

**ANÁLISIS Y ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR INUNDACIÓN EN LA CABECERA
MUNICIPAL DE SANTA ROSA PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN EUGENIO**

LAURA MARÍA GONZÁLEZ LÓPEZ

**UNIVERSIDAD DE CALDAS
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS
PROGRAMA DE GEOLOGÍA
MANIZALES, COLOMBIA
MAYO DE 2022**

**ANÁLISIS Y ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR INUNDACIÓN EN LA CABECERA
MUNICIPAL DE SANTA ROSA PARA LA SUBCUENCA DEL RÍO SAN EUGENIO**

Laura María González López

**Trabajo de grado modalidad práctica académica presentado como requisito para optar al
título de Geóloga**

Director

Geólogo John Jairo Cardona Ríos

Codirectora

Geóloga Maria Alejandra Vélez Hurtado

Universidad de Caldas

Facultad de Ciencias Exactas

Programa de Geología

Manizales, Colombia

mayo de 2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Aprobado



JOHN JAIRO CARDONA RÍOS
DIRECTOR

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mis padres, hermanos y demás familiares, quienes siempre me han respaldado en mis estudios. Su amor, apoyo incondicional y sacrificios han sido la fuerza motriz detrás de mi logro académico.

Quiero expresar mi agradecimiento a el CONSORCIO GC y todos sus integrantes por brindarme la oportunidad de participar en este proyecto y por proporcionar los recursos necesarios para su desarrollo, por su constante guía a lo largo de esta práctica.

A mi asesor académico, el profesor John Jairo Cardona, le agradezco su dedicación y paciencia al orientarme durante todo el proceso. Sus conocimientos, experiencia y valiosos comentarios fueron fundamentales para el éxito de este trabajo.

También quiero agradecer a mis grandes amigos y colegas que me dejo esta carrera, Juan Andres Chavarro, Cristian Reinoso, Zharick Trujillo, Michael Florez, Alejandro Vinasco, en especial a mi mejor amigo Juan Pablo Serna; quienes me brindaron su apoyo, compañía y comprensión en los momentos más desafiantes. Sus palabras de aliento y discusiones enriquecedoras fueron un verdadero estímulo para seguir adelante.

Por último, agradezco a todas aquellas personas que no he mencionado pero que de alguna manera contribuyeron a la culminación de este trabajo. Su apoyo moral y motivación han sido de gran importancia para mí.

Este trabajo de grado no habría sido posible sin la ayuda de todos ustedes. Una vez más, gracias a cada uno de ustedes por su confianza, apoyo y dedicación. Este logro es tanto mío como suyo.

RESUMEN

El estudio se enfoca en las inundaciones naturales relacionadas con las redes fluviales, evaluando tanto las inundaciones súbitas como las lentas. Se analiza el potencial de inundación en áreas cercanas a cuerpos de agua, principalmente debido a eventos meteorológicos como la precipitación intensa. Se clasifican las inundaciones en diferentes tipos según la concentración de sedimentos.

La metodología utilizada incluye la identificación de eventos históricos de inundación y su impacto, así como el análisis de la hidrografía y los caudales máximos de los cuerpos de agua en la zona. Los datos recopilados se emplean para crear mapas e identificar las áreas en riesgo de inundación. Estos resultados se validan mediante modelización matemática y se comparan con datos históricos y análisis geomorfológicos.

El resultado final del estudio es un mapa de amenaza de inundación que puede utilizarse para la planificación del territorio. Este mapa permite identificar de manera precisa las áreas que están en riesgo de inundación, brindando información valiosa para tomar medidas preventivas y realizar una gestión adecuada del riesgo. Además, este mapa puede ser utilizado como un recurso en la determinación de la planificación de infraestructuras así como para la asignación de medios y recursos en áreas propensas a inundaciones.

Con base en lo anterior, en este trabajo se identificó una amenaza alta por inundación a lo largo del río San Eugenio, esta amenaza se encuentra relacionada con alturas de lámina de agua superiores a 0.01 m e inferiores a 5.5 m y velocidades superiores a 0.65 m/s e inferiores a los 8 m/s y la amenaza media en las zonas donde la altura de lámina de agua y velocidad de flujo son inferiores a 0.5 m y 2 m/s respectivamente.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	11
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	GENERAL	12
2.2	ESPECÍFICOS.....	12
3	LOCALIZACIÓN.....	13
4	MARCO NORMATIVO	14
4.1	LEY 1523 DE 2012	14
4.2	LEY 388 DE 1997	14
4.3	DECRETO 1807 DE 2014.....	15
5	MARCO TEÓRICO	16
6	MARCO GEOLÓGICO.....	20
6.1	STOCK GABRODIORÍTICO DE SANTA ROSA	20
6.2	FORMACIÓN SANTA ROSA	21
6.3	FLUJOS FLUVIOVOLCANICOS (DEPÓSITOS TORRENCIALES) Y FLUJOS DE LODO.....	21
6.4	DEPÓSITOS DE CAIDA PIROCLÁSTICA.....	22
6.5	DEPÓSITOS ALUVIALES RECIENTES	23
6.6	DEPÓSITOS COLUVIALES.....	24
6.7	DEPÓSITOS ANTRÓPICOS.....	24
7	ANTECEDENTES.....	26
8	METODOLOGÍA.....	31
8.1	DOCUMENTACIÓN.....	31
8.2	TRABAJO DE CAMPO.....	31
8.3	ANÁLISIS DE INFORMACIÓN A TRAVÉS DE SIG.....	32
8.3.1	<i>ANÁLISIS HIDROGRÁFICO.....</i>	<i>33</i>
8.3.2	<i>ANÁLISIS DE EVENTOS HISTÓRICOS.....</i>	<i>34</i>
8.3.3	<i>ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO.....</i>	<i>35</i>
8.3.4	<i>ANÁLISIS MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL (DEM)</i>	<i>36</i>
8.3.5	<i>ANÁLISIS COEFICIENTE DE RUGOSIDAD N MANNING</i>	<i>37</i>
8.3.6	<i>ANÁLISIS CAUDALES MÁXIMOS POR PERIODOS DE RETORNO</i>	<i>38</i>
8.4	CORRELACIÓN DE INSUMOS PARA LAS ÁREAS POTENCIALMENTE INUNDABLES.....	38
8.5	MODELACIÓN HIDRÁULICA	39
8.6	ZONIFICACIÓN AMENAZA POR INUNDACIÓN	40
9	RESULTADOS	44
9.1	HIDROGRAFÍA	44
9.2	CARACTERIZACIÓN EVENTOS HISTÓRICOS	47
9.3	GEOMORFOLOGÍA	48
9.3.1	<i>Cauce actual (Fca).....</i>	<i>50</i>
9.3.2	<i>Barras puntuales (Fbp).....</i>	<i>51</i>
9.3.3	<i>Barras longitudinales (Fbl).....</i>	<i>52</i>

9.3.4	<i>Terrazas de acumulación (Fta)</i>	52
9.3.5	<i>Escarpe de terraza de acumulación (Ftae)</i>	53
9.3.6	<i>Flujo volcánico aterrazado (FVta)</i>	54
9.3.7	<i>Escarpe de flujo volcánico aterrazado (FVtae)</i>	54
9.3.8	<i>Pendientes</i>	55
9.4	MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL	57
9.5	COEFICIENTE DE RUGOSIDAD.....	58
9.6	CAUDALES MAXIMOS POR PERIODOS DE RETORNO	61
10	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	63
10.1	AREAS POTENCIALMENTE INUNDABLES	63
10.2	MODELACIÓN HIDRÁULICA.....	65
10.3	ZONIFICACION AMENZA POR INUNDACIÓN	68
11	CONCLUSIONES.....	70
12	RECOMENDACIONES	72
13	REFERENCIAS.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. A. Localización de Colombia. B. Localización departamento de Risaralda dentro de Colombia. C. Localización municipio den Santa Rosa de Cabal dentro de Risaralda. D. Localización de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. Fuente: Elaboración propia.	13
Figura 2. Curvas que muestran las relaciones del tamaño de grano con la velocidad de erosión crítica y fluvial. Fuente: Elorza (2008).....	19
Figura 3. Material arrastrado por el Río San Eugenio y asentamientos urbanos en las márgenes derecha e izquierda del río. Fuente: Elaboración Propia	22
Figura 4. Depósito de caída piroclástica en la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. Fuente: Elaboración propia.....	23
Figura 5. Depósitos coluviales margen izquierda del Río San Eugenio. Fuente: Elaboración propia	24
Figura 6. Depósito antrópico en la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal.	25
Figura 7. Mapa de zonas de riesgo de Santa Rosa de Cabal. Fuente: CARDER (2010).....	26
Figura 8. Manchas de inundación para los periodos de retorno de 2, 25 y 200 años en la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. Fuente: CARDER (2012).....	28
Figura 9. Barrios localizados en zonas críticas por inundación dentro del área urbana. Fuente: CARDER (2012).....	29
Figura 10. A. Dique construido sobre la margen del río San Eugenio. B. Dique construido sobre la margen la quebrada La Leona. Fuente: elaboración propia.	30
Figura 11. Fotos tomadas en campo de trabajo de recolección y verificación de información. Fuente: elaboración propia.....	32
Figura 12. Sistema de codificación de unidades hidrográficas. Fuente: IDEAM (2013).....	33
Figura 13. Esquema de jerarquización geomorfológica donde se proponen los rangos de clasificación para geomorfología. Fuente: Carvajal Perico (2012)	36
Figura 14. Valores referentes del coeficiente de rugosidad de Manning. Fuente: Chow et al. (1988).....	37
Figura 15. Flujograma con la metodología para analizar la amenaza por inundación. Fuente: elaboración propia.....	41
Figura 16. Categorización de la amenaza por inundación según tipos de daños. Fuente: IDEAM (2013).....	42
Figura 17. Cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal localizada sobre la subcuenca del río San Eugenio, municipio de Santa Rosa de Cabal. Fuente: Elaboración propia.....	45
Figura 18. Red de drenaje para la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 19. Mapa de geomorfología fluvial a escala 1:2000 para la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. Fuente: Elaboración propia.....	49
Figura 20. Perfil geomorfológico del río San Eugenio dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 21. Cauce aluvial del río San Eugenio, cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal.	

Fuente: Elaboración propia	51
Figura 22. A. Barra puntual localizada en el cauce del río San Eugenio, dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. B. Misma imagen editada donde la línea roja punteada delimita la geoforma fluvial. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 23. A. Barra longitudinal localizada en el cauce del río San Eugenio dirección aguas abajo, dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. B. Misma imagen editada donde la línea roja punteada delimita la geoforma fluvial. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 24. A. Terraza de acumulación localizada en la margen izquierda del cauce del río San Eugenio dirección aguas abajo, dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. B. Misma imagen editada donde la línea roja punteada delimita la geoforma fluvial. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 25. A. Escarpe de terraza de acumulación localizado en el cauce de la quebrada La Leona, dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. B. Misma imagen editada donde la línea punteada delimita la geoforma fluvial. Fuente: Elaboración propia.	53
Figura 26. A. Flujo volcánico aterrazado del río San Eugenio, dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. B. Misma imagen editada donde la línea negra punteada delimita la geoforma. Fuente: Elaboración propia.....	54
Figura 27. A. Escarpe de flujo volcánico aterrazado localizado en el cauce del río San Eugenio, dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. B. Misma imagen editada donde la línea punteada delimita la geoforma fluvial. Fuente: Elaboración propia.	55
Figura 28. Mapa de pendientes de la subcuenca del río San Eugenio en el área de la cabecera municipal. Fuente: Elaboración propia	56
Figura 29. DEM de la cabecera del municipio de Santa Rosa de Cabal que abarca el río San Eugenio, la quebrada El Silencio, la quebrada La Italia, la quebrada Santo Domingo, la quebrada Santa Helena y la quebrada La leona y el cual fue utilizado en la modelación hidráulica. Fuente: Catastro de Santa Rosa de Cabal, 2021.	57
Figura 30. Leyenda temática del mapa de coberturas. Fuente: Elaboración propia	58
Figura 31. Mapa de coberturas de la tierra utilizado para la asignación de los valores de Manning. Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 32. Mapa de áreas potencialmente inundables en la cabecera de Santa Rosa de Cabal Fuente: Elaboración propia	64
Figura 33. Alturas de lámina de agua para el periodo de retorno de 100 años. Fuente: Elaboración propia	66
Figura 34. Velocidades de flujo para el periodo de retorno de 100 años. Fuente: Elaboración propia	67
Figura 35. Zonificación de amenaza por inundación en la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. Fuente: Elaboración propia.....	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sitios afectados por fenómenos de tipo hidrológico en el municipio de Santa Rosa de Cabal	27
Tabla 2. Niveles de amenaza asociados a variables hidráulicas	42
Tabla 3. Cuencas, subcuencas y microcuencas identificadas para la cabecera municipal y el centro poblado Las Mangas, pertenecientes al municipio de Santa Rosa de Cabal.	44
Tabla 4. Valores de rugosidad de N Manning asignados a las coberturas del terreno utilizados en la modelación.	60
Tabla 5. Datos de caudales máximos para cada periodo de retorno del río San Eugenio.....	61
Tabla 6. Datos de caudales máximos para cada periodo de retorno de la quebrada Santa Helena.	61
Tabla 7. Datos de caudales máximos para cada periodo de retorno de la quebrada La Leona....	61
Tabla 8. Datos de caudales máximos para cada periodo de retorno de la quebrada La Italia.	61
Tabla 9. Datos de caudales máximos para cada periodo de retorno de la quebrada Santo Domingo.	61
Tabla 10. Datos de caudales máximos para cada periodo de retorno de la quebrada El Silencio.	62

1 INTRODUCCIÓN

Los estudios de gestión del riesgo son de vital importancia para la planificación territorial, ya que permiten identificar escenarios vulnerables a fenómenos de origen natural, como son las inundaciones. Además, su objetivo principal es minimizar la posibilidad de eventos adversos y disminuir al máximo los impactos negativos en caso de que se materialicen. La incorporación de estos estudios es fundamental para garantizar la sostenibilidad, así como para lograr una identificación temprana y una respuesta efectiva ante los riesgos potenciales. Adicionalmente, contribuyen a minimizar las pérdidas y maximizar las oportunidades, mejorando la capacidad de adaptación y la toma de decisiones en un entorno cambiante y volátil.

En el análisis de la amenaza por inundación, se consideran las condiciones y especificaciones establecidas en el decreto 1807 de 2014, donde se combinan métodos históricos, geomorfológicos e hidrológicos/hidráulicos para identificar y categorizar las áreas que pueden verse afectadas. La precisión de los datos y la integración de múltiples insumos son aspectos fundamentales para obtener un análisis completo y riguroso.

Este estudio se llevó a cabo en dos escalas, 1:2000 y 1:25000, y se evaluó el potencial de inundaciones en diferentes centros de población del municipio. Su objetivo principal es proporcionar información útil para la planificación y gestión del riesgo de inundaciones en la zona, con el fin de tomar medidas preventivas y asegurar la seguridad de la población y los recursos.

El presente trabajo se basa en el estudio denominado “Zonificación de amenaza por inundación a escala rural (1:25.000) y urbana (1:5.000) para el municipio de Santa Rosa de Cabal, Risaralda” desarrollado en la práctica académica realizada con la entidad CONSORCIO GC.

2 OBJETIVOS

2.1 General

Prestar servicios profesionales como geóloga practicante, para brindar apoyo al área de geología, geomorfología e hidrología, dando los alcances necesarios para la ejecución de la consultoría.

2.2 Específicos

- Apoyar la digitalización de los eventos históricos asociados a inundaciones desde bases de datos como DESINVENTAR, UNGRD, Bases de datos municipales, etc. y correlacionarlos con los resultados provenientes de la geomorfología en suelo rural y suelo urbano del municipio de Santa Rosa de Cabal en el departamento de Risaralda.
- Apoyar las labores de estimación de los caudales máximos con periodo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años de las cuencas localizadas en los municipios de Santa Rosa de Cabal.
- Apoyar la elaboración del mapa de subunidades geomorfológicas (1:25.000), y Elementos geomorfológicos (1:5.000) con énfasis en los ambientes fluviales y áreas potencialmente inundables para el municipio de Santa Rosa de Cabal en el departamento de Risaralda.
- Apoyar las labores de delimitación de cuencas aferentes al área de estudio y análisis morfométrico a nivel hidrológico II con aspectos hidrográficos y estimación de índices morfométricos como: área, perímetro, pendiente media, factor de forma, índice de compacidad, densidad de drenaje, índice de torrencialidad y tiempo de concentración para el municipio de Santa Rosa de Cabal en el departamento de Risaralda.
- Apoyar la realización del mapa de zonificación de amenaza por inundaciones para suelo urbano y rural para el municipio de Santa Rosa de Cabal en el departamento de Risaralda.

3 LOCALIZACIÓN

El municipio de Santa Rosa de Cabal está ubicado en el departamento de Risaralda, sobre el flanco occidental de la Cordillera Central en la vertiente oriental del río Cauca, entre alturas que van desde los 5200 m.s.n.m. en el Nevado de Santa Isabel hasta los 1400 en la vereda Las Mangas, con una extensión aproximada de 547 km²; limita por el norte con Chinchiná y Villamaría, por el sur con Pereira y Dosquebradas, por el oriente con el departamento del Tolima y por el occidente con Marsella y Dosquebradas (CARDER, 2020). La cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal posee una extensión de 7,6327 km² y se localiza al noroccidente del perímetro municipal (Figura 1).

