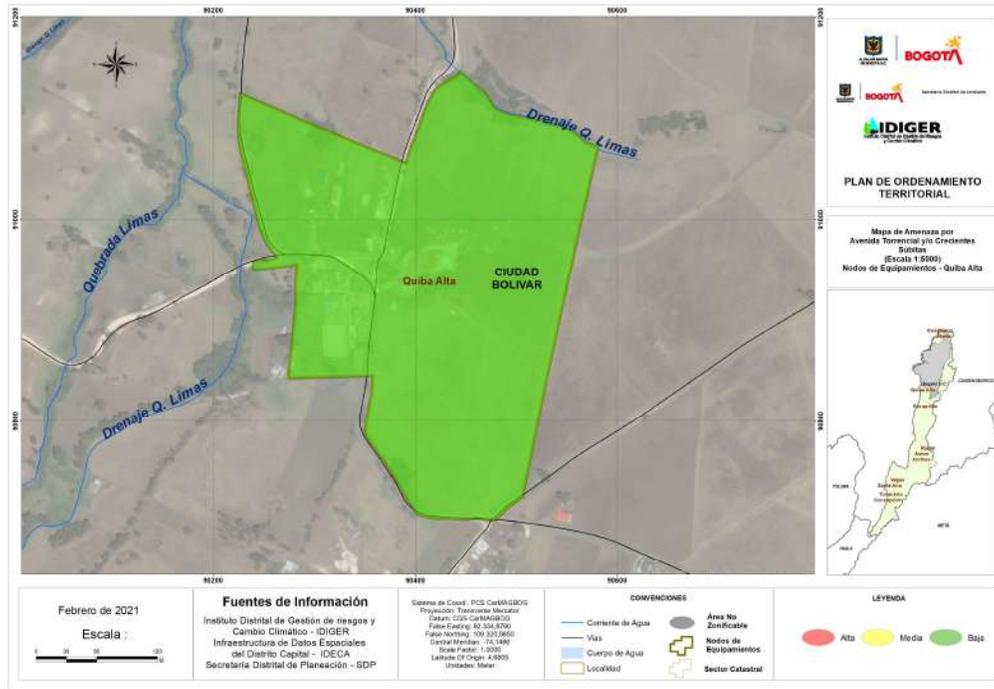


Figura 11-8. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Quiba Alta (escala 1:5.000)



Figura 11-9. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Vegas (escala 1:5.000)

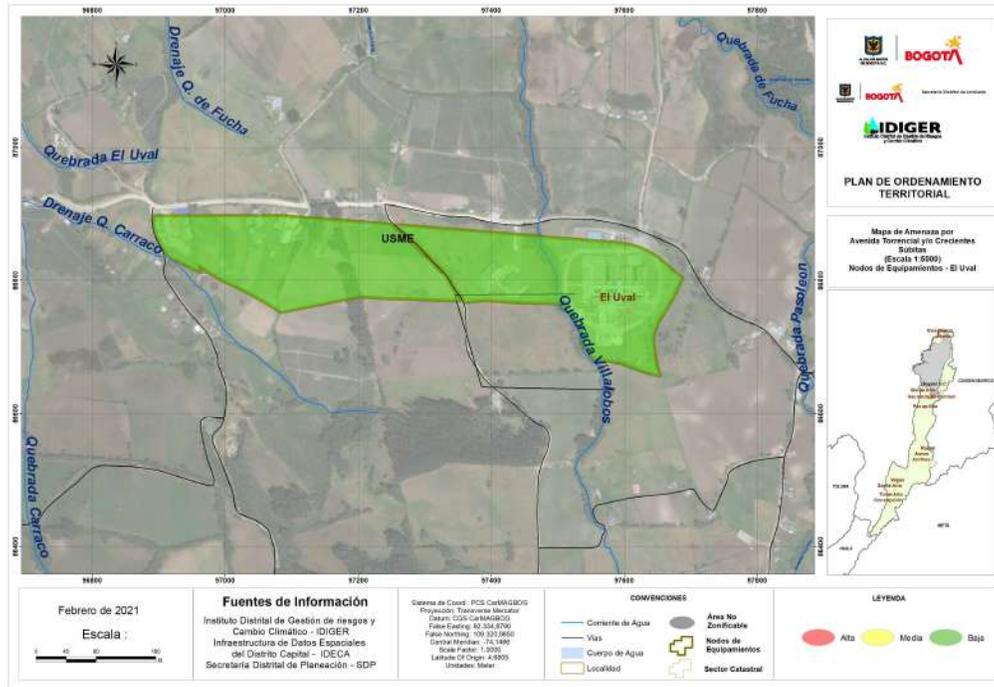


Figura 11-10. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos El Uval (escala 1:5.000)

