

**Evaluación de Riesgos Frente a Amenazas Naturales en Zona Crítica del Municipio de
Mocoa**

Adriana Gisseth Castro Salas

Director:

Carlos Torres Romero

Ingeniero Civil – Magister En Ingeniería Geotecnia

Universidad Santo Tomás

Facultad De Ingeniería Civil

Bogotá

2021

Resumen

El presente proyecto tuvo como propósito la evaluación de riesgos frente a amenazas naturales en zona crítica del municipio de Mocoa, para el desarrollo de este objetivos se identifican 3 fases, la primera catalogada como conocimiento del riesgo que comprende la identificación de las amenazas que pueden afectar la zona de estudio, el conocimiento de las condiciones regionales, así como las características reportadas sobre eventos históricos importantes y la priorización de estos escenarios, una vez realizado esto continua la fase 2: evaluación de la susceptibilidad que para efectos del presente proyecto se determina que se hará una caracterización más detallada de las amenazas por inundaciones y movimientos en masa y la fase 3: evaluación del riesgo o amenaza

La susceptibilidad a movimientos en masa del área de estudio, es el resultado de una combinación de variables temáticas de Geomorfología, Geología, Hidrología, uso y cobertura de suelo que tuvieron como consecuencia el mapa de Susceptibilidad a movimientos de masa a escala 1:5000 que abarca las clasificaciones de amenaza alta, media y baja

El componente de inundaciones tiene en cuenta el análisis hidrológico e hidráulico para la modelación en el software IBER, para su posterior zonificación de las zonas de amenaza por inundación para diferentes tiempos de retorno tomando como criterio la guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación del IDEAM y algunos aspectos geomorfológicos.

Palabras claves:

Movimientos en masa, Inundaciones, Sistemas de información geográfica, susceptibilidad, amenaza

Abstract

The purpose of this project was to assess risks against natural hazards in the area of the municipality of Mocoa, for the development of these objectives 3 phases are identified, the first cataloged as knowledge of the risk that includes the identification of the threats that may affect the study area, the knowledge of the regional conditions, as well as the characteristics reported on important historical events and the prioritization of these scenarios, once this is done, phase 2 continues: evaluation of the susceptibility that for the purposes of this project is determined that a more detailed characterization of the threats due to floods and mass movements will be made and phase 3: risk or threat assessment

The susceptibility to mass movements of the study area is the result of a combination of thematic variables of Geomorphology, Geology, Hydrology, use and land cover that resulted in the map of Susceptibility to mass movements at a scale of 1: 5000 that covers high, medium and low threat ratings

The flood component takes into account the hydrological and hydraulic analysis for modeling in the IBER software, for subsequent zoning of the flood hazard zones for different return times, taking as a criterion the Methodological guide for the Elaboration of Flood Maps of the IDEAM and some geomorphological aspects.

Keywords: Mass movements, Floods, Geographic information systems, susceptibility, threat

Tabla de Contenido

Resumen.....	2
Abstract	3
Glosario.....	8
Conceptual	8
Riesgo de desastres	8
Vulnerabilidad:	8
Gestión del Riesgo de Desastres	8
Análisis del riesgo.....	9
Desastre natural.....	9
Las Inundaciones	9
Movimientos en Masa.....	10
Tecnológico.....	10
Software ArcGIS.....	10
Software IBER	10
Introducción	11
Definición del Problema	12
Justificación del Problema	12
Objetivos	13
General.....	13
Específicos	13
Estado del Arte.....	13
Metodología	17
FASE 1 Identificación y priorización de escenarios de riesgo	17
FASE 2: Evaluación de la Susceptibilidad	17
Metodología Susceptibilidad por movimientos en masa	17
Metodología Susceptibilidad a inundaciones:	18
FASE 3: Evaluación del riesgo o amenaza	18
Conocimiento del Riesgo.....	20
Localización.....	20
Descripción Física.....	21
Demografía	21

Área de Estudio.....	21
Identificación y selección de escenarios de riesgo	22
Contexto hidrológico:	22
Contexto Geológico:	22
Procesos de urbanización.....	23
Evaluación de la Susceptibilidad	24
Análisis de eventos registrados	24
Análisis de Susceptibilidad por Inundación.....	26
Análisis Hidrológico	26
Curvas intensidad – duración – frecuencia (IDF)	28
Parámetros Morfométricos:	29
Índice de compacidad o índice de Gravelius (Kc):	30
Pendiente media: Pm.....	31
Patrones de drenaje:	31
Análisis Hidráulico	33
Modelación Superficie de Inundación	37
Resultados Superficies de Inundación en el Área analizada.....	42
Zonificación de Amenaza por Inundación.....	44
Criterios de Zonificación de Amenaza de Inundación.....	44
Mapa de zonificación de amenaza por inundación para un tiempo de retorno de 2,33 años	47
Mapa de zonificación de Amenaza por Inundación para un tiempo de retorno de 50 años.	48
Convenciones del Mapa de Amenaza por Inundación.....	49
Susceptibilidad por Movimientos en Masa.....	50
Metodología	50
Insumos	50
Pendientes	52
Curvatura total	53
Condiciones geológicas del área de estudio.....	54
Condiciones geomorfológicas del área de estudio.....	62
Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa	68
Asignación de Pesos en el SIG	68
Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa	75

Convenciones del Mapa de Amenaza por Movimientos en Masa	76
Limitaciones.....	77
Conclusiones y Recomendaciones	78
Referencias.....	80

Listado de Figuras

<i>Figura 1 diagrama Metodológico.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2 Localización del Municipio de Mocoa.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3 Área de Estudio.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 4 Tipos de patrones de drenaje.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 5 Patrón de drenaje zona alta.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 6 Patrón de drenaje cauce principal</i>	<i>33</i>
<i>Figura 7 Malla de trabajo generada a partir del DEM Software Iber</i>	<i>39</i>
<i>Figura 8 Usos de suelo Software Iber</i>	<i>40</i>
<i>Figura 9 Asignación de condiciones de entrada</i>	<i>40</i>
<i>Figura 10 Condición de contorno de salida</i>	<i>41</i>
<i>Figura 11 Mapa de Velocidades de flujo para Tr=50 años</i>	<i>42</i>
<i>Figura 12 Mapas de profundidad de flujo para Tr=50 años</i>	<i>43</i>
<i>Figura 13 Mapa de Amenaza de inundación por pendiente.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 14 Mapa de zonificación de amenaza por inundación para un tiempo de retorno de 2,33 años.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 15 Mapa de zonificación de Amenaza por Inundación para un tiempo de retorno de 50 años.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 16 Mapa de usos de suelo</i>	<i>50</i>
<i>Figura 17 Mapa de pendientes en clases según SGC.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 20 Mapa de curvatura.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 21 Mapa de Distribución de las unidades geológicas.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 22 Mapa de Distribución de las unidades geomorfológicas</i>	<i>66</i>
<i>Figura 23 Mapa de Procesos Morfodinámicos en el área de estudio.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 24 Clasificación de pendientes según criterio de amenaza</i>	<i>71</i>
<i>Figura 25 Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa</i>	<i>75</i>

Listado de Tablas

Tabla 2 Demografía del municipio de Mocoa	21
Tabla 3 Escenarios de riesgo.....	23
Tabla 4 Eventos registrados en la zona de estudio.....	24
Tabla 5 Numero de eventos registrados en la zona de estudio.....	26
Tabla 6 Estaciones Meteorológicas.....	27
Tabla 7 Precipitación media mensual	27
Tabla 8 Resultados Parámetros Morfométricos	29
Tabla 9 Clasificación del índice de compacidad.....	30
Tabla 10 Clasificación de factor de forma	30
Tabla 11 Ordenadas del hidrograma unitario adimensional del SCS	34
Tabla 12 Magnitudes calculadas del hidrograma.....	35
Tabla 13 Hidrograma para un Tr: 2,33 años.....	36
Tabla 14 Hidrograma para un Tr: 50 años.....	37
Tabla 15 Coeficientes de Manning en función de los usos del suelo.....	39
Tabla 16 categorización simplificada de la amenaza como el producto de la velocidad por la profundidad.....	45
Tabla 17 clasificación rango de pendientes para inundaciones	45
Tabla 18 Área correspondiente al uso suelo en el área de estudio	51
Tabla 19 Calificación de Pendientes con base en guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa (2017).....	53
Tabla 20 Rangos de curvatura utilizados	54
Tabla 21 Unidades Geomorfológicas para el área de estudio	64
Tabla 22 Distribución porcentual de los Procesos Morfodinámicos	68
Tabla 23 Parámetros de valoración de geoformas.....	69
Tabla 24 Clasificación pendiente	70
Tabla 25 Parámetros de valoración de unidades geológicas.....	73
Tabla 26 Parámetros de valoración de usos de suelo	74

Listado de Graficas

Grafica 1 Histograma de precipitación.....	28
Grafica 2 Curvas IDF Estación Mocoa Acueducto.....	29
Grafica 3 histograma de velocidades de flujo para Tr=50 años	43
Grafica 4 histograma de profundidad de flujo para Tr=50 años.....	44
Grafica 5 Distribución de la cobertura y uso de suelo en el área de estudio	52

Glosario

Conceptual

Riesgo de desastres

Daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse, debido a los efectos de eventos físicos peligrosos en un periodo de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad. (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

Vulnerabilidad:

Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos. (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

Gestión del Riesgo de Desastres

Proceso para identificar, analizar y responder a factores de riesgos, debida a desastres, también permite cuantificar el riesgo y predecir su impacto para tomar medidas correctivas que fortalezcan el manejo de desastres, además permite la recuperación y transformación del territorio. Estas acciones con el fin de contribuir a la seguridad y calidad de vida de las personas. (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

La Gestión del Riesgo puede entenderse como “un parámetro y componente de la gestión del desarrollo, de la gestión del ambiente y la gestión global de la seguridad humana como condición imprescindible para el logro de la sostenibilidad” (Lavell et al, 2003), citado por el Servicio Geológico Colombiano (2017).

Análisis del riesgo

De acuerdo con la Ley 1523 de 2012, el análisis del riesgo implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir, mediante la relación cualitativa, semicuantitativa o cuantitativa de la amenaza y la vulnerabilidad, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades. (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

Desastre natural

Hace referencia a los fenómenos que no son producidos por la acción directa del hombre y causa enormes pérdidas materiales y vidas humanas, como terremotos, inundaciones, tsunamis, deslizamientos de tierra, y otros. (Servicio Geológico Colombiano, 2017)

Las Inundaciones

Son desbordamiento de agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua y/o la acumulación de agua procedente en zonas que normalmente no se encuentran anegadas. (IDEAM 2017)

Movimientos en Masa

Son aquellos movimientos de ladera debajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad. De igual manera, equivale a definiciones tales como procesos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa o fallas de taludes y laderas (SGC, 2013).

Tecnológico

Software ArcGIS

Es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica

Software IBER

Es un modelo hidrodinámico bidimensional para simulaciones en lámina libre. Consta de distintos módulos de cálculo: hidráulico, turbulencia, transporte de sedimentos, calidad de las aguas, rotura de balsa y, desde el pasado mes de enero, incorpora un módulo de hábitat y procesos hidrológicos (Grupo TYCGIS 2019)

Introducción

Eventos naturales como sismo, huracanes, lluvias intensas, inundaciones, deslizamientos son una amenaza para el desarrollo social y económico de una comunidad. El grado de riesgo al que está sometida una población se relaciona con la capacidad de manejar los factores de amenaza y el nivel de exposición ante estos fenómenos.