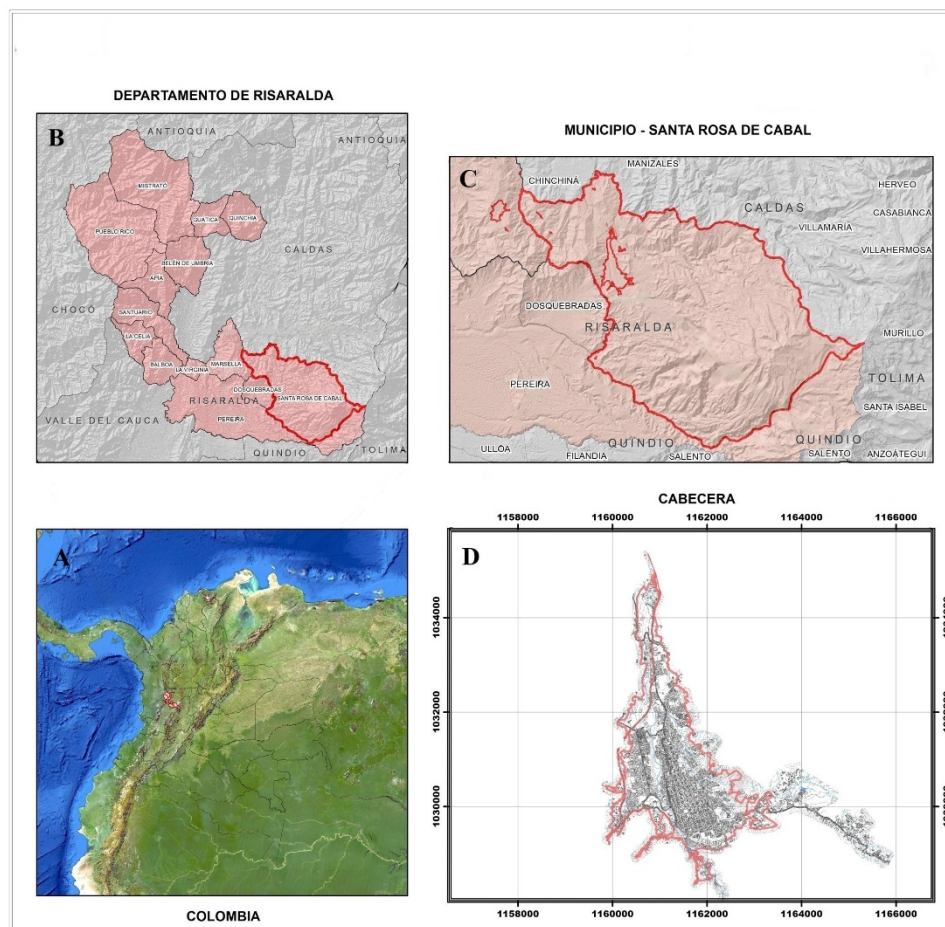


Figura 1. A. Localización de Colombia. B. Localización departamento de Risaralda dentro de Colombia. C. Localización municipio den Santa Rosa de Cabal dentro de Risaralda. D. Localización de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal.

Fuente: Elaboración propia.

4 MARCO NORMATIVO

En el presente capítulo se expone la normativa relacionada con el decreto 1807 de 2014 para desarrollar las actividades de gestión del riesgo con el fin de incorporarlas en los planes de ordenamiento territorial.

4.1 LEY 1523 DE 2012

Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD) y se dictan otras disposiciones. Esta es una de las leyes fundamentales en la gestión del riesgo colombiana, de esta ley se resalta principalmente el artículo 40, asociado a la incorporación de la gestión del riesgo en la planificación, es decir, los centros poblados deberán priorizar la elaboración de programas y proyectos en el plan de ordenamiento territorial (POT) para lograr un desarrollo seguro y sostenible de la gestión del riesgo.

4.2 LEY 388 DE 1997

Por la cual se modifica la planificación del desarrollo municipal propuesta en la ley 9 de 1989 y en la ley 2 de 1991.

De esta ley se resalta principalmente el artículo 8, asociado a la acción urbanística por la cual las entidades gubernamentales deberán tomar decisiones administrativas relacionadas con el ordenamiento del territorio. Se realizarán estudios técnicos que muestren la localización de lugares con mayor vulnerabilidad para el desarrollo de ciudades ordenadas.

4.3 DECRETO 1807 DE 2014

Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones.

Las disposiciones contenidas en este decreto establecen las condiciones y especificaciones mínimas para la elaboración de los estudios básicos de amenaza por inundación, movimientos en masa y avenidas torrenciales a ser incorporados de manera gradual en el nuevo POT.

De esta ley se resalta principalmente el artículo 9, asociado a estudios básicos de amenaza de inundación teniendo en cuenta las siguientes especificaciones: área de estudio, insumos (e.g. geomorfología, hidrología), alcance y productos.

5 MARCO TEÓRICO

Para el contexto de este trabajo se toma como referencia la ley 1523 de 2012 por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Para los efectos de esta ley las autoridades competentes deben dar a conocer la información sobre posibles riesgos y los proyectos que se realizan para su mitigación. Por consiguiente, en el artículo 4 se definen conceptos relacionados a la gestión del riesgo, para efectos de este trabajo se tomaron las siguientes definiciones:

- Amenaza: peligro de que un evento físico de origen natural o antrópico tenga lugar causando la pérdida de vidas u otros impactos en la salud asimismo en los bienes materiales.
- Vulnerabilidad: susceptibilidad física, económica y social que tiene una comunidad en caso de que una amenaza se presente.
- Desastre: es el resultado de una acción natural o antropogénica que al encontrar condiciones de vulnerabilidad altera las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad.
- Gestión del riesgo: planeación, ejecución y seguimiento de programas para conocer el riesgo con el fin de reducir o controlar las situaciones de desastre buscando generar una mejor calidad de vida.
- Intervención: proceso que pretende impedir que las áreas vulnerables estén expuestas ante posibles eventos peligrosos, buscando contribuir de manera anticipada a la localización, construcción y funcionamiento seguro de la comunidad.

En el decreto 1807 de 2014 son nombrados los principales fenómenos de origen natural geológico las avenidas torrenciales, los movimientos en masa y las inundaciones para la incorporación de los estudios de gestión del riesgo en el POT. Este trabajo se basa en el estudio del fenómeno por inundación.

Según el Glosario Hidrológico Internacional (OMN N° 385 2012) las inundaciones, se definen como el desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua y/o la acumulación de agua procedente de drenajes en zonas que normalmente no se encuentran anegadas. En la Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación que aparece en el diccionario de la Real Academia Española, una inundación, es la acción y efecto de inundar o cubrir los terrenos. De igual manera, se define como la sumersión temporal de terrenos normalmente secos, como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona determinada (IDEAM, 2017).

De acuerdo con Elorza (2008), los eventos meteorológicos como la precipitación de intensas lluvias durante un tiempo prolongado, son la mayor causa de las inundaciones fluviales, cuando estas exceden la capacidad de infiltración en el terreno la escorrentía aumenta rápidamente, sin embargo, se conocen otras causas que generan las condiciones propicias para que ocurra este fenómeno (e.g. nieve/deshielo, bloques de hielo, deslizamientos, rotura de presas y trabajos de control) pero de todas estas causas, el clima expresado en términos de temperatura y precipitación, junto con la cubierta vegetal ejercen el control fundamental de la mayoría de las inundaciones.

En el Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica en adelante POMCA, del río Otún, de acuerdo con las características de los ríos y la duración de las lluvias, clasifican las inundaciones en súbitas o torrenciales, y lentas o aluviales (CARDER, 2017).

Las inundaciones súbitas: suelen producirse en ríos de montaña o en corrientes cuyas áreas de drenaje presentan fuertes pendientes y suelen ser producidas por crecidas repentinas y de corta duración (minutos a horas). De acuerdo con la concentración de sólidos, las crecientes súbitas se pueden clasificar en típicamente hidrológicas cuando se habla de concentraciones menores del 15%, soluciones hiperconcentradas cuando la concentración de sólidos está entre 15 y 70 % aproximadamente, por encima de eso no hay verdaderamente flujo, sino desplazamiento de sólidos húmedos, o lo que se denomina flujos de detritos.

Las inundaciones lentas: se producen por el desbordamiento del cauce anegando áreas planas aledañas al mismo y suelen ser originadas por lluvias progresivas y de larga duración. Teniendo en cuenta lo anterior, las crecientes súbitas típicamente hidrológicas y las soluciones hiperconcentradas se diferencian por la concentración de sedimentos; esta se relaciona con la disponibilidad del material y la capacidad de arrastre del sedimento que se origina por las velocidades del agua y del sedimento (Figura 2), puesto que, cuando la velocidad de sedimentación es baja y la turbulencia fuerte, la partícula estará en suspensión más tiempo y será transportada corriente abajo por el flujo de agua. La velocidad está principalmente controlada por el gradiente o pendiente del cauce fluvial, cuanto mayor sea la inclinación del gradiente, mayor será la energía disponible para el flujo de la corriente (Lutgens & Tarbuck, 2010).

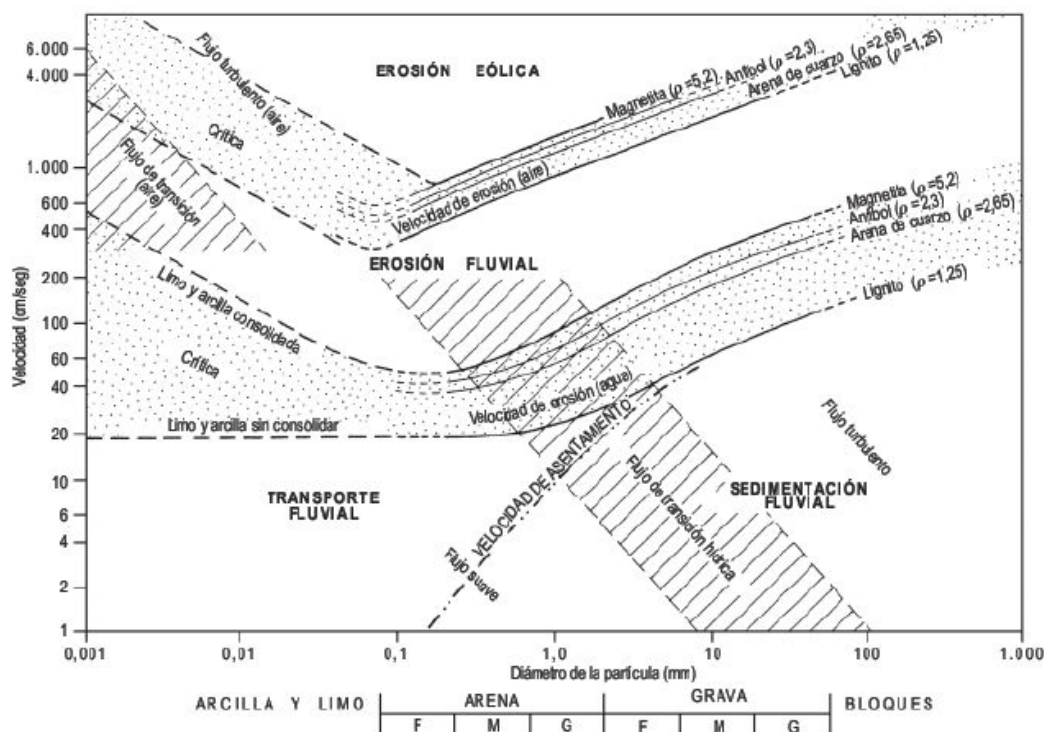


Figura 2. Curvas que muestran las relaciones del tamaño de grano con la velocidad de erosión crítica y fluvial.

Fuente: Elorza (2008)

Según Carvajal Perico (2012), los ambientes fluviales corresponden al conjunto de geformas generadas a partir de la naturaleza erosiva y deposicional en los sistemas de corrientes de agua tales como ríos, arroyos, quebradas, lagos y lagunas.

Una cuenca hidrográfica es una unidad morfológica que es delimitada por una divisoria de agua donde convergen aguas superficiales dirigidas al cauce, estas se consideran como unidades hidrográficas básicas de análisis; las cuales se identifican y delimitan para encontrar las principales subcuencas y microcuencas dentro de la zona de influencia teniendo en cuenta que estas medidas son indivisibles.

6 MARCO GEOLÓGICO

La litología de la zona de estudio consiste en depósitos de caída piroclástica, fluviovolcánicos y laháricos, con origen en la cadena volcánica Ruiz-Tolima y el basamento asociado a rocas ígneas intrusivas del Stock Grabrodiorítico de Santa Rosa. Los depósitos de caída piroclástica cubren gran parte de la zona y varían en espesor y granulometría dependiendo de la cercanía de la fuente.

A continuación, se describen las unidades geológicas que constituyen la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal.

6.1 STOCK GABRODIORÍTICO DE SANTA ROSA

Conforma el basamento del área de estudio cubriendo un área aproximada de 28 km² (González, 1996). Fue descrito inicialmente por Mosquera (1978) como Anfibolita Saussurítica de Chinchiná y por Gómez et al. (2004) como Stock Metagabroico de Chinchiná Santa Rosa que corresponde a rocas de tonalidad verde a gris verdoso, masivas, de grano medio a fino, con bandeamiento a veces plegado aparentemente clástico producido por el Sistema de Fallas Romeral. A nivel mineralógico, se encuentra constituido por plagioclasa intermedia-cálcica, anfíboles, piroxenos, biotita y cuarzo en cantidades menores al 5%. Se logra evidenciar, interstratificación del gabro y orientación de los minerales, además agregan que a partir de estudios de sección delgada se clasifican como metagabros.

Aunque no existen dataciones se ubica como parte del Complejo Arquía asociándolo a su edad Cretácica, esta unidad es ubicada como parte de un complejo ofiolítico ya que según los diagramas de discriminación tectónica el origen de este stock ocurrió en una zona de dorsal oceánica (Gómez et al., 2004).

6.2 FORMACIÓN SANTA ROSA

En la unidad se reconocen dos capas amalgamadas, la primera corresponde a un macizo ligeramente endurecido con fragmentos de rocas metamórficas y volcánicas con restos de madera con una edad aproximada > a 40000 años según Toro – Hermelín (1991, mencionado por Pulgarín et al., 2020). La segunda, es un lahar que corresponde a una capa más alterada con presencia de fragmentos volcánicos con clastos densos de textura porfídica y piedra pómez redondeada y fragmentos metamórficos (Pulgarín et al., 2020).

6.3 FLUJOS FLUVIOVOLCANICOS (DEPÓSITOS TORRENCIALES) Y FLUJOS DE LODO

La emisión de productos piroclásticos de los volcanes del complejo Ruiz-Tolima se transportan en medio acuoso para posteriormente depositarse a lo largo del cauce y zonas de inundación, constituyendo geoformas de fácil identificación en el área de estudio (González,1996).

En general estos depósitos se encuentran en gran parte de la cabecera municipal, presentando una geomorfología suavizada por depósitos de caída piroclástica. En las márgenes del río San Eugenio se aprecia gran cantidad de rocas con sobre tamaño, lo que evidencia su capacidad de arrastre y su potencial amenaza por avenidas torrenciales.

Su edad Pleistoceno tardío - Holoceno representa vestigios de la actividad volcánica Cuaternaria que se extiende hasta hoy en el Complejo Volcánico Ruiz - Tolima (González,1996).



Figura 3. Material arrastrado por el Río San Eugenio y asentamientos urbanos en las márgenes derecha e izquierda del río.

Fuente: Elaboración Propia

6.4 DEPÓSITOS DE CAIDA PIROCLÁSTICA

Productos piroclásticos que se originan a partir de la acumulación de partículas que recubren la topografía (Vásquez et al., 2010). Estos depósitos se consideran primarios ya que sus facies indican acumulación y predominancia de fragmentos piroclásticos que tienen origen en una erupción volcánica (Murcia et al., 2013).

Su edad Pleistoceno tardío - Holoceno corresponden a vestigios de la actividad volcánica Cuaternaria que se extiende hasta hoy en el Complejo Volcánico Ruiz - Tolima (González, 1996).



Figura 4. Depósito de caída piroclástica en la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal.
Fuente: Elaboración propia

6.5 DEPÓSITOS ALUVIALES RECIENTES

Geoforma con topografía plana que corresponde a las zonas de acumulación del río San Eugenio, el aporte del material y su tamaño está relacionado a los cambios de energía en la corriente generando procesos de acumulación en los márgenes de los ríos, zonas bajas o llanuras (Estrada et al., 2001).

Los procesos de socavación de las orillas y la profundización de los cauces sobre estos depósitos constituyen procesos de inestabilidad en los márgenes de las quebradas y del río San Eugenio (INGEOMINAS, 2000).

6.6 DEPÓSITOS COLUVIALES

Depósitos gravitacionales de roca y suelo de carácter superficial y poca extensión areal, que tienden a suavizar levemente la topografía incluyendo flujos de lodo que en la zona están cubiertos por capas de cenizas volcánicas (INGEOMINAS, 2000).



Figura 5. Depósitos coluviales margen izquierda del Río San Eugenio.

Fuente: Elaboración propia

6.7 DEPÓSITOS ANTRÓPICOS

También llamados llenos o rellenos que están constituidos por escombros o suelos removidos los cuales se depositan en laderas o depresiones. En la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal son utilizados para procesos de urbanización y agrandar así las áreas construibles, se extienden principalmente sobre la margen izquierda del río San Eugenio, sobre las laderas o

vertientes, han cambiado bruscamente la morfología del terreno y son susceptibles a fenómenos como flujos de lodo (Vásquez et al., 2010).



Figura 6. Depósito antrópico en la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal.

Fuente: Elaboración Propia

7 ANTECEDENTES

Para determinar las zonas de riesgo geotécnico, geomorfológico, e hidrológico se consultó el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) a través del uso de información de estudios realizados por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER). Estos exponen las principales áreas expuestas a inundación a lo largo del río San Eugenio y otros afluentes de la zona.

Esta entidad realizó un estudio de diagnóstico de riesgos ambientales del municipio de Santa Rosa de Cabal, basado en información de los sitios afectados y observaciones hechas en campo para diferenciar entre los riesgos hidrogeológicos, geotécnicos y su combinación, haciendo su descripción en los sectores expuestos a amenaza (Figura 7).

