

Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:10.000 en la subcuenca de la quebrada Las Cruces, municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.

Lessly Katalina Padilla Mora y Laura Juliana Ramírez Quintero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geóloga

Director

Joaquín Andrés Valencia Ortiz

Ms. C. Geología Ambiental y Aplicada

Codirector

Kelly Patricia Sandoval Rincón

Ms. C. Planificación y Gestión de Riesgos Naturales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Mi madre, mi mayor fuente de fortaleza.

Mi padre, quien me acompaña y protege desde el cielo.

Mis abuelos, por su constante apoyo.

Carlos, que me ha demostrado que la familia va más allá del apellido.

Joaquín, un ejemplo de paciencia.

Juli, por su amor y dedicación.

Mi compañero de vida, por su incondicionalidad y confianza.

Mi familia, que siempre ha deseado lo mejor para mí.

A todas las personas que me han acompañado en este camino, les envío mi cariño y agradecimiento sincero.

Lessly Padilla

A mis padres Patricia y Jorge, por su dedicación y esfuerzo constante, por demostrarme que un alma noble es sinónimo de fortaleza y sobre todo por su infinito amor.

A mi hermano Andrés, por ser mi maestro, mi compañía, mi apoyo en todo momento, por ser la fuerza y luz que me guía siempre.

A Joaquín, por su apoyo y su paciencia.

A Less, por su fortaleza y por haber sido mi soporte cunado más lo necesité.

A Lorena, Angélica, Eduardo y Daniela, por su incondicionalidad, compañía, cariño y por brindarme su hermosa amistad.

A mi familia entera por sus consejos, su apoyo, su guía y por motivarme cada día.

A cada una de las personas que me acompañaron durante esta etapa, por sus enseñanzas, su compañía, las risas y todos los recuerdos.

Finalmente, a la vida por haberme rodeado de personas tan bellas y tan valiosas a lo largo de este camino.

Laura Ramírez

Agradecimientos

Agradecemos especialmente a nuestro director de tesis Joaquín Andrés Valencia Ortiz, por la paciencia, dedicación y apoyo a lo largo de la ejecución del proyecto y durante toda nuestra carrera. Sus enseñanzas, tanto en el ámbito académico como en el personal, han sido invaluable. Joaquín, eres un gran ejemplo como profesional y como ser humano para todos nosotros.

Agradecemos a nuestros padres, por apoyarnos y brindarnos la oportunidad de estudiar. Por darnos fuerzas cada día y demostrarnos como desde el esfuerzo, el amor y las ganas de salir adelante se puede avanzar.

A la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo (ACGGP) y la Corporación Geológica ARES por su apoyo mediante el Fondo Corrigan.

A Wilson Sandoval, Silvia Pedraza, Jessica Rincón y Álvaro Manrique por su apoyo y compañía durante el desarrollo del proyecto.

A todos nuestros amigos y compañeros de geología, con quienes compartimos nuestro camino y una pasión en común. Gracias por su apoyo, consejos, aliento, risas y hermosos recuerdos.

A todos y cada uno de nuestros profesores, porque con su sabiduría, conocimiento y guía sin darse cuenta siembran semillas que cambian nuestras vidas, admiramos inmensamente su vocación.

A la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de Geología, por haber sido nuestro segundo hogar y permitirnos adquirir conocimientos no solo académicos sino también humanos.

A Cesar que además de ser un gran jefe, fue nuestro amigo, y hasta el final siempre nos brindó apoyo para tener los espacios necesarios en la escuela para nuestros estudios y desarrollo de proyectos.

A las secretarias de Geología, Rosita y Martha, quienes siempre han brindado su disposición para resolver cualquier duda o trámite necesario a lo largo de la carrera y de este proyecto.

A los habitantes del municipio de San Vicente de Chucurí y en especial al cuerpo de Bomberos, quienes brindaron acompañamiento, guía y apoyo en la fase de campo de este proyecto.

Desde lo más profundo de nuestro corazón, queremos agradecer a todos aquellos que formaron parte de este proceso. Gracias por ayudarnos a crecer; hoy somos quienes somos gracias a las lecciones que todos nos han brindado.

Tabla de contenido

Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1. Objetivo general	15
1.2. Objetivos específicos	15
2. Planteamiento del Problema.....	16
3. Justificación	18
4. Marco teórico	20
4.1. Avenidas torrenciales	20
4.2. Geomorfología de las avenidas torrenciales	23
4.3. Factores desencadenantes de las avenidas torrenciales.....	24
4.4. Evaluación de la Amenaza por avenidas torrenciales	26
5. Localización	27
6. Marco geológico	28
6.1. Estructuras y génesis de la Cuenca VMM	29
6.2. Litoestratigrafía de la zona.....	29
7. Estado del arte	32
8. Metodología	35
8.1. Etapa de recopilación bibliográfica.....	35
8.2. Etapa de generación de insumos	36
8.2.1. Generación de un DEM de mayor detalle	37
8.2.2. Delimitación de la subcuenca hidrográfica	37

8.2.3. Generación del mapa de pendientes	39
8.2.4. Mapa de Unidades geológicas superficiales (UGS).....	41
8.2.5. Mapa de unidades geomorfológicas.....	44
8.2.6. Inventario de procesos morfodinámicos	47
8.2.7. Mapa de cobertura de la tierra.....	49
8.3. Modelamiento de inundación (análisis hidrológico e hidráulico).....	51
8.3.1. Caracterización morfométrica	52
8.3.2. Análisis hidrológico e hidráulico	54
8.4. Control de campo	62
8.5. Análisis multicriterio.....	68
8.5.1. Normalización de insumos.....	69
8.5.2. Asignación de pesos relativos	70
8.5.3. Generación de mapas de amenaza.....	71
9. Resultados	72
9.1. Descripción del mapa de Amenazas avenidas torrenciales de la quebrada Las Cruces....	76
10. Conclusiones	79
11. Recomendaciones.....	80
11.1. Alternativas para mitigar la amenaza presente.....	81
Referencias Bibliográficas	83
Apéndices.....	94

Lista de figuras

Figura 1. A. Número de eventos y víctimas fatales asociadas a los eventos de avenidas torrenciales en Colombia para el periodo 1920-2018. B. Eventos de avenidas torrenciales en la región andina. Tomado de (Aristizabal, Arango, & García, 2020)	17
Figura 2. flujo clasificado como avenida torrencial: zona de tránsito (t) y zona de depósito (d). Tomado de (Servicio Geológico Colombiano, 2017).	22
Figura 3. Fases del proceso de zonificación de amenazas de avenidas torrenciales. Tomado de (Servicio Geológico Colombiano, 2021)	27
Figura 4. Localización zona de estudio, cuenca de la quebrada las cruces en el municipio de San Vicente de Chucurí.....	28
Figura 5. Mapa geológico del área de estudio. Tomado de Macías y Cabanzo (2017), modificado de Ward et al. (1977), Jaimes y López (2015), Osorio (2016) y Araque y Otero (2016).....	31
Figura 6. Metodología de trabajo para el proyecto de investigación.....	38
Figura 7. Proceso empleado para la delimitación de la subcuenca en QGis v. 3.32.3.....	39
Figura 8. Mapa de pendientes del área de estudio.	40
Figura 9. Mapa de UGS del área de estudio.	43
Figura 10. Mapa Geomorfológico del área de estudio.....	46
Figura 11. Inventario de proceso morfodinámicos correspondiente al área de estudio.	48
Figura 12. Mapa de Cobertura de la tierra, tomado y modificado de: (IDEAM et al., 2008). 50	
Figura 13. Curva hipsométrica para la microcuenca de la Quebrada las cruces	54
Figura 14. Curvas IDF, Representación gráfica de la intensidad de la lluvia vs tiempo de concentración para la zona de estudio. (Tiempo de duración de la tormenta: 78 min).	55
Figura 15. Hietograma para un tiempo de retorno de 100 años.....	56

Figura 16. Valores de factor de Bulking (BF) en función de la concentración de sedimentos por peso y volumen. Tomado de: (District & Watershed Protection, 2011).....	58
Figura 17. Modelo de profundidades de inundación para la quebrada Las Cruces.....	60
Figura 18. Modelo de velocidades de inundación para la quebrada Las Cruces	61
Figura 19. Depósito característico de avenida torrencial SVC – 01.....	63
Figura 20. Depósito aluvial antiguo SVC – 03.....	64
Figura 21 . A. Zona de inundación y erosión presente en la quebrada Las Cruces. Tomada en el año 2023 B. Tomada en el año 2022.....	64
Figura 22. Zona de cambio geomorfológico por reducción de la velocidad del cauce, presencia de espacios de depositación.	67
Figura 23. A. Evidencia de hecho histórico por fenómeno de AvT en zona circundante a la Quebrada las Cruces SVC – 07. B. Parte lateral del río se observan casas en peligro de arrastre por subida del nivel base de la quebrada.	68
Figura 24. Esquema de la utilización del análisis multicriterio en el presente caso de estudio.	69
Figura 25. Mapas de Susceptibilidad por movimientos en masa adaptados a avenidas torrenciales generados con las diferentes ponderaciones. (a) ponderación #44, (b) ponderación #66, (c) ponderación #69, (d) ponderación #92 y (e) ponderación #96.....	71
Figura 26. A. Tabla de normalización en cuatro rangos y B. Matriz de comparación utilizada para la generación de los mapas de amenaza por avenidas torrenciales.....	72
Figura 27. Mapas de Susceptibilidad a movimientos en masa adaptados a avenidas torrenciales generados con las diferentes ponderaciones en los que se observan los puntos donde se evidencian depósitos asociados a estos fenómenos de avenidas torrenciales (puntos de control). (a) ponderación #44, (b) ponderación #66, (c) ponderación #69, (d) ponderación #92 y (e) ponderación #96.....	74

Figura 28. Mapa zonificación de amenaza por avenidas torrenciales en la microcuenca de la quebrada Las Cruces.	75
Figura 29. Porcentajes del área total de amenaza por avenidas torrenciales correspondiente a un periodo de retorno de 100 años en la microcuenca de la quebrada Las Cruces, para cada categoría de amenaza	76
Figura 30. Porcentajes del área urbana afectada asociada a la amenaza por avenidas torrenciales correspondiente a un periodo de retorno de 100 años, con respecto al área total del municipio de San Vicente de Chucurí.	77

Lista de tablas

Tabla 1. Geoformas indicativas de zonas de aporte de sedimentos en avenidas torrenciales tomado de (Servicio Geológico Colombiano, 2017).	24
Tabla 2. Unidades/subunidades indicativas de procesos tipo flujo/avenida torrencial. Tomado de (Servicio Geológico Colombiano, 2017)	24
Tabla 3. Parámetros morfométricos de la subcuenca de La Quebrada las Cruces.	53
Tabla 4. Valores de Caudal Pico para cada periodo de retorno.	57
Tabla 5. Área de afectación del casco urbano según el modelamiento de inundación.	61
Tabla 6. Peso en (%) de cada de los insumos Geomorfología, Cobertura de la tierra, UGS y Pendientes para las diferentes ponderaciones de susceptibilidad por movimientos en masa adaptado a avenidas torrenciales preseleccionadas en el análisis multicriterio.	70
Tabla 7. Área total de amenaza por avenidas torrenciales de la quebraba Las Cruces.	78
Tabla 8. Área y porcentaje de afectación de amenaza por avenidas torrenciales en el casco urbano del municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.	78

Lista de apéndices

Apéndice A. Unidades Geológicas Superficiales	94
Apéndice B. Geoformas de Ambiente Denudacional.....	94
Apéndice C. Geoformas de Ambiente Fluvial.	95
Apéndice D. Geoformas de Ambientes Estructurales.	95
Apéndice E. Coberturas de tierra del área de estudio.	96
Apéndice F. Datos pluviométricos (precipitación máxima mensual) tomados de: (IDEAM, 2020).	97
Apéndice G. Tabla unidades geomorfológicas normalizadas.	99
Apéndice H. Tabla unidades geológicas superficiales normalizadas.....	100
Apéndice I. Tabla coberturas del suelo normalizadas.....	101
Apéndice J. Tabla de valores de pendientes normalizadas	102
Apéndice K. Tabla de escenarios de ponderación para generar el mapa de susceptibilidad a movimientos.....	102

Resumen

Título: Zonificación de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:10.000 en la subcuenca de la Quebrada Las Cruces, municipio de San Vicente de Chucurí, Santander. ^{1*}

Autores: Lessly Katalina Padilla Mora, Laura Juliana Ramírez Quintero. ^{**}

Palabras Clave: Amenaza, avenidas torrenciales, inundación, SIG, Quebrada Las Cruces.

Las avenidas torrenciales representan una de las amenazas hidrometeorológicas más devastadoras en términos de impacto en pérdidas humanas y económicas, especialmente en regiones de paisajes montañosos y climas tropicales como Colombia. La zona de estudio se desarrolla en la microcuenca de la Quebrada Las Cruces ubicada en el municipio de San Vicente de Chucurí. Históricamente la población de San Vicente Chucurí ha sido afectada por eventos torrenciales de gran magnitud debido a condiciones de alto porcentaje de precipitación unido a las condiciones topográficas en las que se encuentra ubicado. El objetivo principal de este estudio es generar un Mapa de Zonificación de Amenaza por Avenidas torrenciales con la finalidad de lograr una identificación precisa y objetiva de las zonas con alto porcentaje a ser afectadas por estos eventos, siendo una herramienta imprescindible para mejorar la capacidad preventiva contra los mismos. Este mapa se ha generado utilizando un enfoque de análisis multicriterio que combina la susceptibilidad a movimientos en masa adaptado a avenidas torrenciales junto con la amenaza de inundación como factores fundamentales. El mapa de susceptibilidad se ha elaborado utilizando diferentes condicionantes, que incluyen aspectos como la geomorfología, las Unidades Geológicas Superficiales (UGS), la cobertura de la tierra y pendientes. El resultado se ha traducido en una categorización de cinco niveles de susceptibilidad. Los procesos de modelamiento hidrológico e hidráulico permitieron la digitalización de la amenaza por inundación en los diferentes periodos de retorno. El mapa de amenaza por avenidas torrenciales se generó utilizando una matriz de comparación junto con la evidencia de depósitos encontrados en campo. A partir de los resultados se concluyó que el área de mayor afectación para un periodo de retorno de 100 años se encuentra ubicada en la parte central de la zona Suroeste del poblado, debido a las características geomorfológicas asociadas a condiciones extremas de pluviosidad.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Joaquín Andrés Valencia Ortiz, Msc. en Geología ambiental. Codirectora: Kelly Patricia Sandoval Rincón, Geóloga Msc.

Abstract

Title: Torrential avenue threat Zoning at 1:10,000 scale in the Quebrada Las Cruces Sub-Watershed, Municipality of San Vicente de Chucurí, Santander.² *

Authors: Lessly Katalina Padilla Mora, Laura Juliana Ramírez Quintero.**

Keywords: Hazard, Torrential avenues, flood, GIS, Quebrada Las Cruces.

Torrential Avenues represent one of the most devastating hydrometeorological threats in terms of their impact on human and economic losses, especially in regions with mountainous landscapes and tropical climates as Colombia. The study area is in the micro-watershed of Quebrada Las Cruces, situated in the town of San Vicente de Chucurí. Historically, the population of San Vicente Chucurí has been affected by significant flooding events due to high precipitation percentages combined with the topographical conditions in the area. The main objective of this study is to generate a Torrential Avenue threat zoning Map with the aim of achieving a precise and objective identification of areas with a high likelihood of being affected by these events, this map is an indispensable tool to enhance preventive capacity against them. This map has been generated using a multi-criteria analysis approach that combines susceptibility to mass movements adapted for torrential avenues along with flood threat as key factors." The susceptibility map has been developed using various criteria, including geomorphology, Surface Geological Units (SGUs), land cover, and slopes, resulting in a categorization into five susceptibility levels. The processes of hydrological and hydraulic modeling allowed for the digitization of flood hazard across various return periods. The torrential avenue threat map was generated using a comparison matrix in conjunction with field-deposits evidence. Based on the findings, it was concluded that the most affected area for a 100-year return period is situated in the central part of the Southwest zone of the town, primarily due to geomorphological characteristics associated with extreme precipitation conditions.

*Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Joaquín Andrés Valencia Ortiz, Msc. en Geología ambiental. Codirectora: Kelly Patricia Sandoval Rincón, Geóloga Msc.

Introducción

Los conceptos de susceptibilidad, amenaza y riesgo son términos que en los estudios geotécnicos y la legislación colombiana tienen sentidos puntuales que brindan a las poblaciones una certeza de cómo organizarse territorialmente. El concepto en el que se basa este trabajo de investigación es el de amenaza, el cual hace referencia a un peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales (Ley 1523, 2012). Teniendo en cuenta esta definición, la amenaza entonces se diferencia del riesgo que trata de las pérdidas y el nivel de impacto por la acción de eventos físicos y de la susceptibilidad que hace referencia a la predisposición a sufrir diversos impactos por la acción de eventos físicos.

El paisaje actual se ha visto afectado por la construcción deliberada en zonas cercanas a flujos de agua que se caracterizan por presentar susceptibilidad a afectarse por eventos naturales como las avenidas torrenciales. Este fenómeno a su vez ha generado catástrofes en las que se ha observado como caseríos y poblados han desaparecido cobrando la vida y las pertenencias de comunidades enteras. Esto se debe principalmente al resultado de un uso inadecuado del suelo, especialmente en terrenos montañosos, donde hay una escorrentía superficial más rápida; por lo que existe mayor susceptibilidad a que ante la acción de las precipitaciones intensas pueden provocar inundaciones y avalanchas representando un determinado nivel de amenaza para dichas comunidades. La forma de mejorar esta situación es cambiar la forma en que se gestiona la tierra mediante el uso de medidas adecuadas en el área de influencia (Štěpánková, Dumbrovský, & Drbal, 2017), a partir de análisis geotécnicos que determinan las zonas de amenaza por avenidas torrenciales.

Es posible identificar las áreas más amenazadas, por ejemplo, a través de la categorización del suelo en términos del potencial ocurrencia de inundaciones por lluvias torrenciales, con un efecto negativo en las áreas antrópicas. En este caso se realizaron una serie de estudios que permiten elaborar una zonificación de la amenaza que existe en los alrededores de la quebrada Las Cruces dentro de la probabilidad de presentar eventos de avenidas torrenciales. Esta zona que se caracteriza según la Unidad Nacional para la Gestión de Riesgos de Desastres- Colombia (UNGRD): Santander, junto a otros departamentos como Cesar, Antioquia y Choco, para el año 2018 es uno de los más susceptibles a presentar avenidas torrenciales (Vanguardia, 2018). Considerándose como avenidas torrenciales a aquellos eventos hidrológicos crecientes, avalanchas, crecidas o torrentes que provocan daños en infraestructura y pérdida de vidas humanas, producidos como consecuencia de episodios extremos de lluvias producidos en las zonas de alta montaña (CORNARE, 2011) (Petrovic, 2015).

Para llevar a cabo una determinación de las amenazas por avenidas torrenciales se debe completar una serie de estudios en profundidad sobre la cuenca hidrológica en cuestión, entre estos estudios se encuentra el análisis hidrológico (cuencas, morfometría, eventos torrenciales y lluvias) y el análisis de sedimentos, análisis hidráulico (modelo hidráulico) y la identificación de las áreas de amenaza, usando como insumos los anteriores análisis y dando como resultado la zonificación de la amenaza de la zona de interés (análisis multicriterio) (IDIGER, 2017). El recurso informático usado en el desarrollo de esta investigación fue QGis v. 3.32.3, software que permitió la elaboración del mapa de amenaza por avenidas torrenciales, haciendo uso de las herramientas y técnicas disponibles para el procesamiento de los datos remotos. Este mapa también tiene como objetivo no sólo visualizar las zonas de amenaza sino, una delimitación objetiva de la ocupación correcta del territorio.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Definir el grado de amenaza por avenidas torrenciales a escala 1:10.000 utilizando una metodología multicriterio para la zona urbana aledaña a la quebrada Las Cruces en el municipio de San Vicente de Chucurí.

1.2. Objetivos específicos

Calcular el caudal para la cuenca de la quebrada Las Cruces a partir de un modelo hidrológico de conversión precipitación-escorrentía, utilizando el software HEC-HMS.

Analizar la variación por inundación del cauce de la quebrada Las Cruces empleando el software HEC-RAS, para incorporar los resultados al modelo de avenidas torrenciales.

Caracterizar los depósitos generados por avenidas torrenciales presentes en la zona de estudio.

Generar un mapa de amenazas por avenidas torrenciales a escala 1:10.000 implementando un Sistema de Información Geográfica (SIG).

2. Planteamiento del Problema

Las inundaciones repentinas en cuencas montañosas áridas se han considerado durante mucho tiempo como una de las amenazas naturales más riesgosas del mundo, esto sumado a los cambios constantes generados por el cambio climático como inundaciones extremas, huracanes, inundaciones costeras, deslizamientos de tierra, olas de calor e incendios forestales acentúan la posibilidad de estos eventos naturales. Esta situación se complejiza aún más a partir de la alternancia de sequías prolongadas y tormentas extremas, ya que puede agravar los impactos adversos de las inundaciones repentinas al aumentar la dureza de la capa superior del suelo y, por lo tanto, aumentar la porción de escorrentía superficial a expensas de la infiltración al subsuelo (Othman et al., 2023).

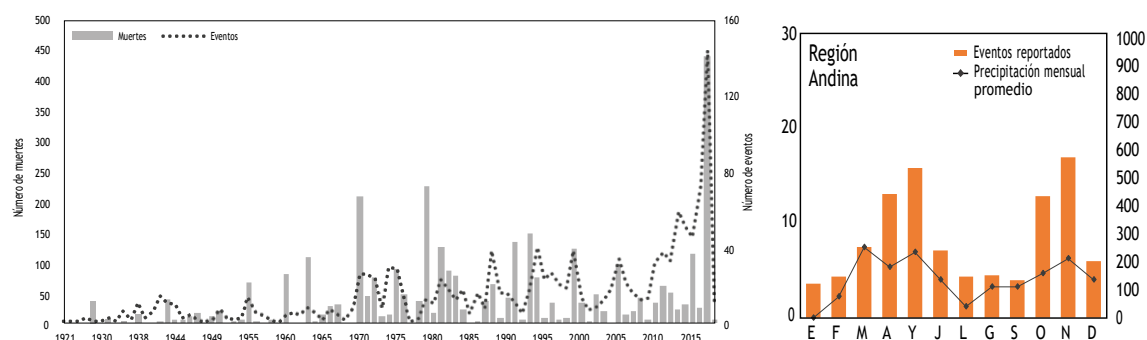
A nivel mundial se han dado eventos devastadores de avenidas torrenciales que han dejado como consecuencia grandes pérdidas, estos fenómenos se han dado principalmente en zonas en las que se presentan temporadas de lluvias torrenciales excepcionales, esto se ha evidenciado en las estadísticas por entidades como la CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), la cual ha determinado que la mayoría de los desastres estudiados por dicha entidad son de origen climático —meteorológico e hidrológico— o geofísico, y entre 1972 y 2011 fueron responsables de 311.127 fallecimientos, afectaron a alrededor de 34 millones de personas y provocaron un impacto económico aproximado de 210.000 millones de dólares (CEPAL, 2013). Este mismo documento asegura que de la totalidad de desastres registrados en ese mismo periodo de tiempo 583 estuvieron vinculados a movimientos de masa húmeda.

Colombia al estar ubicada dentro de la zona tropical cumple con estas características, geomorfológicamente se compone de grandes valles y escarpes denudacionales condicionados por su grado de erosión y meteorización, que permite dos únicas estaciones climáticas una de

lluvia y otra de sequía (Montoya, Silva, & González, 2009). En el territorio nacional se han experimentado eventos asociados a avenidas torrenciales en multitud de ocasiones, de acuerdo con datos extraídos del Sistema de Inventario de Efectos de Desastres (DesInventar), se han registrado 1.139 avenidas torrenciales entre 1914 y 2018, con un saldo de 3.318 víctimas fatales (Aristizabal, Arango, & García, 2020), localmente en Santander se han registrado 64 eventos de avenidas torrenciales con un saldo de 268 muertos, representando el 5% de la totalidad de dichos eventos (DesInventar, 2023). Por otra parte, se presentan eventos de avenidas torrenciales impactantes como la evidenciada en el año 2017 que causó 349 muertes y afectó a más de 45,000 personas en el departamento del Putumayo (Naciones Unidas, 2020).

Figura 1

A. Número de eventos y víctimas fatales asociadas a los eventos de avenidas torrenciales en Colombia para el periodo 1920-2018. B. Eventos de avenidas torrenciales en la región andina.



Nota. Tomado de (Aristizabal, Arango, & García, 2020)

Finalmente, enfocando la atención en la zona de estudio, se ha observado una serie de eventos que alertan a los ciudadanos y las entidades gubernamentales, puesto que en abril del 2018 en el municipio de San Vicente de Chucurí se registró una de las avenidas torrenciales más fuertes de los últimos 10 años, no se ocasionaron pérdidas humanas, pero si se tuvieron que evacuar a más de 400 personas según datos de prensa (Vanguardia, 2018). Además, es importante señalar que se han registrado avenidas torrenciales de gran magnitud en los últimos años en el municipio de San Vicente de Chucuri, quedando como registro histórico de los

eventos dados; el 12 de octubre de 1996, el 18 de mayo del 2011, el 21 de julio del 2012 y el 26 de abril del 2018 (Ávila, 2018). Sin embargo, estos registros están asociados solo a la zona del casco urbano y a un programa de gestión del riesgo elaborado en el año 2013. Cabe resaltar también, que San Vicente del Chucurí hace parte de la zona andina del país donde mayormente se registran los eventos de avenidas torrenciales (Aristizabal, Arango, & García, 2020). La posibilidad de que se generen nuevamente avenidas torrenciales en la Quebrada Las Cruces infiere la necesidad de elaborar un mapa que zonifique la zona en términos de amenazas de avenidas torrenciales y comenzar así a dar mayor importancia a la gestión de los eventos naturales.