Eventos como la avenida torrencial del 1 de abril de 2017 que ocurrió en el municipio de Mocoa, ilustran el inminente riesgo al que están sometidos muchas ciudades y municipios de Colombia, debido a sus condiciones geográficas, la degradación ambiental y el cambio acelerado del uso del suelo amplifican la propensión del país a la ocurrencia de estos eventos, cuyos impactos hacen notorio la necesidad de adoptar y consolidar políticas preventivas de gestión de riesgos.

Por otro lado los SIG (sistemas de información geográfica) realizan un análisis espacial con grandes volúmenes de datos e información, permitiendo una evaluación ágil y sencilla.

El presente trabajo se lleva a cabo con el propósito de implementar estos sistemas de información geográfica para el análisis y evaluación de amenazas debidas a desastres naturales que permita desarrollar planes de respuesta ante emergencias y catástrofes, específicamente la aplicación del software Arcgis e Iber los cuales permite realizar cálculos específicos del riesgos a partir de la comprensión y caracterización de diferentes tipos de amenazas naturales, su comportamiento y la posibilidad de una actualización constante de información de exposición y vulnerabilidad social y de infraestructura

Definición del Problema

Debilidades en las políticas y planes de acción en la generación del riesgo y el impacto de los eventos naturales en el municipio de Mocoa.

Justificación del Problema

Dado que las amenazas por eventos naturales constituyen un problema para la población y la infraestructura expuesta, requieren de una interacción multidisciplinar, así como el adecuado conocimiento de cada zona de estudio, este proyecto tiene en cuenta la implementación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), para lograr la evaluación y gestión de riesgos debido a eventos naturales

Objetivos

General

Determinación de la susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa e inundaciones en un área definida como crítica del municipio de Mocoa

Específicos

- Identificar los escenarios de riesgo y posibles afectaciones por eventos naturales.
- Establecer las características de los elementos expuestos a las amenazas identificadas

Estado del Arte

La situación de Colombia en materia del ordenamiento territorial se puede explicar como consecuencia de un proceso histórico de violencia enfocada en el conflicto y dominio territorial, lo cual ha llevado a tener una configuración precaria de los territorios, sin ningún tipo de infraestructura y sin una perspectiva de desarrollo.

El IGAC fue la primera institución encargada de gestionar y tratar información espacial en Colombia; en 1940 se introduce el catastro como herramienta para el desarrollo del país y se organiza el instituto geográfico militar y catastral recibiendo asesorías y equipos del servicio geodésico interamericano (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2019).

En 1960 el IGAC creó en el Departamento de Catastro una sección de urbanismo para elaborar planes de desarrollo como guías para las políticas de urbanización y servicios públicos.

Durante las últimas tres décadas, a raíz de eventos de origen socio-natural, el gobierno nacional ha expedido y liderado reglamentaciones relacionadas con la administración y desarrollo físico del territorio, la utilización del suelo y la gestión del riesgo de desastres.

Normas de ordenamiento territorial tales como Ley 388 de 1997 y los Decretos 879 de 1998, 3600 de 2007, 1807 de 2014, 1077 de 2015, o de gestión del riesgo de desastres como la

Ley 1523 de 2012, mediante la cual se establece que los municipios del país deben hacer estudios de riesgos naturales como parte esencial de las políticas de planificación del desarrollo seguro y gestión ambiental territorial sostenible.

Por su parte el Servicio Geológico Colombiano en adelante SGC (2017), en cabeza de la Dirección de Geoamenazas y como parte del Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo, ha liderado la evaluación de amenazas por movimientos en masa, a partir de la realización de estudios de zonificación a escala nacional, regional y local, junto con la generación de documentos metodológicos guía para técnicos, tomadores de decisiones y demás actores relacionados con la temática tanto a nivel urbano como rural.

El departamento del Putumayo no es ajeno a la realidad del país, se encuentra antecedentes de emergencias y calamidades desde el 2012, generados por temporada de lluvias. Dentro de los eventos registrados están: inundaciones, avenidas torrenciales, crecientes súbitas y deslizamientos. (Consejo Departamental Gestión del Riesgo de Desastres del Putumayo, 2018).

“Según la oficina de gestión de riesgos de la gobernación del Putumayo en el periodo 2018, con la Ley 1523 de 2012, se registra 71 calamidades públicas municipales, 7 calamidades públicas regionales, 2 urgencias manifiesta regionales y 1 urgencias manifiesta municipal, el 100% están relacionadas con eventos generados por la temporada de lluvias”. (Consejo Departamental Gestión del Riesgo de Desastres del Putumayo, 2018).

Uno de los antecedentes más relevantes del departamento, fue la tragedia de Mocoa, durante la noche del 31 de marzo de 2017 a las 11:30 de la noche, donde fuertes lluvias provocaron los desbordamiento de los ríos Mocoa, Mulato y Sangoyaco, y las Quebradas Taruca,

Conejo y Almorzadero, generando flujos de lodo que afectó más de 48 barrios del casco urbano, 17 de manera grave y 5 destruidos totalmente y zonas pobladas de 13 veredas del Municipio de Mocoa. Adicionalmente, se presentaron graves afectaciones en la infraestructura vial y para la prestación de los servicios públicos y sociales básicos

Ante la magnitud del desastre, el Gobierno Nacional expidió el Decreto 601 del 6 de abril de 2017 declarando la emergencia económica, social y ecológica en el Municipio de Mocoa, posteriormente Declaró como Desastre mediante Decreto Nacional No. 599 de abril 6 de 2017. La Gobernación y Alcaldía también emitieron sus respectivas declaratorias de calamidad pública mediante los decretos 068 y 056 de abril 2017. (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2015).

Para la fase de reconstrucción del municipio de Mocoa, el Gobierno nacional, bajo el liderazgo de la Gerencia para la Reconstrucción del municipio de Mocoa (a cargo del Ministro de Defensa Nacional), plantea un plan que comprende seis líneas de acción estratégicas: (i) ordenamiento territorial, ambiente y gestión del riesgo; (ii) infraestructura social; (iii) conectividad e integración regional; (iv) desarrollo económico; (v) desarrollo social, y (vi) desarrollo institucional. (Conpes, 2017)

El documento resultante del proceso de evaluación y diagnóstico del municipio de Mocoa, en su componente de riesgos dentro del PBOT, tenía como objetivo principal proporcionar a la administración municipal un instrumento orientador con las acciones mínimas necesarias para fortalecer el componente de prevención y reducción de riesgos del municipio, y de esta manera permitir, desde los procesos de planificación territorial municipal, el desarrollo de acciones tendientes a la mitigación de la vulnerabilidad fiscal del estado ante desastres naturales. (Conpes, 2017)

“Por otro lado una de las primeras aplicaciones de SIG para la evaluación de riesgos fue desarrollada en los años 70 y principios de los 80, por la oficina de Menlo Park del United States Geological Survey, para un condado del norte de California. Otra aplicación pionera de SIG para el análisis de riesgos se llamó el Emergency Preparedness Planning and Operations System (EPPOS), que fue desarrollada para la ciudad de Los Ángeles a mediados de los 80”. (Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, 1998)

A pesar del enorme desarrollo en investigación y el esfuerzo por adelantar estudios de amenaza de riesgo a nivel nacional en relación con el impacto de los desastres en el desarrollo, son escasos los resultados de la unión del riesgo de desastre en los procesos de planificación.

En muchos de los países, no se tiene en cuenta las pérdidas probabilistas por sucesos naturales como un elemento importante en su proceso presupuestario, por lo cual es importante la consideración de los modelos probabilísticos como herramientas para la estimación y análisis del riesgo, que permita emplear la información disponible y poder predecir escenarios catastróficos y de alguna manera cuantificar el riesgo.

Los SIG han servido para la toma de decisiones en eventos catastróficos, debido principalmente a que la información de pronta respuesta puede resultar bastante útil en casos de desastres, en especial para proteger la integridad de las personas.

Metodología

Para lograr lo planteado en el Objetivo General, se desarrollan las siguientes fases con sus respectivas actividades:

FASE 1 Conocimiento del Riesgo

Comprende la identificación de los principales fenómenos que puedan representar amenaza para la población, los bienes y el ambiente para la zona de estudio, el conocimiento de las condiciones regionales, así como las características reportadas sobre eventos históricos importantes

FASE 2: Evaluación de la Susceptibilidad

De acuerdo con los análisis de la fase 1 se determinan dos fenómenos que serán más detallados a profundidad los cuales seguirán las siguientes metodologías

Metodología Susceptibilidad por movimientos en masa

La metodología seleccionada se basa en una adaptación del método Mora-Vahrson que permite realizar un análisis a priori de áreas extensas bajo amenaza de deslizamientos, utilizando indicadores morfodinámicos (Mora & Vahrson, 1993)

El procedimiento consiste en la asignación subjetiva de pesos o valoraciones a los factores relevantes y a las subclases para obtener una suma de susceptibilidad a amenaza relativa.

Adicionalmente, se consideraron dos factores relacionados con el evento detonante, que son: la sismicidad y la intensidad de las lluvias.

La asignación de los pesos se hace mediante el software ArcMap teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Clasificación de cada mapa de parámetros de acuerdo con las clases relevantes.
- Asignación de valores de peso a cada parámetro
- clasificación en clases de amenaza.