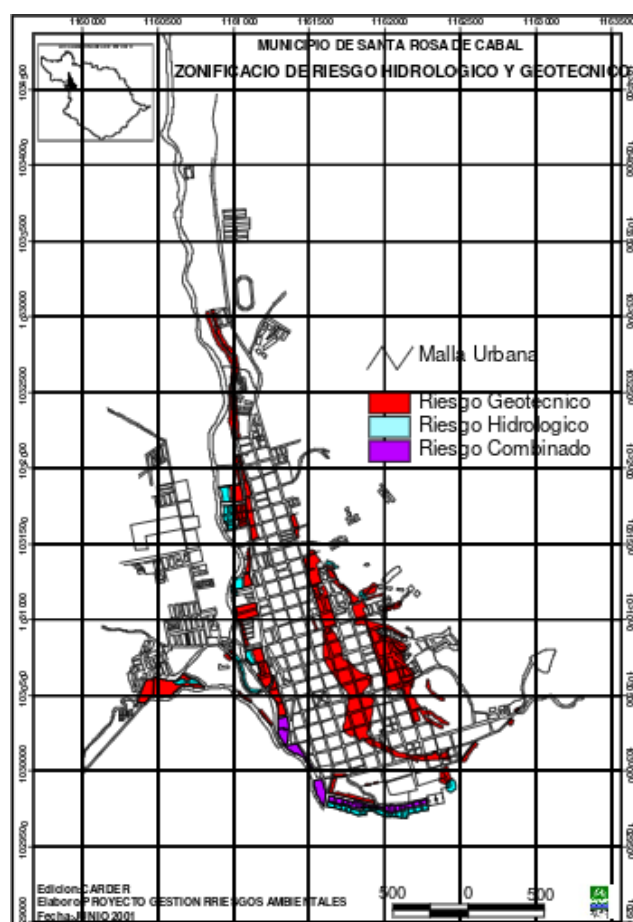


Figura 7. Mapa de zonas de riesgo de Santa Rosa de Cabal.

Fuente: CARDER (2010)

Dentro de las principales amenazas hidrogeológicas identificadas en el estudio de la CARDER se encuentran las inundaciones por aumento del caudal del río San Eugenio y sus afluentes (**Tabla 1**), estos asociados a procesos de socavación lateral, los principales barrios expuestos a amenazas de este tipo son, Barrios Unidos del Sur (Córdoba, La Milagrosa, La Suiza y La Unión), Las Escaleras, Pio XXII, San Eugenio, La Estación, Villa Alegría, Trinidad y San Vicente.

Tabla 1. Sitios afectados por fenómenos de tipo hidrológico en el municipio de Santa Rosa de Cabal

Barrio y/o sectores	TIPO DE AMENAZA	VULNERABILIDAD FÍSICA	TIPO DE RIESGO
Barrios Unidos del Sur (Córdoba, La Milagrosa, La Suiza y La Unión)	* Por inundación. * Aumento de los caudales del río San Eugenio y Quebrada La Leona.	* Viviendas localizadas sobre partes bajas (llanuras de inundación de estas corrientes). * Estructura tipo de las viviendas inadecuada para zonas con influencia de corrientes.	HIDROLÓGICO
LAS ESCALERAS	* Por inundación * Debido al aumento de las corrientes del río San Eugenio y la quebrada La Leona	* Inadecuado manejo de aguas de escorrentía * Casas localizadas muy cerca de corrientes de agua permanentes	HIDROLÓGICO
Pío XXII	Por inundación. Ocasionada por crecientes de la quebrada Santa Elena y el río San Eugenio	* Viviendas localizadas junto o muy cercanas a las corrientes mencionadas * La estructura constructiva no es acorde a la ubicación de la vivienda	HIDROLÓGICO
San Eugenio, La Estación y Villa Alegría	Por inundación debido al aumento del caudal del río San Eugenio.	* Viviendas ubicadas en la margen derecha del río San Eugenio * Algunas de ellas ubicadas en sectores llanos muy cerca al río cuya vivienda tipo no es acorde a su ubicación. * Otras casas se encuentran sobre márgenes activos del río las cuales están afectadas por procesos de socavación lateral.	HIDROLÓGICO
Trinidad y San Vicente	Inundación por aumento de caudal del río San Eugenio	Casas ubicadas en sectores llanos junto al río San Eugenio	HIDROLÓGICO

Fuente: CARDER (2020)

CARDER (2012) presenta un análisis de amenaza por inundaciones como una síntesis de los estudios del inventario de viviendas localizadas en zonas de riesgo y de la evaluación geológica y geomorfológica de la cuenca del río San Eugenio, haciendo referencia al área urbana y suburbana del municipio. Esta entidad menciona que se realizaron análisis hidrológicos e hidráulicos junto a la Universidad Nacional sede Manizales para diferentes periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años) (Figura 8).

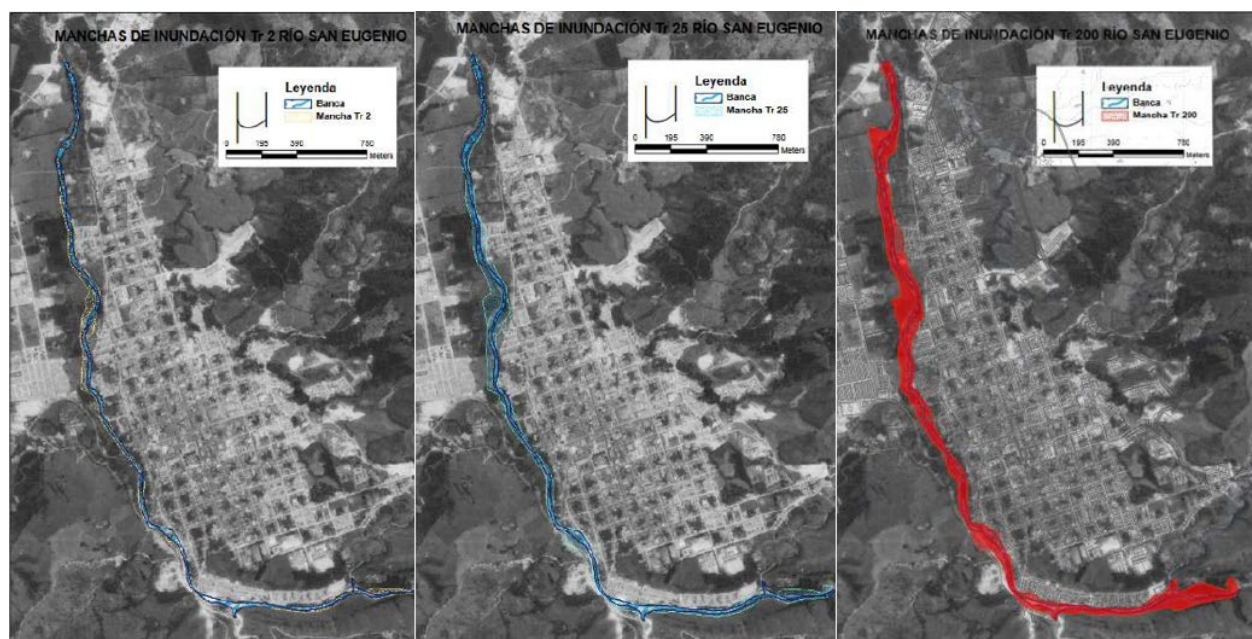


Figura 8. Manchas de inundación para los periodos de retorno de 2, 25 y 200 años en la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal.

Fuente: CARDER (2012).

Esta actualización del inventario de viviendas en riesgo presenta los sitios expuestos a amenaza por inundación del río San Eugenio como, Barrios Unidos del Sur localizada en la margen derecha del río, Plaza de Ferias de Santa Rosa sobre la margen izquierda y los barrios San Vicente, San Eugenio, La Estación, Villa Alegría y La Trinidad que están en cercanías a sus márgenes (CARDER, 2012). Además, se han identificado zonas críticas donde el cauce del río San Eugenio afecta las viviendas del municipio ya sea por su dinámica natural en las llanuras o por obstrucciones del cauce debido a obras que lo ocupan, logrando hacer una lista de viviendas

para reubicación y/o mitigación. La localización de algunos de los barrios en zonas críticas por inundación se muestra en Figura 9.



Figura 9. Barrios localizados en zonas críticas por inundación dentro del área urbana.
Fuente: CARDER (2012).

Según CARDER (2012) para la mitigación del riesgo se construyó sobre la margen izquierda del cauce del río San Eugenio y la quebrada La Leona un dique longitudinal en concreto reforzado (Figura 10).



Figura 10. A. Dique construido sobre la margen del río San Eugenio. B. Dique construido sobre la margen la quebrada La Leona.

Fuente: elaboración propia.

En el estudio de “Zonificación de amenazas geológicas para los municipios del eje cafetero afectados por el sismo del 25 de enero de 1999” elaborado por INGEOMINAS & FOREC (2000), se realizan mapas de susceptibilidad a la inundación a escala 1:50000 donde se delimitan las zonas que pueden ser afectadas por este fenómeno debido a crecientes extraordinarias de los cauces, este análisis tuvo como fundamento los reportes de eventos de inundación a escala 1:25000 obtenidos de las entidades competentes.

8 METODOLOGÍA

La metodología empleada se basó en los fundamentos definidos en el decreto 1807 de 2014 para realizar los estudios básicos de amenaza por inundación, así como en la guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales por sus siglas IDEAM.

Con el propósito del entendimiento de los conceptos empleados en la metodología se describe cada uno.

8.1 DOCUMENTACIÓN

Con el fin de definir las potenciales amenazas por inundación en la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal, se incorporan los resultados más importantes obtenidos del procesamiento y análisis de la información existente que cuenta con la delimitación y zonificación de la amenaza por inundación, estos estudios se soportan en registros históricos y modelación hidrológica hidráulica siendo la base para la identificación de sitios que han sufrido afectaciones de tipo hidrológico.

Se realizó la recopilación de información de estudios previos sobre el fenómeno de inundación en la zona de interés, buscando en la documentación existente para identificar de forma ilustrativa y dinámica los escenarios de riesgo; utilizando esta información de manera comparativa para realizar un consolidado y fortalecer los antecedentes.

8.2 TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo es fundamental para la recopilación de datos, utilizados para analizar la composición, estructura, procesos geológicos de un lugar determinado. En la zona de estudio se realizaron labores de campo con el objetivo de recolectar nuevos datos y verificar la información encontrada en la etapa de documentación, como también los resultados del procesamiento con herramientas de Sistemas de Información Geográficas por sus siglas SIG.

Se realizaron actividades topográficas, de mapeo geológico, toma de muestras, medición de estructuras de erosión y depositación de sedimentos, registro de datos hídricos; estos insumos permitieron identificar y describir las características del área con el fin de llegar a una interpretación y corroboración, así como poder relacionar la información obtenida con los conceptos y los resultados encontrados para obtener una comprensión más completa de la geología de la zona de estudio (Figura 11).



Figura 11. Fotos tomadas en campo de trabajo de recolección y verificación de información.
Fuente: elaboración propia

8.3 ANALISIS DE INFORMACIÓN A TRAVÉS DE SIG

Para el presente trabajo se utilizaron herramientas SIG las cuales permiten analizar, reunir y gestionar datos, realizando correlaciones de insumos que posibilitan el reconocimiento y descripción de la información obtenida. Se utilizaron softwares como ArcGIS y Google Earth, con los cuales se trabajó información geoespacial y geográfica que se recolecto de la zona de

estudio, con esta información se realizó el tratamiento de diferentes insumos, como el análisis de imágenes satelitales y datos espaciales, digitalización de cauces, cuencas, geoformas y datos vectoriales, modificación de sistemas de coordenadas, operaciones cartográficas, generación y procesamiento de datos ráster, procedimientos topológicos, gestión de datos de atributos y realización de mapas. Todas estas operaciones de procesamiento se emplearon a fin de realizar el análisis y relación de los diferentes datos obtenidos para la toma de decisiones de los resultados obtenidos.

8.3.1 ANÁLISIS HIDROGRÁFICO

La zonificación de unidades hidrográficas se basó en los procedimientos establecidos inicialmente en la resolución 0337 en 1978 por el HIMAT (hoy IDEAM) en ese entonces, iniciaron la tarea de zonificar el país en planos cartográficos análogos con base en la cartografía oficial suministrada por el IGAC (IDEAM, 2013) (Figura 12).



Figura 12. Sistema de codificación de unidades hidrográficas.

Fuente: IDEAM (2013)

Para el análisis y selección de las unidades básicas, se tomó la zonificación de unidades hidrográficas realizada a escala 1:25000, elaborada teniendo como referencia el POMCA del Río

Campoalegre y otros directos al Cauca, con el fin de encontrar los puntos que necesitan estudios más detallados para examinar a una escala 1:2000 e identificar y delimitar las subcuencas o microcuencas. Esto se llevó a cabo a partir del reconocimiento de las principales redes de drenajes en la zona de estudio, por medio de procesos efectuados por SIG con elementos como el modelo de elevación digital en adelante DEM y las imágenes satelitales donde se tomó como punto de entrega la entrada de las corrientes hídricas.

8.3.2 ANÁLISIS DE EVENTOS HISTÓRICOS

La caracterización histórica de amenazas consistió en identificar eventos que han causado situaciones de emergencia y riesgos en un área de estudio. En este trabajo, se recopiló información sobre eventos históricos de inundación para identificar las zonas afectadas y reconstruir la extensión de las inundaciones. Durante el proceso de recopilación de información para la caracterización histórica de amenazas de inundación, se revisaron registros históricos, registros de entidades locales e informes técnicos y científicos, encontrados en bases de datos de eventos asociados a inundaciones como lo son: DEISNVENTAR, Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Posteriormente, se verificó la información recopilada para seleccionar los datos más adecuados que sirvieron como insumo en la incorporación de la gestión del riesgo enfatizada hacia el ordenamiento territorial. Estos datos, se clasificaron por periodo de años de ocurrencia y su localización con el fin de reconocer los sitios más afectados, con ellos se realizó una verificación en campo con el propósito de zonificar y delimitar las amenazas por inundación.

Finalmente, el análisis de estos registros permitió espacializar los eventos de inundaciones, teniendo en cuenta la ocurrencia propuesta en tres rangos; menor a 5 años, entre 5 y 15 años, y mayor a 15 años. Se utilizó el software ArcGIS para crear una salida cartográfica

que muestra la extensión de las inundaciones y las zonas más afectadas. Se establecieron tres categorías de densidad de eventos, que son: baja densidad para lugares con inventario de un registro, densidad media para lugares con dos registros y alta densidad para lugares con tres eventos en adelante. Esta información fue útil para identificar las áreas más vulnerables y tomar medidas preventivas para reducir el riesgo de inundaciones en el futuro.

8.3.3 ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO

De acuerdo con (Varón Gutiérrez, S. D., & Vargas Cuervo, G., 2019; Aguilar, Bedoya y Hermelin 2007; Flórez y Suavita Bejarano 1997), se conoce que las geoformas de origen fluvial, por su morfología y distribución espacial tienen una mayor probabilidad para presentar inundaciones, constituyendo una amenaza por desbordamiento natural del cauce y socavación lateral de los mismos. Para el propósito de este trabajo se incluyó el ambiente antrópico, ya que modifica el terreno favoreciendo el desbordamiento de los cauces circundantes.

Teniendo en cuenta que este trabajo se realizó en escala 1:2000 el análisis se centró en identificar las áreas potencialmente inundables relacionadas con la dinámica del río San Eugenio, considerado como el principal responsable del modelamiento de las subunidades de ambiente fluvial dentro de las unidades básicas de análisis. A partir del DEM se analizaron las características del terreno como el relieve relativo y pendientes, identificando las pendientes relativamente planas (inferiores a los 8°) ya que permiten una movilización lateral del material circundante y favorecen los procesos de inundación.

Carvajal Perico (2012), propone un esquema de jerarquización para la clasificación de geoformas (Figura 13) con el cual se clasificó las geoformas encontradas en la zona según la escala de trabajo.

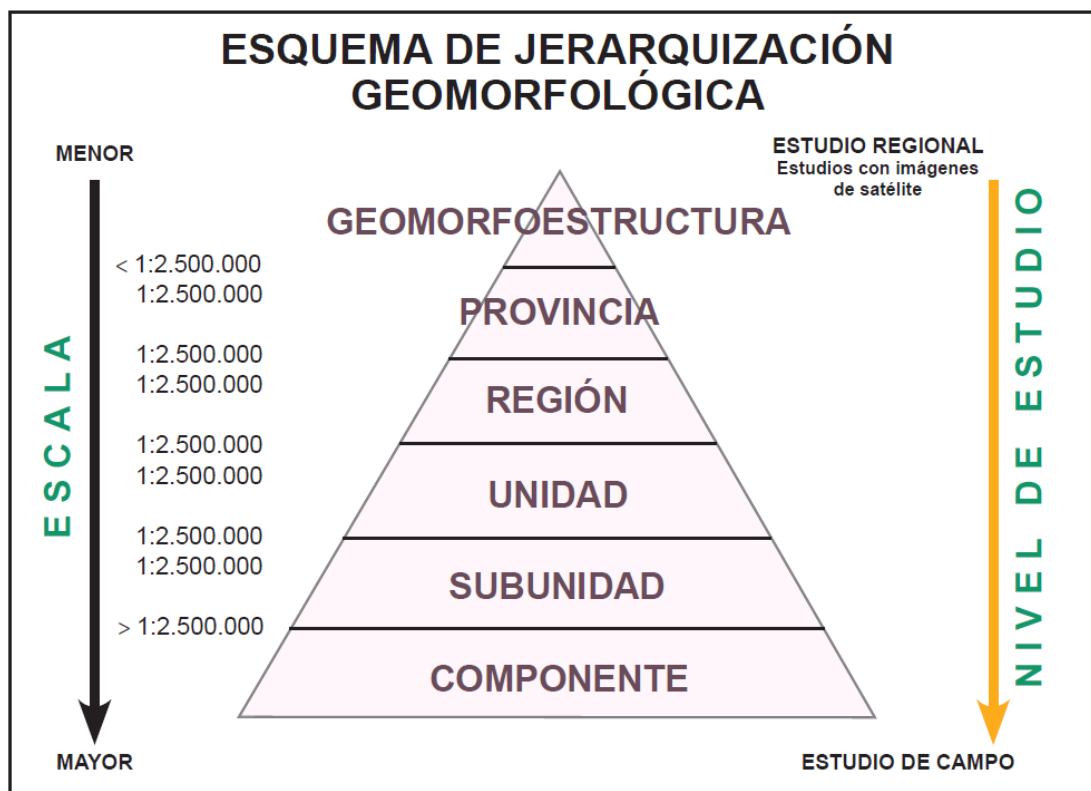


Figura 13. Esquema de jerarquización geomorfológica donde se proponen los rangos de clasificación para geomorfología.

Fuente: Carvajal Perico (2012)

8.3.4 ANÁLISIS MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL (DEM)

Se obtuvo un DEM de 12.5 m de resolución espacial del satélite ALOS (Advanced Land Observation Satellite) de Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), a partir de sensor de radar de apertura sintética PALSAR, posteriormente se realizó una corrección de este para llenar vacíos de información que pueda haber. Con el procesamiento del DEM se establecieron las direcciones de flujo de las aguas y las zonas de acumulación de flujo para la unidad hidrográfica a escala 1:25000 y se delimitó la cuenca del río San Eugenio.