3. Justificación

En la actualidad y a nivel nacional son pocos los modelos que han logrado determinar el comportamiento de un flujo con potencial a generar una avenida torrencial, dada la complejidad que involucra obtener suficientes datos de entrada e insumos aplicables, que además se adecuen a la escala. Es por esto por lo que en este trabajo se busca generar un modelo basado en datos de campo, análisis históricos de inundación y rasgos geológico-geomorfológicos, que permita comprender de mejor manera los factores condicionantes y detonantes asociados, y que su vez, sea un aporte para generar posteriormente una caracterización más detallada de las zonas de riesgo.

Este estudio aplicado puntualmente en la zona de la quebrada Las Cruces, la cual es una zona que ha presentado cierta susceptibilidad al impacto de su comunidad por el posible desencadenamiento de avenidas torrenciales. Es esta la primera razón por la cual se realizó este trabajo de investigación, la cual está basada en la necesidad de tener un punto de partida para dar relevancia y procesar más información geotécnica en la zona previniendo así posteriores

desastres hidrometeorológicos. Es decir, constituye un punto de partida en el estudio de la amenaza, con el fin de apoyar posteriormente un Plan de Ordenamiento Territorial, elemento que funciona como un instrumento técnico y normativo de planeación y gestión de largo plazo; se definen como el conjunto de acciones y políticas, administrativas y de planeación física, que orientarán el desarrollo del territorio municipal por los próximos años y que regularán la utilización, ocupación y transformación del espacio físico urbano y rural (Ley 388, 1997).

Se justifica la elaboración de este trabajo de investigación en el aporte técnico que se da a la comunidad, dado que, los mapas de amenaza de inundación son herramientas valiosas para la planificación estratégica y el crecimiento de la comunidad, particularmente en ciudades con grandes poblaciones, donde se deben establecer lineamientos de infraestructura y se debe asegurar el cumplimiento estricto de estos lineamientos en la construcción de nuevos asentamientos urbanos y megaproyectos de infraestructura (Othman et al., 2023). Evitando que la zona se intervenga de manera antrópica, puesto que se ha demostrado que la intervención humana, como la construcción de proyectos residenciales, industriales, agrícolas, de infraestructura y otros proyectos de transporte, es una de las principales causas de diferentes peligros naturales, en lugares no idóneos es la principal causa de afectaciones (Othman et al., 2023).

Otras herramientas que se ponen al servicio de la comunidad son las técnicas geomáticas como la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG) para la modelización y evaluación de los impactos de las crecidas repentinas, así como su integración con la metodología para desarrollar un modelo hidrológico e hidráulico. Se han considerado excelentes herramientas científicas que proveen de datos cuantitativos derivados de los modelos hidrológicos e hidráulicos ideales para evaluar el riesgo de inundaciones repentinas y para examinar el impacto del uso de la tierra en las inundaciones (Othman et al., 2023).

El impacto en la comunidad de este proyecto de investigación se traduce en la posibilidad de evitar catástrofes provocadas por una ineficiente organización territorial. De acuerdo a los datos tomados a través del tiempo se ha observado en el territorio nacional un aumento en el número de personas muertas a causa de eventos de avenida torrencial. En la (Figura 1.A) es posible observar que los valores máximos que sobresalen en la curva de muertes corresponden a eventos que tuvieron un gran impacto en términos de pérdida de vidas humanas (Aristizabal et al., 2020).

Se puede inferir que este aumento progresivo se debe a causas naturales que se han vuelto más críticas por el cambio climático, pero, también por los asentamientos aledaños a las cuencas hidrográficas. El caso de estudio ubicado en la Cuenca la quebrada Las Cruces, en el municipio de San Vicente de Chucurí – Santander zona que requiere de un estudio a partir del cual se pueda realizar un reconocimiento de las condiciones geomorfológicas, hidrológicas y meteorológicas que condicionan la creación de avenidas torrenciales en la zona. Finalmente, a partir de estos estudios será posible una gestión eficaz del riesgo de los impactos de las avenidas torrenciales que repercute en la reducción de la vulnerabilidad en las ciudades, o en las comunidades en general frente a este tipo de fenómenos naturales.

4. Marco teórico

4.1. Avenidas torrenciales

Las definiciones sobre las avenidas torrenciales son variadas, dependen de la disciplina, la entidad o programa que las conceptualice, por ejemplo, son entendidas como fenómenos gravitacionales pertenecientes al género de los movimientos en masa, en el caso de la geología. En cambio en el caso de la hidrología, se consideran similares a las crecientes súbitas, por parte de profesionales en el campo de la hidrología. Las avenidas torrenciales son fenómenos

naturales que se presentan esporádicamente, su ocurrencia es relativamente baja, pero presentan un alto porcentaje de destrucción, implican daños en la infraestructura, calamidades humanitarias y cientos de damnificados. Es un fenómeno de movimientos de masas en el que el agua de una corriente aumenta considerablemente su volumen por el transporte de material sólido que ha caído a su cauce desde las laderas adyacentes (INGEOMINAS, 2018), otros documentos lo definen como flujo de detritos y los POMCA (Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas) como crecientes súbitas que debido a la caracterización de la cuenca están compuestas por un flujo de agua con alto contenido de materiales de arrastre, con un gran potencial destructivo debido a su alta velocidad (Aristizabal et al., 2020).

Las avenidas torrenciales se generan por efecto de los cauces que se generan en cuencas pequeñas y de montaña (no superiores a 300 km² e inferiores a 150 km² en lo dispuesto en el POMCA (Consortio POMCA, 2014) puesto que, son cuencas con características geomorfológicas que favorecen un alto transporte y alta acumulación de sedimentos sobre el cauce (Figura 2), como lo son cambios drásticos en el gradiente del afluente, alta densidad de drenaje y eventos de precipitación (SGC, 2017), para este tipo de cuencas basta con un evento de precipitación intensa para que afecte la totalidad de la cuenca, y se genere escorrentía directa en los tributarios de diferentes órdenes, a diferencia de una cuenca de mayor área, donde es poco probable que se recojan lluvias simultáneamente en todos los sectores ralentizando la escorrentía (González, Hermelin, & Cháves, 2004).

Figura 2

Flujo clasificado como avenida torrencial: zona de tránsito (t) y zona de depósito (d).



Nota. Tomado de (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Generalmente, son estudiados a través de las características de la cuenca a la que pertenecen en función de la evaluación de susceptibilidad, amenaza y riesgos a los que pueden estar sometida determinada cuenca. La combinación de características como su naturaleza casi impredecible, la gran velocidad a la que actúa, su corta duración y su largo período de retorno implican el desarrollo de una gran destrucción, a esto se le suma que son eventos que tienen una distribución espaciotemporal heterogénea que complejiza su predicción y gestión (Montoya, Silva, & González, 2009).

En lo que respecta a su clasificación resulta compleja debido a que estos flujos torrenciales tienen la particularidad de variar en diferentes proporciones tanto de fluido como de sedimento y es así como diferentes autores han propuesto su categorización correspondiente. Los flujos y los sedimentos determinan el tipo de fenómeno experimentado, pueden clasificarse en flujos hiperconcentrados, flujos de lodo, flujos de escombros o transiciones entre estos

(Caballero J. , 2011). Mientras que (Iverson, 1997) ha determinado la clasificación a partir de cuál de los dos componentes define la transferencia de momento, entonces, expone que los procesos gravitacionales como aquellos donde las interacciones entre los fragmentos sólidos dominan la transferencia de momento, y las inundaciones cargadas de sedimentos como aquellas donde la turbulencia del fluido domina la transferencia de momento; para casos intermedios usa el término flujos de escombros, donde los sólidos y fluidos deben transferir el momento de forma sinérgica para sostener el movimiento.

Algunos determinan que la clasificación también puede darse a partir del agente principal que genera el flujo, que puede ser el agua o el sedimento. A partir de ello se han propuesto límites de concentración en peso y volumen para diferenciar flujos de agua con flujos hiperconcentrados y flujos de escombros. En general, se proponen valores por encima del 30% en volumen para flujos hiperconcentrados y valores por encima del 70% en volumen para flujos gravitacionales (Bradley, 1986) citado por (Aristizabal et al., 2020).

4.2. Geomorfología de las avenidas torrenciales

Previamente se definió a las avenidas torrenciales y se identificó uno de sus principales componentes que hace referencia a la existencia de sedimentos provenientes de movimientos en masa, los cuales finalmente hacen parte de la cartografía como subunidades geomorfológicas y que, a criterio del experto, se pueden usar como complemento del análisis de avenidas torrenciales y representan evidencia de la ocurrencia de estos fenómenos naturales, estos están expuestos en la (Tabla 1) como un listado de geoformas indicativas de estas posibles zonas de aporte. Por otra parte, las avenidas torrenciales también son generadoras de geoformas que a causa del flujo torrencial desembocan en zonas planas (denudacionales y fluviales) en la (Tabla 2) son expuestas dichas subunidades (SGC, 2017).

Tabla 1

Geoformas indicativas de zonas de aporte de sedimentos en avenidas torrenciales.

Ambiente geomorfológico	Unidad/subunidad geomorfológica
Volcánico	Cono lahárico
	Escarpe de flujo lahárico aterrazado
	Escarpe de flujo piroclástico aterrazado
	Flujo lahárico aterrazado
	Flujo piroclástico aterrazado
	Lóbulo de flujo lahárico y piroclástico
Fluvial	Albardones o dique natural
	Complejo de orillales
	Planicie aluvial confinada
	Plano o llanura de inundación
	Terraza de acumulación
	Escarpe de terraza de acumulación
	Terraza de acumulación subreciente
	Terraza de acumulación antigua
	Plano anegadizo
Glaciar	Cono y lóbulo de gelifracción
	Conos glaciofluviales
	Flujo volcánico glaciado

Nota. Tomado de (Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Tabla 2

Unidades/subunidades indicativas de procesos tipo flujo/avenida torrencial.

Ambiente geomorfológico	Unidad/subunidad geomorfológica
Denudacional	Cono o lóbulo de flujo indiferenciado
	Lóbulo y cono de avalancha de detritos
	Lóbulo y cono de avalancha de rocas
Fluvial	Abanico aluvial
	Abanico aluvial antiguo
	Abanico aluvial subreciente
	Abanico aluvial actual
	Abanico aluvial incisado
	Abanicos aluviales coalescentes no diferenciados (bajadas)
	Cono de deyección

Nota. Tomado de (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

4.3. Factores desencadenantes de las avenidas torrenciales

A diferencia de otro tipo de fenómenos de origen natural, como los movimientos en masa, que presentan múltiples factores condicionantes pero un solo factor detonante, las avenidas torrenciales generalmente se presentan como el resultado de un fenómeno en cascada,

donde la lluvia siempre juega un papel fundamental, aunque no siempre detonante (Aristizabal et al., 2020). Las avenidas torrenciales se dan principalmente debido a la acción de una combinación entre los fenómenos de precipitación de alta intensidad sumado a una disponibilidad de sedimentos finos granulares de tipo arcilla o limo que puedan moverse fácilmente por la crecida, dichos sedimentos pueden provenir de deslizamientos, erosiones, o movimientos de material depositado de procesos antrópicos de construcción que son afectados por el mismo evento meteorológico (Caballero J. , 2011). A estas dos características se suman las altas pendientes de la cuenca, que pueden generar movimiento en masa con altas velocidades. La probabilidad de ocurrencia entonces está dictada por la convergencia de estos tres factores los cuales se replican en zonas donde hay cambios marcados en las pendientes ubicándose en quebradas o valles de cuencas hidrográficas (UNAL, 2009).

Otra manera de determinar el desencadenamiento de las avenidas torrenciales es a través de su relación con los deslizamientos. Observaciones de campo y experimentos de laboratorio y los análisis teóricos permitieron a (Iverson, 1997) plantear que los deslizamientos de tierra pueden moverse para formar flujos de escombros mediante tres procesos: (a) falla de Coulomb generalizada en una masa del suelo, (b) licuefacción parcial o completa del suelo por altas presiones de poros que pueden causar o acompañar la falla de Coulomb, y (c) la conversión de la energía de traslación de deslizamiento de tierra a energía vibratoria interna (es decir, temperatura granular). Donde la falla de Coulomb describe el criterio de deslizamiento a lo largo de superficies discretas en materiales granulares de muchos tipos (Iverson, 1997).

El POMCA describe otros factores desencadenantes de las avenidas torrenciales además de los tres principales (pendiente, presencia de sedimentos y altas precipitaciones) este documento establece que el tamaño y la forma de la cuenca son claves en el desarrollo de las avenidas torrenciales, la primera por la facilidad de acumular eventos de precipitación y la segunda por la trayectoria en las líneas de flujo, en una cuenca circular todas siguen una

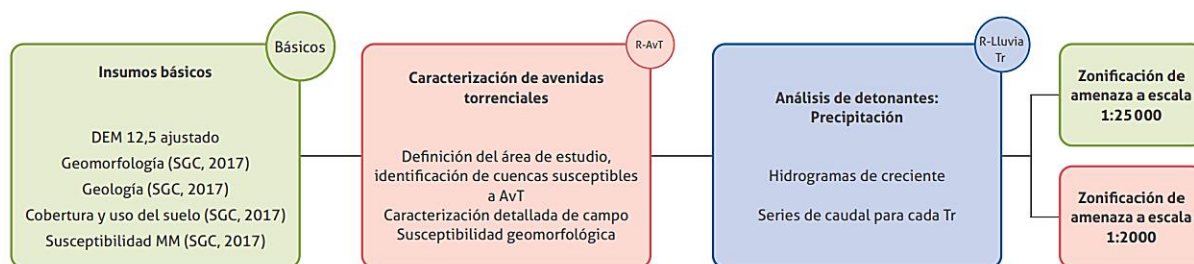
trayectoria corta y son más sincrónicas. La geomorfología también juega un papel importante, puesto que las avenidas torrenciales se generan en zonas montañosas, escarpadas y de piedemonte, en donde se configuren notorios cambios de la pendiente del cauce y donde la erosión predomina sobre la sedimentación. En cuanto a la cantidad y el aporte de los sedimentos, estos deben ser heterométricos gruesos combinados con finos, siendo el material geológico superficial determinante en la ocurrencia y tipo de fenómeno. Finalmente, destacan características como la permeabilidad y humedad del suelo. Si el suelo está saturado durante una precipitación, no permitirá infiltración adicional y toda la lluvia se convierte en escorrentía. En zonas secas se tiene una tasa específica a la que puede absorberse la lluvia, llamada la capacidad de infiltración. Si el índice de pluviosidad excede la capacidad de infiltración, conduce a una producción rápida y eficiente de escorrentía superficial (Consortio POMCA, 2014).

4.4. Evaluación de la Amenaza por avenidas torrenciales

La determinación de la amenaza por avenida torrencial de una cierta zona está también definida por dos metodologías. En primer lugar, se establece en la guía de formulación de los POMCA el uso de parámetros morfométricos para evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca, el parámetro desarrollado es llamado Índice de Vulnerabilidad frente a Eventos Torrenciales (IVET). En cambio, en las guías que ha elaborado el Servicio Geológico Colombiano (SGC) se han propuesto métodos estadísticos para evaluar la susceptibilidad por movimientos en masa sobre las laderas de la cuenca (Aristizabal et al., 2020).

Figura 3

Fases del proceso de zonificación de amenazas de avenidas torrenciales.



Nota. Tomado de (Servicio Geológico Colombiano, 2021)

Para efectos de este trabajo de investigación se propuso hacer uso de la metodología de zonificación establecida por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) (

Figura 3) con algunas modificaciones puesto que el plan de trabajo fue propuesto previo a la elaboración de esa guía, el cual se compone de tres grandes fases: la primera es la recopilación y análisis de información secundaria, la segunda es la caracterización de avenidas torrenciales en campo, la última es la integración de los resultados (SGC, 2021).

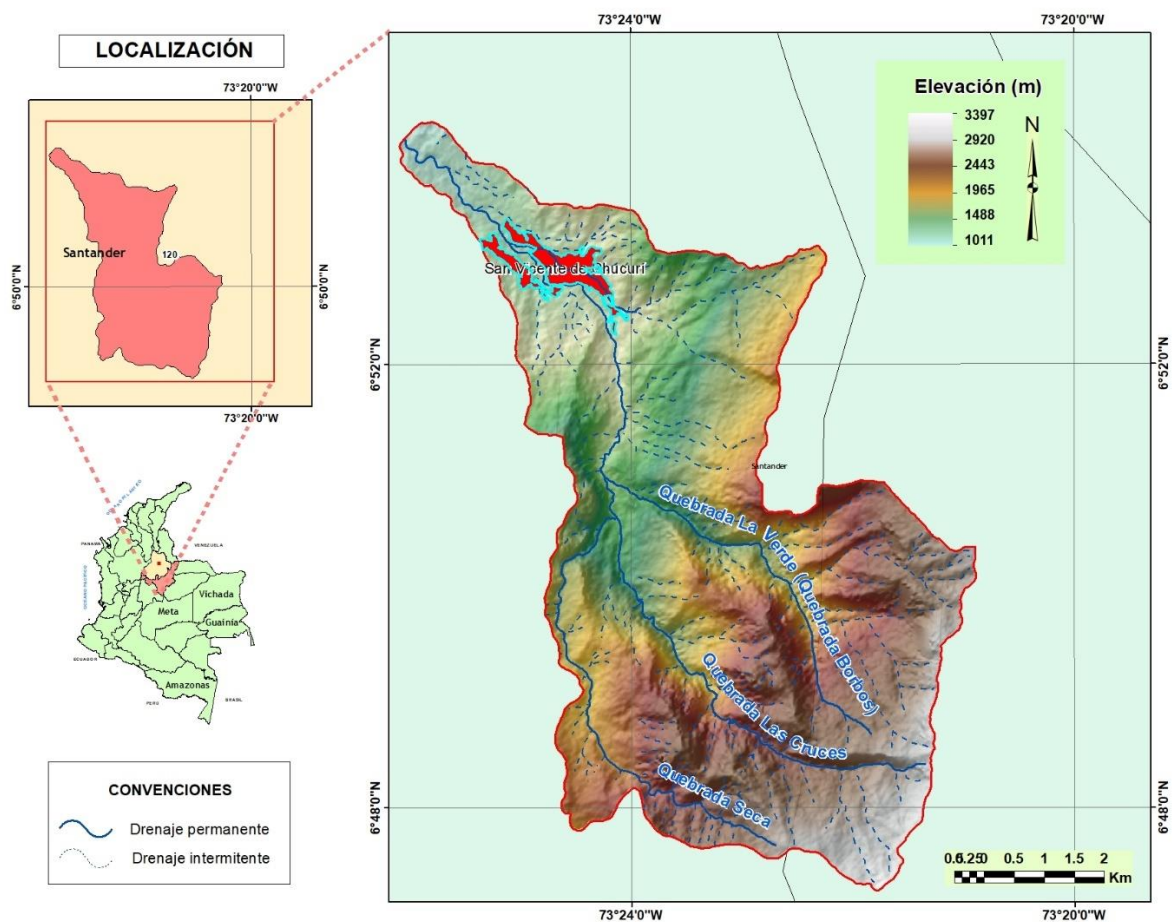
5. Localización

La zona de estudio (Figura 4) comprende al casco urbano y parte del área rural del municipio de San Vicente de Chucurí (Santander), más específicamente toda el área de la cuenca de la quebrada Las Cruces, ubicada en el sector occidental de la Cordillera Oriental en el departamento de Santander y de acuerdo con la cartografía base realizada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) comprende parte de la zona occidental de la plancha 120-Bucaramanga, el proyecto abarca un área de estudio de 57.42 km². De acuerdo con los reportes generados por el DANE, el municipio de San Vicente de Chucurí cuenta con una población de 34,881 habitantes para el año 2017, de los cuales según proyecciones el 39.5% están ubicados en la zona urbana y el 60.5% en la zona rural. El municipio tiene una extensión geográfica de

1104 km² (DNP, 2018), limita al Norte con el municipio de Betulia, por el Occidente con Barrancabermeja, por el Sur se ubica el Carmen de Chucurí, y por el Oriente está Zapatoca. Se encuentra en la provincia de Yariguíes a una distancia de 87 kilómetros de Bucaramanga, la capital de Santander (Colombia Turismo web, s.f.).

Figura 4

Localización zona de estudio, cuenca de la quebrada las cruces en el municipio de San Vicente de Chucurí.



6. Marco geológico

El marco geológico de la zona ubicada en el municipio de San Vicente de Chucurí tiene sus bases en el estudio de (Monroy & Sandoval, 2015), (Clavijo, 1996) y algunas modificaciones propuestas por (Cediell, 1968), cada uno de estos autores realiza una

descripción de las rocas aflorantes en el área de estudio, así como la identificación de algunos de sus procesos de depositación. La secuencia estratigráfica del área abarca rocas sedimentarias generalmente plegadas con edades que se extienden desde el Mesozoico hasta el Cenozoico (Figura 5), las cuales se depositaron en una cuenca que experimentó cambios a lo largo del tiempo hasta convertirse en la actual porción del flanco occidental de la Cordillera Oriental.

6.1. Estructuras y génesis de la Cuenca VMM

La zona para la cual se realizó este trabajo de investigación corresponde a un área ubicada dentro del marco estructural de la cuenca del Valle Medio del Magdalena (VMM) (Cetina, Velandia, & Patiño, 2019). La zona de San Vicente de Chucurí pertenece a la subdivisión del Norte de la Cuenca VMM la cual está determinada por la Falla de Cimitarra (Sarmiento, Puentes, & Sierra, 2015). Corresponde a un área tectónicamente compleja lo que genera que la geología no sea uniforme en cercanías a la zona urbana del municipio, el sistema de fallas indica un movimiento NW y SE, con dirección SW/NE.

6.2. Litoestratigrafía de la zona

Formación Angostura del Rio Lebrija: constituida por arenitas conglomeráticas con interposición de limolitas y arcillolitas rojas, La edad asignada es Jurásico medio – Cretácico inferior (Etayo F. , 1989).

Formación Los Santos: esta unidad compuesta principalmente por areniscas conglomeráticas, lodolitas de color grisáceo y rojo, y cuarzo-areniscas de tono amarillento. Estas capas muestran estratificación cruzada. Las estructuras sedimentarias presentes en esta formación se caracterizan por ser similares a las encontradas en ríos trenzados, según lo descrito por (Cediel, 1968).

Formación Rosablanca: en la zona de San Vicente de Chucurí se presenta como una Formación compuesta de limolitas arenosas y lutitas calcáreas de color gris oscuro (Monroy &

Sandoval, 2015). Una unidad fosilífera, muy cementada de ahí su apreciable dureza, con intercalaciones menores de margas, shales calcáreos (Clavijo, 1996).

Formación Paja: corresponde a limolitas arenosas, laminadas, frágiles y lutitas calcáreas en capas delgadas; las cuales se hallan dispuestas en estratificación plano-paralela discontinua, en contactos ondulados. En algunos de los afloramientos son notables óxidos de hierro diseminados dentro de los planos (Monroy & Sandoval, 2015) mostrando así un ambiente de depositación marino somero (Cetina et al., 2019).

Formación Simití: en la zona consta de shale, blando, laminado, carbonáceo, gris a negro, localmente calcáreo y concrecional y delgadas bandas conglomeráticas con guijos pequeños, nódulos fosfáticos, dientes de peces y arena, ocurren localmente muy cerca del tope (Monroy & Sandoval, 2015).