Metodología Susceptibilidad a inundaciones:

Realizados los análisis hidrológicos y la caracterización de la precipitación regional se procede a hacer una caracterización hidráulica de las cuencas dentro del área de estudio, para determinar los caudales máximos que serán usados para la modelación hidráulica en el software IBER

Este modelamiento sigue tres pasos principales:

- **Pre proceso:** Trabajo previo en ArcGis del procesamiento de información espacial para generar los archivo ASCII de importación a IBER que incluirá la información de la cobertura y uso de suelo, el modelo de elevación digital MDE, y ortomosaico

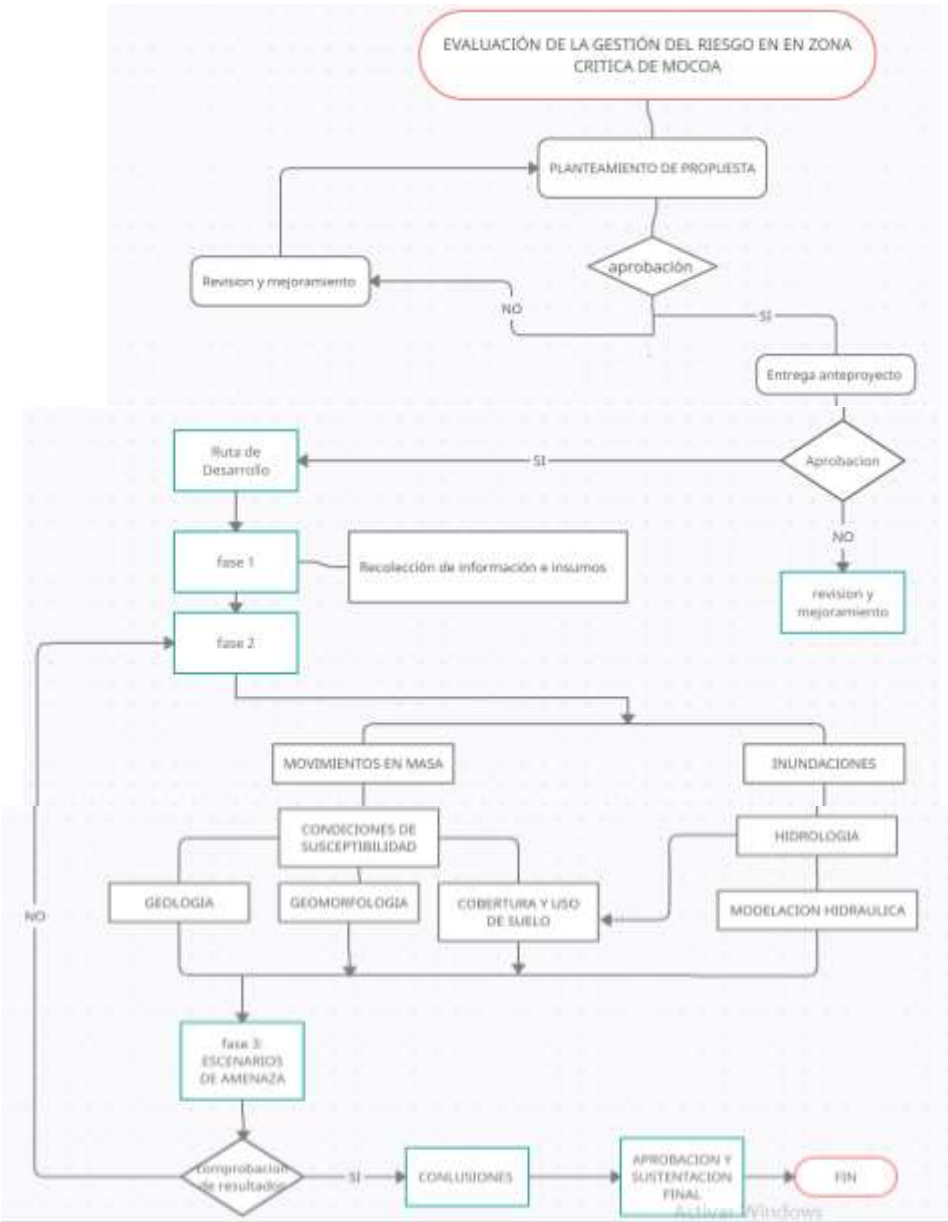
- **Modelación o proceso:** se hace una asignación automática de los coeficientes de rugosidad de Manning para cada uso de suelo determinada en el paso anterior y que se muestra en la siguiente tabla. Paso siguiente, se asignan los datos obtenidos en el análisis hidrológico.

- **Cálculo de los procesos:** se generan las superficies de inundación en el área analizada

FASE 3: Evaluación del riesgo o amenaza

Comprende la categorización del riesgo en alto, medio y bajo, en función del nivel de afectación esperada.

Figura 1 diagrama Metodológico



Fuente: autor

Conocimiento del Riesgo

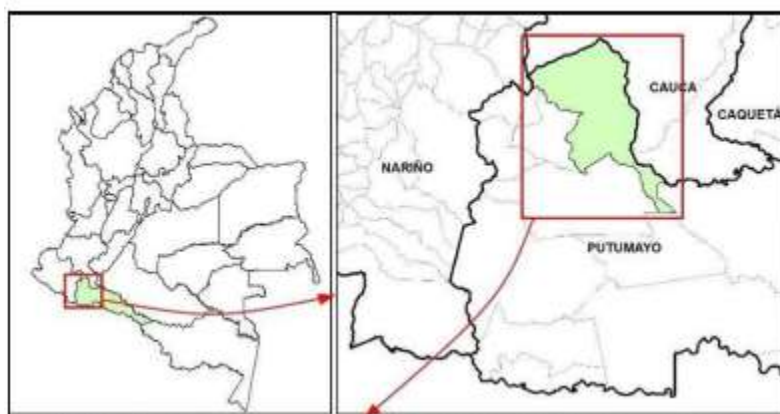
Localización

El municipio de Mocoa ubicado en el departamento del Putumayo, se localiza al sur occidente del país, en el marco del piedemonte amazónico a la altura del Nudo de Los Pastos en.

Limita con:

Por el Norte: Con los Departamentos del Cauca (Municipio de Santa Rosa) y Nariño (Municipio del Tablón), por el Oriente: Limita con el Departamento del Cauca (Municipios de Santa Rosa y Piamonte), por el Sur: Limita con el Municipio de Puerto Caicedo, El área total del municipio tiene una extensión aproximada de 1330 Km

Figura 2 Localización del Municipio de Mocoa



El municipio se localiza en la influencia de 3 subzonas hidrográficas: Alto Caquetá, Alto Río Putumayo y Río Mecaya, siendo la primera la más extensa con 120713.3 hectáreas, correspondiente al 90,5 % del área hidrográfica.

La cabecera municipal de San Miguel de Mocoa se encuentra en la cuenca del río Mocoa a la cual drenan sus aguas las Quebradas Taruca, Taruquita, Almorzadero, Conejo y los ríos Sangoyaco y Mulato. La cuenca del río Mocoa hace parte de la Subzona hidrográfica Alto

Caquetá, cuenta con 67956,5 hectáreas. La cuenca de la Quebrada Taruca tiene 593,8 hectáreas, Sangoyaco 767,48 (sin incluir la cuenca de la Q.Taruca)

Descripción Física

- Extensión total: 1.263 Km2
- Extensión área urbana: 580 Km2
- Extensión área rural: 740 Km2

Demografía

Tabla 1 Demografía del municipio de Mocoa

Población (Urbana Y Rural)	Total	Cabecera	Centros Poblados Y Rural Disperso
	56.398	38.457	17.941

Fuente, Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE (2018)

Área de Estudio

Figura 3 Área de Estudio



Fuente: Autor

Identificación y selección de escenarios de riesgo

Al respecto de la localización como factor de riesgo se puede decir que el Municipio está expuesto a precipitaciones contantes y elevadas a causa de su localización en el marco del piedemonte amazónico, hidrológicamente el casco urbano se encuentra drenado por varias Quebradas y Ríos, que por su trayectoria y disposición de sedimentos asociados a eventos fluviotorrencial pasados.

Contexto hidrológico:

La zona de estudio contiene 3 de las cuencas más importantes para el municipio de Mocoa.

Quebrada Taruca: Nace a una altura de 2100 m.s.n.m en inmediaciones de la vereda San Antonio con una longitud de 7,6 km, un área de 4,9 Km² (490 Ha) y una pendiente media de 19 % aproximadamente. La quebrada desemboca en el Río Sangoyaco

Quebrada Taruquita: Nace en inmediaciones de la vereda San Antonio, tiene un área de 0,996 Km² (99,6 ha),

Río Sangoyaco: Nace aproximadamente a una altura de 1660 m.s.n.m y tiene una longitud de 5,4 km, tiene un área de 6,8 Km² (683 Ha) con una pendiente promedio de 18 %. A traviesa una gran parte del Municipio de Mocoa y desemboca en el río Mocoa.

Contexto Geológico:

Se identifica que el Municipio se encuentra ubicado en la zona de transición entre la cordillera de los andes y la llanura amazónica, en donde hace presencia el sistema de fallas del

borde llanero y otro grupos de fallas de tipo regional y local, por lo tanto se asocia una región de actividad tectónica alta, igualmente otros factores como las pendientes pronunciadas, niveles freáticos altos y la intervención antrópica hace que algunas zonas de Mocoa sean más vulnerables a eventos naturales como movimientos en masa y sismos.

De lo anterior se asocia que el municipio de Mocoa tiene zonas susceptibles a escenarios de riesgo asociados con fenómenos de origen geológico e hidrometeorológico, los cuales se clasifican de acuerdo a la siguiente tabla

Tabla 2 Escenarios de riesgo

Componente	escenario de riesgo
hidrológicos	• Inundaciones • Avenidas torrenciales
geológicos	• Movimientos en masa • Sismos

Fuente: autor

Para efectos del presente proyecto se determina que se hará una caracterización más detallada de las amenazas por inundaciones y movimientos en masa.

Procesos de urbanización

La dinámica de expansión urbana y ocupación de la tierra carecen de un estricto control en relación a la licencia de construcción y permisos de usos de suelo, la población construye desconociendo las zonas de riesgo o haciendo caso omiso. El control de calidad en los materiales y procesos constructivos genera una mayor condición de vulnerabilidad.

En estos procesos también se identifica como condiciones de riesgo al retorno a sus viviendas de familias y habitantes damnificados por eventos naturales pasados.

Evaluación de la Susceptibilidad

Análisis de eventos registrados

Históricamente en Mocoa han ocurrido varios eventos, de diferente tipo y magnitud, asociados a los distintos cauces que atraviesan la ciudad, a continuación, se muestran algunos datos de eventos naturales en los últimos años, asociados a la quebrada Taruca y Río Sangoyaco

Tabla 3 Eventos registrados en la zona de estudio

TIPO DE EVENTO	AÑO	LOCALIZACION	DAÑOS	OBSERVACIONES
Avenida torrencial	1947	rio mulato	perdida de viviendas, animales y cultivos	remoción en masa en la parte alta de la microcuenca y represamiento, largos periodos de lluvias
flujo de lodo y escombros	1958	Mocoa, quebrada Taruca	Muerte de tres personas y de ganado	
Inundación	1960	Río Mocoa	inundación de viviendas	desbordamiento del Río Mocoa
Avenida torrencial	1971	Mocoa, Río Mulato	Cinco viviendas con daños y pérdida de animales domésticos	Bocatoma del acueducto semidestruida
Avenida torrencial y flujo de lodo	1972	Río Sangoyaco	3 personas muertas	
Avenida torrencial	1989	Zona urbana de Mocoa, ríos Mulato y Sangoyaco	Destrucción de 4 viviendas barrio 17 de Julio	

avenida torrencial	1994	Zona urbana, ríos Taruca, Mulato, Sangoyaco y Mulato	Sectores inundados como la plaza de mercado y barrios Miraflores, Pablo VI y Naranjito; destrucción parcial del puente peatonal sobre el río Sangoyaco.	Largos periodos de lluvias
flujo de escombros	1995	Quebrada Taruca		flujo de escombros que desencadenó varios movimientos en masa
avenida torrencial	1997	Zona urbana Mocoa, río Mulato	1 niña muerta, 1 vivienda averiada, otros con daños menores	Periodo invernal.
avenida torrencial	1998	Ríos Mocoa, Sangoyaco, Mulato, Rumiayaco y Pepino	viviendas afectadas, pérdida de cultivos, pérdida de 10 hectáreas de pastizales y ganado vacuno	Altas precipitaciones
avenida torrencial	2010	Río mulato, Quebrada Taruca	Daños a viviendas e infraestructura.	periodo invernal
Avenida torrencial	2014	Quebrada Taruca		remoción de masa
avenida torrencial	2017	Ríos Mocoa, Sangoyaco y Mulato	36 barrios, entre ellos el barrio San Miguel	323 muertos, 332 heridos, destrucción de viviendas e infraestructura
inundaciones y deslizamientos	2018	Ríos Mocoa, Mulato y Sangoyaco	Colapso de puente peatonal en el barrio 17 de julio, afectación en 50 viviendas	colapso de alcantarillado

Fuente: autor

Tabla 4 Numero de eventos registrados en la zona de estudio

TIPO FENÓMENO REPRESENTATIVO	NÚMERO DE EVENTOS
Desbordamientos, inundaciones y Avenidas torrenciales	8
Flujos de escombros, lodo y roca	2
TOTAL DE EVENTOS	10

Fuente: autor

Análisis de Susceptibilidad por Inundación

En cuanto a los escenarios de riesgo por inundación, se debe tener en cuenta que los meses de intensas lluvias para la zona de estudio se presentan desde el mes de mayo hasta el mes de julio, pero debido a otros factores como el cambio climático condiciona a la población a estar preparada para riesgos ocasionados por intensas lluvias en cualquier momento del año.