En el trabajo a escala 1:2000 se utilizó un DEM de 1 m de resolución espacial, el cual fue obtenido a partir del procesamiento de información primaria, según el ráster condicionado, se

calculó los drenajes y su orden dando como resultado una red de drenaje, también con este se analizaron variables morfométricas del terreno como relieve relativo y pendientes que permitieron identificar las formas del terreno modeladas por la dinámica de los cauces.

Para trazar la geometría del cauce del río San Eugenio dentro la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal; además para realizar su modelación hidráulica, se utilizó el DEM de 1 m de resolución espacial.

8.3.5 ANÁLISIS COEFICIENTE DE RUGOSIDAD N MANNING

Este coeficiente expresa la resistencia creada por donde fluye el cauce en los lados y el fondo del canal considerando la cobertura de estas zonas, es por esto que condiciona la velocidad de flujo en la modelación. Para hallar el coeficiente se toman los datos que tengan características similares a la corriente de interés, teniendo en cuenta los valores recomendados por Chow et al. (1988) (Figura 14).

Partiendo del conocimiento del terreno se asigna el coeficiente de rugosidad a cada cobertura del terreno tanto en el canal como en las áreas potencialmente inundables, ya que son las capas más superficiales y con mayor resistencia al flujo.

Superficie	Condiciones			
	Perfectas	Buenas	Regulares	Malas
Canales y Zanjas				
Canales revestidos con concreto	0.012	0.014*	0.016*	0.018
En tierra, alineados y uniformes	0.017	0.020	0.0225	0.025*
En roca, lisos y uniformes	0.025	0.030	0.033*	0.035
En roca, con salientes y sinuosos	0.035	0.040	0.045	
Sinuosos y de escurrimiento lento	0.0225	0.025*	0.0275	0.030
Dragados en tierra	0.025	0.0275*	0.030	0.033
Con lecho pedregoso y bordos de tierra, enhierbados	0.025	0.030	0.035*	0.040
Plantilla de tierra, taludes ásperos	0.028	0.030	0.033	0.035
Corrientes naturales				
1. Limpios, bordos rectos, llanos, sin hendiduras ni charcos profundos	0.025	0.0275	0.030	0.033
2. Igual a 1, pero con algo de hierbas y piedra	0.030	0.033	0.035	0.040
3. Sinuoso, algunos charcos y escollos limpios	0.033	0.035	0.040	0.045
4. Igual a 3, de poco tirante con pendiente y sección menos eficientes	0.040	0.045	0.050	0.055
5. Igual a 3, algo de hierba y piedras	0.035	0.040	0.045	0.050
6. Igual a 4, secciones pedregosas	0.045	0.050	0.055	0.060
7. Ríos perezosos, cauce enhierbado o con charcos profundos	0.050	0.060	0.070	0.080
8. Cauces muy enhierbados	0.075	0.100	0.125	0.150

Figura 14. Valores referentes del coeficiente de rugosidad de Manning.

Fuente: Chow et al. (1988)

8.3.6 ANÁLISIS CAUDALES MÁXIMOS POR PERIODOS DE RETORNO

Variable hidrológica cuantificable que se refiere a la cantidad de agua que pasa por una sección transversal del cauce en un tiempo establecido mostrando la capacidad de escurrimiento de una cuenca ante eventos de precipitación. Permite conocer la respuesta hidrodinámica del cauce y es de gran importancia para la planificación del territorio ya que al utilizar los caudales máximos para diferentes periodos de retorno se puede evaluar y zonificar las amenazas asociadas a fenómenos de inundación.

El caudal puede ser medido por métodos directos o indirectos dependiendo de la calidad y cantidad de información técnica disponible, así como las condiciones del área de estudio. En la cabecera urbana de Santa Rosa de Cabal se usaron métodos indirectos en la cuantificación del cauce debido a la ausencia de estaciones limnigráficas que brindaran una medida directa del caudal en las corrientes hídricas en un periodo igual o superior a 30 años. Para la cuenca del río San Eugenio se recopiló información asociada a caudales máximos de diferentes bases de datos como el IDEAM, Diagnósticos de Riesgos, POMCAS y otros estudios hidrológicos.

Para obtener los caudales máximos de la quebrada Santa Helena, quebrada La Leona, quebrada La Italia, quebrada Santo Domingo y quebrada El Silencio; se tomaron los datos de caudal del río San Eugenio y se realizó un análisis matemático de proporcionalidad directa puesto que las fluctuaciones en la dinámica fluvial de este afectan directamente los tributarios, debido a que el río San Eugenio se toma como nivel base local de estas corrientes.

8.4 CORRELACIÓN DE INSUMOS PARA LAS AREAS POTENCIALMENTE INUNDABLES

Las áreas potencialmente inundables, se definen siguiendo las disposiciones contenidas en el decreto 1807 del 2014, como las zonas cercanas a cuerpos de agua que estén dentro de las

frangas de probables afectaciones por inundación. Para identificarlas, se realizó un análisis geomorfológico de subcuencas y microcuencas, considerando la dinámica fluvial y la intervención antrópica en el terreno. En este análisis se incluyen subunidades y componentes de otros ambientes geomorfológicos, como laderas, planicies aluviales y terrazas fluviales, buscando identificar las zonas de mayor riesgo de inundación, para poder tomar medidas preventivas y de gestión del riesgo.

La metodología se basa en la interpretación de imágenes satelitales y cartografía topográfica, así como en la realización de trabajos de campo para validar la información obtenida. Se utilizaron herramientas de análisis espacial y estadístico para procesar los datos y generar mapas de riesgo de inundación. En los siguientes ítems se describe el proceso metodológico para la construcción e identificación de las áreas potencialmente inundables.

8.5 MODELACIÓN HIDRÁULICA

Después de identificar las áreas potencialmente inundables y con el fin de determinar el comportamiento hidrodinámico de los cuerpos de agua se realizó la modelación hidráulica por medio de los softwares Hec-Ras e Iber, este pretende proveer información gráfica de la inundación esperada asociada a un caudal de periodo de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Este software tiene múltiples usos, siendo el principal en este trabajo la delineación de planicies de inundación, con el fin de lograr esto es necesario conocer las secciones transversales junto con la distancia entre cada una, la geometría del cauce, la condición de borde, los caudales y el coeficiente de Manning en cada fracción de las secciones. Si el flujo es supercrítico la condición de borde a usar es aguas arriba, si el flujo es subcrítico la condición de borde a usar es aguas abajo. En un flujo mixto se debe contar con una condición de borde aguas arriba y aguas abajo.

El modelamiento hidráulico se divide en dos etapas principales; la fase de preprocesamiento tiene como mayor insumo un DEM de muy buena resolución, ya que generalmente las áreas de estudio no cuentan con información batimétrica que permita tener un modelo hidrodinámico, se basa en ingresar al software parámetros como, DEM, geometría del cauce, coeficiente de rugosidad y el caudal máximo según el periodo de retorno.

La fase de post-procesamiento, presenta los resultados obtenidos en el software según los periodos de retorno utilizados, en esta etapa podemos evidenciar el cambio del cauce con relación a las características del terreno, el aumento de caudal y la variación de la dinámica fluvial en la zona de estudio. Del modelamiento hidráulico se obtienen las variables hidráulicas para la zonificación y categorización de la amenaza de inundación en términos de altura de lámina de agua y velocidad de flujo.

8.6 ZONIFICACIÓN AMENAZA POR INUNDACIÓN

Según las guías utilizadas las cuales son complementarias se han unificado parámetros históricos, geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos permitiendo la caracterización y zonificación de las inundaciones en el territorio. (Figura 15).

En el análisis de amenaza por inundación los principales componentes a evaluar son las áreas potencialmente inundables, la altura de lámina de agua y velocidad de flujo. Con el fin de identificar zonas que precisan análisis más detallados se elabora el mapa de áreas potencialmente inundables que tuvo como referencia la caracterización de los eventos históricos y la interpretación geomorfológica. Así mismo, se evalúan estas zonas con métodos de mayor resolución como modelos matemáticos, modelos digitales de elevación del terreno y comportamientos hidráulicos (Figura 15). Aunque se ha notado que estas metodologías son complementarias si existieran discrepancias entre ellas, tienen más peso los obtenidos a través de

las áreas potencialmente inundables debido a que evalúa factores físicos e históricos (IDEAM, 2017).

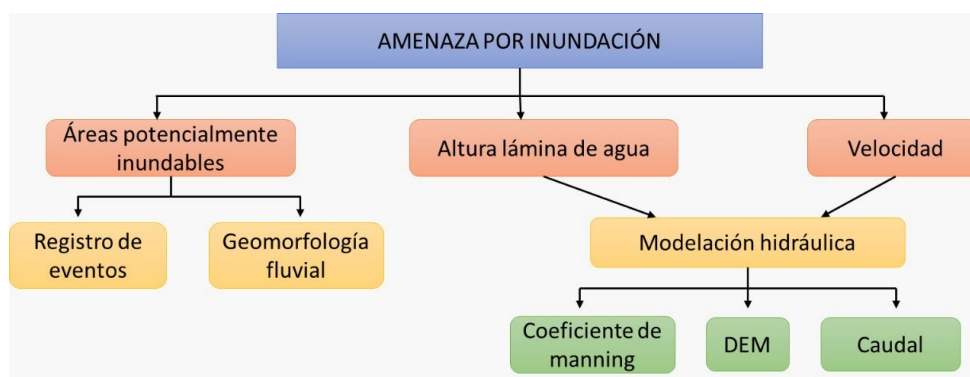


Figura 15. Flujograma con la metodología para analizar la amenaza por inundación.
Fuente: elaboración propia

Existen varios criterios para categorizar la amenaza por inundación, sin embargo, la gran mayoría de estos se encuentran soportados en el análisis conjunto de la velocidad del flujo y la altura de la lámina de agua. En general se deben reconocer tres condiciones hidráulicas diferentes en la zona de inundación: caminos preferentes del flujo de la inundación, zonas de almacenamiento y franjas de desborde (IDEAM, 2017).

Los resultados presentados se deben manejar con precaución ya que no se cuenta con información topobatimétrica que permita realizar una construcción exacta de la geometría del cauce que nos de los valores de altura de lámina de agua y velocidad de flujo esperados.

Por esta razón se tuvieron en cuenta los valores propuestos en el proyecto realizado por la Universidad Nacional con el IDEAM denominado “Zonificación de amenazas por inundación a escala 1:2000 y 1:5000 en áreas urbanas para diez municipios del territorio colombiano” en donde se caracterizó en función de la velocidad y profundidad del flujo dado que son los factores que se relacionan con la pérdida de vidas y daños graves (Figura 16).

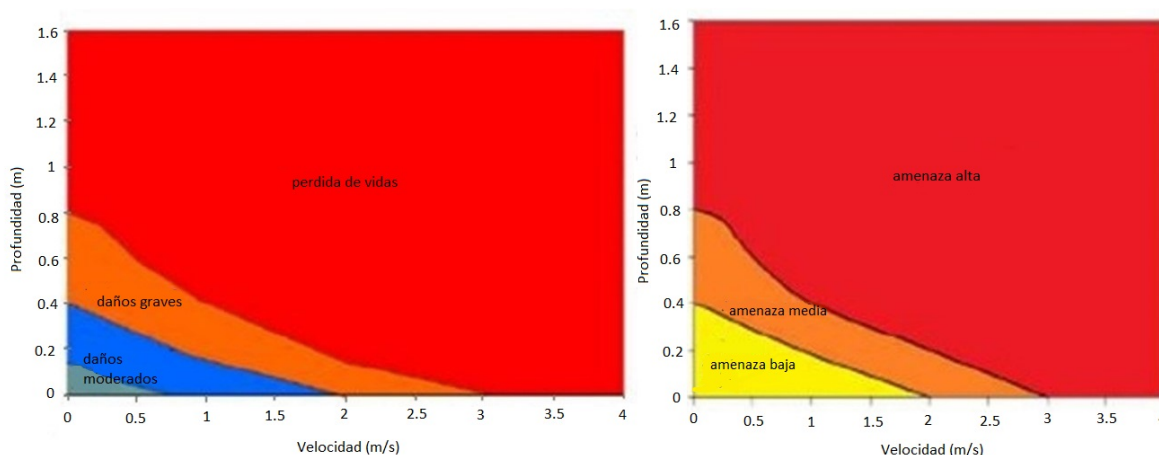


Figura 16. Categorización de la amenaza por inundación según tipos de daños.
Fuente: IDEAM (2013)

Con base en lo anterior los valores utilizados para categorizar la amenaza de inundación en el municipio se presenta en la **Tabla 2**, en los cuales solo se consideran dos categorías de amenaza, con el fin de restringir el uso de las zonas que se verían afectadas por el desbordamiento de los cauces asociado a crecientes con periodos de retorno de 100 años.

Tabla 2. Niveles de amenaza asociados a variables hidráulicas

Profundidad (m)	Niveles de amenaza para la profundidad	Niveles de amenaza	
$Z < 0.50$	Media	Media	Alta
$Z > 0.51$	Alta	Alta	Alta
Niveles de amenaza para la velocidad		Media	Alta
Velocidad (m/s)		$V < 2.0$	$V > 2.1$

Fuente: Elaboración propia a partir de valores tomados y modificados de IDEAM (2017).

Como se dijo anteriormente, los resultados de la modelación hidráulica se complementan con las áreas potencialmente inundables, tanto en la delimitación del área como en la altura de lámina de agua y velocidad de flujo, pero si existieran discrepancias, se procura emplear los

resultados obtenidos por medio de la geomorfología y datos históricos puesto que estos muestran un análisis más real de la amenaza por inundación (IDEAM, 2017).

9 RESULTADOS

En este capítulo se identifican las zonas que pueden ser afectadas por el fenómeno de inundación para la cabecera municipal del municipio de Santa Rosa de Cabal, siguiendo la propuesta metodológica expuesta anteriormente. Para el estudio de las áreas potencialmente inundables se tuvo en cuenta la geomorfología y la caracterización de los eventos históricos; por otra parte, la modelación hidráulica tuvo como principales insumos el DEM, el coeficiente de rugosidad N Manning y caudales máximos por periodo de retorno. Es importante resaltar que estas metodologías son complementarias para la zonificación de la amenaza.

9.1 HIDROGRAFÍA

Los resultados obtenidos a partir de procesos con software de SIG para la unidad hidrográfica nivel I y II se presentan en la zonificación obtenida para la subcuenca con influencia en la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal (**Tabla 3** y Figura 17).

Tabla 3. Cuencas, subcuencas y microcuencas identificadas para la cabecera municipal y el centro poblado Las Mangas, pertenecientes al municipio de Santa Rosa de Cabal.

NIVEL I (Cuenca)	NIVEL II (Subcuencas)	NIVEL III (Microcuencas)	Centro Poblado o Cabecera municipal
Río Campoalegre y otros directos al Cauca	Río San Eugenio	N/A	Cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal.

Fuente: Elaboración propia.

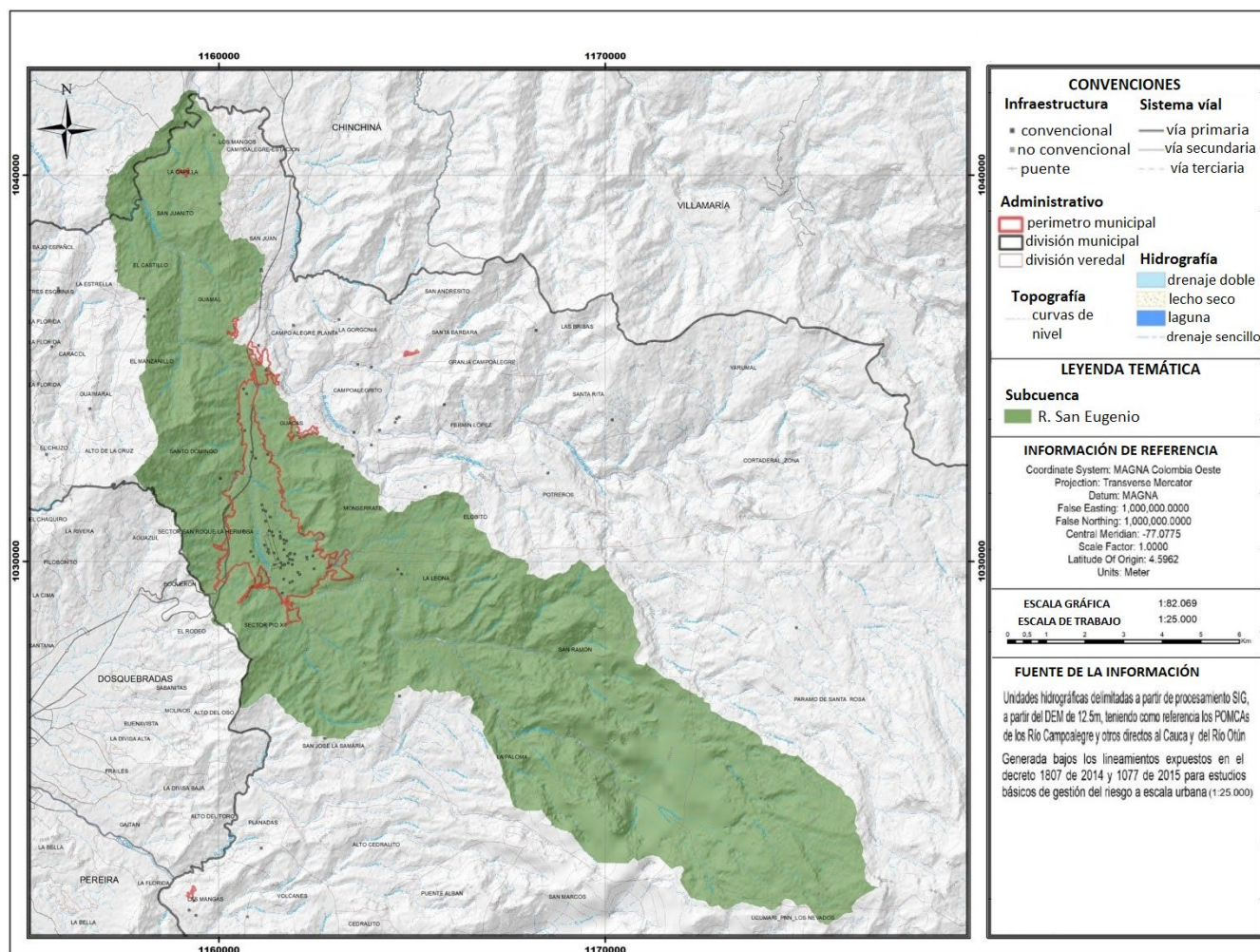


Figura 17. Cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal localizada sobre la subcuenca del río San Eugenio, municipio de Santa Rosa de Cabal.
 Fuente: Elaboración propia.