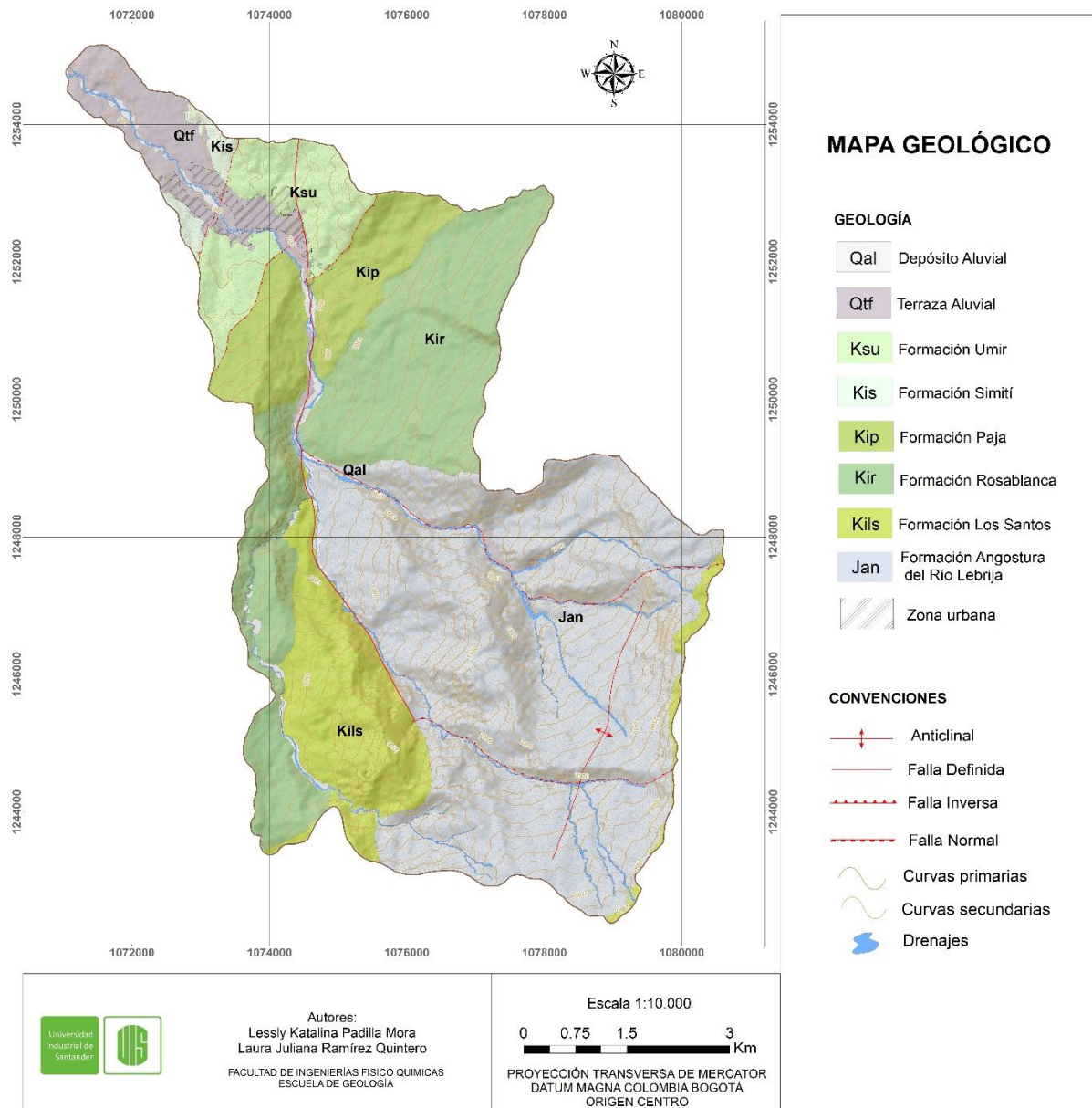
Formación Umir: en una descripción más detallada en la zona se denota arenitas de grano fino a muy fino en capas delgadas a capas medias, con planos de estratificación ondulados no paralelos, se denota también la presencia de arcillolitas intercaladas con limolitas silíceas con planos de estratificación plano paralelos en capas delgadas y capas medias que le dan una apariencia escalonada y limolitas de color gris con estratificación plana paralela continua, en capas delgadas y láminas gruesas (Monroy & Sandoval, 2015).

Depósitos de tipo aluvial: compuestos por bloques de limolitas calcáreas, calizas, shales, chert, limolitas, areniscas de grano grueso y conglomeráticas pertenecientes a las formaciones: Paja, Tablazo, Simití, La Luna, Umir, Lisama, y La Paz, transportados por el drenaje habitual de la zona que retrabajan y moldean dichos bloques y los depositan en las quebradas y el río Chucurí, (Monroy & Sandoval, 2015).

Terrazas aluviales: producidas por la dinámica fluvial en dirección sureste – noroeste de las quebradas Las Cruces y Cantarrana, bloques y sedimentos provenientes de las Formaciones Rosablanca y Paja, fueron depositados a medida que el agua iba perdiendo su energía (Monroy & Sandoval, 2015).

Figura 5

Mapa geológico del área de estudio.



Nota. Tomado de Macías y Cabanzo (2017), modificado de Ward et al. (1977), Jaimes y López (2015), Osorio (2016) y Araque y Otero (2016).

7. Estado del arte

El estudio de las Avenidas Torrenciales en Colombia no ha desarrollado gran interés científico, sin embargo, si interés técnico debido al riesgo que suponen este tipo de fenómenos naturales para la comunidad que los experimenta, comunidades que reconocen este fenómeno como avalancha.

Los trabajos realizados por (Hermelin, Mejía, & Velasquez, 1992) analizan las características hidrológicas y los procesos geomorfológicos generados en la cuenca superior del río San Carlos a partir de un evento convulsivo del 21 de septiembre de 1990, el cual fue desencadenado a partir de una fuerte tormenta. Describe como estos eventos generan tanto flujos de lodo poco profundos en las laderas, como una gran erosión en el canal principal además de depósitos torrenciales con gran diferenciación en cuanto a su tamaño (encontrándose desde bloques de gran tamaño hasta arcilla).

En el estudio de (González, Hermelin, & Cháves, 2004) se resalta la importancia de comprender las avenidas torrenciales debido a su alto potencial destructivo. Estos eventos son impredecibles, rápidos, de corta duración y con un largo período de retorno, lo que los hace peligrosos. Además, se mencionan diversos factores geomorfológicos que pueden desencadenar estas avenidas, como el tamaño pequeño de la cuenca, la forma circular, la ubicación en áreas montañosas con relieve abrupto, la presencia de valles en "V" y una red densa de drenaje. También se destaca la influencia de la precipitación y la saturación del suelo en la generación de avenidas torrenciales.

En el trabajo de (Caballero J. , 2011) se destacan las características fundamentales de las avenidas torrenciales, incluyendo su relación con factores geomorfológicos como el tipo de flujo y los materiales transportados. El autor se enfoca en evaluar la amenaza potencial de

avenidas torrenciales en el Valle de Aburrá, donde las condiciones climáticas y geomorfológicas predisponen al área a experimentar estos fenómenos.

(Jaramillo, Silva, & González, 2009) realizaron un trabajo en el territorio nacional donde desarrollaron una metodología para evaluar la amenaza de avenidas torrenciales en la cuenca de la quebrada Doña María. Utilizaron sistemas de información geográfica y la técnica de residuos ponderados para asignar pesos relativos a factores como topografía, pendiente, geología, geomorfología, red de drenaje acumulada, distancia a los cauces e índice de Melton en las microcuencas de la cuenca. Se centra en una metodología que se enfoca en el análisis de múltiples criterios para evaluar el nivel de amenaza por avenidas torrenciales en la región, incorporando conceptos hidrológicos, físicos e hidráulicos de manera práctica. La metodología se basa en un método previamente desarrollado por (Ordóñez & Martínez, 2003), que implica la superposición de varias capas temáticas que contienen información sobre las condiciones del terreno y parámetros relevantes. En el caso de la cuenca de la quebrada Doña María, se utilizaron datos como el modelo digital de elevación (DEM), el mapa de geología y geomorfología, la red de drenaje acumulada, el mapa de pendientes, la distancia a los cauces y el índice de Melton para las microcuencas en la zona de estudio (Jaramillo, et al, 2009).

Las Corporaciones Autónomas Regionales han comenzado a tomar medidas relacionadas con la gestión de avenidas torrenciales. Por ejemplo, la CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca) en colaboración con Ingeominas ha desarrollado una Guía Metodológica para la Zonificación de Amenazas por fenómenos de remoción en masa y escenarios de riesgo por avenidas torrenciales. Esta guía se basa en varios factores, como la litología, zonificación geomorfológica, aspectos estructurales, registros históricos y análisis hidráulico.

Además, CORNARE (2011) presentó un informe que evaluó y zonificó los riesgos de avenidas torrenciales, inundaciones y movimientos en masa en el municipio de La Ceja, Antioquia. Utilizaron un método indirecto que considera la interacción entre las características del terreno y las condiciones sociales para identificar la posibilidad de que ocurra un evento.

El estudio realizado por Vargas, et al. (2019) se centró en evaluar la susceptibilidad a avalanchas de escombros y deslizamientos de tierra en la ciudad de Mocoa, específicamente para el evento del 1 de abril de 2017. Utilizaron dos enfoques de modelado diferentes, Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS) y Regresión Logística (LR), para calcular la probabilidad de que ocurrieran deslizamientos de tierra. Para construir estos modelos, emplearon nueve atributos del terreno derivados de un Modelo Digital de Elevación (DEM) con alta resolución de píxeles, que incluyeron información sobre elevación, pendiente, orientación, índices topográficos y otros factores geológicos como litología, distancia a fallas y presencia/ausencia de procesos de fluencia del suelo.

En el contexto local, no se han destacado estudios específicos sobre avenidas torrenciales, pero se ha observado que la Gobernación de Santander, junto con entidades gubernamentales como las alcaldías de Zapatoca y San Vicente de Chucurí, han incorporado el componente de gestión del riesgo en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio. En este contexto, se incluyó un estudio de amenaza por avenidas torrenciales realizado por la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS) en el componente de gestión del riesgo urbano del POT (Ministerio de Ambiente, 2013).

Estudiantes de la Universidad Industrial de Santander llevaron a cabo un estudio en el municipio de San Vicente de Chucurí, Santander, en el que identificaron zonas de susceptibilidad y amenaza a movimientos en masa, teniendo en cuenta factores como el condicionante sísmico y la precipitación. Utilizaron un método estadístico bivariado y se

basaron en las metodologías proporcionadas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), en particular, el "Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000" del año 2017 y el más reciente "Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000" del SGC del año 2017a. (Ardila & Jaimes, 2019).

8. Metodología

Con el fin de identificar las zonas de mayor amenaza por avenidas torrenciales en la quebrada Las Cruces en el municipio de San Vicente de Chucurí, se generó un mapa de amenazas a escala 1:10.000 mediante caracterización geomorfológica, modelamiento de la inundación, ponderación de los insumos y control de campo. El estudio se realizó en 6 etapas descritas a continuación en la (Figura 6).

8.1. Etapa de recopilación bibliográfica

La revisión de fuentes bibliográficas ha sido un componente esencial de la investigación, ya que ha permitido recopilar una amplia gama de documentos relacionados con estudios sobre las amenazas de inundaciones torrenciales en Colombia, con un enfoque particular en eventos ocurridos en San Vicente de Chucurí en los años 1996, 2011, 2012 y 2018. Estos estudios anteriores han sido integrados en el estado del arte de la investigación, lo que proporciona un contexto valioso para el trabajo actual.

Esta recopilación bibliográfica no solo ha enriquecido la comprensión de la amenaza de inundaciones torrenciales en la región, sino que también ha proporcionado datos esenciales que serán utilizados en las etapas posteriores de la metodología propuesta por el Servicio Geológico Colombiano (SGC). Esto demuestra la importancia de construir sobre la base del conocimiento previo y utilizar la investigación existente para avanzar en la comprensión y la

gestión de amenazas naturales como las inundaciones torrenciales en San Vicente de Chucurí y en Colombia en general.

Dentro de esta información, también se realizaron consultas y se recopilaron datos pluviométricos del área que fueron adquiridos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), para el proyecto se recopiló la información de las estaciones Albania, La Putana, La Fuente y San Vicente, estos son datos necesarios para el desarrollo del modelo hidrológico en HEC-HMS 4.8 y posteriormente el modelo hidráulico en HEC-RAS 6.0. Para el procesamiento de las imágenes en este estudio, se utilizó información de diversas fuentes satelitales, incluyendo la plataforma Alaska Vertex. A partir de esta plataforma, se adquirieron los siguientes datos: un modelo de elevación digital (DEM) con una resolución de 12.5 m x 12.5 m, así como imágenes multiespectrales capturadas por Landsat 8 con una resolución de 30 m x 30 m y por Sentinel-2 con una resolución de 10 m x 10 m. Por otra parte, la información topográfica se obtuvo del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), donde se consultaron las planchas topográficas a escala 1:10.000 (Planchas 120-III-B-3, 120-III-C-2, 120-III-D-1 Y 120-III-D-3).

La información de la cartografía geológica correspondiente a la cuenca se obtuvo de la plancha 120 de Bucaramanga y del mapa geológico realizado por (Macías & Cabanzo, 2017) a escala 1:25.000, el cual fue tomado y modificado de (Ward et al., 1977), (Jaimes E. L., & López, O. A., 2015), (Osorio, D., 2016) y (Araque, N., & Otero, J., 2016)

8.2. Etapa de generación de insumos

En esta etapa a partir de la información adquirida previamente como lo es la geología, el DEM e imágenes satelitales, se delimita la cuenca y a continuación se generan mediante la fotointerpretación y el procesamiento de los datos en el software QGis v. 3.32.3, el mapa geomorfológico, mapa de UGS, mapa de pendientes y el mapa de cobertura de suelos.

8.2.1. *Generación de un DEM de mayor detalle*

Se necesitaba obtener un Modelo Digital de Elevación (DEM) de mayor detalle para la zona de estudio. Esto se logró digitalizando las curvas de nivel previamente georreferenciadas en formato shape utilizando diversas herramientas y asignando sus respectivas altitudes. Luego, se creó un Modelo de Triangulación Irregular (TIN) a partir de estas curvas de nivel utilizando diversas herramientas de modelado 3D.

El propósito de generar un nuevo DEM fue para permitir una interpretación más precisa de la zona de estudio, especialmente para la creación de drenajes en esa área. Sin embargo, se sometió a todos los DEM disponibles a un proceso para generar una subcuenca hidrográfica con el objetivo de determinar cuál sería el más adecuado. El criterio de selección del DEM más apropiado para el proyecto se basó en la comparación de la dirección de los cursos de agua generados con las imágenes satelitales de Google Earth Pro, Landsat 8 y Sentinel-2. Estas comparaciones demostraron que el DEM descargado de la plataforma Alaska Vertex era el que mejor se adaptaba a la dirección de los cursos de agua observados en las imágenes satelitales.

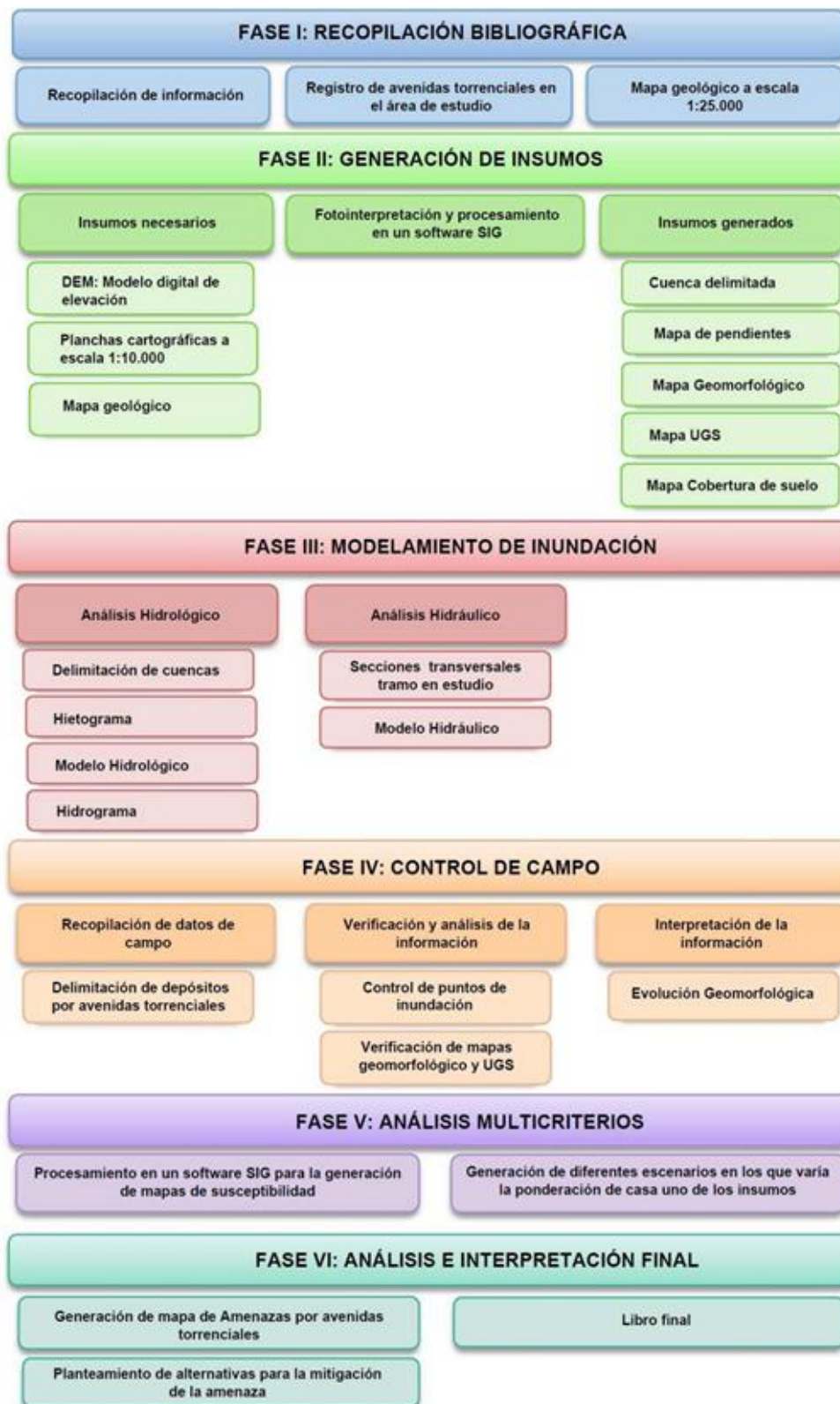
8.2.2. *Delimitación de la subcuenca hidrográfica*

Para llevar a cabo esta tarea, se empleó el Modelo Digital de Elevación (DEM) en QGis v. 3.32.3. El sistema de coordenadas utilizado en todo el proyecto se basó en el Magna Colombia Bogotá, que se estableció desde el inicio del trabajo con el software.

Con el propósito de delimitar la cuenca de manera precisa para el proyecto, se utilizaron diversas herramientas en QGis v. 3.32.3, entre las cuales se destaca la herramienta "Fill Sinks", que resultó en un DEM modificado. Este DEM modificado sirvió como base para crear una serie de capas ráster que definieron la dirección del flujo, la acumulación del flujo y los segmentos de los cursos de agua. Posteriormente, se utilizó la herramienta "Watershed" para delimitar la subcuenca, que se definió como el área de estudio para la realización del proyecto.

Figura 6

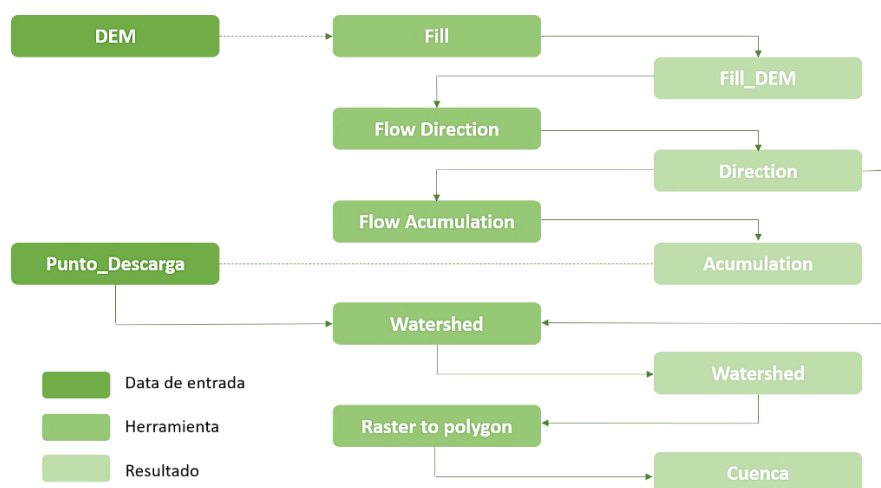
Metodología de trabajo para el proyecto de investigación.



Las capas generadas relacionadas con los drenajes y la subcuenca fueron vectorizadas para su posterior análisis y uso en el proyecto. Adicionalmente, debido a la dinámica natural de los tramos de un río, que tienden a migrar y cambiar la dirección de su cauce con el tiempo, se optó por ajustar la definición de dicho cauce activo mediante la interpretación de las imágenes satelitales disponibles en Google Earth Pro. Sin embargo, estas imágenes presentaban un alto nivel de nubosidad, por lo que también se utilizaron imágenes de Landsat 8 y Sentinel-2 para complementar la información. En la (Figura 7) se ilustra el proceso de generación de la subcuenca en QGis v. 3.32.3.

Figura 7

Proceso empleado para la delimitación de la subcuenca en QGis v. 3.32.3.



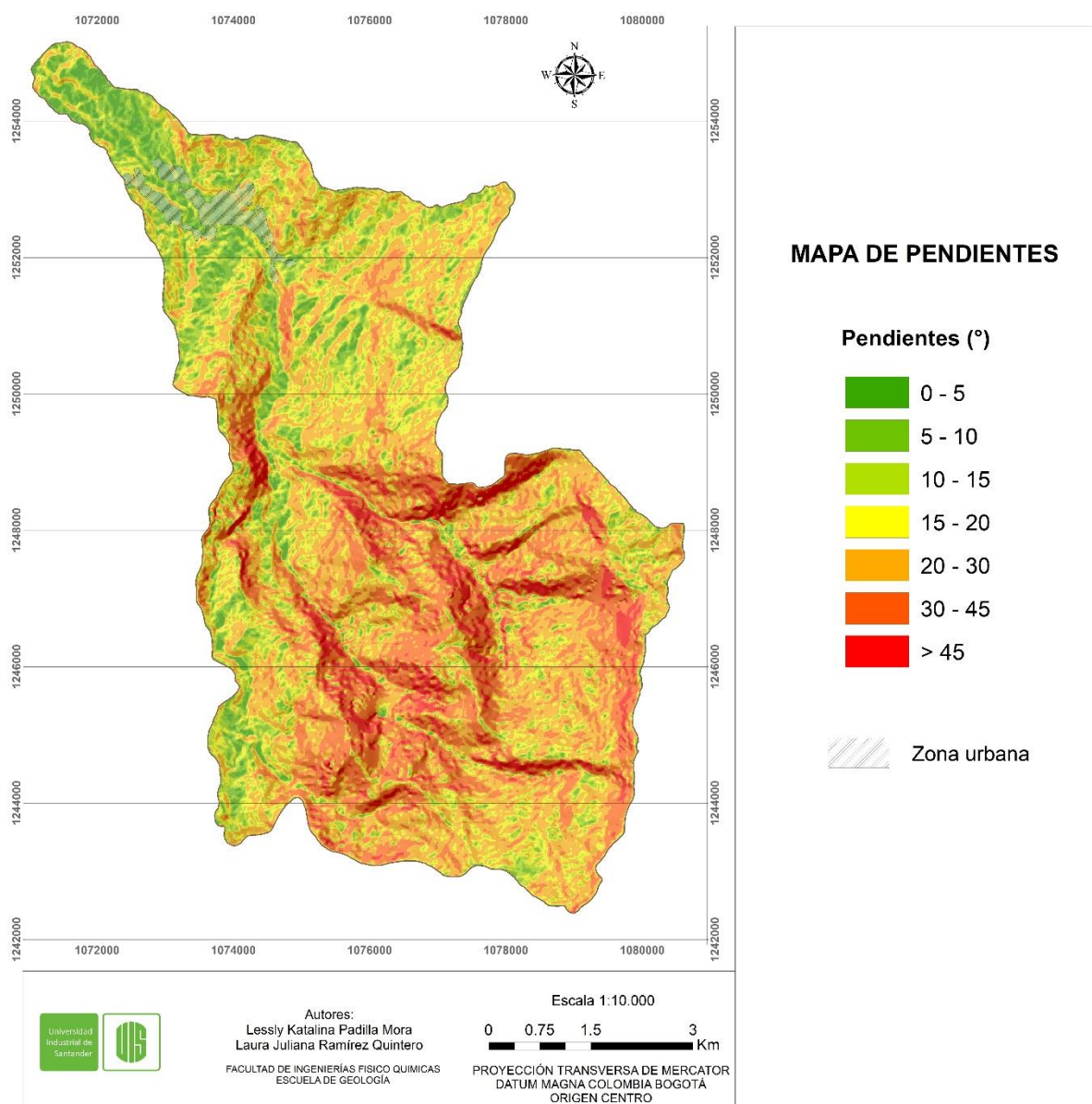
8.2.3. Generación del mapa de pendientes

De acuerdo con el SGC (2013) la pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y su horizontal, la cual puede estar representada tanto en grados como en porcentaje y en este caso se obtendrá mediante el procesamiento del DEM en QGis v. 3.32.3. Esta medida se considera un factor significativo que facilita el inicio de los movimientos en masa y, por lo tanto, se ha convertido en el atributo más utilizado en las evaluaciones de la

susceptibilidad y amenaza de dichos movimientos (Van Westen, Castellanos, & Kuriakose, 2008). Aunque los movimientos en masa no son el enfoque principal de este proyecto de investigación, están intrínsecamente relacionados con los eventos de avenidas torrenciales. Esto se debe a que gran parte del material desprendido durante los movimientos en masa puede convertirse en un componente importante del flujo hiperconcentrado en una avenida torrencial.

Figura 8

Mapa de pendientes del área de estudio.



Para generar el mapa de pendientes (Figura 8), se utilizó la herramienta "Slope," que forma parte de las herramientas de Spatial Analyst en QGIS v. 3.32.3. Esta herramienta realiza la clasificación correspondiente de las pendientes. En el estudio, se llevaron a cabo dos reclasificaciones del mapa de pendientes.