La topografía, la ausencia en el mantenimiento de los cauces y las deficientes o ausentes características de las obras de infraestructura para la evacuación de las aguas, incitan la ocurrencia y el aumento de las áreas de afectación de este tipo de riesgo.

Por otro lado, procesos de deforestación en las cuencas y la densificación poblacional sin planificación, que permitió que las personas construyan viviendas sobre la ronda hídrica de las fuentes de agua incrementando la exposición de amenaza por inundación

Análisis Hidrológico

Para la caracterización hidrológica del área a evaluar es necesaria la revisión de las series de registros de las estaciones meteorológicas del lugar. Por ello en primera instancia se realizó un

inventario de todas las estaciones que estuvieran en la zona y finalmente se selecciona las estaciones Campucana y Acueducto Mocoa que son las más cercanas a la zona de estudio.

Tabla 5 Estaciones Meteorológicas

NOMBRE	CODIGO	TIPO	COTA	X	Y
Campucana	44010030	Pluviómetro (PM)	1400	1044148	624737
Mocoa Acueducto	44015040	Climatológica Ordinaria (CO)	650	1047376.71	619742.559

Fuente: Autor

Precipitación media mensual

El comportamiento de las lluvias en Mocoa es de tipo monomodal propio de la región Amazónica, con picos de precipitación que se presentan entre los meses de mayo, junio y julio. A continuación se incluyen los datos los promedios mensuales, así como el promedio anual de la serie de datos analizada.

Tabla 6 Precipitación media mensual

ESTACION	PERIODO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
CAMPUCANA	1985-2017	207	218	282	401	495	532	507	362	300	260	225	227	4016
MOCOA ACUEDUCTO	1985-2017	229	238	315	385	444	463	429	337	281	235	241	238	3836

Fuente: Autor

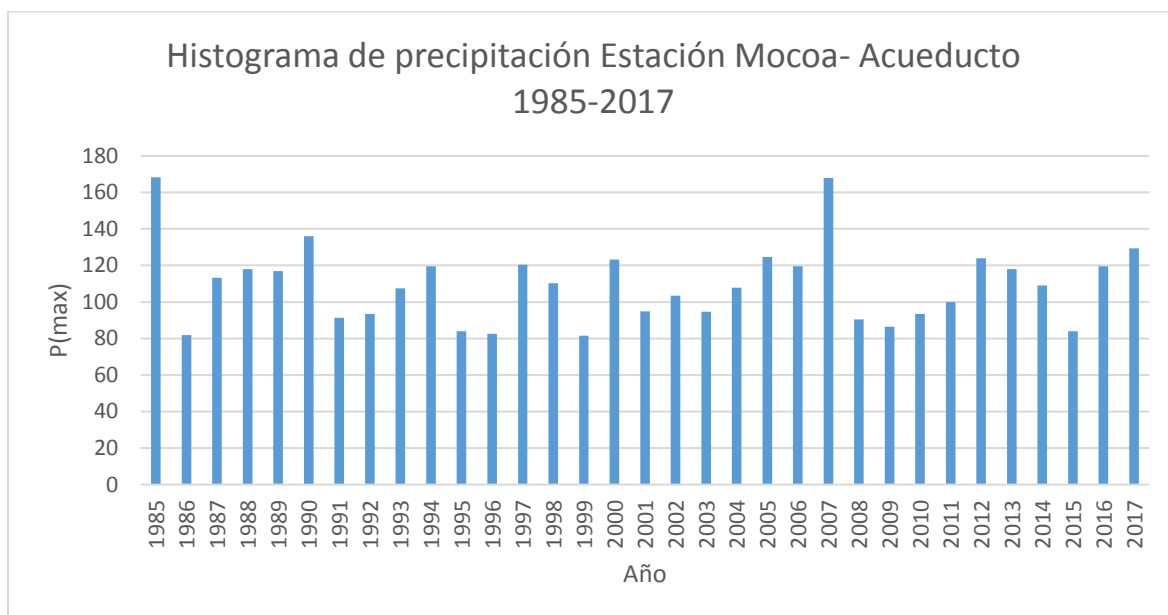
De acuerdo con los registros de precipitaciones de las estaciones meteorológicas analizadas, se aprecia el comportamiento monomodal, los mayores valores de precipitación se encuentran en los meses de mayo, junio y julio con valores promedio de 429 a 532 aproximadamente.

La precipitación máxima en 24 horas

Los valores máximos más recientes de los registros históricos analizados de la estación Mocoa Acueducto ocurrieron en enero de 2016 con una precipitación de 119,5 mm y 129,3 mm

en marzo de 2017, esta última refleja la precipitación alcanzada el día del evento natural ocurrido el 31 de marzo

Grafica 1 Histograma de precipitación



Fuente: autor

Como se observa en la anterior grafica no hay una función única que relacione las precipitaciones máximas en 24 horas anuales, aunque la tendencia general indica que en promedio cada 3 años ocurre una precipitación máxima de 24 horas mayor a 120 mm. Por otro lado se puede observar precipitaciones sobresalientes como los 168,3 mm en 1985, y 136 mm en 1990 indicando que históricamente se han presentado precipitaciones mayores a las presentadas el 31 de marzo de 2017

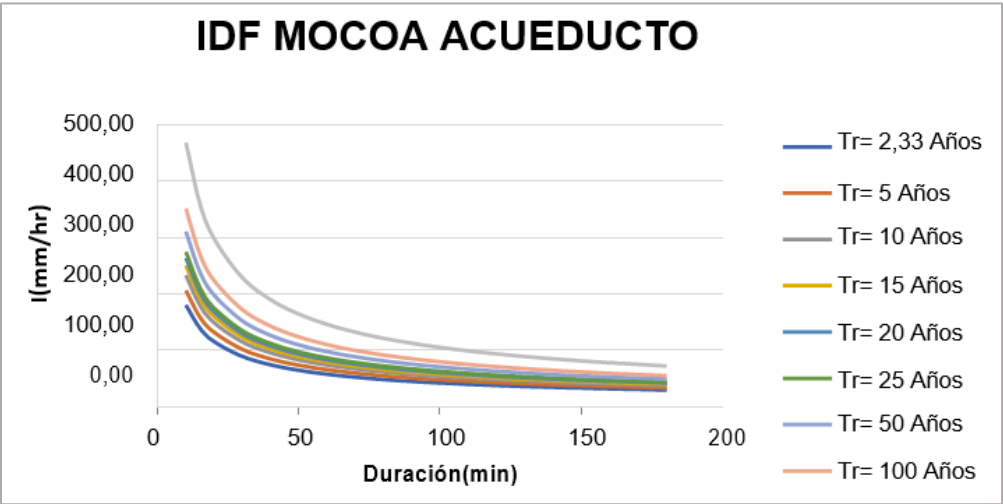
Curvas intensidad – duración – frecuencia (IDF)

Las curvas IDF constituyen un insumo necesario para la estimación de la magnitud de los eventos relacionados con la precipitación y en la estimación de caudales de diseño con

distintos tiempo de retorno, a continuación se muestra la curva IDF de la estación Mocoa

Acueducto

Grafica 2 Curvas IDF Estación Mocoa Acueducto



Parámetros Morfométricos:

Para la descripción de la cuenca, se determinaron varios parámetros morfométricos con la ayuda del software ArcMap

Teniendo en cuenta que los cursos de agua de la Q. Taruca y el Rio Sangoyaco se unen se establece usar la longitud del cauce más grande

Tabla 7 Resultados Parámetros Morfométricos

RESULTADOS		
Área	8.2	km2
Longitud cauce principal	6.2	km
pendiente media	0.19	m/m
Ancho	0.79	Km
Perímetro	17.4	km

Fuente: autor

Índice de Compacidad o Índice de Gravelius (Kc):

Es un parámetro adimensional que permite evaluar la respuesta de una cuenca a eventos de precipitación; se calcula con la siguiente formula:

$$Kc = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

$$Kc=1,7$$

Tabla 8 Clasificación del índice de compacidad

Kc	Clasificación
1 a 1,25	Casi redonda a oval-redonda
1,25 a 1,5	Oval redonda a oval-oblonga
1,5 a 1,75	oval oblonga a rectangular oblonga
>1,75	Rectangular

El coeficiente esta entre 1.5 y 1,75 clasificando la cuenca con una forma oval oblonga a rectangular oblonga

Factor de forma: Este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas, rápidas y muy intensas o lentas y sostenidas.

$$Kf = \frac{A}{L^2}$$

$$Kf = 0, 2 < 1$$

Tabla 9 Clasificación de factor de forma

Kf	característica
<1	tiende a ser alargada, baja susceptibilidad a las avenidas
1	cuadrada
>1	tiende a ser achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas

Fuente: autor

La cuenca tiende a ser alargada en consecuencia a esto tiene una baja susceptibilidad a los fenómenos mencionados.