La red de drenaje de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal está compuesta en su mayoría por drenajes de primer y segundo orden que tributan a drenajes de orden superior, estos drenajes presentan una alta carga de sedimentos gruesos en la parte media a baja del cauce lo que posiblemente se relaciona con una alta capacidad de carga y arrastre, los drenajes tributan al río San Eugenio, de orden 4, con una longitud de 7735,46 metros en el área cartografiable y amplitud promedio de 16,80 metros influenciando de manera directa la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal, al atravesarla de sur a norte (Figura 18).

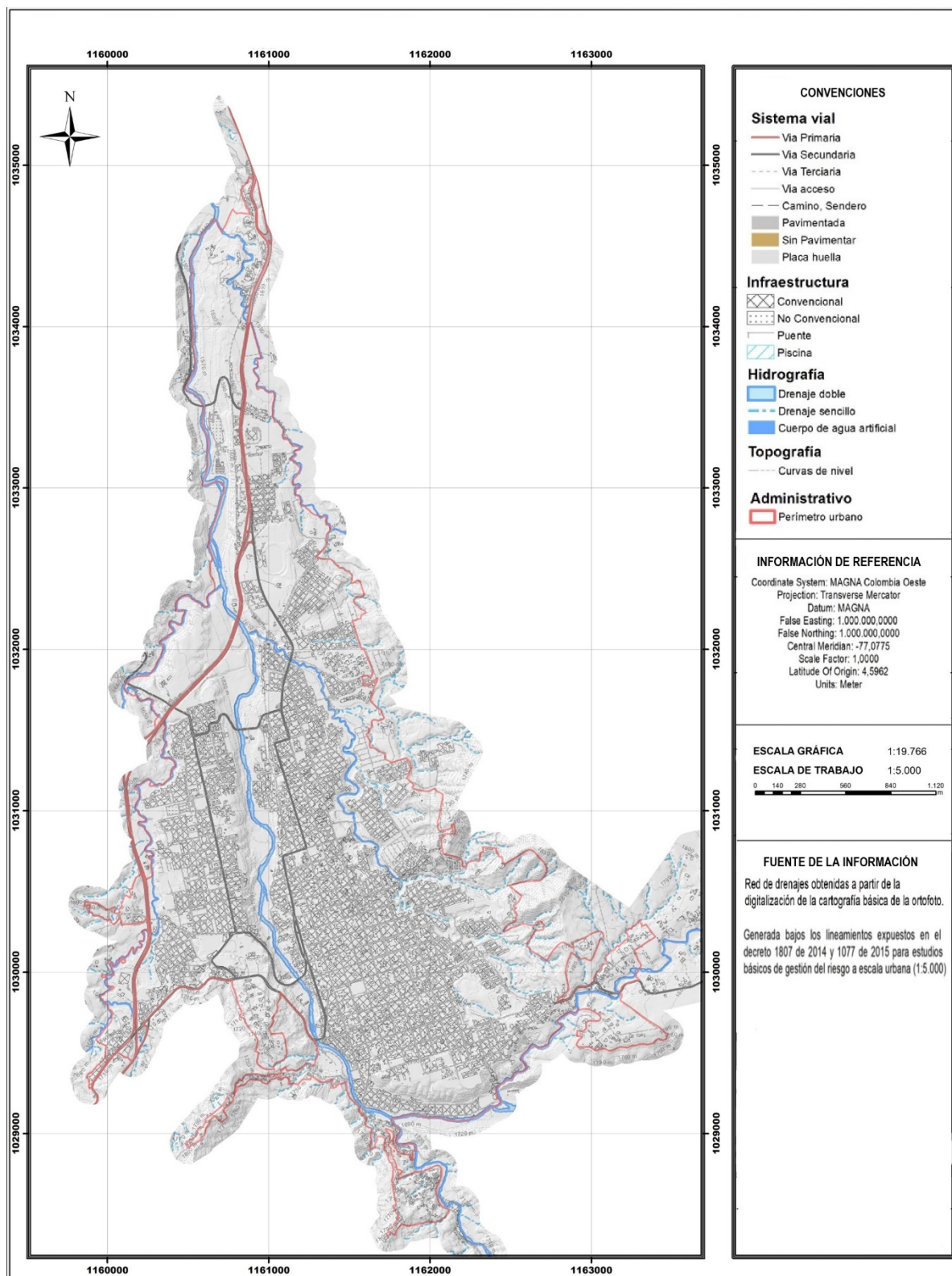


Figura 18. Red de drenaje para la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal.

Fuente: Elaboración propia.

9.2 CARACTERIZACIÓN EVENTOS HISTÓRICOS

Según la información de cada base de datos sobre los eventos históricos de inundación en la cabecera de Santa Rosa de Cabal, se toma cada registro para espacializar y analizar la cantidad de eventos. De los barrios que se encuentran dentro de la categorización de baja densidad se pueden distinguir:

- Barrio El Palmar, ubicado en la parte norte de la cabecera, zona en la cual los eventos tienen una ocurrencia entre 5 y 15 años, está relacionado con el cauce del río San Eugenio y su afluente la quebrada La Italia.
- Barrio La Eugenia ubicado hacia la parte noroccidente de la cabecera en el cual el evento tiene una ocurrencia entre 5 y 15 años, está relacionado con el cauce del río San Eugenio.
- Barrio La Italia ubicado en la parte nororiente de la cabecera en el cual el evento tiene una ocurrencia entre 5 y 15 años.

Los barrios que se encuentran dentro de la categorización de densidad media son:

- Barrio San Vicente, está ubicado en la parte centro-sur de la cabecera, uno de los eventos tiene una ocurrencia entre 5 y 15 años relacionado con el cauce del río San Eugenio.
- Barrio Nuevo Horizonte está ubicado en la parte centro-sur de la cabecera, uno de los eventos tiene una ocurrencia entre 5 y 15 años relacionado con el cauce del río San Eugenio.
- Barrio La Estación está ubicado en la parte centro-sur de la cabecera, el evento se relaciona con el cauce del río San Eugenio.

Por otra parte, los barrios que se encuentran dentro de la categorización de alta densidad son:

- Barrio La Trinidad ubicado hacia la parte norte de la cabecera limitando con el río San Eugenio al cual se asocian los eventos que tienen un reporte de 3 registros.

- Barrio San Vicente ubicado hacia el nororiente de la cabecera con un total de 3 eventos de los cuales uno tiene una ocurrencia entre 5 y 15 años, relacionado con el cauce del río San Eugenio.
- Barrio Córdoba está ubicado en la parte sur de la cabecera en el que se encuentran 3 reportes de eventos que están relacionados con el cauce del río San Eugenio.
- Barrio La Milagrosa está ubicado en la parte sur de la cabecera en el que se encuentran 3 reportes de eventos del que 1 tiene una ocurrencia mayor a 15 años y están relacionados con el cauce del río San Eugenio.
- Barrio La Unión está ubicado en la parte sur de la cabecera en el que se encuentran 3 reportes de eventos que están relacionados con el cauce del río San Eugenio.
- Barrio Suiza está ubicado en la parte sur de la cabecera en el que se encuentran 4 reportes por lo que es el barrio con mayor densidad de eventos del que 1 tiene una ocurrencia mayor a 15 años y están relacionados con el cauce del río San Eugenio.

9.3 GEOMORFOLOGÍA

Para comprender la dinámica del sistema fluvial en la zona, este trabajo fue realizado a escala 1:2000, la cual indica una jerarquización geomorfológica de nivel componente. Los principales componentes identificados dentro de la zona de estudio son, barras puntuales, barras longitudinales, cauce actual, terrazas de acumulación y escarpes de terrazas de acumulación (Figura 19).

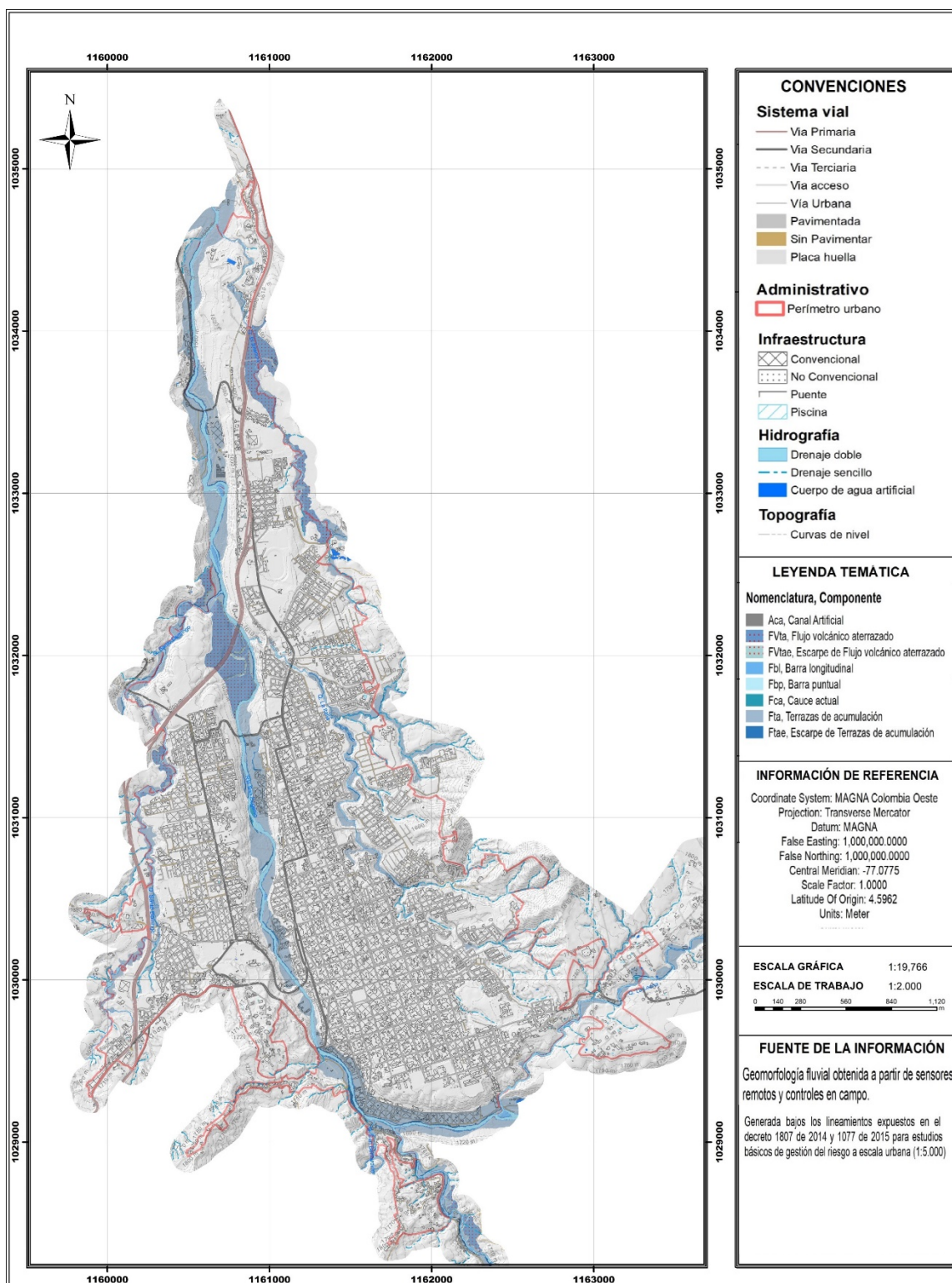


Figura 19. Mapa de geomorfología fluvial a escala 1:2000 para la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal.
 Fuente: Elaboración propia.

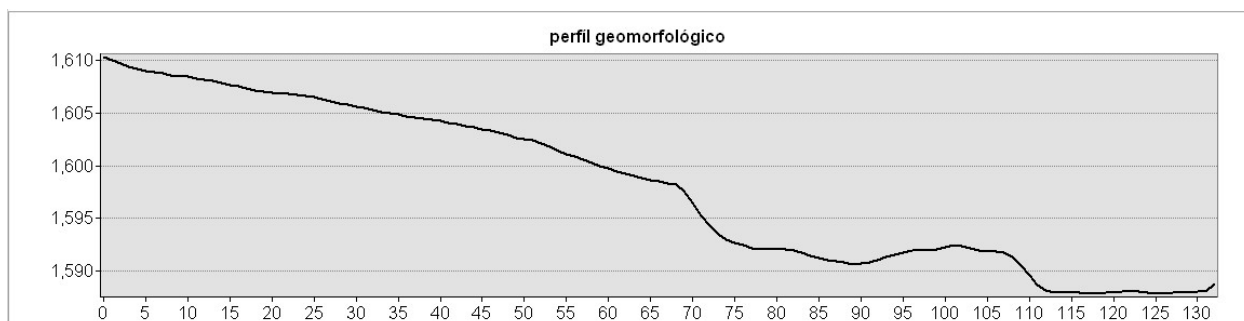


Figura 20. Perfil geomorfológico del río San Eugenio dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa.
Fuente: Elaboración propia.

9.3.1 Cauce actual (Fca)

Según Leiva et al. (2019), es un canal de forma irregular excavado por erosión de las corrientes perennes, dependiendo de factores como pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden ser rectos que se restringen a valles estrechos en forma de V, o meandriiformes cuando las corrientes fluyen en zonas semiplanas a planas (llanura aluvial), según la cantidad de carga de sedimentos, la pendiente y caudal pueden llegar a formar sistemas anastomosados, trenzados, divergentes y otras unidades asociadas.

En la zona de estudio, el río San Eugenio tiene un componente meandriiforme ya que por las bajas pendientes este río ha migrado lateralmente a lo largo del tiempo debido a el proceso de erosión en la parte convexa y el de sedimentación en la parte cóncava que permite la formación de barras puntuales y longitudinales a lo largo del cauce (Figura 21). Además, el río presenta una carga de sedimentos bastante alta, evidenciada en una gran cantidad de sedimentos de granulometría gruesa; los cauces aluviales dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal poseen un área de 230027,08 m² el cual equivale al 50,3% del área de estudio.



Figura 21. Cauce aluvial del río San Eugenio, cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal.
Fuente: Elaboración propia.

9.3.2 Barras puntuales (Fbp)

Según Leiva et al. (2019), las barras puntuales son cuerpos con forma de medialuna de morfología suave ondulada, compuesta de crestas y artesas curvas de poca altura. Estos cuerpos se localizan en la parte cóncava de los meandros de los ríos, como producto de la acumulación de sedimentos erodados de la parte convexa del cauce. En la zona de estudio, están conformadas por sedimentos heterogéneos, con tamaños que varían desde arcilla (menor a 0,002 mm) hasta guijarros (4-64 mm). Las barras puntuales ocupan un área total de 7437,01 m², equivalente al 1,48% de las geoformas fluviales presentes en la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal (Figura 22).

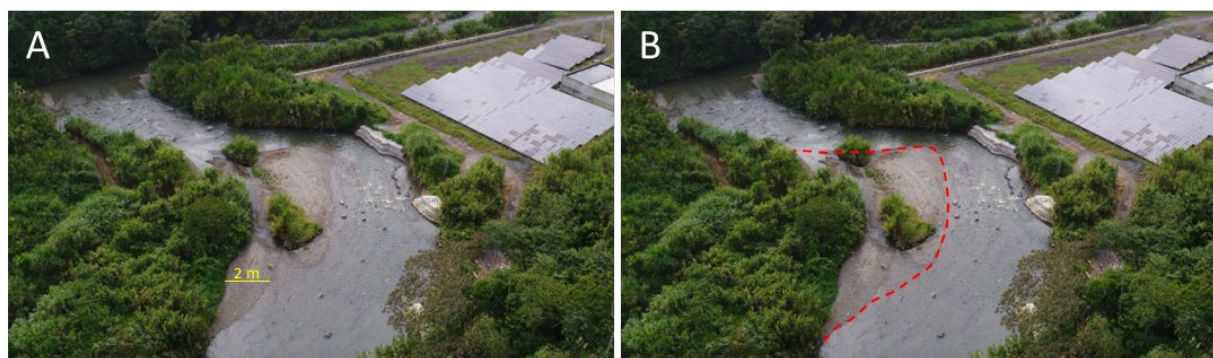


Figura 22. A. Barra puntual localizada en el cauce del río San Eugenio, dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. B. Misma imagen editada donde la línea roja punteada delimita la geoforma fluvial.

Fuente: Elaboración propia.

9.3.3 Barras longitudinales (Fbl)

Según Leiva et al. (2019), una barra longitudinal posee un cuerpo elongado, dispuesto paralelo al centro de los cauces fluviales mayores, con la punta más aguda en la dirección de la corriente, su origen es relacionado a la acumulación de sedimentos durante grandes inundaciones, que luego de disminuir el caudal, quedan como remanentes que dividen la corriente. En la zona de estudio, presentan granulometría variada y composición heterogénea, presentando las formas antes descritas por las dinámicas hidráulicas del río San Eugenio (Figura 23). Las barras longitudinales poseen un área 12178,93 m² las cuales equivalen al 2,42% de las geoformas fluviales presentes en la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal.



Figura 23. A. Barra longitudinal localizada en el cauce del río San Eugenio dirección aguas abajo, dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. B. Misma imagen editada donde la línea roja punteada delimita la geoforma fluvial.

Fuente: Elaboración propia.

9.3.4 Terrazas de acumulación (Fta)

Según Leiva et al. (2019), las terrazas de acumulación corresponden a geoformas con superficies elongadas, planas a suavemente onduladas, modeladas sobre sedimentos aluviales, que se presentan de forma pareada, limitada por escarpes de diferente altura a lo largo del cauce del río. Su origen está relacionado a procesos de erosión vertical y acumulación aluvial, dentro de antiguas llanuras de inundación. En la zona de estudio, estas geoformas se presentan en ambos márgenes del río San Eugenio de forma no pareada, conformadas por sedimentos heterogéneos

con tamaños que varían desde arcilla (menor a 0,002 mm) hasta guijarros (4-64 mm) (Figura 24). Las terrazas de acumulación dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal poseen un área de 252601,30 m² el cual equivale al 45,80% de las geoformas fluviales.