La primera reclasificación se empleó para la interpretación y la creación del mapa geomorfológico. Esta reclasificación comprende 7 rangos, destacándose la predominancia del rango de 20°-30°. Este rango coincide con la mayor concentración de movimientos en masa, como se mencionó previamente, y es posible que también esté relacionado con las zonas propensas a generar avenidas torrenciales.

Por otro lado, la segunda reclasificación se utilizó como entrada para el análisis multicriterio y se compone de 5 rangos de clasificación (Apéndice J).

8.2.4. *Mapa de Unidades geológicas superficiales (UGS)*

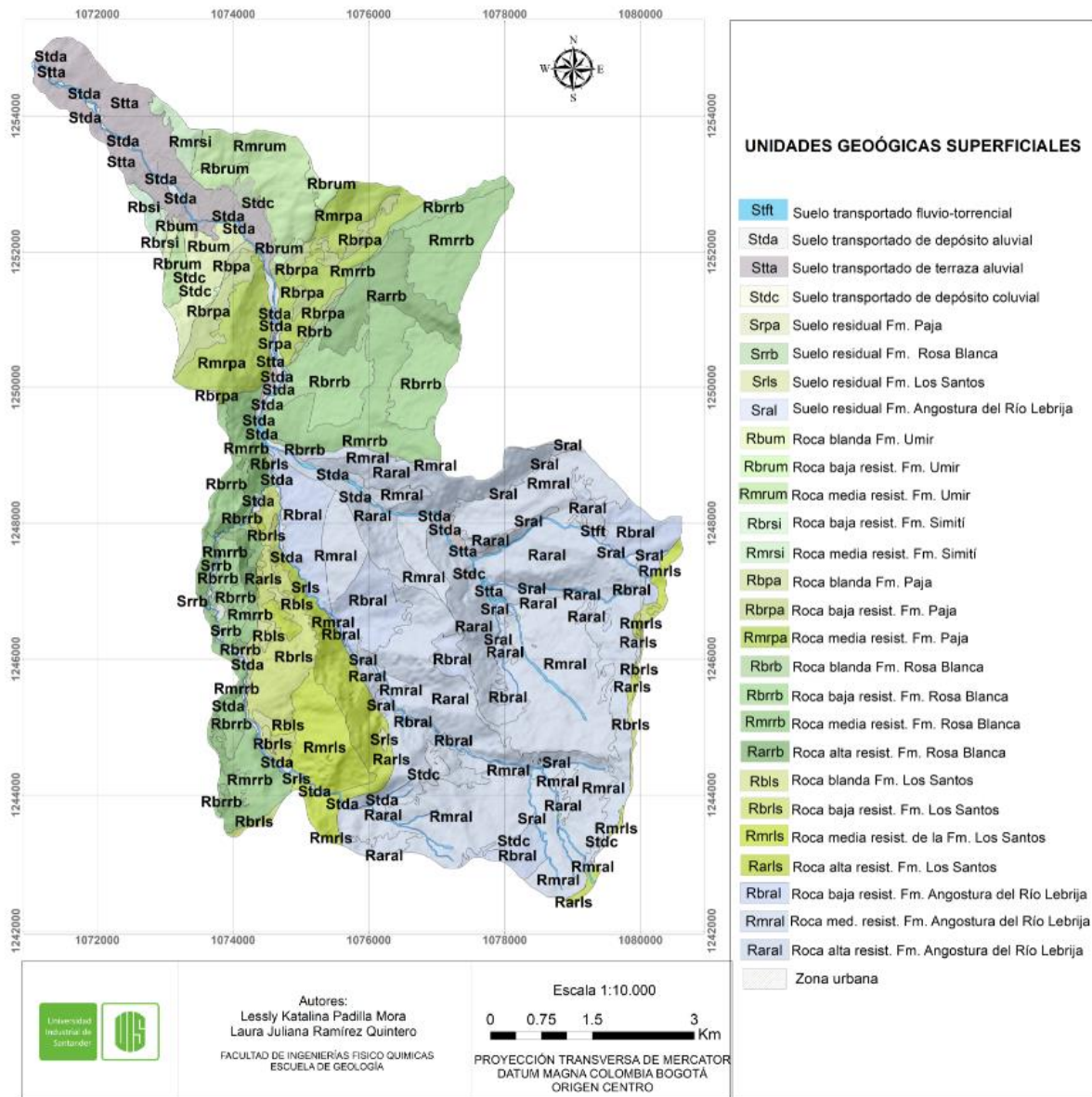
Las unidades geológicas superficiales se consideran como un conjunto de materiales que conforman la superficie del terreno hasta profundidades del orden de decenas de metros, e incluyen rocas con diferentes grados de meteorización y fracturamiento, así como suelos y depósitos no consolidados (Hermelin M. , 1987). Las unidades geológicas de superficie representan uno de los factores cruciales que condicionan la estabilidad de las laderas. Estas unidades consisten en agrupaciones homogéneas de materiales geológicos que se encuentran expuestos en la superficie terrestre. Estos materiales comparten un origen común y, en general, mantienen características físicas y comportamientos geomecánicos similares en una región determinada. Debido a estas similitudes, las unidades geológicas de superficie resultan sumamente útiles en una variedad de proyectos, como construcción, actividades mineras o la planificación del uso del suelo (POT) (SGC, 2015) (García & Porras, 2017).

La generación del mapa de Unidades Geológicas Superficiales (UGS) se llevó a cabo utilizando como punto de partida la digitalización del mapa Geológico previamente elaborado por (Macías & Cabanzo, 2017) a escala 1:25.000, el cual fue tomado y modificado de (Ward et al., 1977), (Jaimes E. L., & López, O. A., 2015), (Osorio, D., 2016) y (Araque, N., & Otero, J., 2016) (Figura 5). Para definir las Unidades Geológicas de Superficie (UGS), se empleó una clasificación de rocas basada en su resistencia, la cual fue adaptada de (Galván, V. R., 1999), citado por (Kanji, M. A., 2014).

Se utilizó una clasificación de suelos residuales y transportados que fue modificada a partir de (Hermelín, M., 1985). Esta clasificación se encuentra agrupada y detallada en la Guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000 del (SGC, 2017). Esta detalla cómo se puede clasificar una unidad geológica superficial a partir del dato inicial de tipo de material sea roca/suelo, sabiendo esto posteriormente se analiza la procediendo y/o origen de la UGS, entre ellos destacan rocas con procesos de alteración, derivadas de rocas in situ o simplemente suelos que han sido transportados (todos clasificados como depósitos según su procedencia).

Figura 9

Mapa de UGS del área de estudio.



En total se identificaron 405 UGS en el área de estudio divididas en 26 tipos diferentes (Apéndice A), donde la UGS predominante es “Roca de media resistencia de la Formación Angosturas del río Lebrija” y las UGS más asociada a avenidas torrenciales son “Suelo transportado de Depósito Aluvial” y “Suelo transportado de Terraza Aluvial” (Figura 9).

8.2.5. *Mapa de unidades geomorfológicas*

Los procesos geomorfológicos son dinámicos e incluyen todos los cambios que ha tenido el terreno desde sus inicios, tanto en procesos endógenos como exógenos, que contribuyen al modelado de los relieves que configura un equilibrio entre denudación y acumulación cuya estabilidad depende de la resistencia de los cuerpos de roca o sedimentos, acción y tiempo de los agentes meteóricos presentes (Thornbury, 1960). En consecuencia, una unidad geomorfológica se define como la forma elemental del terreno que se determina principalmente a través de las diferencias en aspectos morfológicos y morfométricos, los cuales relacionan el tipo de material o la disposición estructural de estos con la topografía correspondiente del terreno (Carvajal J. , 2011). La jerarquización geomorfológica se utiliza para diferenciar características según la escala y el nivel de detalle del estudio; esta establece que, a medida que la escala disminuye, el estudio de campo se vuelve más detallado en la zona de estudio. La jerarquía se organiza de mayor a menor escala de la siguiente manera: geomorfoestructura, provincia, región, unidad, subunidad y componente. En esta jerarquía, la "unidad" se considera el nivel con el mayor nivel de detalle para describir componentes geomorfológicos (Carvajal J. , 2008).

Para la creación del mapa de unidades geomorfológicas (Figura 10), se utilizó un Modelo Digital de Elevación (DEM), sumado a las imágenes Landsat 8, Sentinel 2 e imágenes de Google Earth Pro. Además, el análisis y la clasificación de las unidades geomorfológicas se llevaron a cabo utilizando el Glosario de unidades, subunidades y elementos geomorfológicos proporcionado por la Guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000 (SGC, 2017), así como el Glosario de términos geomorfológicos presentado en la "Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:100.000" en 2015.

En la zona de estudio se identificaron tres ambientes morfogenéticos principales: el Ambiente Denudacional, el Ambiente Estructural y el Ambiente Fluvial. Dentro de cada uno de estos ambientes, se identificaron sus respectivas unidades geomorfológicas. En total, se identificaron 36 unidades geomorfológicas.

Ambiente Denudacional: este ambiente incluye las geoformas cuya expresión morfológica está definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que remodelan y dejan remanentes de las unidades preexistentes, de igual manera, creando nuevas unidades geomorfológicas por la acumulación de sedimentos (SGC, 2013). En condiciones climáticas secas, este ambiente se caracteriza por la presencia de erosión laminar, surcos y cárcavas. En cambio, en condiciones húmedas, se favorece la meteorización y los movimientos en masa (Benavides et al., 2007). En la zona de estudio, se identificaron un total de 21 geoformas diferentes relacionadas con el Ambiente Denudacional, que cubren aproximadamente el 59.8% del área total de estudio, equivalente a 34.1 km² (Apéndice B). Estas geoformas son una parte significativa de la configuración del paisaje en la zona de estudio.

Ambiente Fluvial: incluye las geoformas que se originan por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas a dichas corrientes, tanto en épocas de grandes avenidas e inundación, como en la dinámica normal de las corrientes perennes, durante la época seca. De esta manera, es posible encontrar unidades aledañas a ríos, quebradas y en el fondo de los cauces, cuyos depósitos son transportados y acumulados cuando éstas pierden su capacidad de arrastre (SGC, 2013).

En el área de estudio, se identificaron un total de 8 geoformas distintas relacionadas con el Ambiente Fluvial, que abarcan un área de aproximadamente 5.3 km². Esto representa alrededor del 9.3% del área total de estudio (Apéndice C).

geoformas de ambiente estructural, que abarcan 17,9 Km² que corresponden al 31% del área de estudio (Apéndice D).

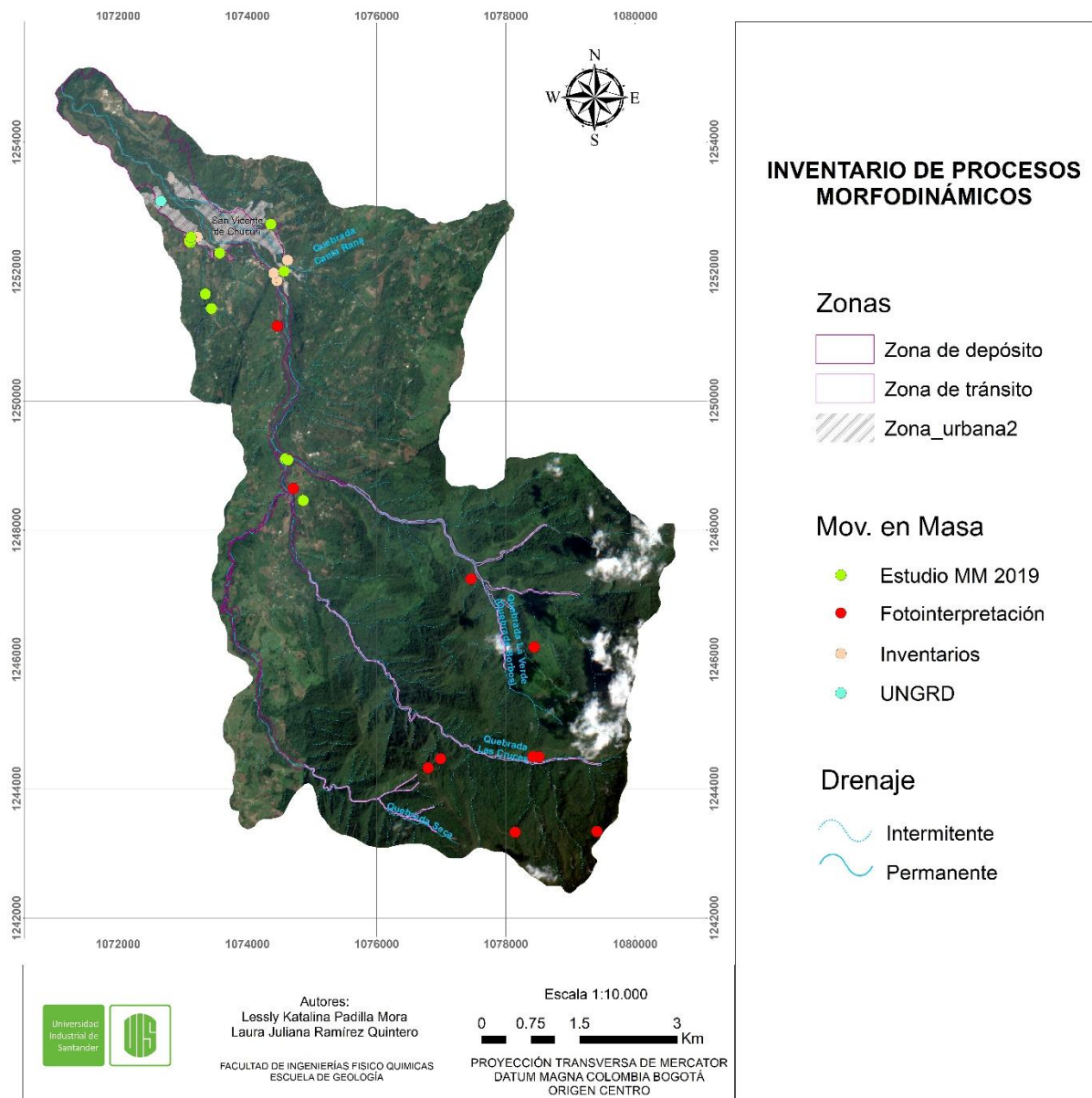
8.2.6. *Inventario de procesos morfodinámicos*

El concepto de morfodinámica se refiere al estudio de los procesos superficiales que afectan a una geoforma a lo largo del tiempo. Esto incluye procesos que han ocurrido en el pasado, aquellos que están activos en el presente y también aquellos que pueden activarse en el futuro (INGEOMINAS, 2018). Entre los insumos básicos requeridos para la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales se encuentran el inventario de procesos morfodinámicos, la geomorfología, la geología y la cobertura del suelo (SGC, 2021). Estos insumos son esenciales para comprender la dinámica del paisaje y evaluar la amenaza de avenidas torrenciales en la zona de estudio.

La generación de este insumo requirió la creación de un inventario de movimientos en masa, que también incluyó la representación cartográfica de las avenidas torrenciales. Esta base de datos para movimientos en masa se construyó utilizando datos proporcionados por diversas fuentes de información, incluyendo el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), el sistema de Inventario de Desastres (DesInventar), la Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastre (UNGRD) y el estudio previo realizado en el área llamado “Estudio de amenaza por movimientos en masa aplicando el método estadístico bivariado a escala 1:25.000 caso de estudio: San Vicente de Chucurí, Santander” publicado en el (Ardila & Jaimes, 2019), de estas fuentes proporcionaron la ubicación de los movimientos en masa registrados en el área de estudio a lo largo del tiempo. En lo que respecta a la representación cartográfica de las avenidas torrenciales, se utilizaron imágenes satelitales de Landsat 8, Sentinel 2 y Google Earth Pro para llevar a cabo este proceso.

Figura 11

Inventario de proceso morfodinámicos correspondiente al área de estudio.



Como resultado de este inventario (Figura 11), se identificaron un total de veintiséis (26) movimientos en masa. Estos movimientos en masa se obtuvieron a partir de diversas fuentes de información de la siguiente manera: Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastre (UNGRD) proporcionó información sobre uno (1) de los movimientos, mientras que los inventarios de SIMMA contribuyeron con cuatro (4) movimientos y DesInventar con diez

(10) movimientos. La identificación de quince (15) de estos movimientos en masa se realizó utilizando imágenes de Google Earth Pro, y la información sobre once (11) movimientos provino del control de campo documentado en el estudio previamente realizado por Ardila & Jaimes (2019). Para identificar las zonas de tránsito y depósito de avenidas torrenciales, se utilizaron imágenes satelitales de Landsat 8, Sentinel 2 y Google Earth Pro.

8.2.7. *Mapa de cobertura de la tierra*

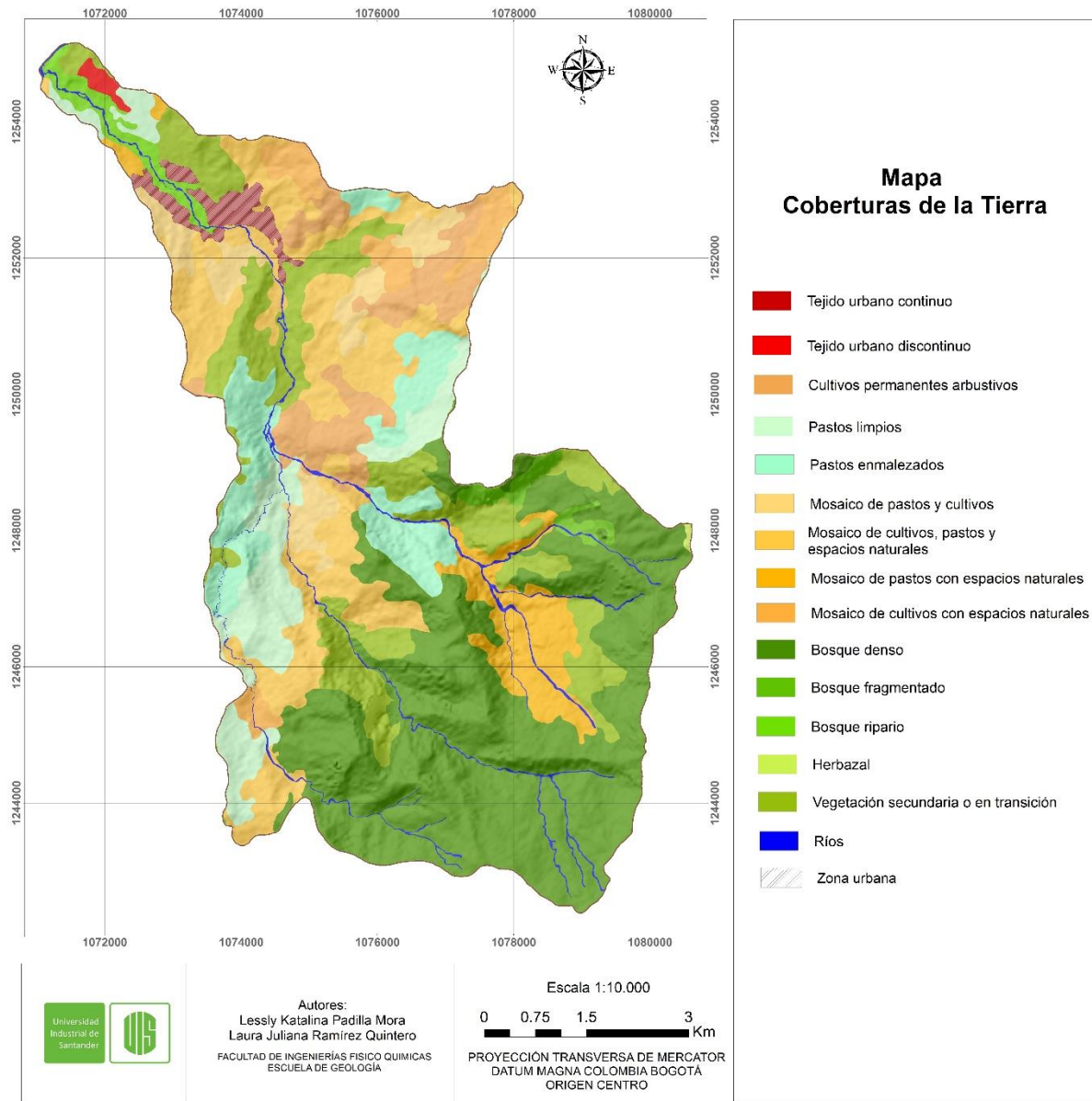
Este mapa representa visualmente la distribución de la cobertura de la tierra, que puede incluir elementos como la vegetación, las características antrópicas (creadas por el ser humano) y otras superficies terrestres, como afloramientos rocosos y cuerpos de agua (Figura 12).

La cobertura de la tierra puede ser de origen natural, resultado de la evolución ecológica, lo que incluye categorías como bosques, sabanas, lagunas, entre otros, o bien de origen artificial, cuando es creada o modificada por la actividad humana, como cultivos, represas, ciudades, entre otros. Este mapa es importante para comprender la composición del paisaje y su relación con la amenaza de avenidas torrenciales en la zona de estudio (IGAC, 2005b).

Colombia actualmente no dispone con una capa de cobertura de tierra a escala 1:10.000, por lo que para el proyecto se utilizó como base la capa de Leyenda Nacional de Cobertura de Tierras para Colombia a escala 1:100.000 publicada por el IDEAM. Para mejorar el nivel de detalle y adaptarse a la escala establecida se llevó a cabo una fotointerpretación de imágenes satelitales de Google Earth Pro utilizando la metodología CORINE Land Cover (Coordination of Information on the Environmental) (IDEAM et al., 2008).

Figura 12

Mapa de Cobertura de la tierra.



Nota. tomado y modificado de: (IDEAM et al., 2008).

A partir de este análisis se identificaron 15 tipos de coberturas de la tierra, donde la categoría predominante es “Bosque denso” con un porcentaje del 32.55%, seguida de “Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales” con un 14.73%, puede encontrar la lista completa de las categorías en el (Apéndice E).

8.3. Modelamiento de inundación (análisis hidrológico e hidráulico)

La generación del modelo hidrológico e hidráulico de la quebrada Las Cruces implicó el uso de software como Arc-GIS, HEC-RAS y la herramienta HEC-GeoHMS diseñada para Arc-GIS. El proceso de análisis hidrológico se divide en tres aspectos fundamentales:

Generación de Insumos de Drenajes y Subcuenca: Se inicia con la creación de los insumos necesarios en formato vector, que incluyen la delimitación de los drenajes y subcuencas. Estos insumos son esenciales para el análisis hidrológico.

Caracterización Morfométrica de la Subcuenca: La caracterización morfométrica de la subcuenca es una etapa crucial, ya que determina el tipo de modelo hidrológico a utilizar. Esta caracterización se basa en parámetros que describen la forma y la topografía de la subcuenca.

Cálculo del Tiempo de Concentración: El tiempo de concentración se calcula a partir de los parámetros del cauce principal, desde su origen hasta el punto de menor altura en la cuenca. Este cálculo es necesario para el análisis hidrológico.

El proceso de análisis hidrológico e hidráulico comienza con la delimitación del área de estudio en el Modelo Digital de Elevación (DEM), lo que resulta en la creación de capas de drenajes y subcuencas vectorizadas. Luego, utilizando la extensión HEC-GeoHMS, se procesa este DEM. Con esta información y la caracterización morfométrica, se procede a la elección de los parámetros relacionados con la hidrología de la cuenca.

En una tercera etapa, se realiza un análisis estadístico de los datos pluviométricos proporcionados por el IDEAM. Esto permite generar curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) para diferentes períodos de retorno, incluyendo hasta un período de retorno de 100 años. Todos estos parámetros definidos se importan al programa HEC-HMS en la cuarta

etapa, donde se procesan los datos y se obtienen los caudales, lo que es fundamental para la comprensión y evaluación de los flujos de agua en la quebrada Las Cruces.

8.3.1. Caracterización morfométrica

El análisis hidrológico inicia con una caracterización morfométrica que implica un procesamiento cuantitativo de los atributos físicos de una cuenca hidrográfica. Esta caracterización resulta de gran utilidad en el análisis espacial de cuencas hídricas, ya que permite determinar las características ambientales del territorio a partir de la descripción de la geometría de las formas superficiales (Gasparí, et al., 2012) la caracterización morfométrica facilita la evaluación de la semejanza de flujos en cuencas de diferentes tamaños. Es decir, la descripción y el análisis de los aspectos relacionados con la forma de la cuenca desempeñan un papel crucial en el comportamiento hidrológico. Se ha comprobado que, en términos generales, el comportamiento de las cuencas de igual área, pero de formas distintas es diferente, y esto condiciona la velocidad del escurrimiento superficial (Lux Cardona, 2016).

El proceso de caracterización morfométrica implicó la determinación de diversos aspectos clave de la cuenca hidrográfica, que son fundamentales para comprender su forma y funcionamiento. Entre los aspectos determinados se encuentran: Área de la cuenca, perímetro de la cuenca, longitud de la cuenca, longitud total de los canales, longitud del cauce principal, ancho de la cuenca, entre otros. Estos valores fueron obtenidos utilizando las herramientas del software QGis v. 3.32.3 y se registran en la (Tabla 3).

El análisis de la topografía o relieve de una cuenca es fundamental para comprender su respuesta hidrológica y su comportamiento frente a eventos como las avenidas torrenciales.