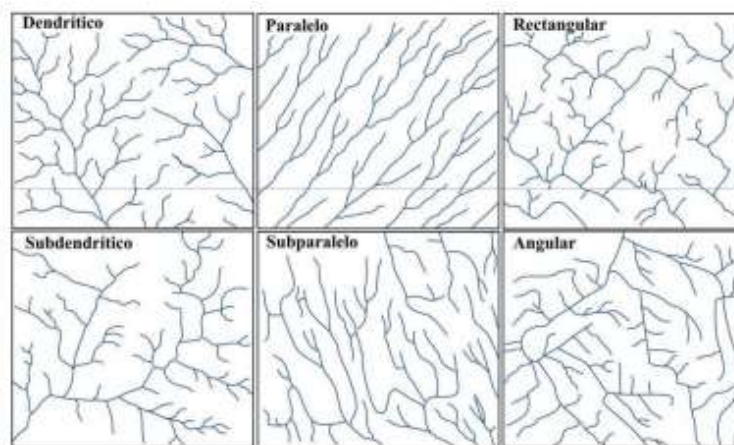
Pendiente media: $P_m = 19\%$

La cuenca tiene una pendiente media de 19% caracterizando el relieve en accidentado, también que pertenece a una zona de alta montaña, debido a los cambios que podemos apreciar en la gran diferencia de cotas, lo cual incrementa la velocidad de corriente y su capacidad de arrastre, por ende genera mayor tendencia a crecientes súbitas y transporte de material sólido

Patrones de drenaje:

El patrón de drenaje de una cuenca puede referirse como el arreglo que presentan las vías de drenaje, permanentes y transitorias, que confluyen a evacuar las aguas superficiales de la cuenca. El patrón de drenaje es un elemento compuesto, para cuyo análisis es fundamental tener en cuenta el relieve, la distribución de la vegetación y las condiciones estructurales de la zona. (Londoño, 2001)

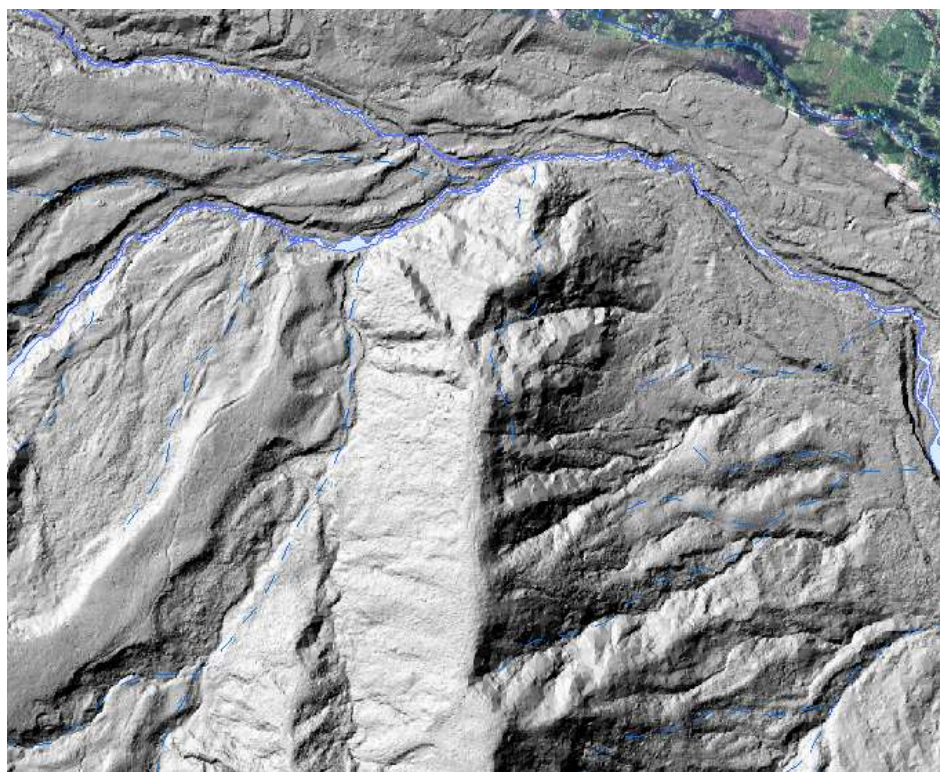
Figura 4 Tipos de patrones de drenaje



Fuente: Integral, 2019.

Con base en la cartografía disponible y la información secundaria de se pudo observar que en la zona de estudio se presentan dos tipos de patrones de drenaje; dendrítico y subdendrítico característico de zonas de alta montaña, este tipo de patrón se caracteriza por la subdivisión de tributarios en todas direcciones, formando toda clase de ángulos menores a 90° . Se desarrolla sobre rocas de resistencia uniforme e implica una falta de control estructural.

Figura 5 Patrón de drenaje zona alta



Fuente: autor con software Arcgis

Por otro lado, el cauce principal en tierras bajas presenta un patrón de drenaje trenzado, debido a los procesos de erosión y sedimentación del cauce que formaron canales o brazos interconectados que se encuentran separados por barras e islas, lo cual genera que estos tramos no sean homogéneos.

Figura 6 Patrón de drenaje cauce principal



Fuente: autor con software Arcgis

Análisis Hidráulico

Teniendo en cuenta el análisis hidrológico se procede a estimar los caudales máximos asociados a una determinada lluvia de diseño, mediante la aplicación del Método del hidrograma unitario, siguiendo la metodología que presenta el Instituto Nacional De Vías-INVIAS, Manual de Drenaje para Carreteras, este método se define para áreas de drenaje mayores a 2.5 km²

Para el proceso de estimación del caudal se procede a determinar la Intensidad de la precipitación en el área de estudio por medio de las curvas IDF para un periodo de retorno de

2,33 años, 50 años y el periodo de retorno de 100 años como evento extraordinario, asociados a una duración igual al tiempo de concentración del área de drenaje

Hidrograma unitario del United States Soil Conservation Service, SCS

Es el hidrograma unitario adimensional desarrollado por Victor Mockus en 1950. Este hidrograma fue estudiado con base en el análisis de un gran número de hidrogramas unitarios naturales de un amplio rango de tamaños de hojas hidrográficas y sitios geográficos.

Tabla 10 Ordenadas del hidrograma unitario adimensional del SCS

t/t_p	Q/Q_p
0.0	0.00
0.2	0.10
0.4	0.31
0.6	0.66
0.8	0.93
1.0	1.00
1.2	0.93
1.4	0.78
1.6	0.56
1.8	0.39
2.0	0.28
2.2	0.207
2.4	0.147
2.6	0.107
2.8	0.077
3.0	0.055
3.2	0.040
3.4	0.029
3.6	0.021
3.8	0.015
4.0	0.011
4.2	0.010
4.4	0.007
4.6	0.003
4.8	0.0015
5.0	0.0000

En el método del número de curva CN, el tiempo de desfase se expresa a través de la siguiente fórmula:

$$T_c = \frac{L^{0.8}(2540 - 22.86CN)^{0.7}}{14104 CN^{0.7} S^{0.5}}$$

Donde:

Tc: Tiempo de concentración, en horas (h).

CN: Número de curva del SCS.

L: Longitud del cauce principal, en metros (m).

S: Pendiente del cauce principal, en metros por metro (m/m).

En el método del SCS, la relación del tiempo al picotp y la duración de la lluvia efectiva tr se fijan así:

tiempo pico (Tp)

$$\frac{t_p}{t_i} = \frac{10}{9}$$

Por último el Caudal pico (Qp), en el sistema métrico se lo halla mediante la siguiente formula

$$Q_p = \frac{0.208 A}{t_p}$$

Tabla 11 Magnitudes calculadas del hidrograma

MAGNITUDES CALCULADAS DEL HIDROGRAMA		
Tiempo de concentración (tc)	0.8	horas
tiempo pico (tp)	0.90	hr
caudal pico (Qp)	1.89	m3/s
precipitación para Tr=2,33	90.00	mm

Fuente: autor

A partir de los valores obtenidos para t_p y Q_p , se halla el hidrograma unitario multiplicando los valores dados en la tabla 8 y por la precipitación para un periodo de retorno de 2,33 años, al realizar esto se encuentra el siguiente hidrograma:

Tabla 12 Hidrograma para un T_r : 2,33 años

t/t_p	q/q_u		
0.00	0.00	1.58	76.59
0.09	2.55	1.62	71.48
0.18	12.76	1.80	54.46
0.27	27.23	1.98	40.85
0.36	47.65	2.03	37.44
0.45	73.18	2.16	30.63
0.54	102.11	2.25	25.53
0.63	131.05	2.35	22.12
0.68	141.26	2.48	17.87
0.72	151.47	2.53	16.68
0.81	165.09	2.71	12.76
0.90	170.19	2.93	9.02
0.99	166.79	3.16	6.13
1.08	156.58	3.38	4.42
1.13	149.77	3.61	3.06
1.17	142.96	3.83	2.04
1.26	127.64	4.06	1.53
1.35	112.33	4.28	1.02
1.44	95.31	4.51	0.68

Fuente: autor

Para el hidrograma de un tiempo de retorno de 50 años se usa una precipitación de 125 mm correspondiente a este según el diagrama de curvas IDF, al realizar esto se encuentra el siguiente hidrograma:

Tabla 13 Hidrograma para un Tr: 50 años

t/tp	q/qu		
0.00	0.00	5195.24	132.37
324.70	3.55	5682.29	106.37
649.40	17.73	5844.64	99.28
974.11	37.82	6494.05	75.64
1298.81	66.19	7143.45	56.73
1623.51	101.64	7305.80	52.00
1948.21	141.83	7792.86	42.55
2272.92	182.01	8117.56	35.46
2435.27	196.19	8442.26	30.73
2597.62	210.38	8929.32	24.82
2922.32	229.29	9091.67	23.16
3247.02	236.38	9741.07	17.73
3571.73	231.65	10552.83	12.53
3896.43	217.47	11364.58	8.51
4058.78	208.01	12176.34	6.15
4221.13	198.56	12988.10	4.25
4545.83	177.28	13799.85	2.84
4870.54	156.01	14611.61	2.13
		15423.36	1.42
		16235.12	0.95

Fuente: autor

Modelación Superficie de Inundación

Teniendo en cuenta los análisis anteriores, se construye un modelo con el software IBer para obtener el mapa de amenaza por inundación, este proceso sigue tres pasos principales descritos a continuación:

A partir de los caudales estimados en el modelo hidrológico, se construye un modelo con el software IBer como parámetro base para el modelamiento y así así obtener el mapa de susceptibilidad de inundación.

Insumos Utilizados:

- Base cartográfica Oficial Escala 1:25.000 suministrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
- Modelo de elevación digital del Terreno producido por Incige 2018-DEM
- Cálculo de los caudales para periodos de retorno
- Selección de la intensidad de precipitación con curvas Intensidad- Duración - Frecuencia (Curvas IDF)
- Parámetros morfométricos de las cuencas
- Registros de eventos reportados en áreas de interés

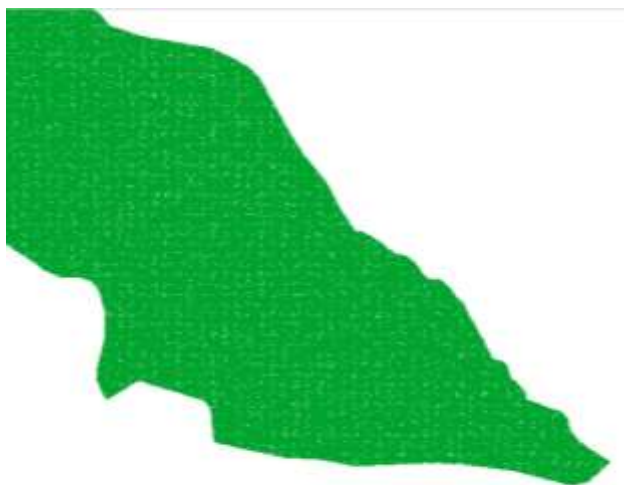
Pre proceso:

Para el procesamiento de los datos obtenidos se utiliza el Software ArcGis, el cual permitió generar los archivos ASCII de importación a IBER que incluirá la información de la cobertura y uso de suelo, el modelo de elevación digital MDE, y el Ortomosaico

Modelación o proceso:

Generación de la malla de cálculo

La generación de la malla de cálculo con IBER se realizó a través de la herramienta “RTIN”, capaz de crear e importar una geometría formada por una red de triángulos rectángulos a partir de un Modelo Digital del Terreno en formato ASCII previamente obtenido.