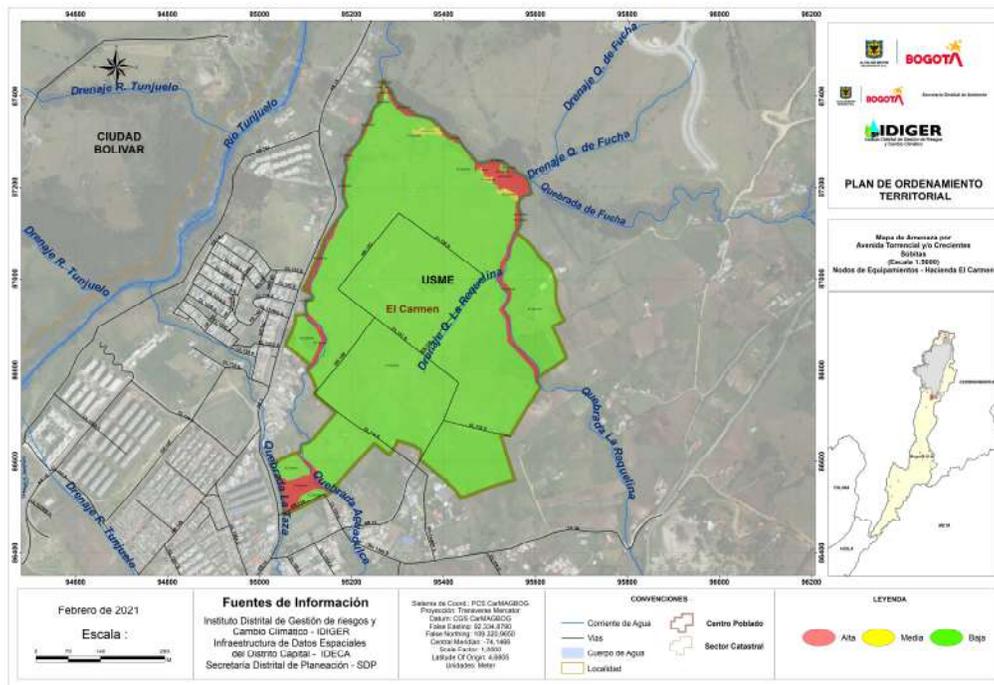


Figura 11-11. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamiento El Carmen (escala 1:5.000)



Figura 11-12. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Norte (escala 1:5.000)

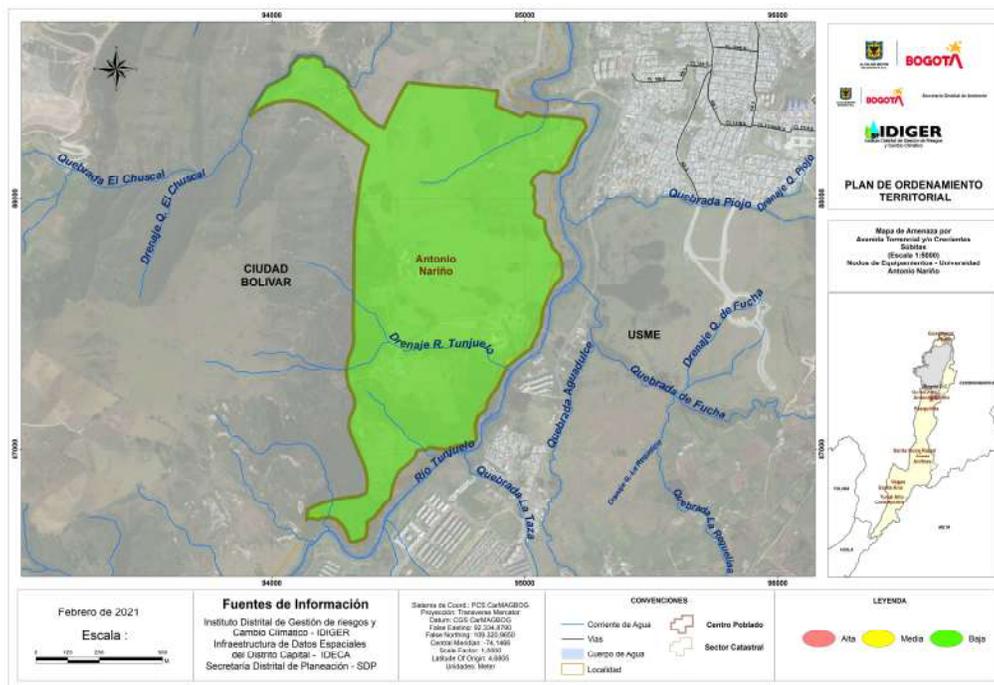


Figura 11-13. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamiento Antonio Nariño (escala 1:5.000)