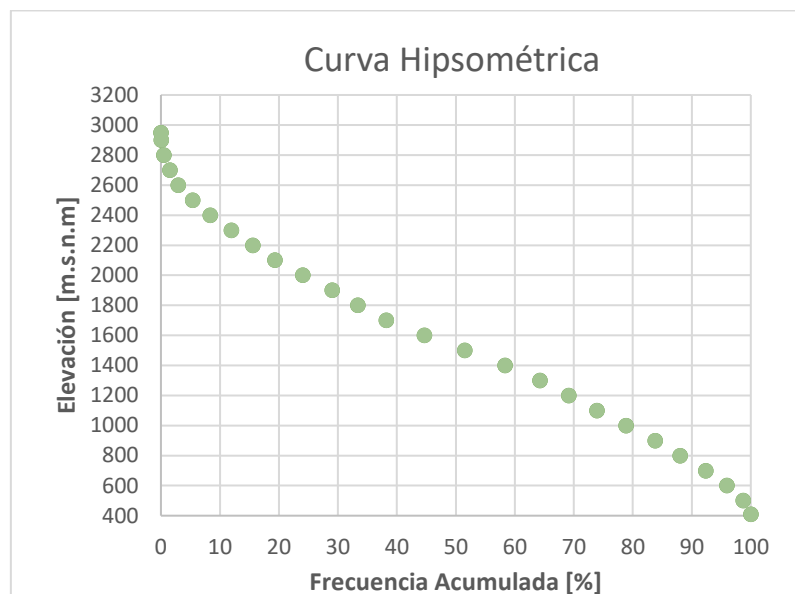
Tabla 3*Parámetros morfométricos de la subcuenca de La Quebrada las Cruces.*

Parámetro	Valor
Área de la cuenca [km²]	57,425
Perímetro [km]	44.117
Longitud de la cuenca [km]	14.669
Longitud total de canales [km]	97.518
Longitud del cauce principal [km]	17,424
Ancho de la cuenca [km]	3.914
Cota máxima de la cuenca [m]	2948
Cota en la salida de la cuenca [m]	429
Cota máxima del cauce principal	2661
Cota de salida del cauce principal	429
Pendiente media de la cuenca [%]	47.417
Pendiente media del cauce [%]	12,809

Curva Hipsométrica: La curva hipsométrica proporciona información sobre la distribución de las altitudes en la cuenca. Se describe como una curva de tipo B, lo que sugiere que la cuenca se encuentra en una etapa de equilibrio en su fase geológicamente madura (Figura 13). En términos prácticos, esto significa que la cuenca ha experimentado procesos de erosión y desarrollo durante un período geológico considerable y ha alcanzado una cierta estabilidad en su forma y relieve.

Figura 13

Curva hipsométrica para la microcuenca de la Quebrada las cruces



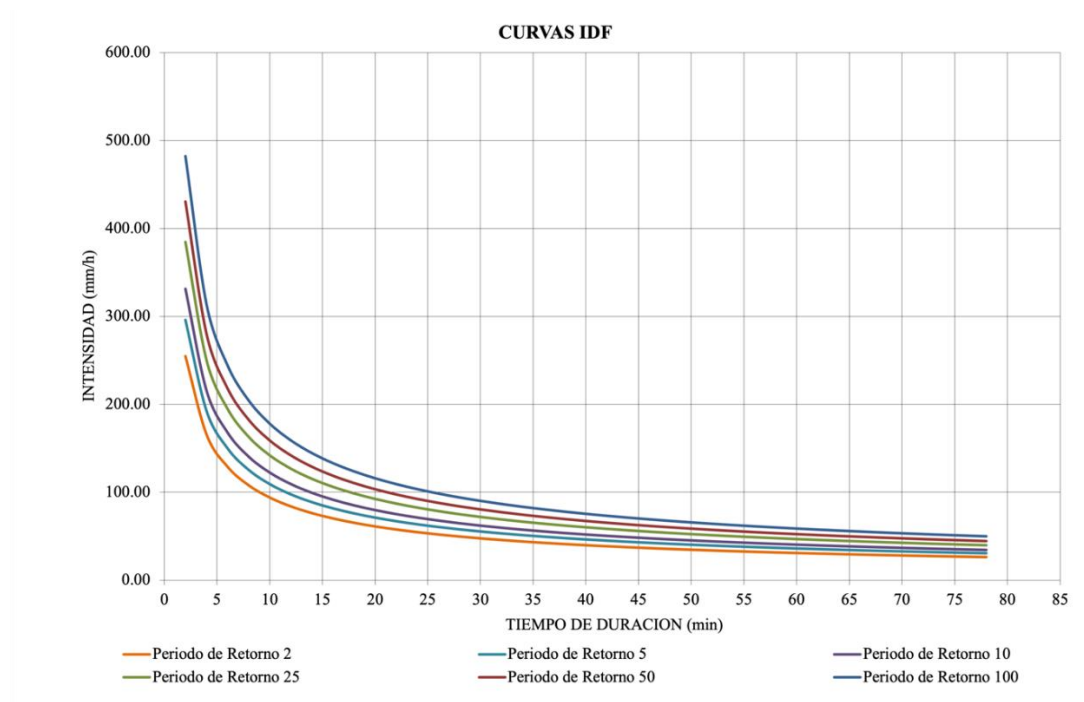
8.3.2. Análisis hidrológico e hidráulico

La elección de la ecuación para calcular el tiempo de concentración y la obtención de las curvas IDF (Intensidad, Duración y Frecuencia) (Figura 14) y la generación de hietogramas de precipitación son pasos importantes en la modelización de inundaciones y en la evaluación de la amenaza de avenidas torrenciales.

En este caso, se ha seleccionado la Fórmula California para determinar el tiempo de concentración de la cuenca, lo que es fundamental para estimar las intensidades de precipitación en función de la duración y la frecuencia

Figura 14

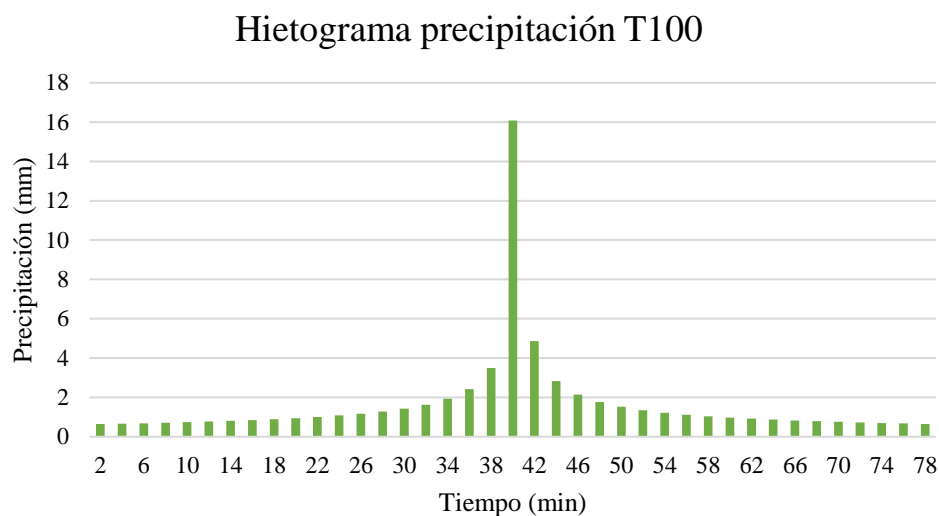
Curvas IDF, Representación gráfica de la intensidad de la lluvia vs tiempo de concentración para la zona de estudio. (Tiempo de duración de la tormenta: 78 min).



Los hietogramas de precipitación resultante corresponden a una representación gráfica de la distribución de la intensidad de la lluvia a lo largo del tiempo durante una tormenta para los diferentes periodos de retorno (2,5,10,25,50,100) años. El hietograma para un periodo de retorno de 100 años es de referencia y refleja la variabilidad temporal típica de la precipitación local real para eventos extremos (Wartalska et al., 2020). La elección de un hietograma con un período de retorno de 100 años es relevante porque se utiliza para determinar el caudal máximo asociado a eventos extremadamente raros, lo que es esencial para la evaluación de la amenaza de avenidas torrenciales en condiciones de máxima intensidad de precipitación (Figura 15).

Figura 15

Hietograma para un tiempo de retorno de 100 años.



Para llevar a cabo este análisis hidrológico, se requirió obtener el Índice de Precipitación Máxima Diaria Probable a partir de los registros de Precipitación mensual máxima en 24 horas. Esta precipitación máxima se determinó utilizando mediciones obtenidas mediante un pluviómetro. La elección de la estación del pluviómetro se realizó mediante la aplicación de la metodología de polígonos de Thiessen, la cual permite definir cuál es la mejor estación de monitoreo en función de su área de influencia: Estación San Vicente, Latitud 0652 N, Longitud 7324 W, altura 721 msnm (IDEAM 01, Santanderes 08). Los datos presentados fueron recopilados de la fuente del IDEAM (Apéndice F), los datos escogidos se computaron fueron 1980-2020.

En el siguiente paso del proceso, se utilizan los valores de precipitación a lo largo de la tormenta de diseño, que se presentan en bloques alternos según el hietograma previamente mencionado, para estimar el caudal máximo. Para el posterior ajuste para la definición de los caudales picos es necesario conocer el CN y para ello realizar el método de pérdida del número de curva CN, utilizando la extensión HEC-HMS, es necesario proporcionar mapa de cobertura

vegetal y conocer el tipo de grupo hidrológico del suelo (SCS, 1964), valor proporcionado a partir del cálculo:70,1. Este modelamiento proporciona una serie de valores de caudal a lo largo del tiempo. Sin embargo, el objetivo principal es determinar el caudal máximo en el punto de salida de la cuenca.

Comprendiendo el proceso de obtención de los hidrogramas, se utilizó una serie de valores de precipitación de bloques alternados en los hietogramas. Estos valores de precipitación fueron previamente codificados teniendo en cuenta las condiciones mencionadas anteriormente. Además, los resultados de los caudales pico para distintos períodos de retorno (Tabla 4) también desempeñaron un papel crucial en este proceso; lo que permitió comprender y modelar la respuesta hidrológica en función de las condiciones particulares del estudio.

Tabla 4

Valores de Caudal Pico para cada periodo de retorno.

Periodo de retorno	Valor Caudal Pico (m³/s)
T2	18,3
T5	35,4
T10	53,9
T25	87,6
T50	121,7
T100	164,3

Es importante tener en cuenta que las avenidas torrenciales no solo transportan caudales líquidos, sino que también llevan consigo una carga de sedimentos debido a la erosión, movimientos en masa o depósitos antiguos. Por lo tanto, el caudal total aumenta en función del caudal sólido transportado por la quebrada. Es fundamental considerar este paso antes de generar el modelo hidráulico, estos valores de caudal aumentado serán los datos de entrada en el modelamiento hidráulico.

Modelo de sedimentos: Es necesario tener en cuenta el concepto de Bulking entendido como el incremento de volumen realizado a la descarga de agua para tener en cuenta las altas concentraciones de sedimento en un flujo (District & Watershed Protection, 2011).

Siendo el caudal Bulk/caudal sólido, como el resultado de la composición del caudal líquido más el caudal de sedimentos:

$$QB=QL+Qs$$

Derivando una relación entre el caudal total y el caudal líquido conocida como Bulk Factor o Bf.

Luego el caudal Bulk quedaría definido como:

$$QB=BF*QW$$

Figura 16

Valores de factor de Bulking (BF) en función de la concentración de sedimentos por peso y volumen.

Bulking Factor							
0	1.11	1.25	1.43	1.67	2.00	2.50	> 3.33
Sediment Concentration, % by Weight (100% by WT = 1 x 10 ⁶ ppm)							
0	23	40	52	63	72	80	87 to 100
Sediment Concentration, % by Volume (specific gravity = 2.65)							
0	10	20	30	40	50	60	70 to 100
Normal Streamflow		Hyperconcentrated Flow		Debris Flow/ Mud Flow		Landslide	

Nota. Tomado de (District & Watershed Protection, 2011).

Para calcular este caudal, se utiliza un factor de 1,67, que se basa en la evidencia encontrada en el campo y que es adecuado para flujos hiperconcentrados (Figura 16). Una vez que los datos se han ingresado en la extensión HEC-RAS, se generan una serie de pasos para la configuración del modelo hidráulico entre estas se destacan:

Información base: Para el posterior procesamiento del modelamiento hidráulico es necesario contar con los insumos para la obtención del mapa de coeficientes de Manning de la zona de estudio, este coeficiente es un índice el cual determina la resistencia de un flujo en un canal, para ello se usaron como información preliminar mapa de coberturas de suelo (IDEAM et al., 2008) y la tabla de índices de rugosidad de Manning (Chow, 1959), para seguido de esto realizar el procesamiento en el software QGis v. 3.32.3.

Geometría de modelamiento: La segunda fase del proceso implica la determinación de la geometría y la preparación del modelo para el análisis hidráulico. Se realiza una definición del área específica en la que se va a llevar a cabo el análisis hidrológico; posterior se genera un mallado que sea adecuado para el análisis, después se elige un tamaño específico de celda. En este caso, se optó por un mallado de 10x10, basándose en las condiciones del Modelo Digital de Elevación (DEM) original de 12.5x12.5. Se requiere realizar un refinamiento del mallado en áreas donde se requiera un mayor nivel de detalle, se realiza un refinamiento del mallado. Esto implica la creación de "breaking lines" o líneas de ruptura que delimitan características específicas, como cauces de ríos o arroyos. Estas líneas de ruptura permiten la generación de celdas de menor tamaño (2 metros) para representar con mayor precisión estas áreas detalladas, normalmente son áreas asociadas a terrazas de inundación o zonas continuas al cauce. Finalmente, se definen las condiciones de contorno para el modelo. En particular, se mencionan las condiciones de entrada, que se basa en los valores del Flow Hidrogram para diferentes períodos de retorno. Esto implica la especificación de los caudales de entrada en el inicio del modelo hidráulico.

Una vez que se completaron estos pasos, se obtuvieron la geometría y el mallado adecuados, estos pasos fueron esenciales para asegurar que el modelo se encontrara representando con precisión la topografía y las condiciones específicas de la zona de estudio, lo que es fundamental para obtener resultados confiables en el análisis de flujo y la modelación

hidráulica. Finalmente, se obtienen isobatas e isotacas máximas para cada tiempo de retorno (Figura 17 y Figura 18). Los valores de las profundidades y las velocidades se emplearon más tarde en un proceso de reclasificación que permitió calcular el riesgo de inundación, considerando también la presencia de avenidas torrenciales. Como resultado de este análisis de datos, se obtuvo un porcentaje de área urbana afectada por las inundaciones, el cual se muestra en la (Tabla 5).

Figura 17

Modelo de profundidades de inundación para la quebrada Las Cruces.

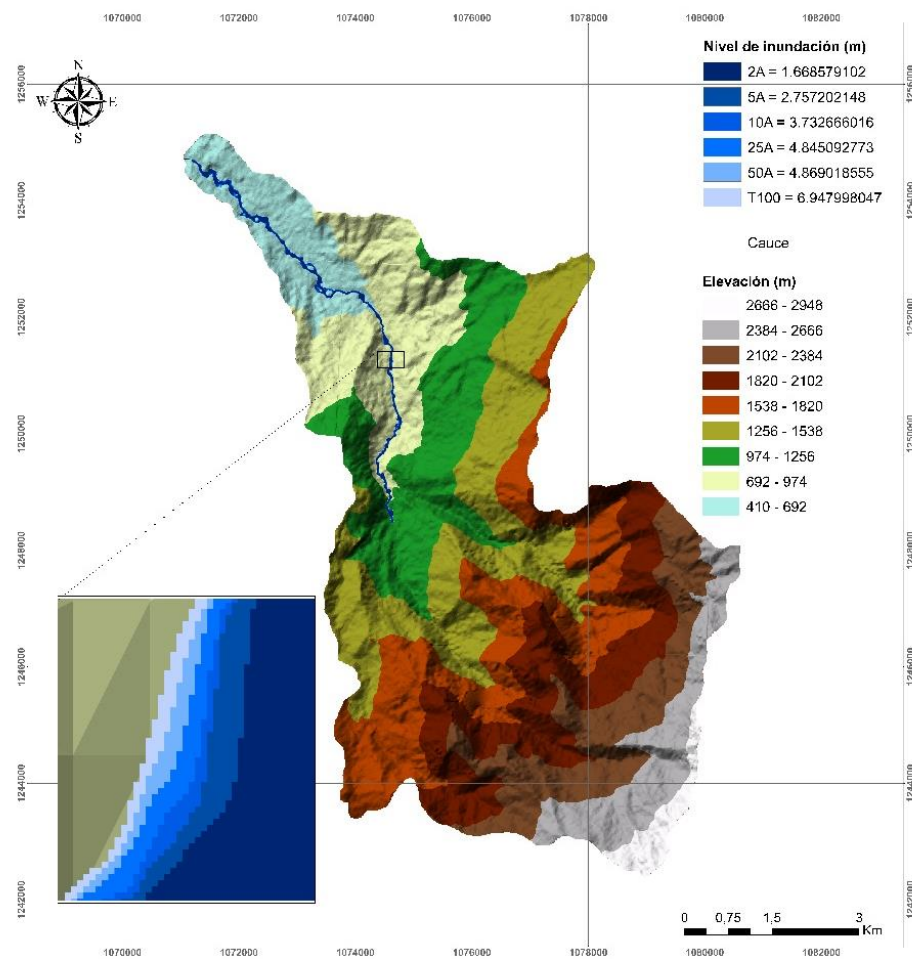


Figura 18

Modelo de velocidades de inundación para la quebrada Las Cruces

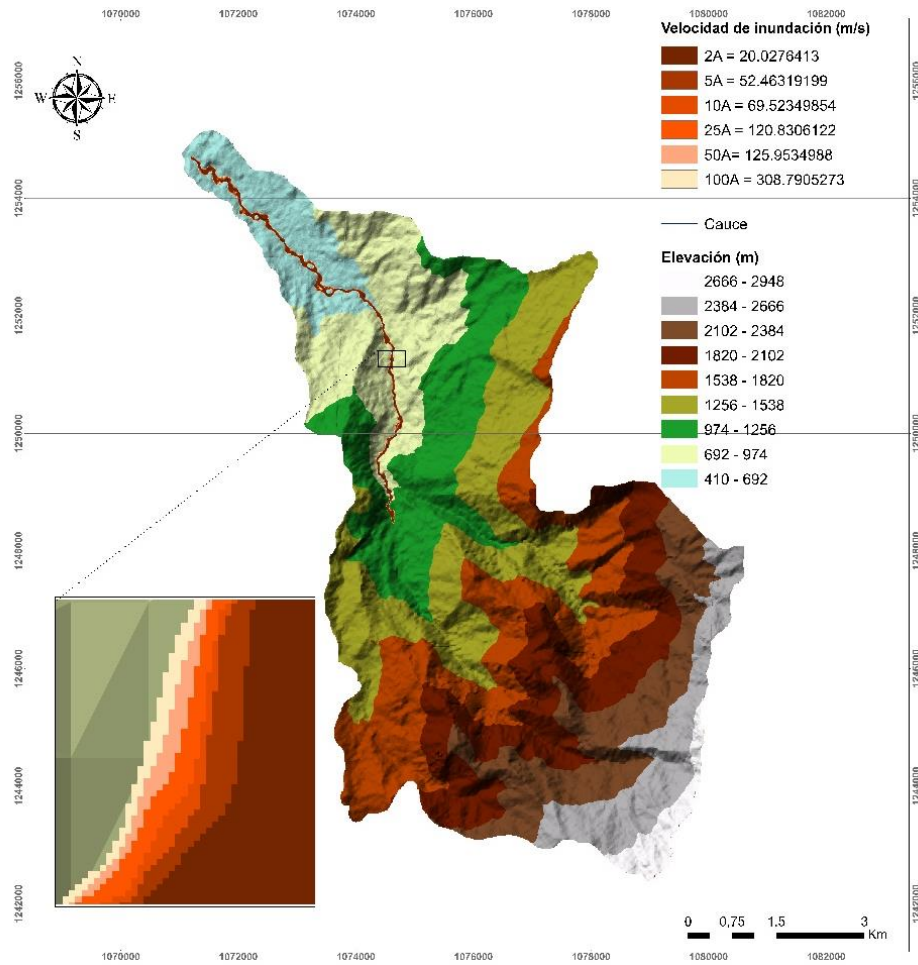


Tabla 5

Área de afectación del casco urbano según el modelamiento de inundación.

Periodo de Retorno	Área de afectación	% de Afectación	Isobatas (m)	Isotacas (m/s)
2	8.902	0,8921	1,66	20,02
5	11.346	1,1370	2,75	52,46
10	12.820	1,2848	3,73	69,52
25	14.572	1,4603	4,84	120,83
50	15.865	1,5899	4,87	125,85
100	16.985	1,7022	6,94	308,79

8.4. Control de campo

Durante la salida de campo llevada a cabo, se planteó la realización de un reconocimiento de la zona en la que se identificaron puntos de interés. Estos puntos incluían áreas donde se habían registrado aumentos en el nivel del agua o se había producido algún tipo de daño en la infraestructura debido a eventos pasados de avenidas torrenciales. Como medida adicional se llevaron a cabo una serie de encuestas a ciudadanos en cercanía a estos lugares que suministraran datos referentes a posibles alturas y daños ocasionados por las mismas. Posteriormente, se visitaron zonas independientes a la quebrada Las Cruces, pero con aporte hídrico, los puntos de interés fueron puentes que comunicaban diferentes sectores y de los cuales se tomaron algunas cotas de altura con respecto a la lámina de agua.

Esta fase del proyecto resultó beneficiosa para proporcionar un mayor nivel de detalle y mejorar la delimitación de geformas, además de realizar una descripción de los depósitos fluviotorrenciales que se encontraban en el terreno. Durante esta etapa de control de campo, se buscó identificar las áreas de aporte, transporte y depósito en la cuenca de interés. A continuación, se presentan algunas de los depósitos más significativos que se identificaron y describieron.

SVC-01: E: 1074032, N: 1252402, h: 662 m.s.n.m.

En el margen derecho de la quebrada, en dirección aguas arriba desde el puente de Terpel hasta el parque natural Miraflores, se identifica un depósito que se clasifica como un depósito de avenida torrencial. Este depósito se caracteriza por ser aluvial y antiguo, con fragmentos de roca que muestran una leve orientación en la dirección del flujo del agua y tienen un tamaño promedio de alrededor de 1,5 metros. Estos fragmentos son subangulares y muestran una esfericidad baja, lo que sugiere un transporte mínimo. La composición del depósito es principalmente terrígena, con un tamaño de grano que oscila entre arena fina y media,

posiblemente compuesta por cuarzoareniscas. El depósito tiene una altura aproximada de 5 metros y presenta un crecimiento de vegetación sobre su superficie, lo que indica la antigüedad que podría alcanzar dicho depósito. (fotos tomadas están orientadas en dirección NW/SE) (Figura 19).

Figura 19

Depósito característico de avenida torrencial SVC – 01.

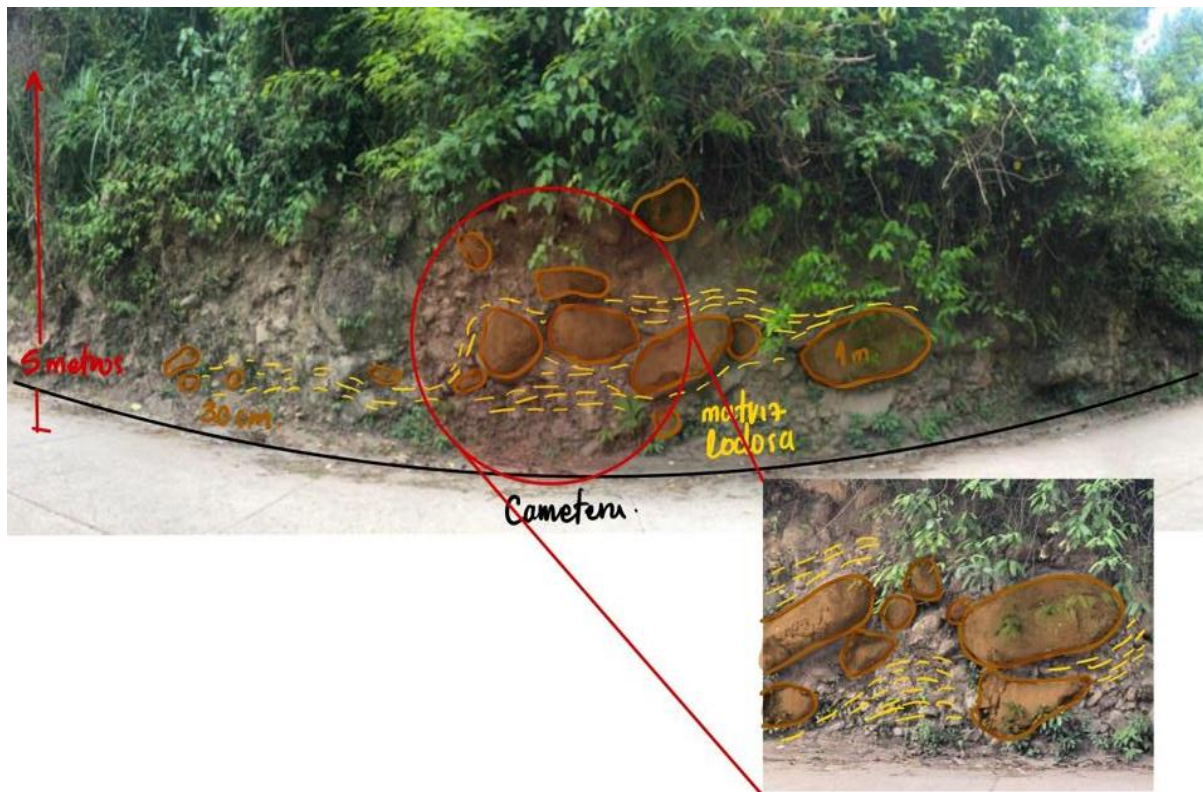


SVC-03: E: 1074237, N: 1252107, h: 688 m.s.n.m.