Figura 24. A. Terraza de acumulación localizada en la margen izquierda del cauce del río San Eugenio dirección aguas abajo, dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. B. Misma imagen editada donde la línea roja punteada delimita la geoforma fluvial.

Fuente: Elaboración propia.

9.3.5 Escarpe de terraza de acumulación (Ftae)

Según Leiva et al. (2019), plano vertical a subvertical, escalonado, excavado en sedimentos aluviales que bordean las terrazas de acumulación y pueden alcanzar decenas de metros, su origen es relacionado a la incisión y profundización del cauce. En la zona de estudio, poseen una composición heterogénea con granulometrías variadas presentando alturas entre los 3 m y 17 m, y pendientes mayores a los 16 grados.

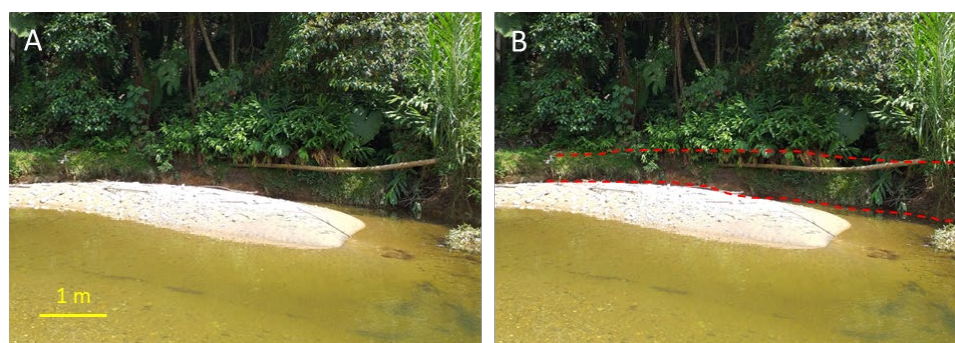


Figura 25. A. Escarpe de terraza de acumulación localizado en el cauce de la quebrada La Leona, dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. B. Misma imagen editada donde la línea punteada delimita la geoforma fluvial.

Fuente: Elaboración propia.

9.3.6 Flujo volcánico aterrazado (FVta)

Según Leiva et al. (2019), son superficies de aspecto plano a suavemente inclinado, con escarpes de diferente altura que van quedando elevados conforme la corriente hídrica va erosionando y recobrando su cauce, su génesis está asociada a la acumulación de productos volcánicos previamente depositados o generados durante la erupción, que han sido mezclados o removidos por cuerpos de aguas superficiales. En la zona de estudio, se presentan de manera alargadas y regulares en sentido norte sur sobre la margen izquierda del río San Eugenio provocando modificaciones morfológicas sobre la topografía original (Figura 26).

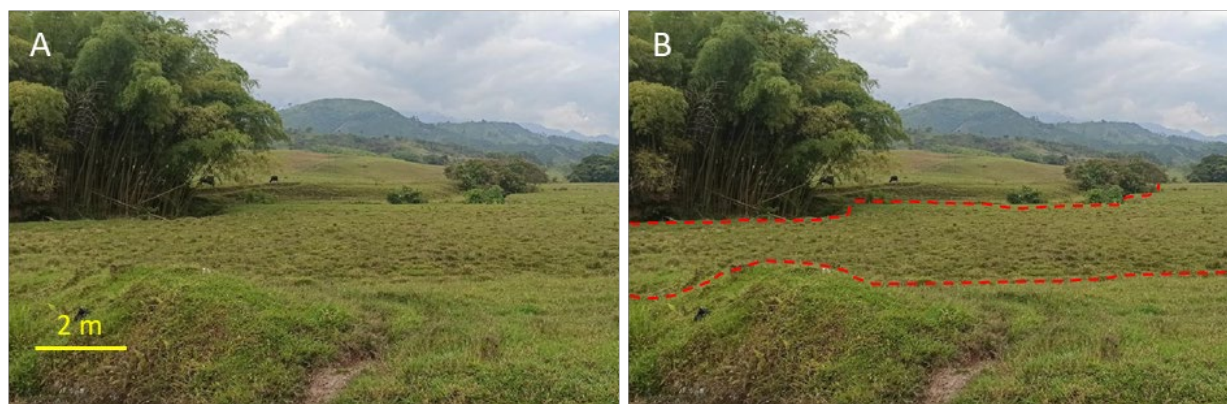


Figura 26. A. Flujo volcánico aterrazado del río San Eugenio, dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. B. Misma imagen editada donde la línea negra punteada delimita la geoforma.

Fuente: Elaboración propia.

9.3.7 Escarpe de flujo volcánico aterrazado (FVtae)

Según Leiva et al. (2019), ladera casi vertical de longitud y altura variadas, de forma cóncava o convexa, presente en los bordes de la superficie de remanentes de un depósito de flujo volcánico, su génesis está asociada a la incisión y socavación de las corrientes hídricas en los depósitos. En la zona de estudio, presentan alturas entre los 3 y 18 m, y pendientes mayores a los 16 grados (Figura 27).



Figura 27. A. Escarpe de flujo volcánico aterrazado localizado en el cauce del río San Eugenio, dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal. B. Misma imagen editada donde la línea punteada delimita la geoforma fluvial.

Fuente: Elaboración propia.

9.3.8 Pendientes

Para identificar las geoformas próximas al cauce con una pendiente menor a los 8 grados, se utilizó la reclasificación de Vanzuidam (1986) quien considera terrenos con pendientes 0 – 2 grados como planos a casi planos, con pendientes de 2 – 4 grados como suavemente inclinado y terrenos con pendientes de 4 – 8 grados como terrenos inclinados. Con estas se muestran diferentes niveles de terrazas y escarpes de gran altura que dificultan el desbordamiento de los drenajes. Además, permiten la identificación de formas del terreno con pendientes mayores a 8 grados que facilitan la evacuación de aguas de escorrentía.

El mapa de pendientes de la subcuenca del río San Eugenio se presenta en la Figura 28, en este se evidencia que en la cabecera municipal predominan las pendientes planas a suavemente inclinadas que contrastan con las pendientes abruptas a moderadamente abruptas que limitan la llanura aluvial del cauce del río San Eugenio, donde se puede evidenciar un mayor confinamiento, traducido en formas de valles en V con fondo plano. Este cambio de la pendiente

se atribuye a la incisión y modelamiento fluvial generado por la dinámica del río. Sin embargo, en las zonas de confluencia de sus tributarios, disminuye la energía hidráulica generando una pérdida de confinamiento asociado a pendientes planas a casi planas.

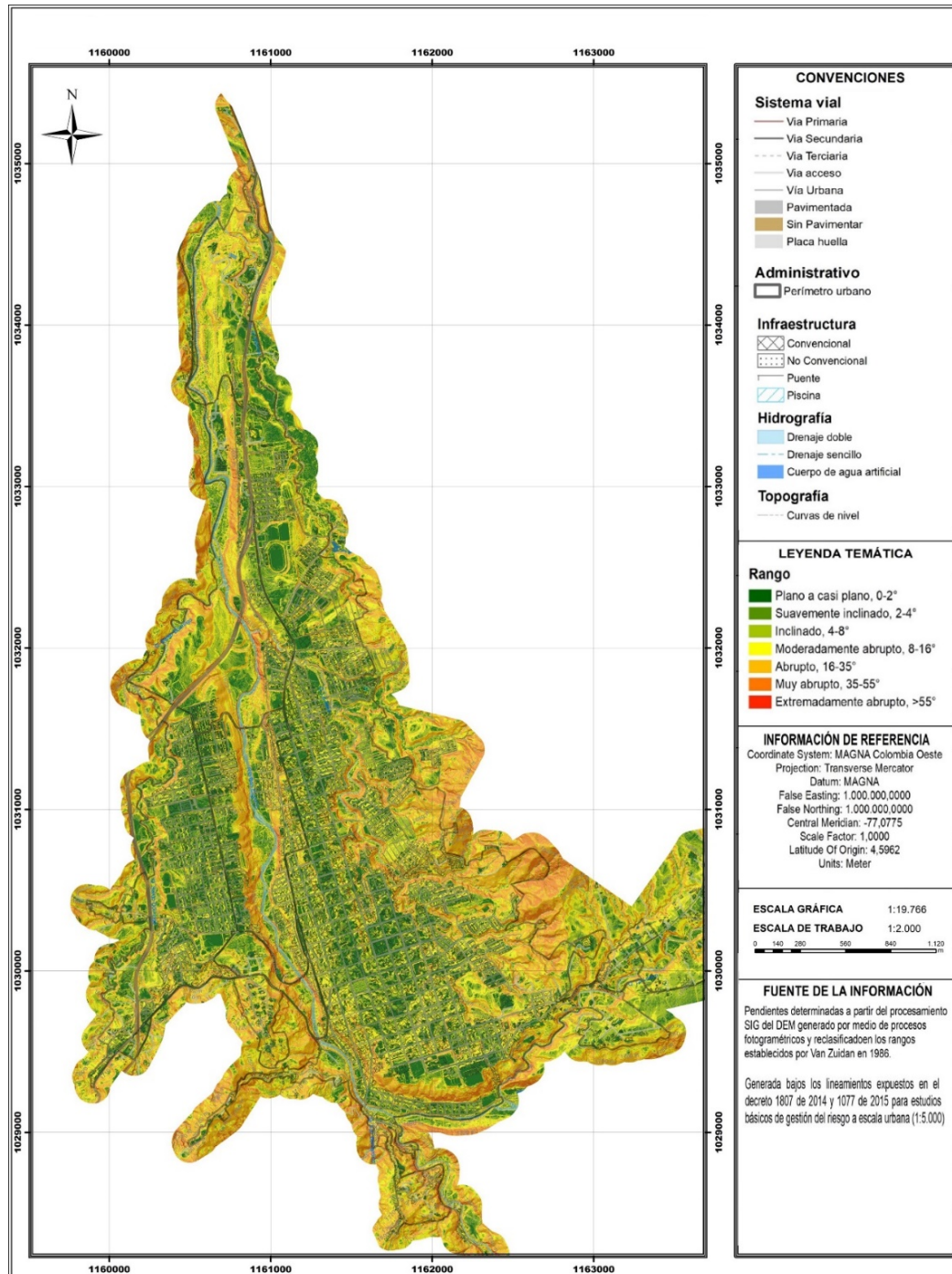


Figura 28. Mapa de pendientes de la subcuenca del río San Eugenio en el área de la cabecera municipal.

Fuente: Elaboración propia

9.4 MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

A partir del DEM del terreno facilitado por catastro del municipio de Santa Rosa de Cabal a escala 1:2000 el cual abarca toda el área del centro poblado, se realizó la modelación hidráulica, este se llevó a un procesamiento de llenado de vacíos con la herramienta Fill del software ArcGis (Figura 29).

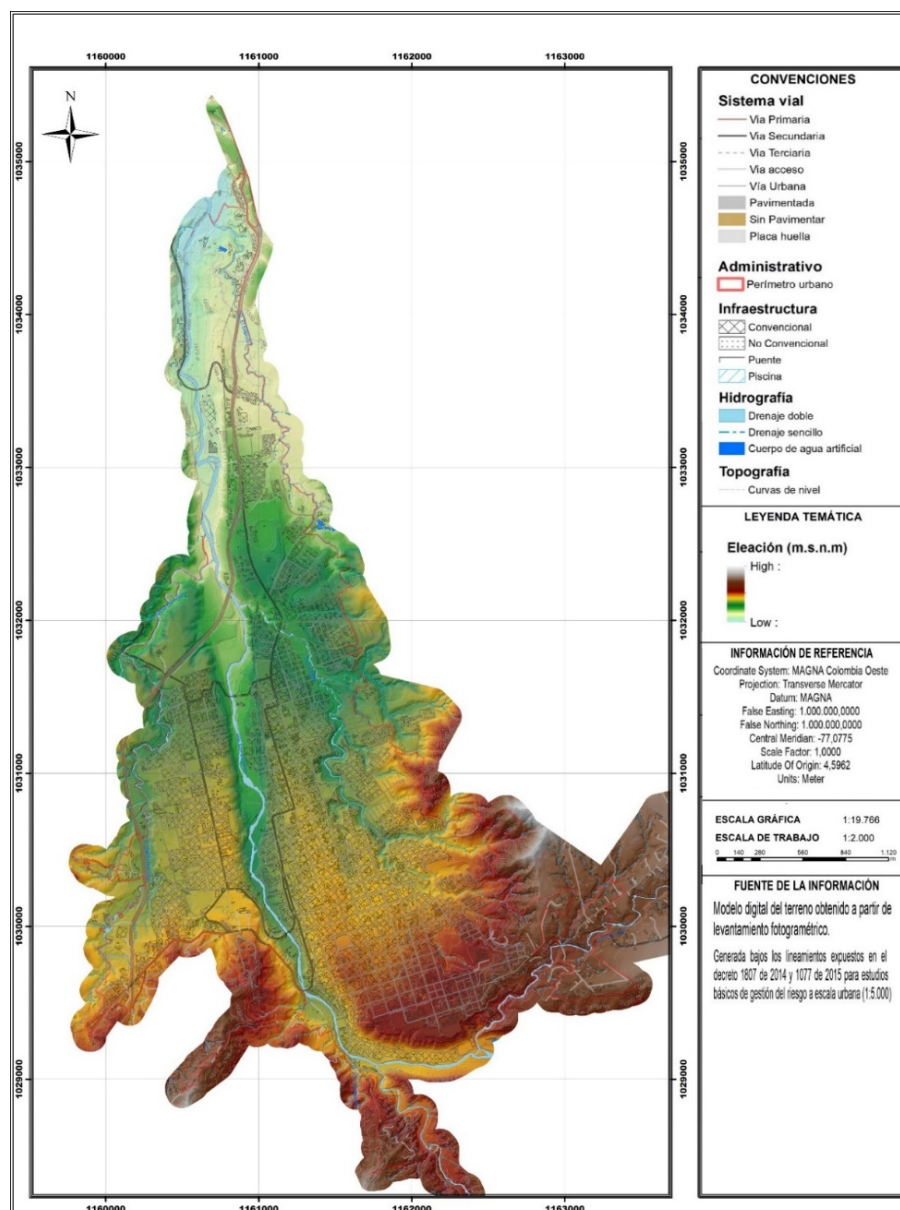


Figura 29. DEM de la cabecera del municipio de Santa Rosa de Cabal que abarca el río San Eugenio, la quebrada El Silencio, la quebrada La Italia, la quebrada Santo Domingo, la quebrada Santa Helena y la quebrada La leona y el cual fue utilizado en la modelación hidráulica.

Fuente: Catastro de Santa Rosa de Cabal, 2021.

9.5 COEFICIENTE DE RUGOSIDAD

Se utilizó el mapa de coberturas del terreno (Figura 31), como base para asignar un valor de coeficiente de rugosidad N Manning basado en los datos recomendados por Chow et al. (1988), en cada uno de los cauces como en sus áreas aledañas donde se presenta vegetación arbórea densa y cultivos en algunos tramos de las márgenes. Los valores asignados a las coberturas en el área de interés para la modelación del cauce se presentan en **Tabla 4**.

LEYENDA TEMÁTICA

Coberturas			
	Bosque de galería y ripario		Otros cultivos permanentes herbáceos
	Bosque fragmentado		Otros cultivos transitorios
	Café		Parqueaderos en concreto
	Cuerpos de agua artificiales		Parqueaderos en gravilla
	Cultivos confinados		Parques cementerios
	Cultivos y árboles plantados		Parques urbanos
	Escombreras		Pastos arbolados
	Estanques para acuicultura continental		Pastos enmalezados
	Explotación de materiales de construcción		Pastos limpios
	Hortalizas		Plantación forestal
	Instalaciones recreativas		Plátano y banano
	Mosaico de cultivos		Red vial pavimentada
	Mosaico de pastos con espacios naturales		Red vial sin pavimentar
	Mosaico de pastos y cultivos		Ríos
	Oleaginosas y leguminosas		Tejido urbano continuo
	Otras zonas verdes urbanas		Tejido urbano discontinuo
	Otros cultivos permanentes arbustivos		Tierras desnudas
	Otros cultivos permanentes arbóreos		Vegetación secundaria alta
			Vegetación secundaria baja
			Zonas arenosas naturales
			Áreas abiertas construidas
			Áreas deportivas

Figura 30. Leyenda temática del mapa de coberturas.