Figura 7 Malla de trabajo generada a partir del DEM Software Iber

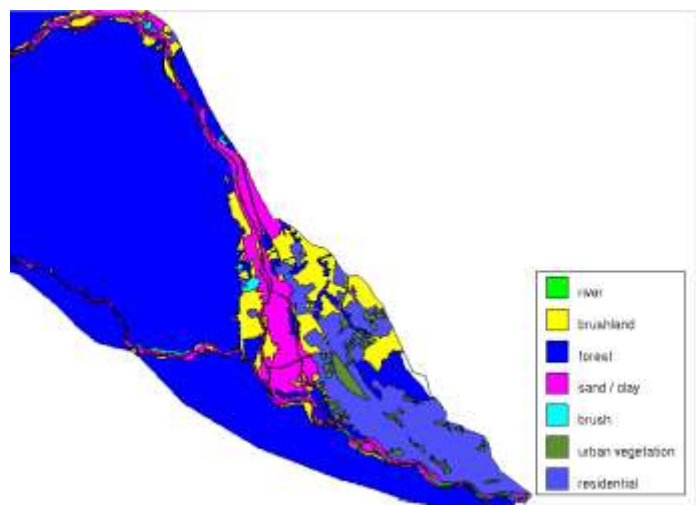
Asignación de Coeficientes de Manning

Los coeficientes de Manning se asignaron automáticamente en función de las distintas coberturas del suelo obtenidas a partir del archivo georreferenciado de usos de suelo

Tabla 14 Coeficientes de Manning en función de los usos del suelo

Usos de Suelo	Coeficiente de Manning
Cauce	0.025
Bosque	0.12
Tierra degradada	0.023
Cultivos	0.05
Residencial	0.15
Vegetación urbana	0.032

Figura 8 Usos de suelo Software Iber



Fuente: autor a partir de software iber

Asignación de Condiciones de Contorno e Iniciales

Hidrogramas: se establece la simulación en régimen permanente y como dato de entrada el hidrograma unitario obtenido en el estudio hidráulico previo para cada periodo de retorno

Figura 9 Asignación de condiciones de entrada

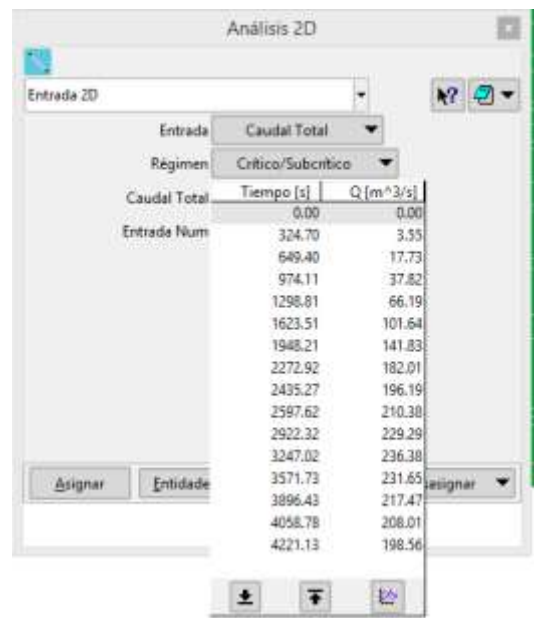


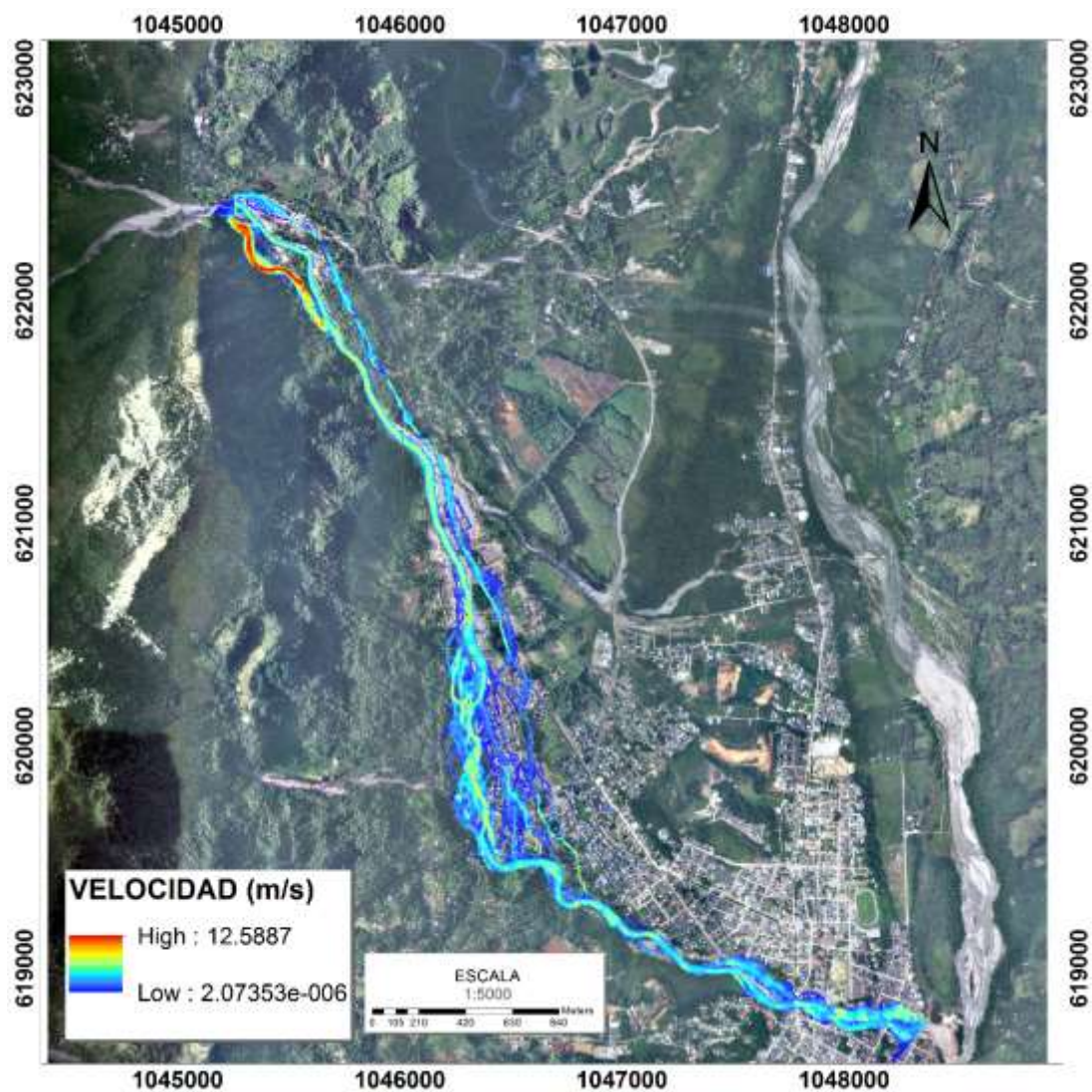
Figura 10 Condición de contorno de salida

The image shows a software window titled "Análisis 2D". Inside the window, there is a dropdown menu labeled "Salida 2D" with a blue arrow icon. Below this, there is a label "Condición del Flujo" followed by a dropdown menu showing "Supercrítico/Crítico". Underneath that is a label "Salida Número" followed by a text input field containing the number "1". At the bottom of the window, there is a row of four buttons: "Asignar", "Entidades" (with a dropdown arrow), "Dibujar" (with a dropdown arrow), and "Desasignar" (with a dropdown arrow). Below these buttons is a single "Cerrar" button. The window has a yellow border and a red close button in the top right corner.

Fuente: autor a partir de software iber

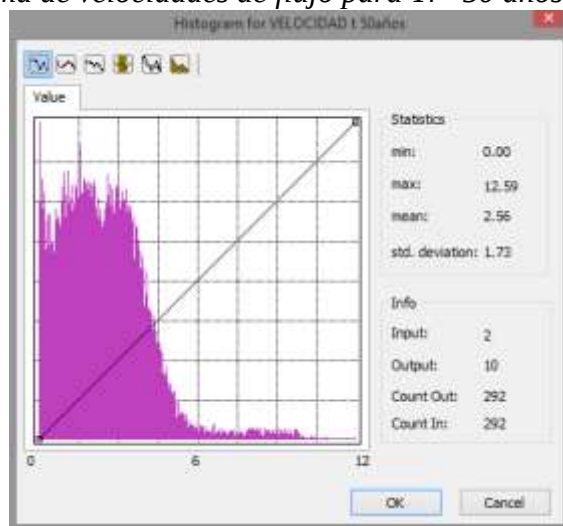
Resultados Superficies de Inundación en el Área analizada

Figura 11 Mapa de Velocidades de flujo para $Tr=50$ años



Fuente: autor a partir de software iber

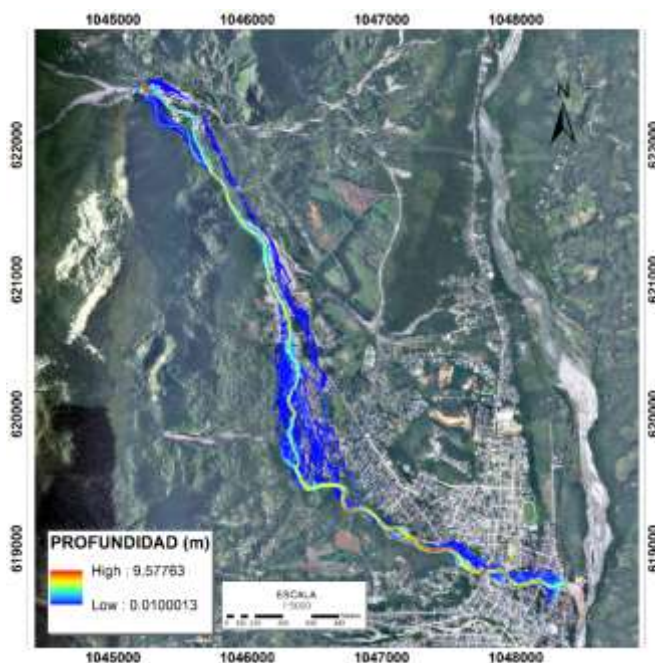
Grafica 3 histograma de velocidades de flujo para $Tr=50$ años



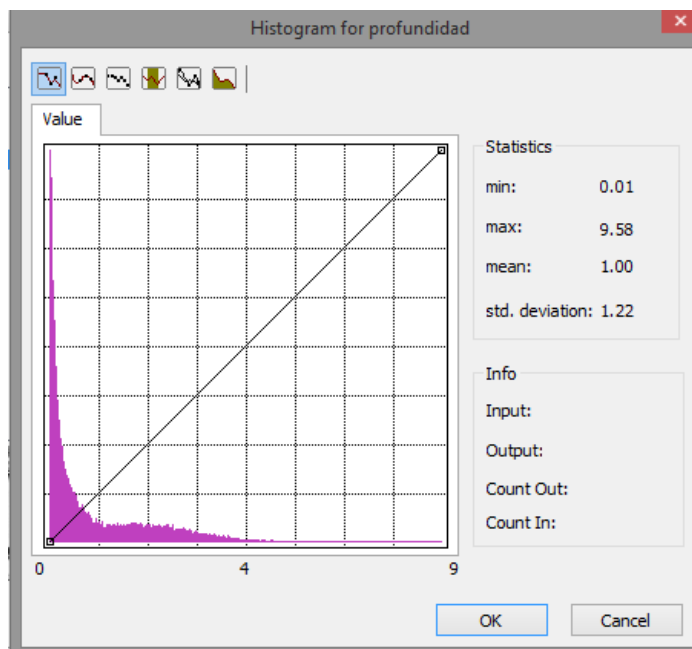
Fuente: autor a partir de software ArcMap

En la gráfica anterior se evidencia que las velocidades en el flujo varían en un rango de 0 a 12,6 m/s siendo 2,56 m/s el promedio, los valores máximos se presentan en la parte superior de la cuenca y disminuyen cerca del casco urbano

Figura 12 Mapas de profundidad de flujo para $Tr=50$ años



Fuente: autor a partir de software ArcMap

Grafica 4 histograma de profundidad de flujo para $Tr=50$ años

Fuente: autor a partir de software ArcMap

Zonificación de Amenaza por Inundación

Criterios de Zonificación de Amenaza de Inundación

Para la categorización de la amenaza por inundación se encuentran diferentes criterios; En la gran mayoría de clasificaciones están soportada en el análisis conjunto de la altura de la lámina de agua y la velocidad del flujo.