Depósito aluvial antiguo compuesto por clastos de naturaleza terrígena, específicamente cuarzoareniscas, con un tamaño de grano que se sitúa en el rango de arena fina a media. Los clastos en este depósito presentan dimensiones que varían desde 30 centímetros hasta 1 metro de diámetro, lo que indica una escasa selección en términos de tamaños; estos clastos se encuentran subredondeados y muestran una baja esfericidad. La matriz del depósito es predominantemente lodosa, y no se observa una orientación preferencial en la disposición de los clastos dentro del mismo. (Figura 20).

Figura 20

Depósito aluvial antiguo SVC – 03.



SVC-05: E: 1074431, N: 1251752, h: 721 m.s.n.m.

A lo largo de la carretera que sigue el curso de la quebrada Las Cruces, se pudo observar con mayor detalle un depósito que se formó como resultado del incremento base del nivel del agua de la quebrada Las Cruces. Este depósito destaca por sus dimensiones, con una altura que se estima en aproximadamente 6 metros y una longitud de unos 100 metros. En términos geológicos, este depósito puede ser clasificado como reciente y aluvial, ya que contiene clastos que no muestran una orientación específica, presentan poca selección en cuanto a sus tamaños, los cuales varían desde dimensiones métricas hasta centimétricas. (Foto tomada desde el puente Las Maravillas orientada SE-NW) (Figura 21).

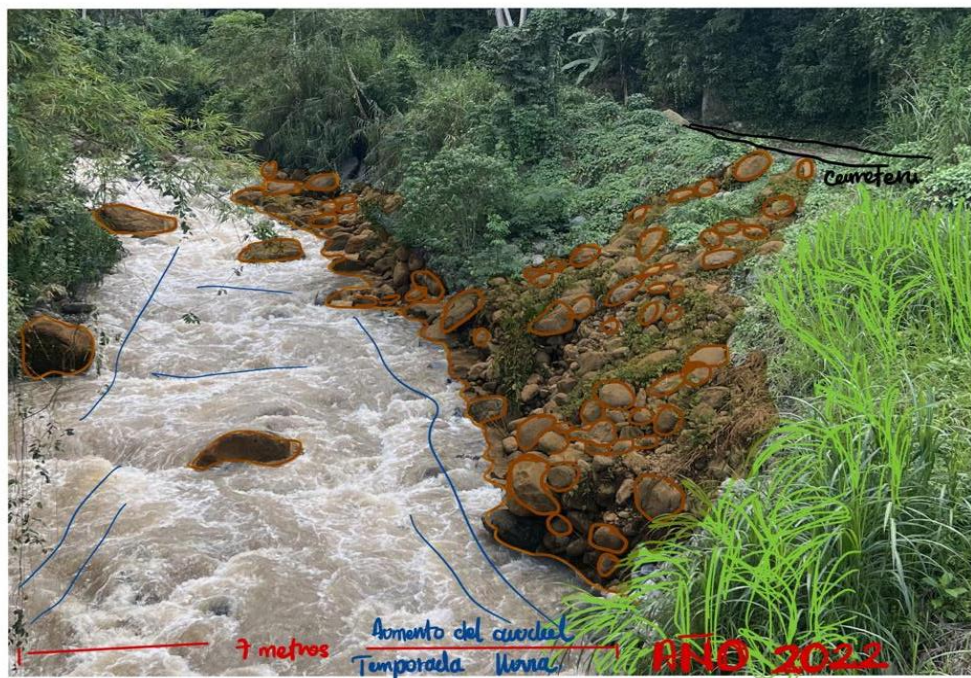
Figura 21

A. Zona de inundación y erosión presente en la quebrada Las Cruces. Tomada en el año 2023 B. Tomada en el año 2022.

A.



B.



La composición de los clastos, se nota una distinción significativa. Los clastos con una mayor redondez y esfericidad están asociados principalmente con litologías terrígenas, como cuarzoarenitas y lodolitas, o con arenas muy finas de tonalidad rojiza. En contraste, los clastos

más angulares y con menor esfericidad están vinculados a litologías calcáreas, principalmente calizas del tipo mudstone. Importante destacar que este depósito se caracteriza como clasto soportado, ya que no se percibe una matriz entre los clastos.

SVC – 09: E: 1074335, N: 1249489, h: 615 m.s.n.m.

Este punto de control de campo ubicado en la quebrada Las Cruces brinda una valiosa oportunidad para examinar las transformaciones en la geomorfología fluvial en esta área. Se pudo identificar los espacios disponibles para la acumulación de sedimentos y fragmentos de roca, así como los procesos de erosión tanto en sentido vertical como lateral, los cuales están relacionados con el flujo del agua. El depósito que se observó en este lugar tiene su origen en procesos fluviales y es relativamente reciente, presentando similitudes notables con los depósitos previamente analizados. En este depósito se aprecia una baja selección de clastos, lo que implica que contiene fragmentos de diversos tamaños. La redondez de los clastos observados está principalmente relacionada con las composiciones de origen terrígeno, que abarcan una variedad de tonalidades desde tonos rojizos hasta matices cremosos. (Foto se encuentran orientadas en sentido NE-SW) (Figura 22).

Figura 22

Zona de cambio geomorfológico por reducción de la velocidad del cauce, presencia de espacios de depositación.



SVC – 07: E: 675453, N: 760643, h: 911 m.s.n.m.

En Barrio Oro se localiza un punto de verificación de un evento torrencial dado a lo largo de la historia en el área urbana del municipio (Figura 23A), este se encuentra ubicado a aproximadamente 11 m de la Quebrada Las Cruces, desde él se puede ver la afectación y el impacto del alcance de la lamina de un flujo hiperconcentrado. El depósito se caracteriza por ser aluvial antiguo con baja selección de clastos, los cuales son subredondeados y de baja esfericidad en cuanto a sus dimensiones cuenta con una altura de 1,6 m y un ancho de 10m. Se pueden observar las casas ubicadas en la ladera del río las cuales fueron afectadas por el evento y es importante resaltar que debido al mismo hoy en día el barrio se encuentra desalojado (Figura 23B).

Figura 23

A. Evidencia de hecho histórico por fenómeno de AvT en zona circundante a la Quebrada las Cruces SVC – 07. B. Parte lateral del río se observan casas en peligro de arrastre por subida del nivel base de la quebrada.



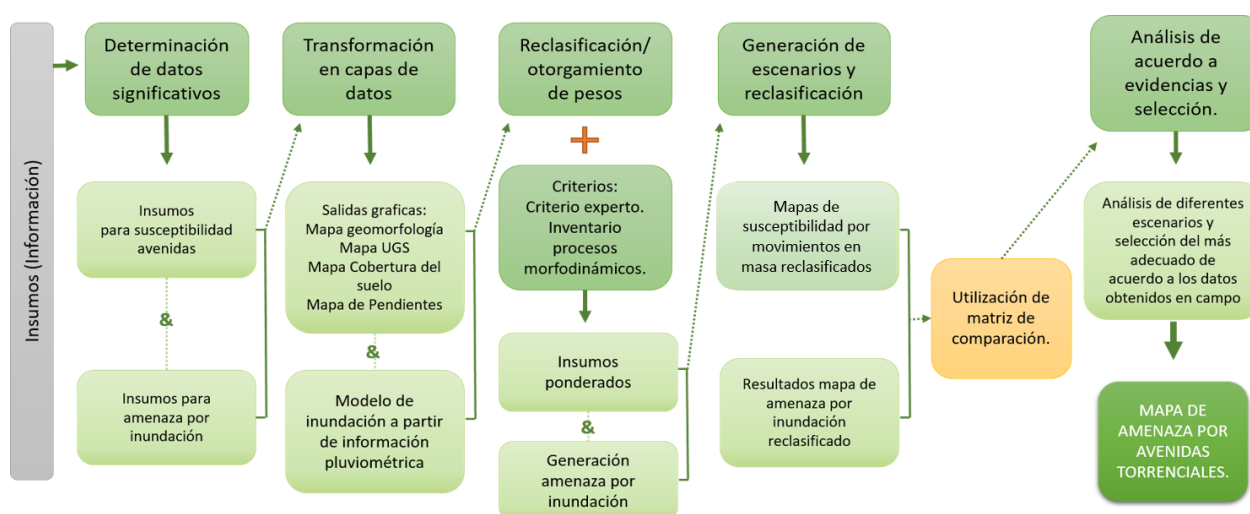
8.5. Análisis multicriterio

En la etapa inicial del desarrollo del mapa de amenazas, se llevó a cabo la creación del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, adaptado específicamente para avenidas torrenciales. En esta fase del estudio, el mapa de susceptibilidad se combinará exclusivamente con la variable desencadenante (precipitación pluviométrica), esto se debe a que las lluvias

torrenciales son el factor principal que activará o desencadenará la liberación de material debido a los movimientos en masa que se encuentran en las áreas circundantes de la quebrada, caudal que a su vez aumentará por la incidencia de las mismas lluvias. Es importante destacar que se utilizará el cálculo de la amenaza por inundación previamente generado como la variable desencadenante por lluvia.

Figura 24

Esquema de la utilización del análisis multicriterio en el presente caso de estudio.



La metodología planteada se basa en la identificación de amenazas naturales, es decir la identificación de zonas de amenaza por inundación y deslizamientos, todo esto mediante sistemas de información geográfica, utilizando técnicas de análisis multicriterio (Figura 24) en primer lugar en la definición del mapa de susceptibilidad a movimientos en masa adaptado a avenidas torrenciales, y luego finalmente con la información de los depósitos encontrados en campo junto con el criterio experto se escoge el mapa final de amenazas avenidas torrenciales.

8.5.1. Normalización de insumos

Para realizar el análisis multicriterio se hizo necesaria la normalización de todos los datos de entrada, es decir, de los insumos generados previamente correspondientes a los mapas de Geomorfología (Apéndice G), UGS (Apéndice H), Cobertura de suelo (Apéndice I) y

Pendientes (Apéndice J). En este caso todas las variables se llevan a una escala de 1 a 5, donde 1 representa el valor que no favorece a la generación de susceptibilidad y 5 representa el valor en el cual el favorecimiento a la generación del evento es más alto.

8.5.2. *Asignación de pesos relativos*

Para la generación de avenidas torrenciales participan diferentes variables, pero el nivel de influencia de cada una de estas variables no es el mismo, puede que unas variables tengan un mayor peso de importancia que otras, por esta razón es necesaria la generación de diferentes escenarios de ponderación, en total se generaron noventa y seis (96) escenarios diferentes, variando el porcentaje de importancia de cada uno de los insumos previamente normalizados (Apéndice K). De estos noventa y seis (96) escenarios se escogieron los cinco (5) (Tabla 6 y Figura 25), que generaban de acuerdo al criterio experto los resultados de mayor concordancia con los datos del Inventario de procesos morfodinámicos (Figura 11) (el cual indica la información espacial de ocurrencia de los diferentes movimientos en masa y también la zona de depósito de una posible avenida torrencial).

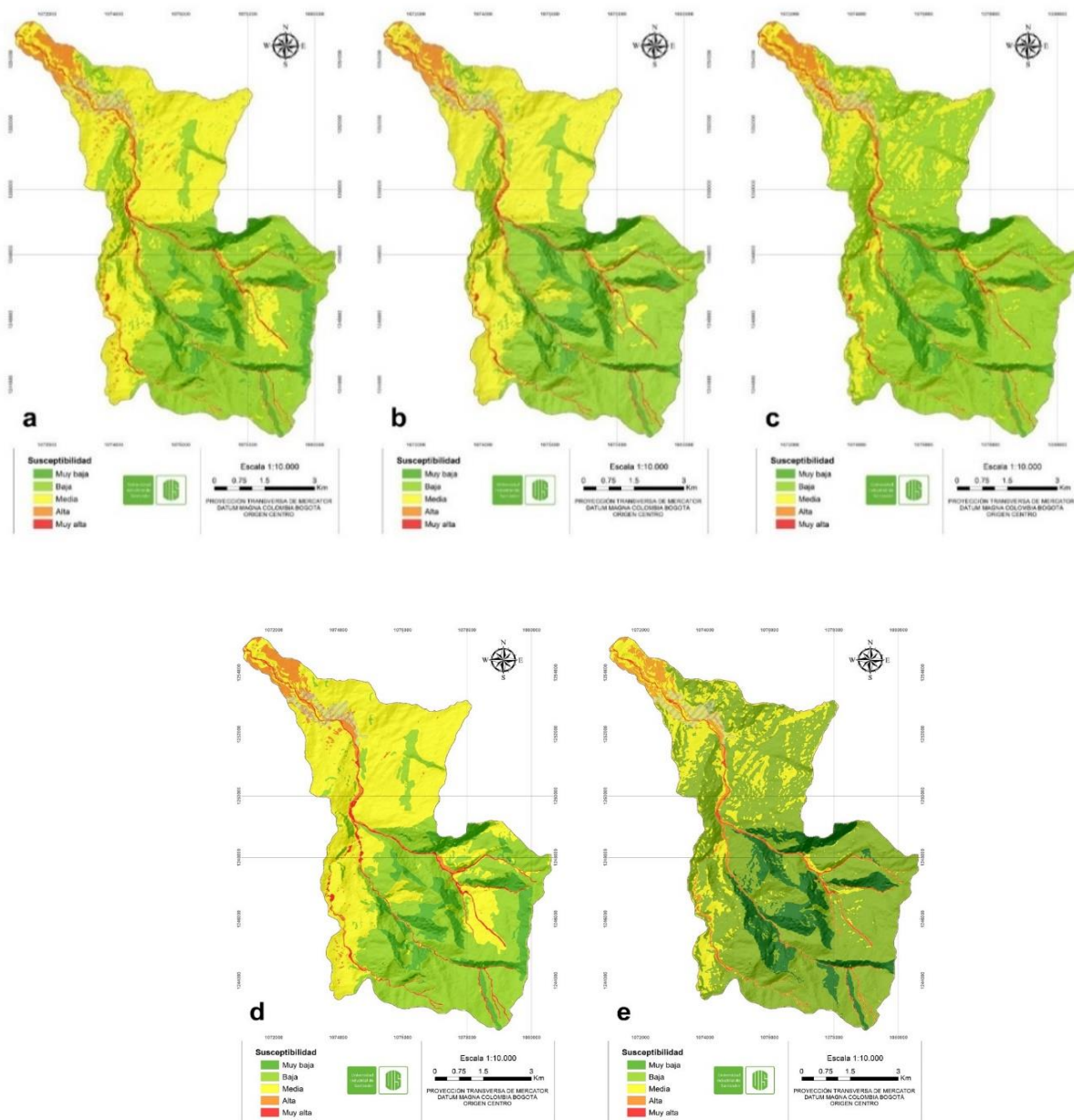
Tabla 6

Peso en (%) de cada de los insumos Geomorfología, Cobertura de la tierra, UGS y Pendientes para las diferentes ponderaciones de susceptibilidad por movimientos en masa adaptado a avenidas torrenciales preseleccionadas en el análisis multicriterio.

Ponderación	Peso Geomorfología (%)	Peso Cobert. de la tierra(%)	Peso UGS (%)	Peso Pendientes (%)
# 44	40	20	10	30
# 66	50	10	30	10
# 69	50	10	10	30
# 92	35	20	35	10
# 96	60	10	10	20

Figura 25

Mapas de Susceptibilidad por movimientos en masa adaptados a avenidas torrenciales generados con las diferentes ponderaciones. (a) ponderación #44, (b) ponderación #66, (c) ponderación #69, (d) ponderación #92 y (e) ponderación #96.



8.5.3. Generación de mapas de amenaza

Los diferentes mapas de amenaza por avenidas torrenciales fueron realizados por la combinación de mapas en QGis v. 3.32.3, a partir de los mapas de susceptibilidad y el detonante de amenaza por inundación para un periodo de retorno de 100 años. La amenaza por inundación se clasifica en amenaza baja, media, alta y muy alta, es decir, se encuentra en 4 rangos, y las

susceptibilidad se clasifica en muy baja, baja, media, alta y muy alta, se encuentra en 5 rangos, por lo que es necesario de nuevo normalizar la susceptibilidad y la amenaza por inundación en 4 rangos donde 1 es el valor que no favorece a la generación del evento y 4 el valor el cual el favorecimiento a la generación del evento es más alto, de esta manera se reasignaron los valores de susceptibilidad a movimientos en masa adaptados a avenidas torrenciales (Figura 26a).

Figura 26

a). Tabla de normalización en cuatro rangos y b). Matriz de comparación utilizada para la generación de los mapas de amenaza por avenidas torrenciales.

a)

Muy Alta	Muy alta
Alta	Alta alta
Media	Media
Baja	Baja
Muy Baja	

b)

Susceptibilidad	4	3	4	4	4
	3	2	3	3	4
	2	1	2	3	4
	1	1	2	2	3
		1	2	3	4
	Amenaza por inundación				

Después para la generación de los mapas de amenaza por avenidas torrenciales se implementó una matriz de comparación y asignación de pesos (Figura 26b). De esta manera se obtuvieron cinco mapas de amenaza por avenidas torrenciales para un periodo de retorno de 100 años.

9. Resultados

Los resultados de la presente investigación refleja en cierta medida la metodología propuesta por el SGC como se observó en la última etapa de este proceso. En este caso, como parte de la interpretación de los resultados, se propuso obtener el mapa que mejor se ajuste a la evidencia de campo. Por lo tanto, fue necesario ubicar los diferentes depósitos de avenidas torrenciales encontrados en la zona de estudio. Estos depósitos se utilizaron para calibrar y seleccionar el mapa final de amenaza.

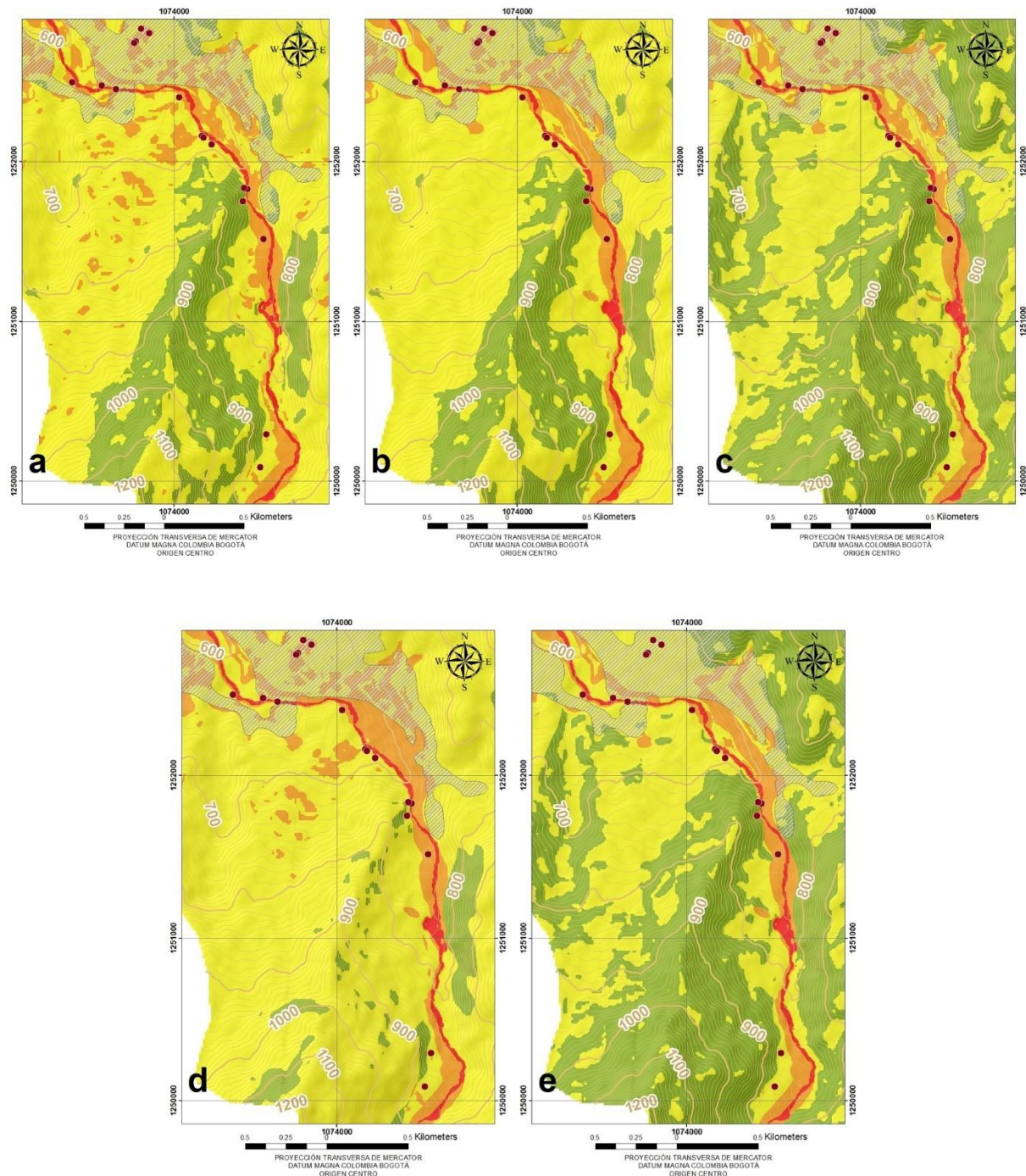
Para determinar la ponderación más adecuada, dado que el mapa de amenazas se relaciona con la exposición a la mancha de inundación, se llevó a cabo una comparación entre los mapas de susceptibilidad y los mapas de avenidas torrenciales. Ambos tipos de mapas permiten visualizar e identificar los puntos de influencia. En el mapa de susceptibilidad, estos puntos van desde un alta hasta una media susceptibilidad. En contraste, las áreas que se encuentran distantes de la llanura de inundación y de los depósitos de terrazas deberían corresponder a zonas de baja susceptibilidad. Esto se debe a que no existe una manera física posible a partir de los datos ingresados en la modelación hidráulica en la que el flujo de agua pueda llegar hasta los puntos más altos y de mayor pendiente de la cuenca que se encuentran más alejados del río.

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados anteriormente se puede observar que los mapas que cumplen con el parámetro de tener bajos valores de susceptibilidad fuera de la influencia de la quebrada Las Cruces son los mapas de las ponderaciones número 69 y 96 (Figura 27), ya que los otros muestran valores medios de susceptibilidad incluso en las zonas altas de la cuenca.

Finalmente, para la selección del mapa más adecuado se tuvo en cuenta los puntos donde se evidenciaron depósito característico de avenidas torrenciales en las terrazas de inundación ubicadas en el área urbana de la cuenca, de esta manera se escoge el mapa de susceptibilidad más adecuado el correspondiente a la ponderación número 69 (Tabla 6), donde la variable de mayor influencia es la Geomorfología con un peso del 50%, seguida de la variable Pendientes con un peso del 30% y finalmente las variables con menos influencia fueron las UGS con un 10% de peso y la cobertura de suelo con un 10% de peso.

Figura 27

Mapas de Susceptibilidad a movimientos en masa adaptados a avenidas torrenciales generados con las diferentes ponderaciones en los que se observan los puntos donde se evidencian depósitos asociados a estos fenómenos de avenidas torrenciales (puntos de control). (a) ponderación #44, (b) ponderación #66, (c) ponderación #69, (d) ponderación #92 y (e) ponderación #96.