Fuente: Elaboración propia

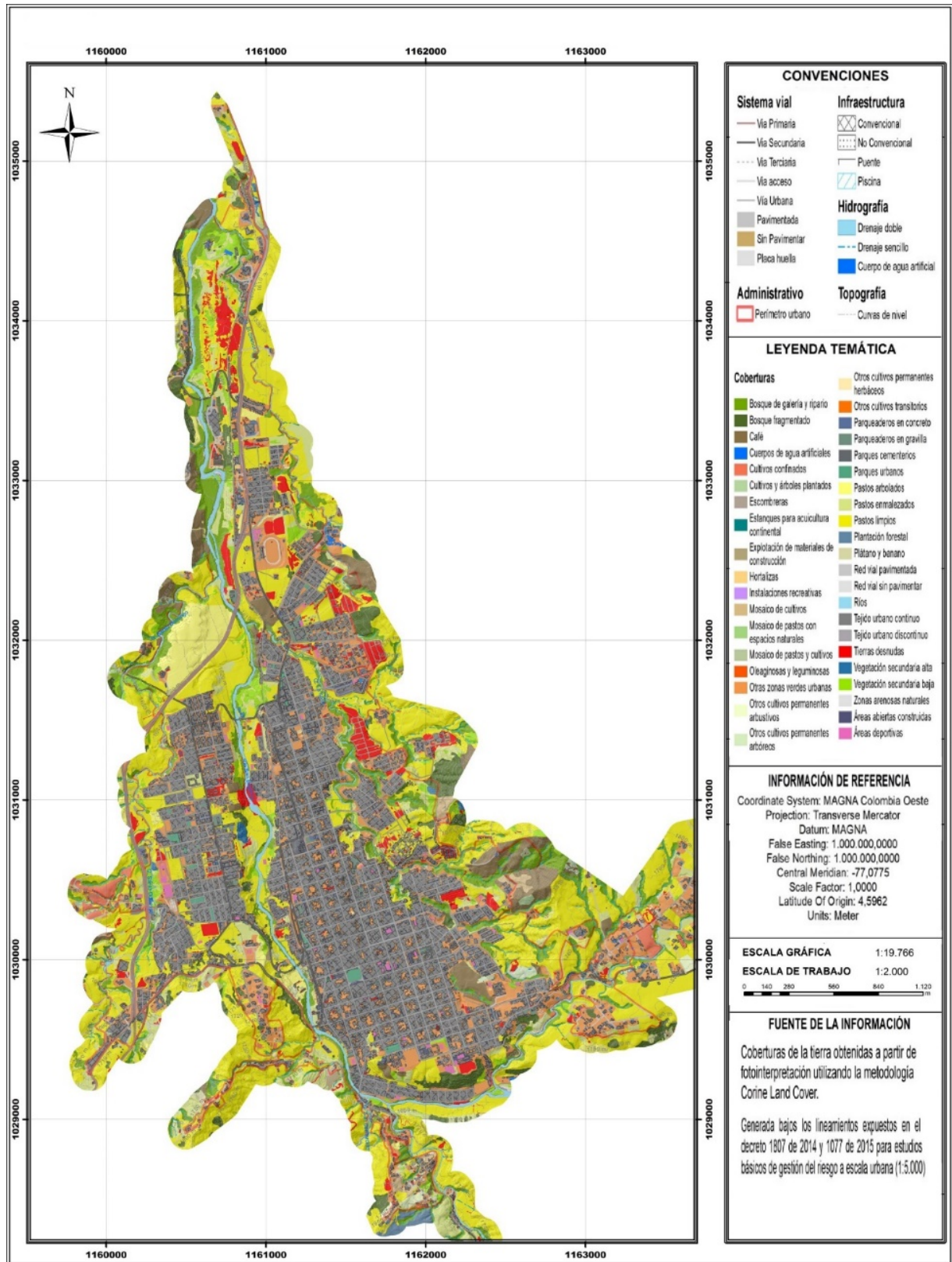


Figura 31. Mapa de coberturas de la tierra utilizado para la asignación de los valores de Manning.
 Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Valores de rugosidad de N Manning asignados a las coberturas del terreno utilizados en la modelación.

Cobertura	Coefficiente de rugosidad N Manning
Áreas abiertas construidas	0,013
Áreas deportivas	0,03
Bosque de galería y ripario	0,16
Bosque fragmentado	0,16
Café	0,045
Cuerpos de agua artificiales	0,045
Cultivos confinados	0,045
Cultivos y árboles plantados	0,05
Escombreras	0,036
Estanques para acuicultura continental	0,045
Explotación de materiales de construcción	0,036
Hortalizas	0,045
Mosaico de cultivos	0,045
Mosaico de pastos y cultivos	0,05
Otras zonas verdes urbanas	0,05
Otros cultivos permanentes arbóreos	0,045
Otros cultivos permanentes herbáceos	0,045
Otros cultivos transitorios	0,045
Parqueaderos en concreto	0,02
Parqueaderos en gravilla	0,036
Parques cementerios	0,02
Parques urbanos	0,02
Pastos arbolados	0,05
Pastos enmalezados	0,05
Pastos limpios	0,05
Plantación forestal	0,05
Plátano y banano	0,045
Red vial pavimentada	0,03
Red vial sin pavimentar	0,036
Ríos	0,045
Tejido urbano continuo	0,017
Tierras desnudas	0,01
Vegetación secundaria alta	0,06
Vegetación secundaria baja	0,06
Zonas arenosas naturales	0,06

Fuente: Elaboración propia a partir de valores propuestos por Chow et al. (1988).

9.6 CAUDALES MÁXIMOS POR PERIODOS DE RETORNO

Se tomaron los caudales por periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años (**Tabla 5 a Tabla 10**), para realizar la modelación hidráulica en el río San Eugenio y sus afluentes de la cabecera de Santa Rosa de Cabal como lo son la quebrada La Italia, quebrada La Leona, quebrada Santa Helena, y quebrada El Silencio.

Tabla 5. Datos de caudales máximos para cada periodo de retorno del río San Eugenio.

CUENCA	Área (km ²)	Q 2,33 (m ³ /s)	Q 5 (m ³ /s)	Q 10 (m ³ /s)	Q 25 (m ³ /s)	Q 50 (m ³ /s)	Q 100 (m ³ /s)
San Eugenio	123,54	70	100,8	117,6	141,4	173,6	196

Fuente: CARDER Y CORPOCALDAS, 2020

Tabla 6. Datos de caudales máximos para cada periodo de retorno de la quebrada Santa Helena.

MICROCUENCA	Área (km ²)	Q 2,33 (m ³ /s)	Q 5 (m ³ /s)	Q 10 (m ³ /s)	Q 25 (m ³ /s)	Q 50 (m ³ /s)	Q 100 (m ³ /s)
Santa Helena	8,70	4,93	7,10	8,28	9,96	12,23	13,80

Fuente: Elaboración propia a partir de CARDER Y CORPOCALDAS, 2020

Tabla 7. Datos de caudales máximos para cada periodo de retorno de la quebrada La Leona.

MICROCUENCA	Área (km ²)	Q 2,33 (m ³ /s)	Q 5 (m ³ /s)	Q 10 (m ³ /s)	Q 25 (m ³ /s)	Q 50 (m ³ /s)	Q 100 (m ³ /s)
La Leona	6,19	3,51	5,05	5,90	7,09	8,70	9,83

Fuente: Elaboración propia a partir de CARDER Y CORPOCALDAS, 2020

Tabla 8. Datos de caudales máximos para cada periodo de retorno de la quebrada La Italia.

MICROCUENCA	Área (km ²)	Q 2,33 (m ³ /s)	Q 5 (m ³ /s)	Q 10 (m ³ /s)	Q 25 (m ³ /s)	Q 50 (m ³ /s)	Q 100 (m ³ /s)
La Italia	4,30	2,44	3,51	4,09	4,92	6,04	6,82

Fuente: Elaboración propia a partir de CARDER Y CORPOCALDAS, 2020

Tabla 9. Datos de caudales máximos para cada periodo de retorno de la quebrada Santo Domingo.

MICROCUENCA	Área (km ²)	Q 2,33 (m ³ /s)	Q 5 (m ³ /s)	Q 10 (m ³ /s)	Q 25 (m ³ /s)	Q 50 (m ³ /s)	Q 100 (m ³ /s)
Santo domingo	7,05	4,00	5,76	6,71	8,07	9,91	11,19

Fuente: Elaboración propia a partir de CARDER Y CORPOCALDAS, 2020

Tabla 10. Datos de caudales máximos para cada periodo de retorno de la quebrada El Silencio.

MICROCUENCA	Área (km²)	Q 2,33 (m³/s)	Q 5 (m³/s)	Q 10 (m³/s)	Q 25 (m³/s)	Q 50 (m³/s)	Q 100 (m³/s)
El Silencio	5,12	2,90	4,18	4,88	5,86	7,20	8,13

Fuente: Elaboración propia a partir de CARDER Y CORPOCALDAS, 2020

10 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

10.1 AREAS POTENCIALMENTE INUNDABLES

Dentro de la subcuenca del río San Eugenio se ubica la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal, siendo este río la corriente principal que fluye en dirección sur a norte por el sector occidental del área urbana, este ha creado un valle aluvial con diferentes niveles de terrazas no pareadas, también barras longitudinales y puntuales que indican la sedimentación actual y la dinámica fluvial.

El canal del río San Eugenio en su tramo urbano presenta una ligera sinuosidad y cambios en la dirección de la corriente, la mayoría de las terrazas identificadas corresponden a antiguas barras de meandro elevadas por la incisión de la corriente, varias son alargadas en la dirección del cauce con mayor extensión sobre la margen derecha asociadas a influencia tectónica y las barras longitudinales como las puntuales están mayormente vegetalizadas. El cauce es poco profundo con presencia de bloques de gran tamaño que ejercen resistencia al flujo.

Las geoformas identificadas cercanas al cauce principal son de origen fluvial presentando algunas de estas modificaciones antrópicas, con pendientes planas a suavemente inclinadas limitadas por laderas de pendiente abrupta. En recorridos de campo se lograron identificar obras de mitigación para inundaciones lo que es evidencia de zonas potencialmente inundables que coinciden con registros de diferentes eventos históricos. Tomando lo anterior se muestran las áreas potencialmente inundables dentro de la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal en la Figura 32.

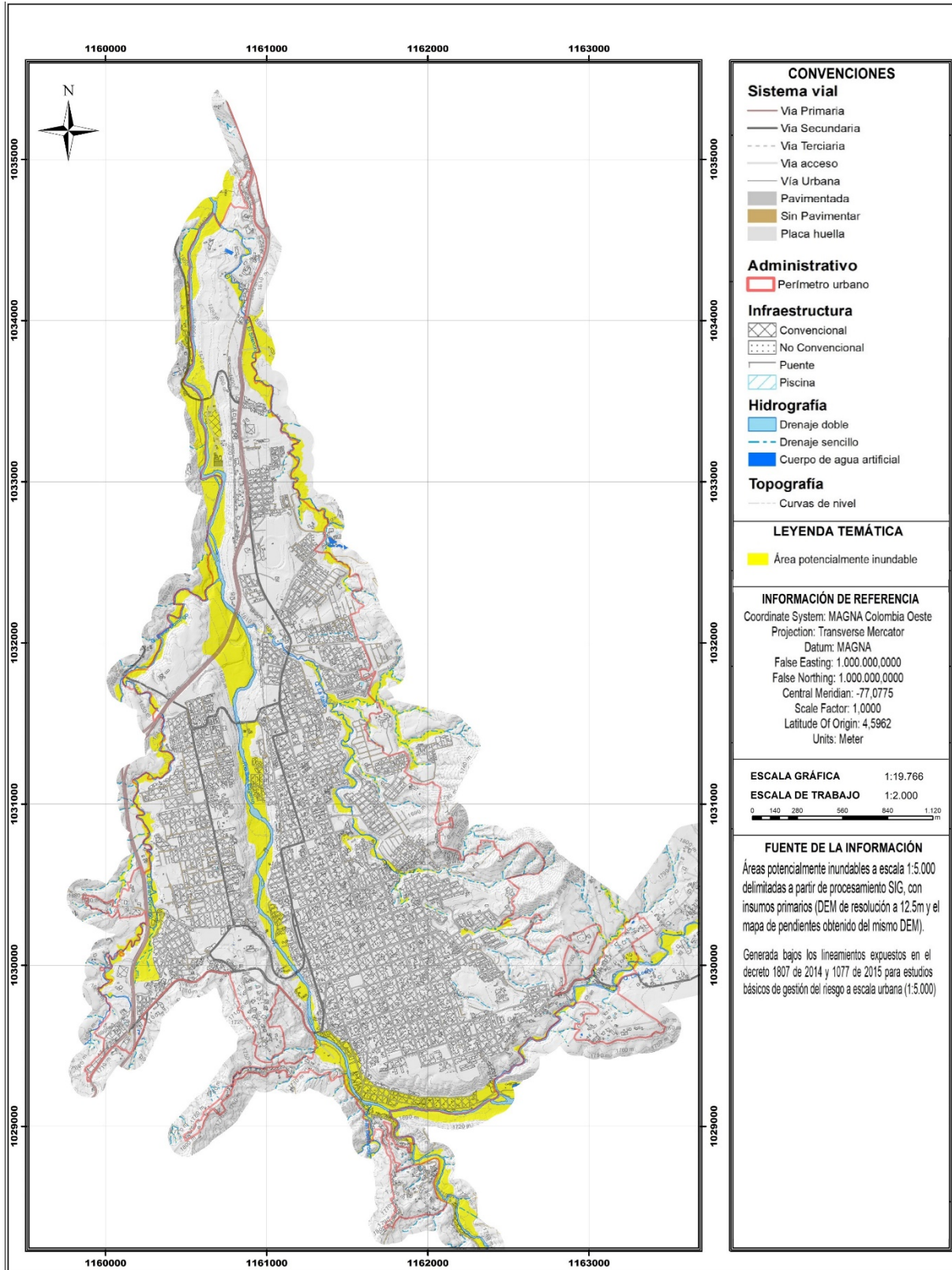


Figura 32. Mapa de áreas potencialmente inundables en la cabecera de Santa Rosa de Cabal

Fuente: Elaboración propia

10.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA

Se realizó la modelación hidráulica para el río San Eugenio y sus afluentes, siendo este río el de mayor orden que concentra el caudal aportado por los drenajes tributarios, esto se realizó con el fin de determinar la altura de lámina de agua y velocidad de flujo para el periodo de retorno de 100 años con el que se obtiene los mayores valores proyectados, asociadas a la dinámica de estos drenajes.

Se puede evidenciar la incidencia de las variaciones de la dinámica fluvial en relación a las características del terreno, lo que permite observar en el resultado de la modelación para una creciente de periodo de retorno de 100 años en el río San Eugenio, velocidades de flujo inferiores a los 8 m/s (Figura 34) sobre ambas márgenes del cauce en el tramo de interés y alturas de lámina de agua inferiores a 5,5 m (Figura 33), ya que es una cuenca de montaña, estos datos se consideran concordantes con las características morfológicas y morfométricas de la corriente hídrica, pudiendo relacionar los valores de velocidad con flujos turbulentos, que da lugar a la ocurrencia de un tipo de inundaciones como lo son las crecientes súbitas.

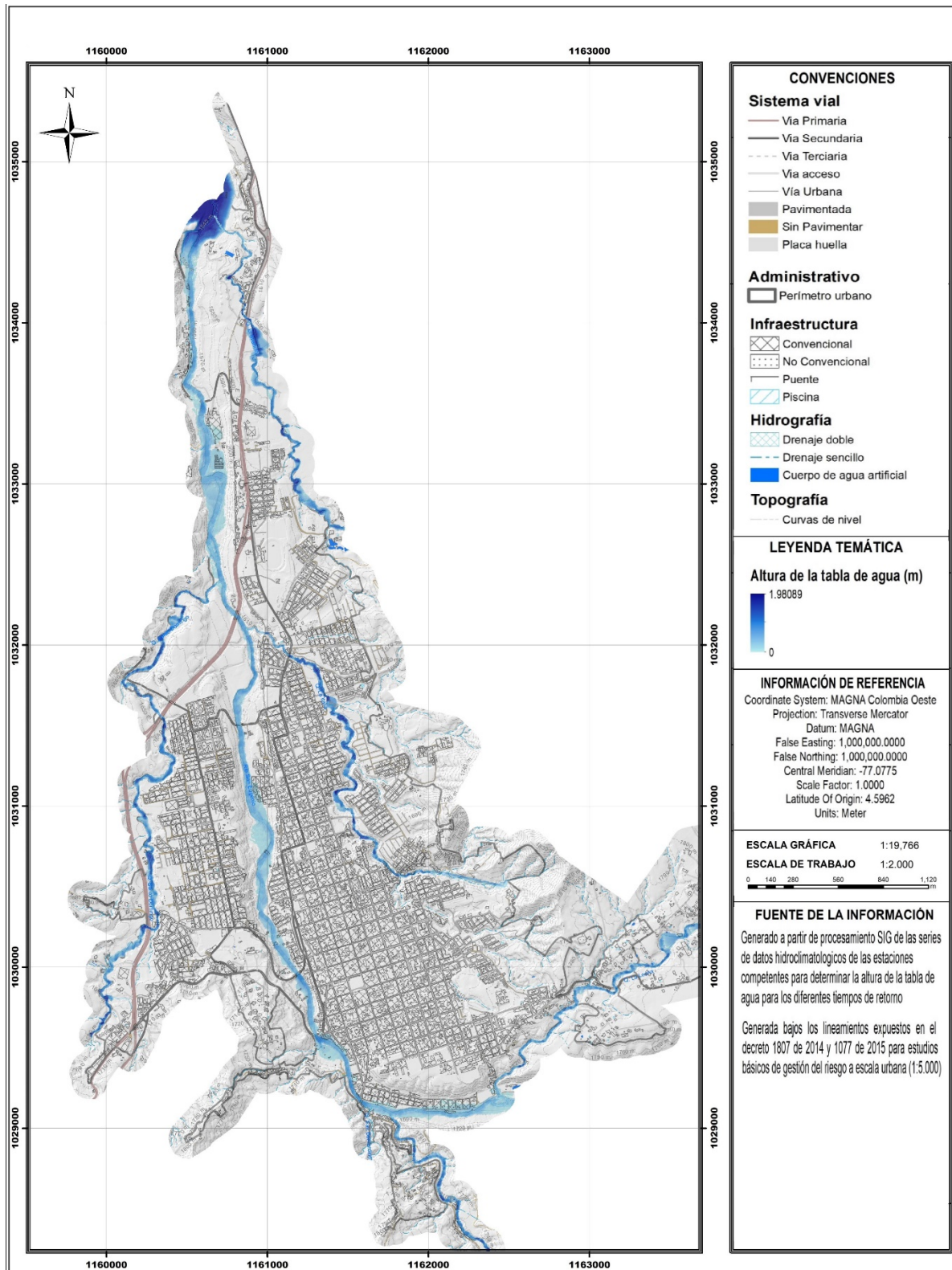


Figura 33. Alturas de lámina de agua para el periodo de retorno de 100 años.