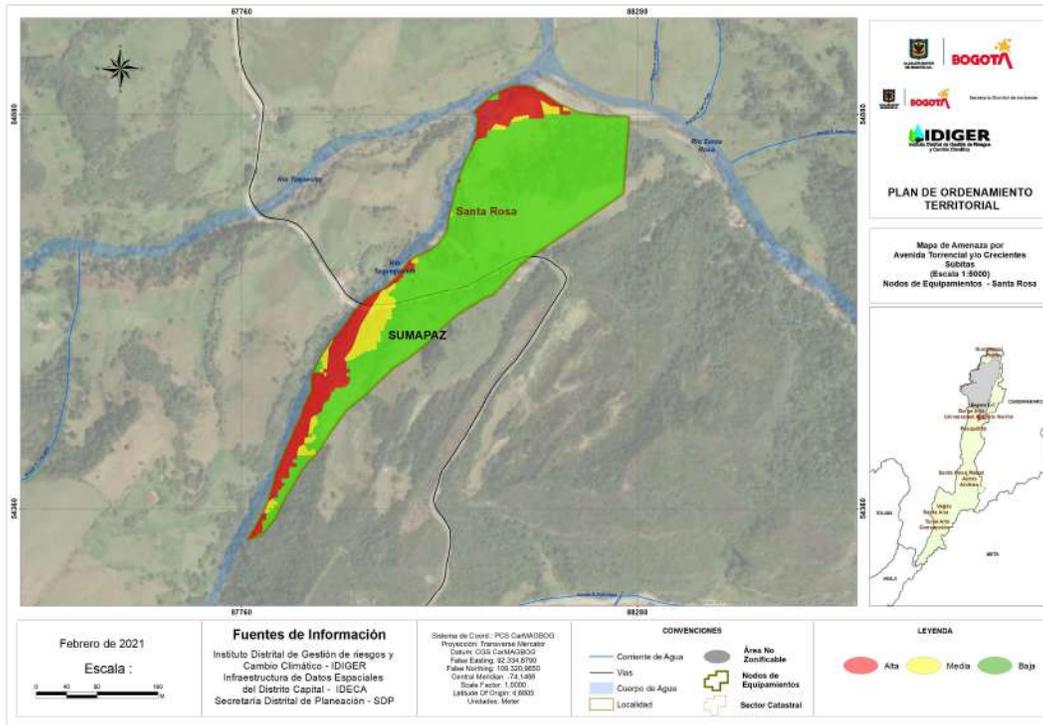


Figura 11-14. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el Nodo de Equipamientos Santa Rosa (escala 1:5.000)

El polígono de Vivienda Rural Campestre se ubica en la zona rural de la localidad de Suba, en la siguiente figura se presenta el mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para la Vivienda Rural Campestre.