Para el presente estudio se utiliza la metodología planteada por Federal Emergency Management Agency (FEMA) definida en la Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación. (IDEAM 2017); la cual es el resultado de multiplicar las profundidades y velocidades para posteriormente categorizarlos en los distintos niveles de amenaza definidos así:

Tabla 15 categorización simplificada de la amenaza como el producto de la velocidad por la profundidad

Categoría de amenaza	Velocidad (V) m/s*Profundidad
BAJA	<0.2
MEDIA	0.2 - 0.5
ALTA	>0.5

Fuente: adaptada de la metodología FEMA

Mapa de pendientes

A partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) se determinaron las zonas con pendientes bajas donde se pueda presentar algún tipo de inundaciones asociadas al cauce principal.

Los rangos de pendiente utilizados como parámetro de clasificación de escenarios de amenaza relativa se muestran en la siguiente tabla:

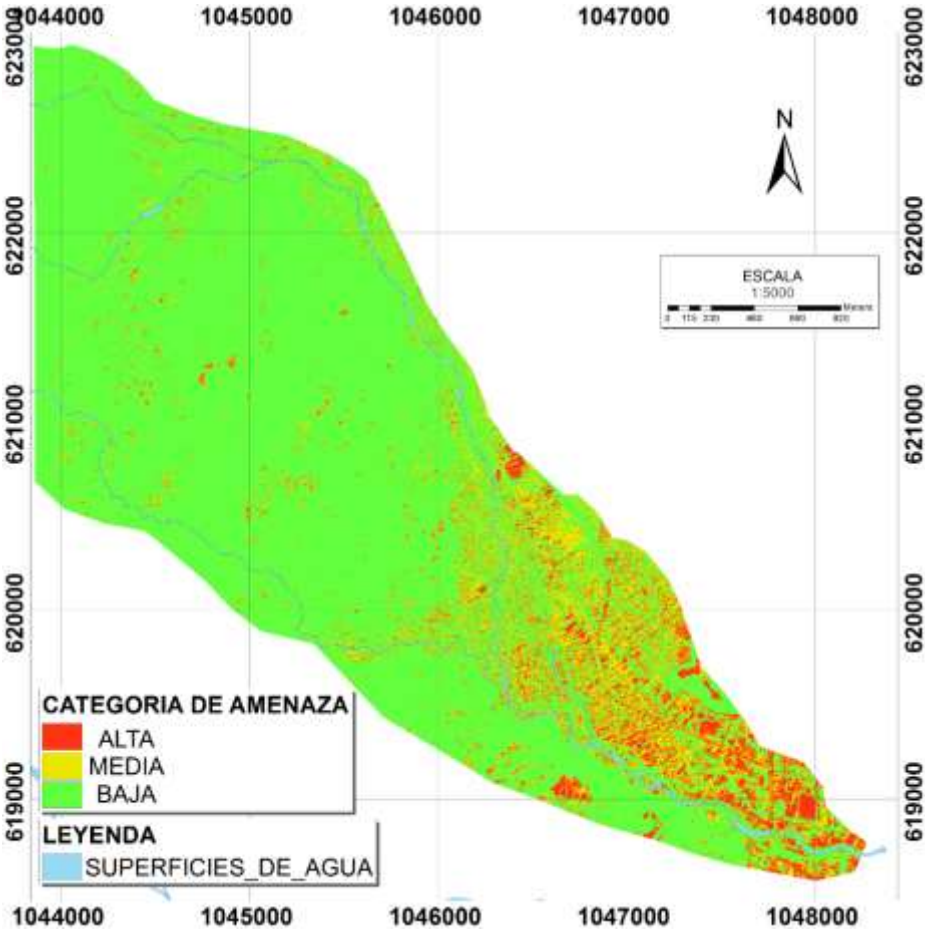
Tabla 16 clasificación rango de pendientes para inundaciones

Rango de pendiente	Categoría Amenaza
0 - 3 %	Alta
3 - 6 %	Media
6 - 9%	Baja

Fuente: autor

Se clasifica como zonas de amenaza alta por inundación a aquellas zonas de márgenes aledañas al cuerpo de agua donde la pendiente del terreno sea baja.

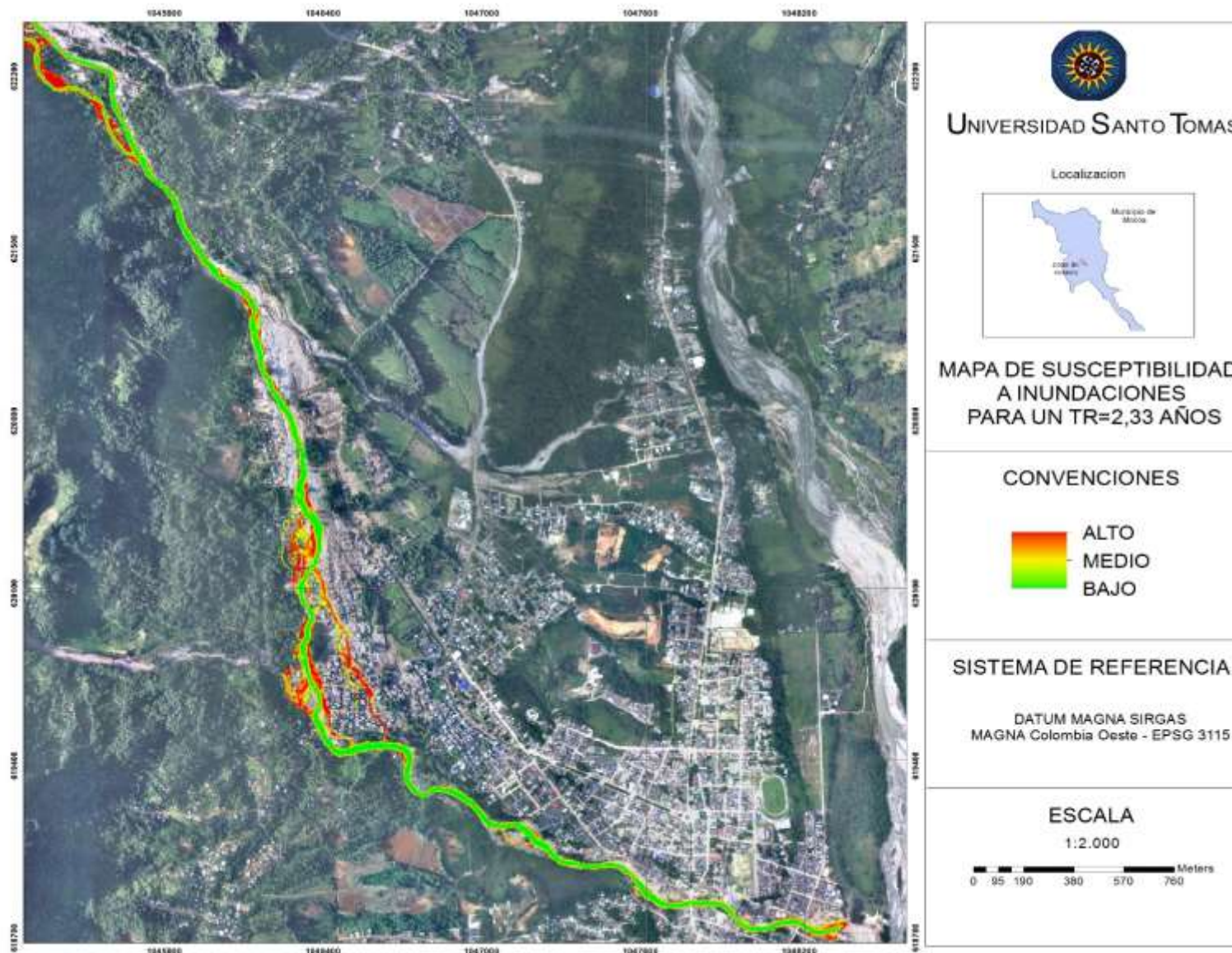
Figura 13 Mapa de Amenaza de inundación por pendiente



Fuente: autor a partir de software ArcMap

Mapa de zonificación de amenaza por inundación para un tiempo de retorno de 2,33 años

Figura 14 Mapa de zonificación de amenaza por inundación para un tiempo de retorno de 2,33 años.



Mapa de zonificación de Amenaza por Inundación para un tiempo de retorno de 50 años.