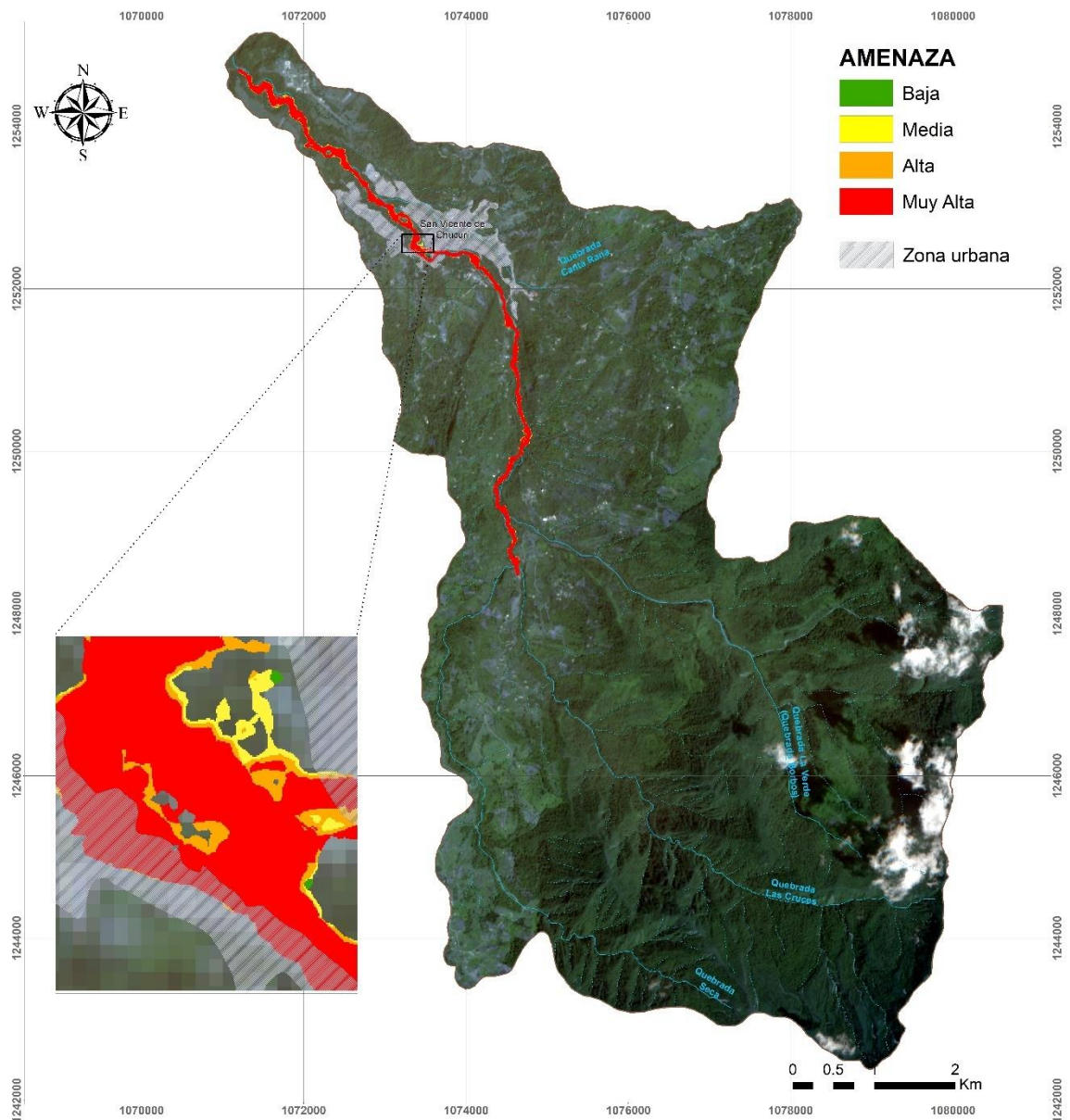


Para finalizar, se escoge el mapa de amenazas por avenidas torrenciales (Figura 28), generado previamente en el análisis multicriterio con la matriz de comparación y asignación

de pesos, producto de la combinación ráster de la susceptibilidad a movimientos en masa adaptado a avenidas torrenciales de la ponderación número 69 junto con el mapa de amenazas por inundación.

Figura 28

Mapa zonificación de amenaza por avenidas torrenciales en la microcuenca de la quebrada Las Cruces.



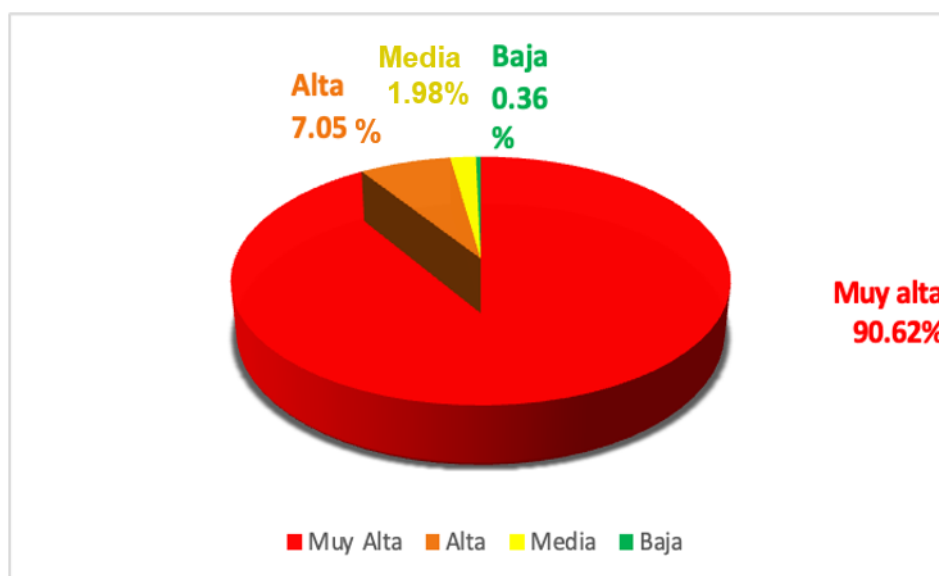
9.1. Descripción del mapa de Amenazas avenidas torrenciales de la quebrada Las Cruces

El mapa final de amenazas por avenidas torrenciales de la quebrada Las Cruces se realizó previamente mediante la herramienta “combine” de las herramientas de Spatial analyst tools del ToolBox de ArcMap 10.6. El mapa generado se clasificó en cuatro categorías: baja, media, alta y muy alta.

En la (Figura 29) se muestra la distribución porcentual de las cuatro categorías definidas con respecto al total del área de amenaza por avenidas torrenciales para un periodo de retorno de 100 años la cual es de 580,499 m². La categoría con mayor porcentaje de influencia es la que corresponde a una amenaza muy alta con un 90.62% y un área de influencia de 526023 m², seguida por la categoría de amenaza alta con un 7.05% y un área de influencia de 40898 m², luego tiene la categoría de amenaza media con un 1.98% y un área de influencia de 11490 m², finalmente se encuentra la categoría de amenaza baja con un 0.36% y un área de influencia de 2088 m².

Figura 29

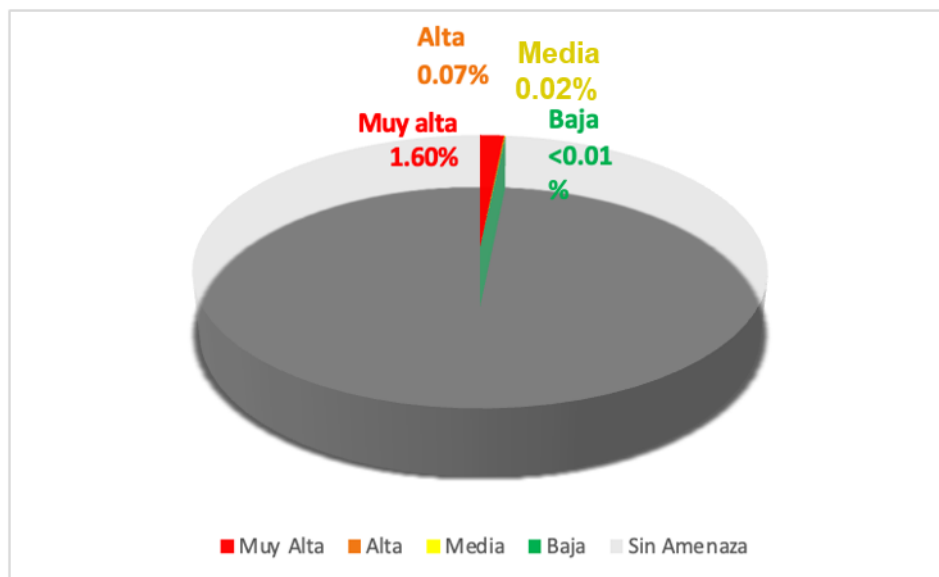
Porcentajes del área total de amenaza por avenidas torrenciales correspondiente a un periodo de retorno de 100 años en la microcuenca de la quebrada Las Cruces, para cada categoría de amenaza.



En cuanto a la influencia de la amenaza por avenidas torrenciales para un periodo de retorno de 100 años en el área correspondiente al tejido Urbano continuo (municipio de San Vicente de Chucurí) (Figura 30) teniendo en cuenta que el área urbana del municipio es de 1012439.33 m² y el área total afectada por la amenaza es de 16986.20 m² correspondiente al 1.60% del área total del municipio. La categoría con mayor porcentaje de influencia corresponde a una amenaza muy alta con un 1.60% y un área de influencia de 16154.30 m², seguida por la categoría de amenaza alta con un 0.7% y un área de influencia de 660.41 m², luego tenemos la categoría amenaza media con un 0.2% y un área de influencia de 166.57 m², finalmente se encuentra la categoría de amenaza baja con un porcentaje menor a 0.01%, más exactamente con 0.0005% y un área de influencia de 4.92 m².

Figura 30.

Porcentajes del área urbana afectada asociada a la amenaza por avenidas torrenciales correspondiente a un periodo de retorno de 100 años, con respecto al área total del municipio de San Vicente de Chucurí.



Cabe mencionar que anteriormente se generó el mapa de amenazas por avenidas torrenciales para un periodo de retorno de 100 años, sin embargo, para tener un estudio con mayor nivel de detalle temporal se calculó con la ponderación de susceptibilidad número 69 también la amenaza por avenidas torrenciales para los periodos de retorno de 2 años, 5 años,

10 años, 25 años y 50 años. El área y el porcentaje de afectación (afec. en la tabla) de amenaza por avenidas torrenciales de la quebrada Las Cruces de acuerdo con las categorías: muy alta, alta, media y baja con respecto al área total de amenaza por avenidas torrenciales para los diferentes periodos de retorno se muestran en la (Tabla 7).

Tabla 7

Área total de amenaza por avenidas torrenciales de la quebrada Las Cruces.

AMENAZA	Área T2 (m ²)	% Afec. T2	Área T5 (m ²)	% Afec. T5	Área T10 (m ²)	% Afec. T10	Área T25 (m ²)	% Afec. T25	Área T50 (m ²)	% Afec. T50	Área T100 (m ²)	% Afec. T100
Baja	3689	1,00	2994	0,70	3111	0,67	2517	0,49	2347	0,43	2088	0,36
Media	21887	5,93	17089	4,01	14688	3,16	12742	2,49	12783	2,34	11490	1,98
Alta	74163	20,08	69647	16,36	63758	13,70	53411	10,43	45405	8,31	40898	7,05
Muy alta	269529	72,99	335973	78,92	383841	82,48	443364	86,59	485675	88,92	526023	90,62
Total	369268		425703		465398		512034		546210		580499	

Los resultados de la amenaza por avenidas torrenciales de la quebrada Las Cruces y su área de influencia en el casco urbano se presentan a continuación en la (Tabla 8).

Tabla 8

Área y porcentaje de afectación de amenaza por avenidas torrenciales en el casco urbano del municipio de San Vicente de Chucurí, Santander.

AMENAZA	Área T2 (m ²)	% Afec. T2	Área T5 (m ²)	% Afec. T5	Área T10 (m ²)	% Afec. T10	Área T25 (m ²)	% Afec. T25	Área T50 (m ²)	% Afec. T50	Área T100 (m ²)	% Afec. T100
Baja	50,02	0,01	46,17	0,01	38,30	0,01	19,24	0,01	9,03	0,01	4,92	0,01
Media	637,57	0,06	639,09	0,06	462,14	0,05	212,65	0,02	211,82	0,02	166,57	0,02
Alta	2588,43	0,26	2054,40	0,20	1713,24	0,17	1102,98	0,11	882,91	0,09	660,41	0,07
Muy alta	5586,62	0,55	8562,19	0,85	10560,33	1,04	13202,13	1,30	14718,29	1,45	16154,30	1,60
Total	5586,62	0,87	11301,85	1,11	12774,01	1,26	14536,99	1,43	15822,05	1,56	16986,20	1,69

10. Conclusiones

Mediante el modelo hidrológico de conversión precipitación-escorrentía realizado en el Software HEC-HMS se calcularon los caudales máximos utilizando el método de pérdida del número de curva CN, dando como resultado para un periodo de retorno de 100 años un valor de 164,3 m³/s, este valor de caudal permitió determinar el área de afectación por inundación en el casco urbano del municipio de San Vicente de Chucurí de 16.985 m² correspondiente a un 1,70% del área total del mismo.

Teniendo en cuenta que los valores encontrados de velocidades y profundidades para todos los periodos de retorno estudiados superan los valores de 1m/s y 1m para velocidad y profundidad respectivamente. En el período de retorno correspondiente a dos (2) años la profundidad máxima del flujo es de 1,66 m y alcanza una velocidad máxima de 20,02 m/s mientras que, para el mayor periodo de retorno, es decir cien (100) años la profundidad máxima es de 6.94 m y la velocidad máxima corresponde a 308.79 m/s. Por lo anterior se infiere que la amenaza por inundación es alta.

A partir de los depósitos asociados a avenidas torrenciales caracterizados y analizados en el control de campo en la microcuenca de la quebrada Las Cruces, se concluye que dichos poseen características muy heterogéneas entre sí, esto asociado a la disponibilidad del material de aporte alrededor de cada área en la sección específica de la quebrada y a que no todos son producto del mismo evento torrencial. Esto sugiere que esta área es propensa a que se generen este tipo de eventos por lo que se deben tomar medidas de prevención.

Se establece que en el área del proyecto la amenaza por avenidas torrenciales muy alta es la amenaza predominante, abarcando aproximadamente el 90.62% de la zona total amenazada, con un área de 580499 m². La amenaza alta es la segunda categoría con más presencia en la zona con un 7.05% abarcando un área de influencia de 40898 m². Las zonas de

amenaza comprenden geoformas principalmente de tipo Fluvial y algunas Denudacional como los son la ladera inclinada ondulada y la ladera disectada muy abrupta. Además, esta zona de amenaza afecta en su mayoría los suelos transportados aluviales y suelos residuales de la Formación Paja.

El relieve en el área de estudio es fuertemente accidentado y de acuerdo con la curva hipsométrica la cuenca se encuentra en una fase de equilibrio o etapa de madurez, es decir que se encuentra en una etapa de estabilización respecto a los procesos erosivos, sin embargo al no encontrarse en una etapa de vejez esto nos indica que aún hay influencia erosiva presente que se puede asociar a la generación de movimientos en masa, y parte de este material a su vez puede llegar a ser de aporte en un evento torrencial.

El área crítica de amenaza por avenidas torrenciales dentro del casco urbano del municipio de San Vicente de Chucurí se encuentra en la zona sur-oeste debido a la presencia de construcciones demasiado próximas y sobre la llanura de inundación de la quebrada. El área urbana total afectada es de 16986,20 m² correspondiente a solo el 1.69% del área total del casco urbano del municipio de San Vicente de Chucurí y la categoría con mayor porcentaje de influencia en el mismo corresponde a la de amenaza muy alta con un 1.60% y un área de afectación de 16154.30 m².

11. Recomendaciones

Una recomendación importante es utilizar un modelo digital de elevación (DEM) de mayor resolución para mejorar la precisión en diversos aspectos del estudio. Una resolución más alta mejorará la capacidad de simular y predecir eventos hidrológicos, lo que es fundamental para la gestión de riesgos de inundación.

Un mapa de cobertura vegetal más detallado permitirá una asignación más precisa de los coeficientes de Manning, lo que mejorará la precisión del modelo hidráulico y, en última instancia, la simulación de inundaciones.

Generar estudios donde se evalúe la contribución de material proveniente de deslizamientos a la quebrada y su impacto en la generación de avenidas torrenciales. Aunque estos movimientos no afectan la cabecera municipal en la actualidad, es importante considerar los posibles cambios en el futuro debido a diversos factores, como la evolución del terreno, el cambio climático u otros eventos geológicos.

Llevar a cabo un estudio de aguas subterráneas para mejorar el modelamiento hidrológico y la comprensión completa del sistema hidrológico de la cuenca.

Incluir valores de evapotranspiración en el modelo HEC-HMS es una recomendación acertada y relevante, ya que la evapotranspiración es un componente clave en el ciclo hidrológico y puede afectar significativamente el caudal de una cuenca.

11.1. Alternativas para mitigar la amenaza presente

- La implementación de planes que proporcionen capacitación técnica para el fortalecimiento de la respuesta de atender emergencias en el municipio de San Vicente de Chucurí.
- Elaborar planes de adaptación para la infraestructura sobre las zonas de amenaza alta y muy alta a corto y mediano plazo, incluyendo también las áreas cercanas a dichas zonas.
- La realización de estudios topográficos y batimétricos detallados para comprender la dinámica hidráulica del sistema de drenaje.
- El seguimiento y control de posibles nuevos eventos involucra la implementación de sistemas de monitoreo y sistemas de alertas tempranas (desde el 2021 San

Vicente de Chucuri cuenta con un sistema de alertas temprana). Esto incluye el establecimiento de redes hidrometeorológicas que cuenten con estaciones pluviométricas y sensores de nivel de cauce. Estos sistemas se vinculan al análisis de la variabilidad climática actual y a posibles cambios climáticos en el futuro.

- Generación de un plan normativo para la intervención antrópica en zonas del cauce de la quebrada que son sensibles a la torrencialidad.

Referencias Bibliográficas

- Araque, N., & Otero, J. (2016). *Zonas transversales y su relación con estructuras regionales, flanco O- Cordillera Oriental*. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Bucaramanga.
- Ardila, M., & Jaimes, M. (2019). *Estudio de amenaza por movimientos en masa aplicando el método estadístico bivariado a escala 1:25.000 caso de estudio: San Vicente de Chucurí, Santander*. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Aristizabal, E., Arango, M., & García, I. (2020). Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, Vol. 29, N°1*, 242-258.
- Ávila, D. (27 de Abril de 2018). *Estas son las emergencias invernales de los últimos años en San Vicente de Chucurí*. Obtenido de Vanguardia : <https://www.vanguardia.com/economia/local/estas-son-las-emergencias-invernales-de-los-ultimos-anos-en-san-vicente-de-chucuri-KEv1431478>
- Benavides, H.; Mayorga, R.; Hurtado, G. (2007). Análisis de índices de extremos climáticos para Colombia usando el Rclimindex, Nota técnica del Ideammeteo/007-2007. Recuperado el 21 de Agosto de 2023, de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/020661/NotaRclimindexfinal.pdf>
- Bradley, J. (1986). *Hydraulics and Bed Material Transport at High Fine Suspended Concentrations*. Colorado State University: Tesis de doctorado.
- Caballero, J. (2011). Las avenidas torrenciales: una amenaza potencial en el Valle de Aburrá. *Gestión y Ambiente, Vol.14, N°3*, 45-50.

- Caballero, V., Parra, M., & Mora, A. (2010). Levantamiento de la Cordillera Oriental durante el Eoceno tardío – Oligoceno temprano: Proveniencia sedimentaria en el sinclinal de Nuevo Mundo, cuenca Valle Medio del Magdalena. *Boletín de Geología*, N°32, 45-77.
- Cambell, R. (1975). Soil slip, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, Southern California. *US Geological survey professional, paper 851*, 51.
- Carvajal, J. (2008). Primeras aproximaciones a la estandarización de la geomorfología en Colombia. . *Documento inédito en preparación.*, 30.
- Carvajal, J. (2011). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Bogotá.
- Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental. . *Bol. Geológico*, Vol. XVI, 5-96.
- CEPAL. (2013). *Manual para la Evaluación de Desastres*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Cetina, L., Velandia, F., & Patiño, H. (2019). Análisis de deformación al occidente del Anticlinorio de Los Yarigués - Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, Vol.41, N°3, 31-56.
- Chow. (1959). *Open Channels Hydraulics*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Clavijo, J. (1996). *Memoria Explicativa de la Plancha 75 –Aguachica. Mapa Geológico de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.
- Colombia Turismo web. (s.f.). *San Vicente de Chucurí*. Recuperado el 17 de Febreo de 2020, de <https://www.colombiaturismoweb.com/DEPARTAMENTOS/SANTANDER/MUNICI>

PIOS/SAN%20VICENTE%20DE%20CHUCURI/SAN%20VICENTE%20DE%20C
HUCURI.htm

Consorcio POMCA. (2014). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica – Arroyos directos al caribe sur y la Ciénaga de La Virgen*. Bogotá: Minambiente.

Cooper, M., Addison, F., Álvarez, R., Coral, M., Graham, R., Hayward, A., . . . Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley Colombia. *AAPG Bulletin*, Vol. 79, N°10, 1421-1443.

CORNARE. (2011). *Evaluación y zonificación de riesgos por avenida torrencial, inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de La Ceja*. Medellín: Gobernación de Antioquia.

Costa, J. (1978). Colorado Big Thompson flood: Geologic evidence of a rare hydrologic event. *Geology*, Vol. 6, N°10, 617-620.

DesInventar. (4 de Mayo de 2023). *Perfil de Colombia Santander*. Obtenido de Consulta estadísticas DesInventar: <https://www.desinventar.net/DesInventar/profiletab.jsp>

District, W. P., & Watershed Protection. (2011). *SEDIMENT/DEBRIS BULKING FACTORS AND POST-FIRE HYDROLOGY FOR VENTURA COUNTY*. Ventura: WEST Consultants, Inc.

DNP, D. N. (2018). *Departamento Nacional de Planeacion*. Obtenido de DNP: <https://www.dnp.gov.co/plan-nacional-desarrollo/Paginas/plan-nacional-de-desarrollo-2018-2022.aspx>

Etayo, F. (1968). El sistema cretáceo en la región de Villa de Leyva y zonas próximas. *Universidad Nacional Geología de Colombia*, Vol.5, 5-74.

- Etayo, F. (1989). Análisis facial del inicio del avance marino del Cretácico en la región SW del Macizo de Santander. *Excursión Pre-congreso Colombiano de Geología*.
- Furdada, G., Génova, M., Guinau, M., Victoriano, A., Khazaradze, G., Díez, A., & Calvet, J. (2016). Las avenidas torrenciales de los barrancos de Portainé, Reguerals y Ramiosa (Pirineo Central): evolución de las cuencas y dinámica torrencial. *Reunión Nacional de Geomorfología XIV*.
- Galván, V. R. (1999). *Simulation of the geotechnical properties of arenaceous soft rocks by means of artificial materials (in Portuguese)*. PhD Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- García, J., Génova, M., Calvet, J., Furdada, G., Guinau, M., & Díez, A. (2015). Datación de avenidas torrenciales y flujos de derrubios mediante metodologías dendrogeomorfológicas (barranco de Portainé, Lleida, España). *Ecosistemas, Vol. 24, N°2*, 43-50.
- García, K. L., & Porras, J. N. (2017). *Análisis de la susceptibilidad por movimientos en masa a escala 1:25.000 aplicando el método de redes neuronales: Caso de estudio municipio de San Andrés, Santander*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia.
- Gasparí, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Besteiro, S., & Delgado, M. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *AUGMDOMUS, Vol. 4*, 143-158.
- González, J., Hermelin, M., & Cháves, O. (2004). *Aspectos geomorfológicos de la Avenida Torrencial del 31 de enero de 1994 en la cuenca del río Fraile y sus fenómenos asociados*. Cali: Universidad EAFIT.

- Guerra, F., & González, J. (2002). Caracteriza morfométrica de la cuenca de la Quebrada La Bermeja, San Cristobal, Estado de Táchira, Venezuela. *Geoenseñanza*, vol. 7, 88-108.
- Hermelín, M. (1985). Suelos, Rocas y Formaciones Superficiales. *DYNA*, 106, 25-29.
- Hermelin, M. (1987). *Bases de geología ambiental*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Hermelin, M., Mejía, O., & Velasquez, E. (1992). Erosional and depositional features produced by a convulsive event, San Carlos, Colombia, September 21, 1990. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, Vol. 45, N°1, 89-95.
- Hungr, O. (1995). A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Geotechnical Journal*, Vol. 32, N°4, 610-623.
- IDEAM. (2020). *Banco de Datos IDEAM*. Obtenido de Consulta y descarga de datos hidrometeorológicos: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- IDEAM, IGAC & CORMAGDALENA. (2008). Mapa de Cobertura de la tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Instituto Geográfico Agustín Codazzi y Corporación Autónoma Regional del río Grande de La Magdalena*.
- IDIGER. (2017). *Mapa de amenaza por avenidas torrenciales en perspectiva de cambio climático zona urbana y de expansión urbana escala 1:5000*. Bogotá: Plan de Ordenamiento Territorial.

INGEOMINAS. (2018). *Memoria explicativa del mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa esc 1:100.000 plancha 227*. Bucaramanga: UPTC.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). (2004a). Proyecto Compilación y Levantamiento de la Información Geomecánica: Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la Cartografía Geomorfológica para la Zonificación Geomecánica - Volumen I.

Instituto Colombiano de la Geología y Minería. (2011). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Bogotá: (INGEOMINAS).

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2012). Ecosistemas. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/coberturas-tierra>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2005b). Interpretación Visual de Imágenes de Sensores Remotos y su Aplicación en levantamientos de Cobertura y Uso de la Tierra.

Iverson, R. (1997). Debris-flow mobilization from landslides. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol. 25, N°1*, 85-138.

Jaimes E. L., & López, O. A. (2015). *Contribución al conocimiento geológico del sector Sureste de la Plancha 120-III-C, Valle Medio del Magdalena*. Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-químicas, Escuela de geología, Bucaramanga.

Jaramillo, L., Silva, S., & González, J. (2009). Evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales utilizando metodologías cualitativas. Caso de aplicación a la quebrada Doña María. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Vol. 8, N°15*, 12-26.

Jiménez, H., & Materón, H. (1986). *Hidrología Básica (Tomo III)*. Cali: Universidad del Valle.

Kanji, M. A. (2014). Critical issues in soft rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6, 186-195.

Ley 1523. (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 y se dictan otras disposiciones*. Bogotá: Gobierno de la República de Colombia.