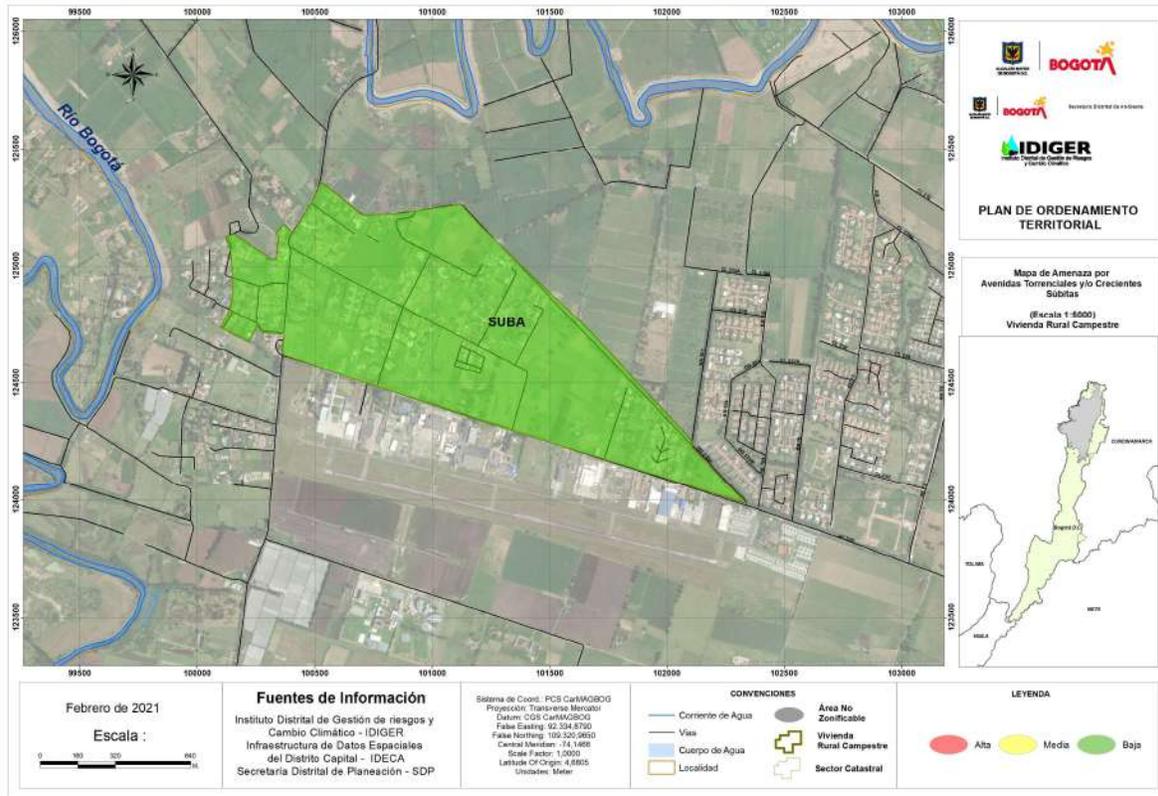


Figura 11-15. Mapa de amenaza por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas para el polígono de Vivienda Rural Campestre (escala 1:5.000)

## 12. CONSIDERACIONES PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO POR AVENIDAS TORRENCIALES Y/O CRECIENTES SÚBITAS

Debido a que la concentración de la población en el suelo rural se asocia a los Asentamientos Humanos como Centros Poblados, Nodos de Equipamientos y Servicios y Vivienda Rural Campestre cuyas consideraciones para la gestión del riesgo se presentan en un anexo particular, en el suelo rural no se considera el desarrollo y obtención de las áreas con condición de amenaza y de las áreas con condición de riesgo, salvo las asociadas a estos asentamientos como se presentan en el Documento Técnico de Soporte, que compila la incorporación de la gestión del riesgo en la actualización y revisión del Plan de Ordenamiento Territorial.

### 12.1. Priorización de estudios detallados por avenidas torrenciales y/o crecientes súbitas



La priorización para los estudios detallados se presenta en el Documento Técnico de Soporte, que compila la incorporación de la gestión del riesgo en la actualización y revisión del Plan de Ordenamiento Territorial.

La planeación y ejecución de los estudios detallados estará condicionada a la evaluación de esta amenaza en el tiempo, teniendo en cuenta la dinámica del proceso amenazante y el registro de emergencias. Por lo anterior, la priorización presentada podrá ser modificada por el Distrito teniendo en cuenta la temática social, las emergencias recurrentes, la priorización de recursos, propuestas o prioridades de desarrollo, entre otros. La priorización de los estudios para las corrientes de agua aferentes a los centros poblados, se describe en el Documento Técnico de Soporte (DTS).

### 13. ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO

El desarrollo y obtención de las áreas con condición de amenaza y de las áreas con condición de riesgo se presentan en el Documento Técnico de Soporte, que compila la incorporación de la gestión del riesgo en la actualización y revisión del Plan de Ordenamiento Territorial.

## 14. REFERENCIAS

- Babajaa, S., Masoud, M., & Al-Amri, N. (2014). Flash flood hazard mapping based on quantitative hydrology, geomorphology and GIS techniques (case study of Wadi Al Lith, Saudi Arabia). *Arabian Journal of Geosciences*, 7(6), 2469–2481. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0941-2>
- Farhan, Y., & Anaba, O. (2016). Flash Flood Risk Estimation of Wadi Yutum (Southern Jordan) Watershed Using GIS Based Morphometric Analysis and Remote Sensing Techniques, (April), 79–100. <https://doi.org/10.9734/IJPSS/2016/25321>
- Gemma, G. (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. *Publicación Geológica Multinacional*, 4(0717–3733), 432. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Movimientos+en+Masa+en+la+Regi?n+Andina:+Una+gu?a+para+la+evaluaci?n+de+amenazas#5>
- Koshak, N., & Dawod, G. (2011). A GIS morphometric analysis of hydrological catchments within Makkah Metropolitan area , Saudi Arabia. *Journal Of Geomatics*, 2(2), 544–554.
- Matjaž, M. (2013). Risk Management and Mountain Natural, (September 2013).
- O’Brien, J. (2014). FLO-2D Webinar Hyperconcentrated Sediment Flows - Mud and Debris Flows. FLO-2D Software, Inc.
- WMO, W. M. O., & UNESCO, U. N. E. and S. O. (1998). *International Glossary of Hydrology. IHP/OHP-Berichte*. Retrieved from [http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/international\\_glossary/385\\_IGH\\_2012.pdf](http://www.wmo.int/pages/prog/hwrrp/publications/international_glossary/385_IGH_2012.pdf)