Fuente: Elaboración propia

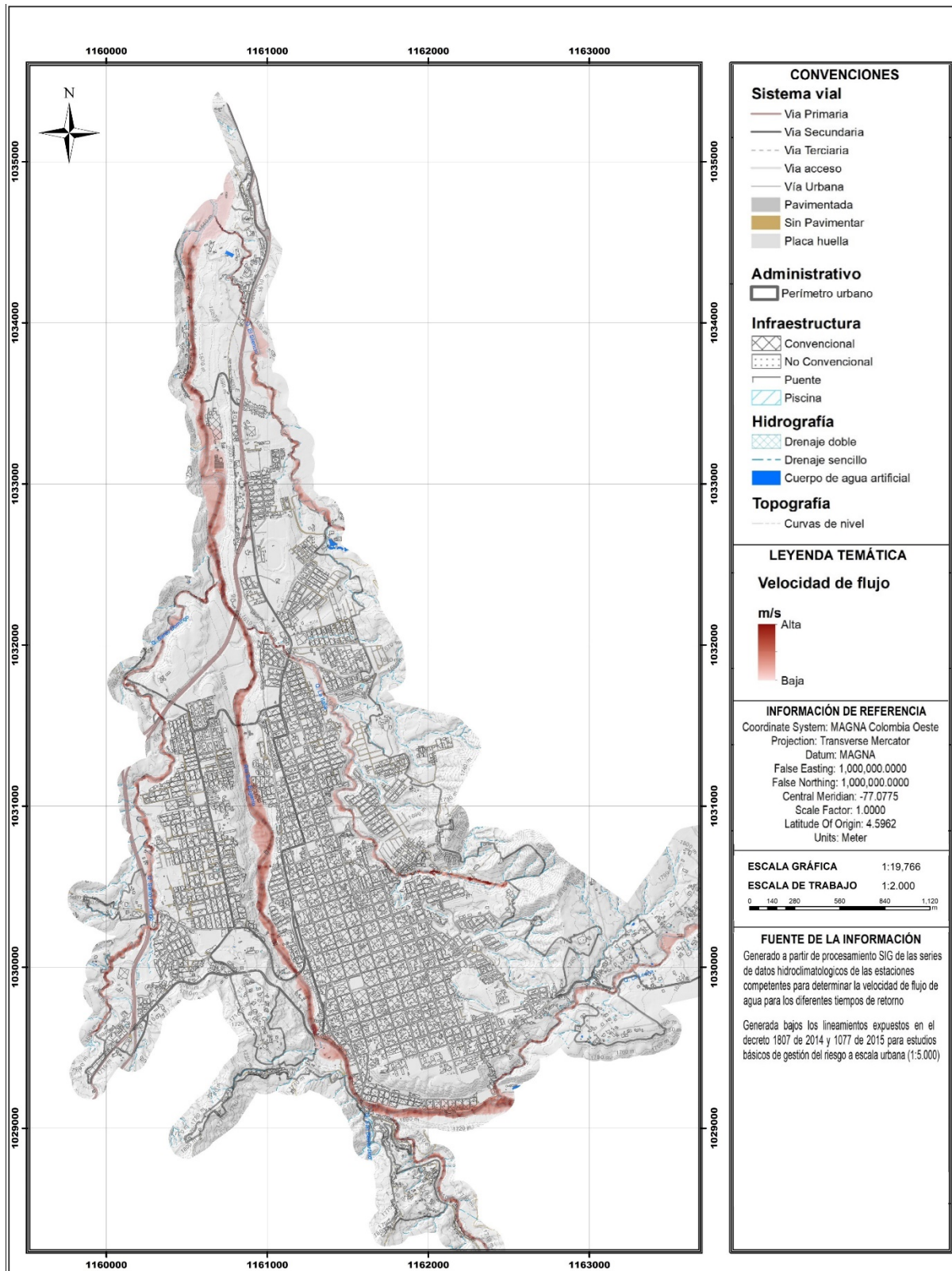


Figura 34. Velocidades de flujo para el periodo de retorno de 100 años.

Fuente: Elaboración propia

10.3 ZONIFICACIÓN AMENAZA POR INUNDACIÓN

Se determinó la amenaza por inundación en la subcuenca del río San Eugenio a partir del análisis conjunto de la velocidad de flujo y la altura de la lámina de agua para un periodo de retorno de 100 años el cual nos da como resultado el escenario más catastrófico esperado, estos parámetros son considerados como los principales factores generadores de daños en infraestructura y pérdida de vidas humanas.

En la zonificación de amenaza por inundación (Figura 35) se evidencia que las zonas con mayor afectación abarcan la llanura aluvial del río San Eugenio y sus afluentes junto a algunas de las terrazas aluviales próximas a estos cauces, conservando una pendiente relativamente alta desde su nacimiento hasta su desembocadura, además las variaciones en el nivel de base local han favorecido la incisión dejando los valles aluviales relativamente confinados.

La amenaza alta por inundación a lo largo del río San Eugenio se encuentra relacionada con alturas de lámina de agua superiores a 0,01 m e inferiores a 5,5 m y velocidades superiores a 0,65 m/s e inferiores a los 8 m/s, esta categoría abarca ambas márgenes del cauce, y la parte más próxima de las terrazas de acumulación, algunas de estas, intervenidas antrópicamente lo que favorece que el área inundable sea más amplia correspondiendo incluso a lugares donde el cauce se encuentra más somero y con menor vegetación arbórea; y se adelgaza en las zonas donde el cauce se profundiza y se confina. Las mayores profundidades y velocidades se encuentran en la región central del cauce y las alturas de la lámina de agua fuera de los confines de este, alcanzan alturas de 3,6 m y velocidades de 4,3 m/s.

La amenaza media se encuentra en las zonas donde la altura de lámina de agua y velocidad de flujo son inferiores a 0,5 m y 2 m/s respectivamente, siendo coincidentes además con las zonas donde se presenta vegetación arbórea como barrera protectora ante inundaciones. De acuerdo con la dinámica fluvial del cauce del río San Eugenio, las zonas de confluencia y las

zonas donde hay variaciones abruptas en la dirección del flujo corresponden a las zonas donde se presentan desbordamientos que alcanzan mayores distancias con alturas de lámina de agua y velocidad incluso muy altas.

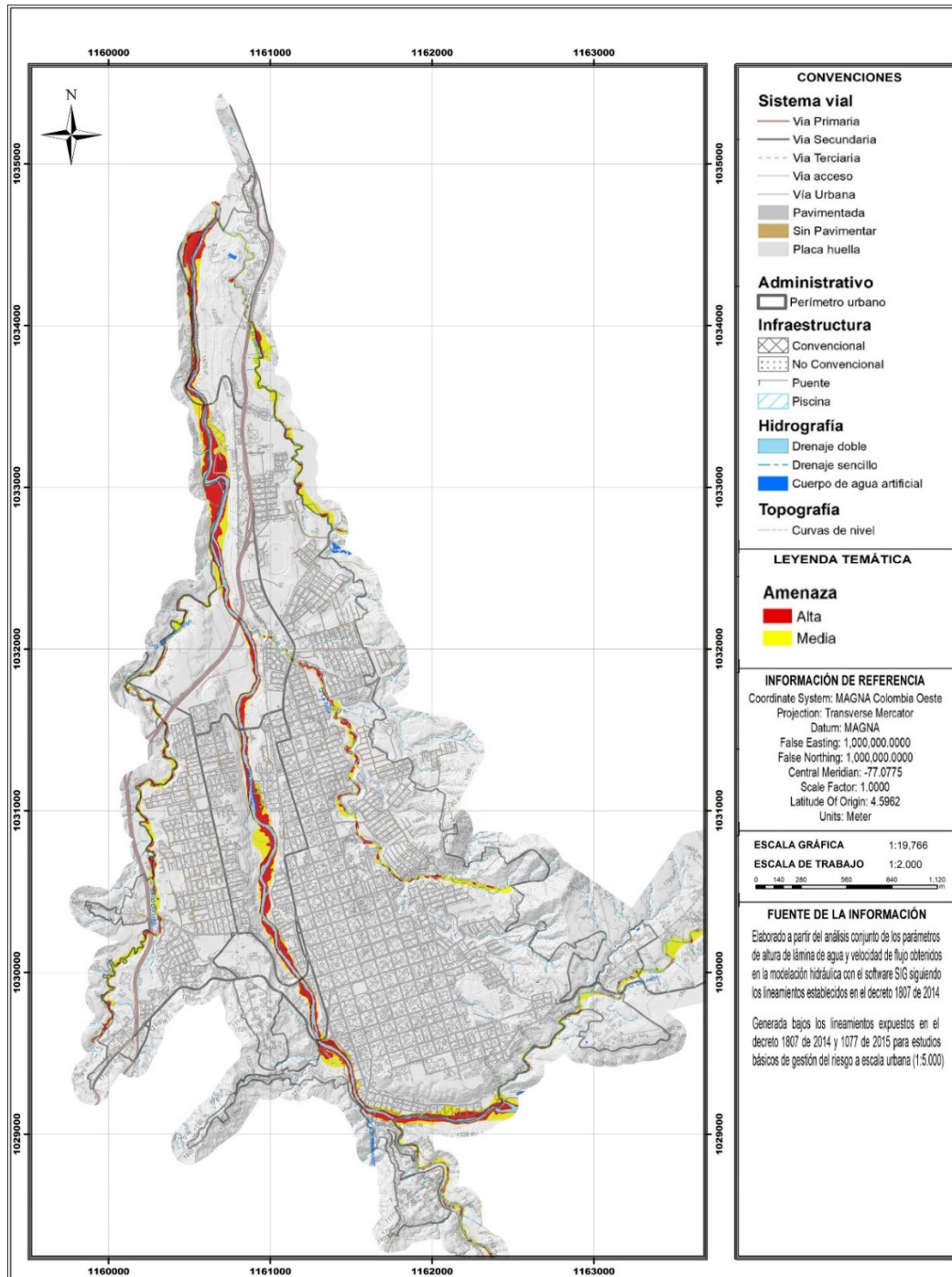


Figura 35. Zonificación de amenaza por inundación en la cabecera municipal de Santa Rosa de Cabal.
 Fuente: Elaboración propia.

11 CONCLUSIONES

- La dinámica fluvial desempeña un papel crucial en la modelación geomorfológica, proporcionando información sobre los cambios ocurridos en los cauces a lo largo del tiempo. Al combinar estos datos con los registros de eventos pasados, es posible pronosticar áreas que podrían verse afectadas por inundaciones en el futuro.
- En términos de capacidad de escurrimiento de una cuenca, se ha calculado que, en el escenario más catastrófico, el caudal puede alcanzar los 196 m³/s en un período de 100 años. Este dato representa la cantidad máxima de agua que puede pasar por una sección del cauce estudiado y es fundamental para evaluar la amenaza por inundación.
- En el análisis de la zona de estudio, se identificaron varios elementos geomorfológicos fluviales, como barras puntuales, barras longitudinales, terrazas de acumulación y escarpes de terrazas de acumulación con pendientes menores a 8 grados, determinadas cómo planas a suavemente inclinadas, las cuales se encuentran cerca del cauce principal y son indicadores clave para determinar las áreas potencialmente inundables.
- El uso de softwares de procesamiento SIG permitieron identificar a nivel hidrológico II la subcuenca del río San Eugenio como unidad básica de medida en el presente estudio, enfocándose así en su análisis hidrológico.
- En el análisis y zonificación de la amenaza por inundación, se concluyó que acorde a la dinámica fluvial en el río San Eugenio, las áreas de confluencia de corrientes y los puntos donde el flujo cambia de dirección bruscamente son los lugares donde se producen inundaciones que se extienden a mayores distancias, con valores altos de altura de lámina de agua y velocidades.

- En resumen, el estudio de la dinámica fluvial, la modelación geomorfológica y el análisis de eventos pasados son esenciales para pronosticar y zonificar las áreas propensas a inundaciones. Estas conclusiones brindan información valiosa para la gestión adecuada de los riesgos asociados con las inundaciones y la protección de las comunidades y los ecosistemas vulnerables.

12 RECOMENDACIONES

Seguidamente, se expresan recomendaciones basadas en los resultados obtenidos:

- Establecer un sistema de seguimiento y actualización periódica de los registros de eventos históricos para garantizar la disponibilidad de información actualizada y precisa.
- Incorporar datos hidrometeorológicos actualizados y confiables en los análisis para mejorar la precisión de las estimaciones de caudales máximos.
- Considerar la colaboración con expertos en geomorfología para asegurar la calidad y la interpretación adecuada de los datos recopilados.
- Se sugiere fomentar a los gobiernos locales a destinar recursos para la gestión del riesgo, puesto que una apropiada ejecución de esta medida permitirá la habilidad de contar con comunidades mejor preparadas para afrontar sucesos amenazantes por fenómenos naturales. De igual forma, establecer una planificación territorial adecuada, lo cual permitirá promover un crecimiento de los municipios.
- Se enfatiza la relevancia de llevar a cabo la implementación de los estudios básicos de amenaza con el objetivo de una planificación de ordenamiento territorial más segura, sostenible y resiliente, protegiendo a la población y los recursos frente a posibles desastres y promoviendo un desarrollo equilibrado.
- Se recomienda realizar un estudio de obras civiles para la realización de infraestructuras en el área, esto con el fin de contribuir de manera eficiente, a la mitigación de las inundaciones generadas a partir de largos e intensos periodos de lluvia que se puedan presentar dentro del municipio, y con el principal fin de evitar daños en las mismas y prevenir desbordamientos de los cauces.

- Debido a la utilización de información secundaria se recomienda realizar mejores estudios donde se obtenga información propia para mayor exactitud en el trabajo.
- Se recomienda realizar no solo labores hidrológicas sino también incluir lo relacionado directamente con la geología de la zona.
- En la selección de la escala de trabajo tener en cuenta que en Colombia la información no se encuentra a un detalle tan específico, por esto no se debe acomodar la escala del trabajo a los insumos en cambio se recomienda realizar labores de obtención de recursos propios.

13 REFERENCIAS

- CARDER. (2010). *Diagnóstico de Riesgos Ambientales del municipio de Santa Rosa de Cabal Risaralda*. Corporación Autónoma Regional de Risaralda.
- CARDER. (2012). *Actualización del Inventario de Viviendas localizadas en zonas de alto riesgo por inundaciones y fenómenos de remoción en masa y del mapa de aptitud del suelo en la zona urbana del municipio de Santa Rosa de Cabal*. Gobernación de Risaralda.
- CARDER. (2017). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Otún. Fase de Diagnóstico. VI. Gestión del Riesgo*.
- CARDER. (2020, Agosto 06). *Diagnóstico de Riesgos Ambientales – Santa Rosa de Cabal*. Obtenido de Corporación Autónoma Regional de Risaralda - CARDER: <https://www.carder.gov.co/download/diagnostico-de-riesgos-ambientales-santa-rosa-de-cabal/>
- CARDER; CORPOCALDAS. (2020). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Campoalegre y otros directos al Cauca*.
- Carvajal-Perico, J. H. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Libros del Servicio Geológico Colombiano. Recuperado a partir de <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/52>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill, Inc.
- Decreto 1807 (2014, Septiembre 19). *Gestor normativo de la República de Colombia*. Recuperado el 19 de Mayo de 2023, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>
- Elorza, M. G. (2008). *Geomorfología*. Madrid: Pearson Educación S.A. pág. 920.
- Estrada, J. J., Viana, R., & González, H. (2001). *Geología de la Plancha 205 Chinchiná*. Publicación Digital Ingeominas, 2001, 38-50.
- Gómez, A., Ossa, C., & Toro, L. (2004). *Geoquímica de las rocas del Stock de Chinchiná Santa Rosa*. Boletín de Geología UIS Vol. 26 (42) , 67-78.

- González, H. (1996). *Geología de las Planchas 206 Manizales y 225 Nevado deL Ruiz*. Bogota: Ingeominas, Informe 2196.
- IDEAM. (2013). *Zonificación y Codificación de Unidades Hidrográficas e Hidrogeológicas de Colombia*. Bogotá, D.C.: Imprenta Nacional de Colombia.
- IDEAM. (2017). *Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.
- INGEOMINAS. (2000). *Zonificación regional de amenazas por fenómenos de remoción en masa, caracterización geotécnica y amenaza volcánica para los municipios del Eje Cafetero afectados por el sismo del 25 de enero de 1999*. Santa Rosa de Cabal.
- INGEOMINAS; FOREC. (2000). *Zonificación de Amenazas geológicas para los Municipios del Eje Cafetero Afectados por el Sismo del 25 de Enero de 1999. Volumen II*. Santa Fé de Bogotá: Convenio de cooperación técnico científica N° 004 de 1999. Presidencia de la República - Fondo para la reconstrucción y desarrollo social del eje cafetero - Ingeominas, subdirección de amenazas geoambientales.
- Leiva, O.Y., Moya-Berbeo, H.G., Trejos-Gonzalez, G.A., Carvajal-Perico, J.H. (2019). Anexo A. Glosario de Términos Geomorfológicos. En S. G. SGC, *Propuesta Metodológica Sistemática Para la Generación de Mapas Geomorfológicos Analíticos Aplicados a la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:100.000*. Bogotá D.C.
- Ley 1523. (2012, Abril 24). *Gestor normativo de la República de Colombia*. Recuperado el 19 de Mayo de 2023, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
- Ley 388. (1997, Julio 18). *Gestor normativo de la República de Colombia*. Recuperado el 19 de Mayo de 2023, de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=339>
- Lutgens, F. K. & Tarbuck. E. J. (2010). *Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física. Volumen II*. 408 pp. PEARSON PRENTICE HALL.
- Mosquera, D. (1978). *Geología del Cuadrángulo K-8 Informe 1763, 63 p*. Bogotá: Ingeominas.

- Municipio de Santa Rosa de Cabal. (2000). *PBOT - Plan Básico de Ordenamiento Territorial*. Santa Rosa de Cabal.
- Murcia, H., Borrero, C., Pardo, N., Alvarado, G., Arnosio, M., & Scolamacchia, T. (2013). *Depósitos volcanoclásticos: términos y conceptos para una clasificación en español*. *Revista Geológica de América Central*, 48, 15-39.
- Pulgarín –Alzate, B.A., Tamayo–Alzate, M., Correa–Tamayo, A.M., Ceballos–Hernández, J.A., Cruz–Toro, Y.P. & Méndez–Fajury, R. (2020). *Stratigraphy and geological evolution of the Paramillo de Santa Rosa Volcanic Complex and its Pleistocene to Holocene eruptive history*. En SGC, *The geology of Colombia* (pág. Chapter 5 Vol. 4). Bogotá.
- Vanzuidam, R.A. (1986). *Aerial Photointerpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Ed. Smits Publishers, The Hague.
- Vásquez, H., Jimena, G., Gonzalez, J., & Vargas, B. (2010). *Actualización del inventario de viviendas localizadas en zonas de alto riesgo por inundaciones y fenómenos de remoción en masa y del mapa de aptitud del suelo en la zona urbana del municipio de Santa Rosa de Cabal*. Santa Rosa de Cabal.