Ley 388. (1997). *Ley de Desarrollo Territorial*. Bogotá: Gobierno de la República de Colombia.

Lux Cardona, B. (2016). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. *Repositorio Institucional USAC*.

Macías, Y., & Cabanzo, M. (2017). *Análisis y caracterización estructural de zonas transversales en el bloque colgante de la Falla del Suárez*. Trabajo de grado, Universidad Industrial de Santander, Facultad de ingenierías físico-químicas, Escuela de Geología., Bucaramanga, Colombia.

Méndez, L., & Manchego, S. (2019). *Causas de las avenidas torrenciales e inundaciones rápidas en el Departamento del Huila en los municipios de Algeciras, Campoalegre, Neiva y Rivera en Febrero del 2017*. Medellín: Universidad EAFIT.

Ministerio de Ambiente. (2013). *Gestión del riesgo en POT en San Vicente de Chucurí*.

Obtenido de

https://archivo.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/gesti%C3%B3n_del_riesgo/Gesti%C3%B3n_del_Riesgo_en_OT_San_Vicente_de_Chucur%C3%AD.pdf

f

- Monroy, W., & Sandoval, M. (2015). *Exploración y evaluación de carbones en el área Vanegas - San Vicente de Chucurí - Ríos Cascajales del Departamento de Santander*. Bogotá: SGC.
- Montoya, L., Silva, S., & González, J. (2009). Evaluación de zonas de amenaza por avenidas torrenciales utilizando metodologías cualitativas. Caso de aplicación a la Quebrada Doña María. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, Vol. 8, N°15, 11-29 .
- Morales, L., Podesta, D., Hatfield, W., Taner, H., Jones, S., Barker, M., . . . Goss, C. (1958). General geology & oil occurrences of the Middle Magdalena Valley, Colombia. Habitat of Oil. *Symposium, America Association of Petroleum Geologists*, 641-695.
- Naciones Unidas. (3 de Enero de 2020). *América Latina y el Caribe: la segunda región más propensa a los desastres*. Obtenido de Cambio climático y medioambiente: <https://news.un.org/es/story/2020/01/1467501>
- Ordóñez, C., & Martínez, R. (2003). *Sistemas de Información Geográfica, Aplicaciones prácticas con IDRISI KILIMANJARO al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales*. Madrid: RA-MA.
- Osorio, D. (2016). *Estratigrafía y deformación del Grupo Girón en El Anticlinorio de Los Yariquies (Anticlinal de Los Cobardes) sectores Zapatoca y Rio Lebrija*. Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, Escuela de geología, Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Bucaramanga.
- Othman, A., El-Saoud, W., Habeebullahb, T., Shaaban, F., & Abotalib, Z. (2023). Risk assessment of flash flood and soil erosion impacts on electrical infrastructures in overcrowded mountainous urban areas under climate change. *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 236.

- Petrovic, A. (2015). Challenges of torrential flood risk management in Serbia. *J. Geogr. Inst. Cvijic.*, Vol.65, N°2, 131–143.
- Restrepo, J., & Toussaint, J. (1988). Terranes and continental accretion in the colombian Andes. *Episodes*, Vol. 7, N°3, 189-193.
- Reyes, A., Barroso, F., & Carvajal, Y. (2010). *Guía básica para la caracterización morfológica de cuencas hidrográficas*. Cali: Universidad del Valle.
- Royero, J., & Clavijo, J. (2001). *Memoria geológico generalizado del departamento de Santander*. Bucaramanga: Ingeominas.
- Sala, M. (1984). Geomorfología actual. *Guía conceptual, temática y bibliográfica*. *Revista de geografía* , 18(1), 209-248. Recuperado el 15 de Agosto de 2023, de <https://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/viewFile/45984/56810>
- Sarmiento - Rojas, L. (2011). Eastern Cordillera Basin. *Petroleum Geology of Colombia - Regional Geology*. *Petroleum Geology of Colombia - Regional Geology ANH*, Vol. 7.
- Sarmiento, G., Puentes, J., & Sierra, C. (2015). Evolución Geológica y Estratigrafía del Sector Norte del Valle Medio del Magdalena. *Geología Norandina*, N°12, 52-82.
- SCS. (1964). *Grupos Hidrológicos del Suelo*.
- Servicio Geológico Colombiano. (2013). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa a escala 1:100.000 (Vol. 2)*. Bogotá, Colombia: Servicio Geológico de Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colombiano.

- Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000, Anexo A: Glosario de términos geomorfológicos*. Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colombiano.
- Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza or movimeintos en masa escala 1:25.000*. Bogotá D.C., Colombia: Servicio Geológico Colombiano.
- Servicio Geológico Colombiano. (2021). *Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*. Bogotá, Colombia: Servicio Geológico Colomlbiano.
- Štěpánková, P., Dumbrovský, M., & Drbal, K. (2017). The assessment of level of flash floods threat of urbanised areas. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendeliane Brunensis, Vol. 65, N°2*, 519-526.
- Thornbury, W. D. (1960). *Principios de Geomorfologia*. Buenos Aires: Kapelusz.
- Universidad Nacional de Colombia. (2009). *Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de propuestas de gestión*. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
- Van Westen, C., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102, 112-131.
- Vanguardia. (7 de Mayo de 2018). *Ideam lanza alerta roja en Santander por posible crecida de ríos*. Obtenido de La Vanguardia: <https://www.vanguardia.com/colombia/ideam-lanza-alerta-roja-en-santander-por-posible-crecida-de-rios-FEVL432403>

- Vargas, G., Rotigliano, E., & Conoscenti, C. (2019). Prediction of debris-avalanches and -flows triggered by a tropical storm by using a stochastic approach: An application to the events occurred in Mocoa (Colombia) on 1 April 2017. *Geomorphology*, Vol. 339, 31-43.
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Jimeno, V. A., Cruz, B. J., Restrepo, H. y Gómez, R. E. (1977). Geología de la plancha 120 de Bucaramanga. Escala 1:100000. Bogotá, Colombia. *Ingeominas*.
- Wartalska, K., Kaźmierczak, B., Nowakowska, M., & Kotowski, A. (2020). Analysis of Hyetographs for Drainage System Modeling. *Water*, Vol. 12, N°1, 149.

Apéndices

Apéndice A

Unidades Geológicas Superficiales

UGS	COD
Suelo transportado de Terraza Aluvial	Stta
Roca blanda de la Formación Umir	Rbum
Roca de alta resistencia de la Formación Rosa Blanca	Rarrb
Roca de media resistencia de la Formación Rosa Blanca	Rmrrb
Roca de baja resistencia de la Formación Rosa Blanca	Rbrrb
Roca de media resistencia de la Formación Los Santos	Rmrls
Roca de baja resistencia de la Formación Los Santos	Rbrls
Suelo transportado de Depósito Aluvial	Stda
Suelo residual de la Formación Rosa Blanca	Srrb
Suelo residual de la Formación Angostura del río Lebrija	Sral
Roca de baja resistencia de la Formación Umir	Rbrum
Roca de media resistencia de la Formación Umir	Rmrum
Suelo residual de la Formación Paja	Srpa
Roca de media resistencia de la Formación Paja	Rmrpa
Roca de baja resistencia de la Formación Angostura del río Lebrija	Rbral
Suelo residual de la Formación Los Santos	Srls
Roca de alta resistencia de la Formación Los Santos	Rarls
Roca blanda de la Formación Los Santos	Rbls
Roca de media resistencia de la Formación Angostura del río Lebrija	Rmral
Roca de alta resistencia de la Formación Angostura del río Lebrija	Raral
Roca de baja resistencia de la Formación Paja	Rbrpa
Suelo transportado de Deposito coluvial	Stdc
Roca de media resistencia de la Formación Simití	Rbsi
Roca blanda de la Formación Rosa Blanca	Rbrb
Suelo transportado fluvio-torrencial	Stft
Roca blanda de la Formación Paja	Rbpa

Apéndice B

Geoformas de Ambiente Denudacional.

Código	Nombre	Área (km ²)	% área
Dc	Cima	0.285	0.496
Ddi	Cono de deslizamiento indiferenciado	0.027	0.047
Ddrt	Cono de deslizamiento rotacional	0.001	0.001
Ddtr	Cono de deslizamiento traslacional	0.001	0.001
Deed	Escarpe de erosión diferencial	0.129	0.224
Deem	Escarpe de erosión mayor	0.581	1.012
Dla	Lomo angosto	0.636	1.107

Dld	Ladera denudada	0.324	0.565
Dlde	Lomo denudado	0.574	1.000
Dldi	Ladera disectada	3.891	6.775
Dldma	Ladera disectada muy abrupta	8.062	14.040
Dleo	Ladera escarpada ondulada	0.618	1.076
Dlfd	Cono de flujo de detritos	0.001	0.002
Dli	Ladera inclinada	0.979	1.705
Dlio	Ladera inclinada ondulada	7.276	12.671
Dlmio	Ladera muy inclinada ondulada	1.017	1.771
Dlmo	Ladera moderadamente inclinada ondulada	0.718	1.251
Dlo	Ladera ondulada	3.384	5.893
Dloa	Ladera ondulada abrupta	4.578	7.973
Dloma	Ladera ondulada muy abrupta	0.768	1.338
Dsa	Superficie de erosión o aplanamiento	0.251	0.437
	Total	34.101	59.384

Apéndice C

Geoformas de Ambiente Fluvial.

Código	Nombre	Área (km²)	% área
Fbc	Barra compuesta	0.017	0.030
Fbl	Barra longitudinal	0.013	0.022
Fca	Cauce aluvial activo	0.943	1.641
Fcd	Cuenca de decantación	0.102	0.177
Fpi	Plano o llanura de inundación	1.009	1.757
Fta	Terraza de acumulación	2.340	4.075
Ftae	Escarpe de terraza de acumulación	0.893	1.556
Fte	Terraza de erosión	0.041	0.071
	Total	5.358	9.330

Apéndice D

Geoformas de Ambientes Estructurales.

Código	Nombre	Área (km²)	% área
Sla	Ladera abrupta	4.641	8.081
Sles	Ladera escalonada	1.022	1.780
Slesc	Ladera escarpada	4.536	7.898
Slft	Lomo de falla con faceta triangular	1.390	2.421
Slma	Ladera muy abrupta	0.829	1.444
Slmi	Ladera muy inclinada	4.686	8.160

Slp	Lomo de presión	0.863	1.503
	Total	17.966	31.287

Apéndice E

Coberturas de tierra del área de estudio.

Cobertura (CORINE Land Cover)	Área (km2)	% área
Bosque ripario	0.923	1.607
Bosque denso	18.694	32.554
Bosque fragmentado	0.658	1.145
Cultivos permanentes arbustivos	3.277	5.706
Herbazal	0.035	0.062
Mosaico de cultivos con espacios naturales	1.697	2.955
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	8.460	14.732
Mosaico de pastos con espacios naturales	2.882	5.018
Mosaico de pastos y cultivos	2.365	4.118
Pastos enmalezados	4.324	7.529
Pastos limpios	4.015	6.991
Ríos	0.943	1.641
Tejido urbano continuo	0.997	1.737
Tejido urbano discontinuo	0.206	0.359
Vegetación secundaria o en transición	7.951	13.846

Apéndice F

Datos pluviométricos (precipitación máxima mensual).

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Octubre	Nov	Dic
1980	15.0	55.0	42.0	65.0	29.0		42.0	45.0	53.0	23.0	56.0	41.0
1981	38.0	64.0	64.0	47.0	106.0	38.0	48.0	79.0	78.0	19.0	83.0	32.0
1982	45.0	74.0	65.0	63.0	32.0	30.0	46.0	66.0	68.0	38.0	37.0	14.0
1983	22.0	13.0	17.0	32.0	30.0	26.0	30.0	40.0	14.0	40.0	20.0	15.0
1984	15.0	63.0	78.0	30.0	32.0	81.0	35.0	14.0	31.0	55.0	40.0	16.0
1985	62.0	25.0	72.0	55.0	32.0	46.0	15.0	26.0	80.0	45.0	30.0	28.0
1986	49.0	40.0	48.0	66.0	63.0	26.0	34.0	34.0	25.0	48.0	45.0	10.0
1987	104.0	62.0	52.0	46.0	59.0	15.0	19.0	29.0	65.0	62.0	79.0	27.0
1988	24.0	93.0	32.0	65.0	24.0	54.0	56.0	42.0	18.0	64.0	48.0	72.0
1989	20.0	25.0	57.0	37.0	48.0	25.0	25.0	34.0	43.0	20.0	43.0	58.0
1990	42.0	46.0	33.0	47.0	49.0	38.0	17.0	13.0	14.0	42.0	30.0	135.0
1991	12.0	55.0	74.0	26.0	81.0	36.0	23.0	37.0	37.0	36.0	33.0	35.0
1992	43.0	40.0	96.0	33.0	64.0	75.0	29.0	19.0	38.0	49.0	72.0	19.0
1993	56.0	60.0	34.0	50.0	39.0	10.0	68.0	56.0	35.0	37.0	71.0	29.0
1994	49.0	26.0	45.0	21.0	48.0	30.0	68.0	29.0	35.0	35.0	60.0	53.0
1995	22.0	30.0	53.0	38.0	57.0	41.0	61.0	125.0	33.0	90.0	73.0	43.0
1996	48.0	15.0	67.0	60.0	43.0	36.0	35.0	33.0	64.0	83.0	140.0	16.0
1997	14.0	62.0	93.0	100.0	34.0	70.0	47.0	34.0	63.0	72.0	63.0	10.0
1998	87.0	85.0	20.0	53.0	80.0	38.0	27.0	35.0	26.0	38.0	55.0	39.0
1999	42.0	55.0	32.0	45.0	39.0	40.0	37.0	30.0	77.0	98.0	36.0	50.0
2000	72.0	53.0	60.0	63.0	32.0	73.0	8.0	28.0	54.0	79.0	41.0	60.0
2001	25.0	45.0	32.0	94.0	39.0	32.0	50.0	37.0	34.0	40.0	43.0	21.0
2002	26.0	61.0	54.0	50.0	100.0	26.0	33.0	67.0	48.0	40.0	22.0	26.0
2003	43.0	51.0	84.0	28.0	51.0	78.0	13.0	71.0	38.0	58.0	51.0	50.0
2004	27.0	46.0	102.0	57.0	41.0	24.0	39.0	17.0	57.0	63.0	41.0	35.0
2005	49.0	138.0	57.0	60.0	38.0	25.0	14.0	60.0	24.0	92.0	63.0	57.0

2006	63.0	79.0	45.0	29.0	41.0	33.0	80.0	66.0	39.0	109.0	17.0	15.0
2007	40.0	63.0	71.0	83.0	55.0	21.0	14.0	39.0	69.0	72.0	51.0	37.0
2008	15.0	55.0	53.0	20.0	30.0	20.0	30.0	85.0	70.0	62.0	89.0	5.0
2009	69.0	21.0	22.0	102.0	104.0	28.0	20.0	15.0	25.0	86.0	85.0	30.0
2010	4.0	61.0	48.0	57.0	85.0	57.0	55.0	48.0	65.0	104.0	50.0	30.0
2011	30.0	17.0	46.0	37.0	40.0	27.0	49.0	50.0	47.0	64.0	95.0	31.0
2012	31.0	25.0	51.0	67.0	36.0	25.0	24.0	80.0	41.0	54.0	40.0	19.0
2013	24.0	43.0	22.0	55.0	63.0	38.0	32.0	63.0	26.0	48.0	60.0	60.0
2014	6.0	35.0	40.0	80.0	35.0	12.0	17.0	38.0	32.0	48.0	40.0	20.0
2015	60.0	16.0	79.0	50.0	32.0	28.0	13.0	55.0	33.0	29.0	22.0	17.0
2016	65.0	73.0	100.0	64.0	41.0	17.0	21.0	30.0	77.0	40.0	41.0	52.0
2017	39.0	33.0	61.0	77.0	42.0	15.0	21.0	25.0	48.0	80.0	46.0	22.0
2018	23.0	31.0	72.0	189.0	67.0	40.0	47.0	27.0	42.0	52.0	36.0	5.0
2019	50.0	55.0	49.0	42.0	50.0	30.0	10.0	54.0	49.0	42.0	56.0	69.0
2020	70.0	106.0	57.0	64.0	36.0	34.0	19.0	27.0	41.0	34.0	41.0	22.0

Nota. tomado de (IDEAM, 2020).

Apéndice G

Tabla unidades geomorfológicas normalizadas.

GEOMORFOLOGÍA		
Dc	Cima	1
Sla	Ladera abrupta	
Slesc	Ladera escarpada	
Slesc	Ladera escarpada	
Sift	Lomo de falla con faceta triangular	
Slma	Ladera muy abrupta	
Ddi	Cono de deslizamiento indiferenciado	2
Ddrt	Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional	
Ddtr	Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional	
Deed	Escarpe de erosión diferencial	
Deem	Escarpe de erosión mayor	
Dla	Lomo angosto	
Dld	Ladera denudada	
Dlde	Lomo denudado	
Dldi	Ladera Disectada	
Dldma	Ladera disectada muy abrupta	
Dleo	Ladera escarpada ondulada	
Dlfd	Cono o lóbulo de flujo de detritos	
Dli	Ladera inclinada	
Dlio	Ladera inclinada ondulada	
Dlmio	Ladera muy inclinada ondulada	
Dlmo	Ladera moderadamente inclinada ondulada	
Dlo	Ladera ondulada	
Dloa	Ladera ondulada abrupta	
Dloma	Ladera ondulada muy abrupta	
Dsa	Superficie de erosión o aplanamiento	
Sles	Ladera escalonada	
Slmi	Ladera muy inclinada	
Sslp	Sierra y lomo de presión	
Fta	Terraza de acumulación	3
Ftae	Escarpe de terraza de acumulación	
Fte	Terraza de erosión	
Fcd	Cuenca de decantación	4
Fpi	Plano o llanura de inundación	
Fbc	Barra compuesta	5
Fbc	Barra compuesta	
Fbl	Barra longitudinal	
Fbl	Barra longitudinal	
Fca	Cauce aluvial activo	

Apéndice H

Tabla unidades geológicas superficiales normalizadas.

Unidades Geológicas Superficiales		
Roca de alta resistencia de la Formación Angostura del río Lebrija	Raral	1
Roca de alta resistencia de la Formación Los Santos	Rarls	
Roca de alta resistencia de la Formación Rosa Blanca	Rarrb	
Roca de alta resistencia de la Formación Rosa Blanca	Rarrb	2
Roca de media resistencia de la Formación Los Santos	Rmrls	
Roca de alta resistencia de la Formación Los Santos	Rarls	
Roca de media resistencia de la Formación Rosa blanca	Rmrrb	
Roca de media resistencia de la Formación Angostura del río Lebrija	Rmral	
Roca de alta resistencia de la Formación Angostura del río Lebrija	Raral	
Roca de baja resistencia de la Formación Angostura del río Lebrija	Rbral	
Roca de baja resistencia de la Formación Los Santos	Rbrls	
Roca de baja resistencia de la Formación Rosa Blanca	Rbrrb	
Roca de media resistencia de la Formación Paja	Rmrpa	
Roca de media resistencia de la Formación Simití	Rbsi	
Roca de media resistencia de la Formación Umir	Rmrum	
Roca de media resistencia de la Formación Simití	Rmrsi	
Roca de media resistencia de la Formación Rosa Blanca	Rmrrb	3
Roca de baja resistencia de la Formación Rosa Blanca	Rbrrb	
Roca de baja resistencia de la Formación Los Santos	Rbrls	
Roca de baja resistencia de la Formación Umir	Rbrum	
Roca de media resistencia de la Formación Umir	Rmrum	
Roca de baja resistencia de la Formación Angostura del río Lebrija	Rbral	
Roca de media resistencia de la Formación Angostura del río Lebrija	Rmral	
Suelo residual de la Formación Angostura del río Lebrija	Sral	
Roca de media resistencia de la Formación Los Santos	Rmrls	
Roca de media resistencia de la Formación Simití	Rbsi	
Roca de media resistencia de la Formación Paja	Rmrpa	
Roca de media resistencia de la Formación Simití	Rmrsi	
Roca de alta resistencia de la Formación Angostura del río Lebrija	Raral	
Roca de alta resistencia de la Formación Los Santos	Rarls	
Roca de baja resistencia de la Formación Paja	Rbrpa	
Roca de alta resistencia de la Formación Rosa Blanca	Rarrb	
Roca blanda de la Formación Umir	Rbum	
Roca de baja resistencia de la Formación Simití	Rbrsi	
Suelo transportado de Terraza Aluvial	Stta	
Suelo transportado de Terraza Aluvial	Stta	4
Roca blanda de la Formación Umir	Rbum	
Roca de baja resistencia de la Formación Rosa Blanca	Rbrrb	
Roca de baja resistencia de la Formación Los Santos	Rbrls	
Suelo residual de la Formación Rosa Blanca	Srrb	
Suelo residual de la Formación Angostura del río Lebrija	Sral	
Suelo residual de la Formación Paja	Srpa	
Roca de media resistencia de la Formación Paja	Rmrpa	
Suelo residual de la Formación Los Santos	Srls	

Roca blanda de la Formación Los Santos	Rbls	
Roca de baja resistencia de la Formación Paja	Rbrpa	
Suelo transportado de Deposito coluvial	Stdc	
Roca de baja resistencia de la Formación Umir	Rbrum	
Roca de baja resistencia de la Formación Simití	Rbrsi	
Roca blanda de la Formación Rosa Blanca	Rrb	
Roca blanda de la Formación Paja	Rbpa	
Roca de alta resistencia de la Formación Angostura del río Lebrija	Raral	
Roca de media resistencia de la Formación Rosa Blanca	Rmrb	
Roca de media resistencia de la Formación Umir	Rmrum	
Roca de media resistencia de la Formación Simití	Rmrsi	
Suelo transportado de Depósito Aluvial	Stda	5
Suelo transportado fluvio-torrencial	Stft	
Suelo transportado de depósito aluvial.	Fpi	

Apéndice I

Tabla coberturas del suelo normalizadas

COBERTURA VEGETAL	
Bosque denso alto de tierra firme	1
Bosque abierto alto de tierra firme	2
Bosque ripiario	
Bosque fragmentado	3
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	
Tejido urbano continuo	
Herbazal denso de tierra firme arbolado	
Áreas con vegetación herbácea y arbustiva	
Aeropuerto	4
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	
Mosaico de cultivos y espacios naturales	
Mosaico de cultivos	
Mosaico de pastos con espacios naturales	5
Pastos arbolados	
Mosaico de pastos con espacios naturales	
Mosaico de pastos y cultivos	
Tierras desnudas y degradadas	
Bosque denso alto inundable	
Rio	

Apéndice J*Tabla de valores de pendientes normalizadas*

Pendiente °	Reclasificación
0°-5°	1
5°-10°	2
10°-15°	3
15°-30°	4
>30°	5

Apéndice K.*Tabla de escenarios de ponderación para generar el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa adaptado a avenidas torrenciales.*

Ponderación #	Peso Geomorfología (%)	Peso Cobertura de la tierra (%)	Peso UGS (%)	Peso pendientes (%)
1	25	25	25	25
2	40	20	20	20
3	20	40	20	20
4	20	20	20	40
5	30	25	25	20
6	25	30	25	20
7	25	25	30	20
8	25	25	20	30
9	30	20	25	25
10	30	25	20	25
11	20	30	25	25
12	20	25	30	25
13	20	25	25	30
14	50	10	20	20
15	50	20	10	20
16	50	20	20	10
17	20	50	20	10
18	20	20	50	10
19	20	20	10	50
20	20	50	10	20
21	20	10	50	20
22	20	10	20	50
23	10	50	20	20
24	10	20	50	20
25	10	20	20	50
26	30	30	20	20
27	30	20	30	20
28	30	20	20	30
29	20	20	30	30
30	20	30	20	30

31	20	30	30	20
32	40	30	20	10
33	30	40	20	10
34	30	20	40	10
35	30	20	10	40
36	40	20	30	10
37	20	40	30	10
38	20	30	40	10
39	20	10	30	40
40	40	10	30	20
41	40	30	10	20
42	20	20	20	40
43	40	10	20	30
44	40	20	10	30
45	20	30	10	40
46	10	20	30	40
47	10	30	20	40
48	30	10	20	40
49	30	10	40	20
50	30	40	10	20
51	20	10	40	30
52	20	40	10	30
53	10	30	40	20
54	10	40	30	20
55	10	40	20	30
56	10	20	40	30
57	40	10	25	25
58	30	10	30	30
59	30	15	25	30
60	30	15	30	25
61	30	25	15	30
62	30	25	30	15
63	55	15	15	15
64	55	5	20	20
65	50	10	10	30
66	50	10	30	10
67	30	10	50	10
68	20	5	55	20
69	50	10	10	30
70	10	10	20	60
71	10	10	60	20
72	30	10	10	50
73	35	20	25	20
74	35	20	20	25
75	35	15	25	25
76	25	15	35	25
77	25	15	25	35
78	40	5	20	35
79	35	5	20	40
80	20	5	35	40
81	20	5	40	35
82	35	5	40	20
83	40	5	35	20

84	60	10	20	10
85	20	10	60	10
86	65	5	15	15
87	65	5	20	10
88	65	5	10	20
89	20	5	65	10
90	10	5	65	20
91	35	10	35	20
92	35	20	35	10
93	35	10	20	35
94	35	20	10	35
95	40	10	10	40
96	60	10	10	20