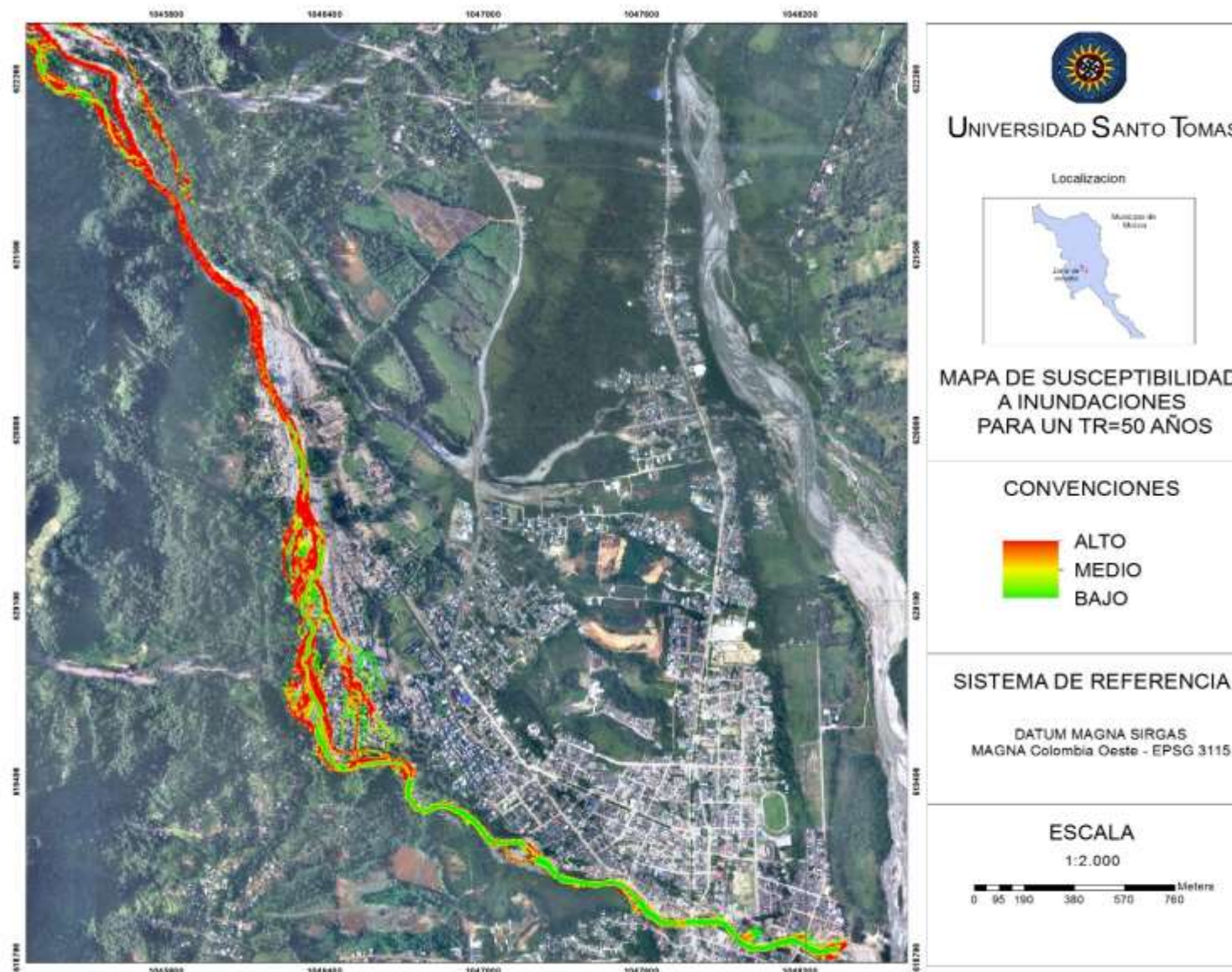


Figura 15 Mapa de zonificación de Amenaza por Inundación para un tiempo de retorno de 50 años

Convenciones del Mapa de Amenaza por Inundación
Amenaza alta

Se identifican como zona de amenaza alta por inundación en un escenario del caudal pico con un tiempo de retorno de 2,33 años, a zonas donde el producto entre la velocidad del flujo y la altura de lámina de agua es superior a 0.5 m²/s.

Se identifican como amenaza alta a las áreas aferentes al cauce principal con pendientes de hasta el 3%

Geomorfológicamente es de resaltar que en este escenario de inundación debido a la presencia de terrazas aluviales existe una alta predisposición al transporte de sedimentos y socavación lateral que puede generar represamientos a causa de inestabilidad de laderas y bancas, adicional a esto se observa que el cauce tiene un comportamiento trezado en las zonas cercas al casco urbano

Amenaza media

Se identifican como de amenaza media por inundación las áreas el producto entre la velocidad del flujo y la altura de lámina de agua es menor a 0,5 m²/s, geomorfológicamente estas zonas corresponden a llanuras aferentes al cauce con pendientes entre 3 y 6 %

Amenaza baja

Se identifican como de amenaza baja por inundación las áreas donde el producto entre la velocidad del flujo y la altura de lámina de agua es menor a 0,25 m²/s, geomorfológicamente estas zonas corresponden a llanuras aferentes con alturas mayores a 6 % respecto al cauce

Nota: En base a los Mapas generados, se identifica como áreas aferentes a las zonas de inundación de hasta 16 m a partir de borde del cauce principal para un tiempo de retorno de 50 años y 13 m para un tiempo de retorno de 2,3 años.

Susceptibilidad por Movimientos en Masa

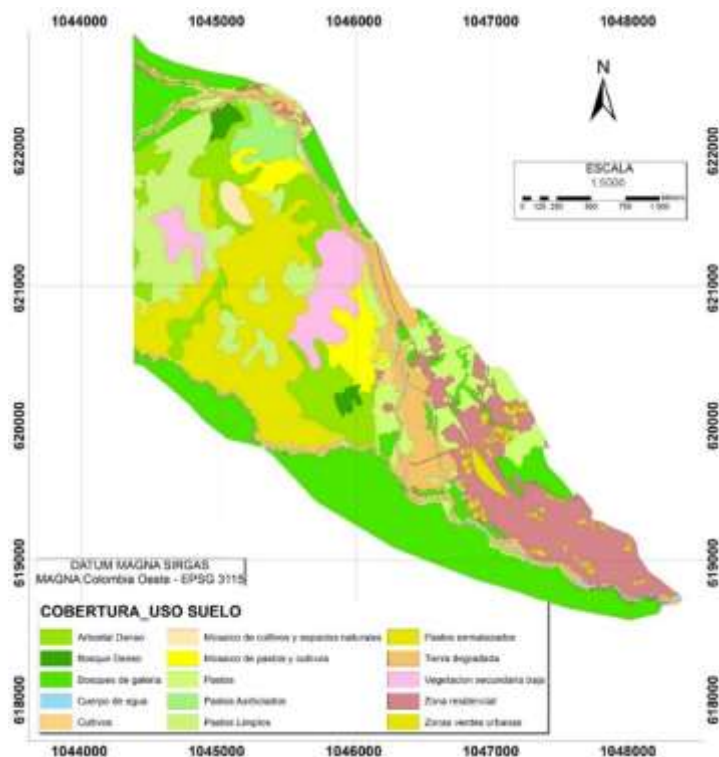
Metodología

La metodología seleccionada se basa en una adaptación del método Mora-Vahrson que permite realizar un análisis a priori de áreas extensas bajo amenaza de deslizamientos, utilizando indicadores morfodinámicos (Mora & Vahrson, 1993)

Insumos

Usos de suelo: Se emplea como base el Mapa de uso de suelo del PBOT de Mocoa del año 2005, además de una validación visual del resultado por medio de la clasificación imágenes cartográficas del IGAC 2017

Figura 16 Mapa de usos de suelo

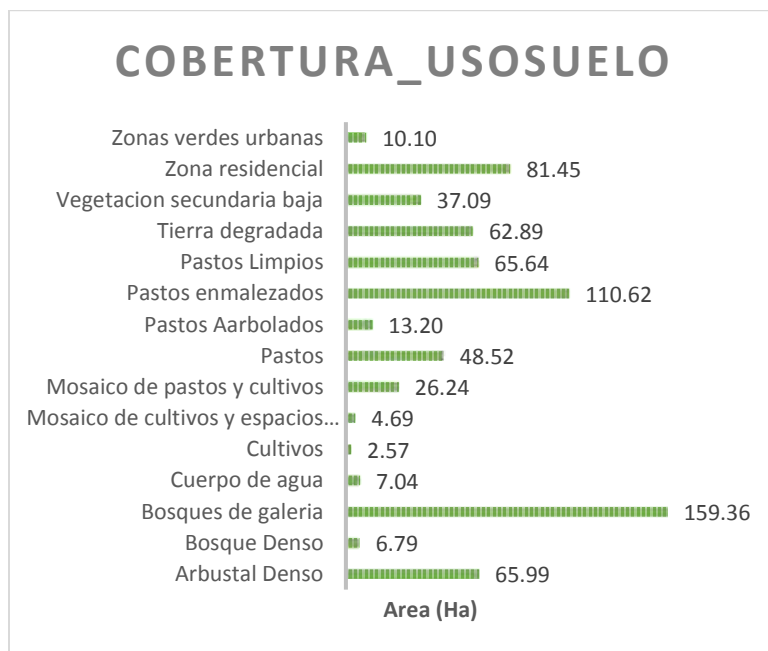


Fuente: autor a partir de software ArcMap

Tabla 17 Área correspondiente al uso suelo en el área de estudio

COBERTURA_USOSUELO	AREA	
	Hectareas (Ha)	%
Arbustal Denso	65.99	9%
Bosque Denso	6.79	1%
Bosques de galería	159.36	23%
Cuerpo de agua	7.04	1%
Cultivos	2.57	0%
Mosaico de cultivos y espacios naturales	4.69	1%
Mosaico de pastos y cultivos	26.24	4%
Pastos	48.52	7%
Pastos Arbolados	13.20	2%
Pastos enmalezados	110.62	16%
Pastos Limpios	65.64	9%
Tierra degradada	62.44	9%
Tierra degradada	0.45	0%
Vegetación secundaria baja	37.09	5%
Zona residencial	81.45	12%
Zonas verdes urbanas	10.10	1%

Fuente: autor

Grafica 5 Distribución de la cobertura y uso de suelo en el área de estudio

Fuente: autor

En cuanto a la cobertura y uso de suelo del área de estudio se aprecia que la mayor parte corresponde a variedad de cultivos y pastos con un 48 % del área total, seguido de bosques primarios, secundarios y de galería que ocupan el 24 %, la zona residencial y sus zonas verdes representa un 13%, tierra degradada 9 % , vegetación secundaria 5% y por último los cuerpos de agua ocupan en conjunto el 1%

Pendientes

La pendiente indica el grado de inclinación que tiene la superficie del terreno o una ladera de una montaña respecto a la horizontal. Se crea el mapa de pendientes a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) usando herramientas del software ArcGIS

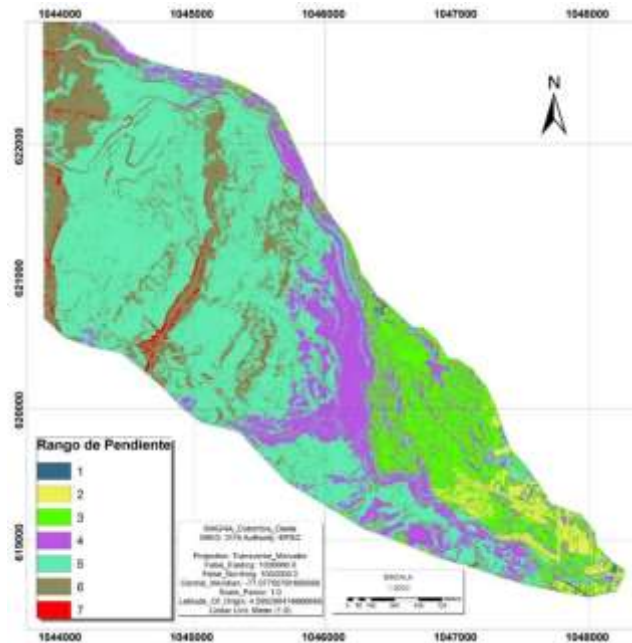
Es de destacar que el área de estudio presenta variaciones de altura entre 566 y 1136 m.s.n.m., aproximadamente; donde, la cota más baja se encuentra sobre las geoformas de origen aluvial y la más alta sobre las cimas de las geoformas de origen estructural.

Tabla 18 Calificación de Pendientes con base en guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa (2017).

RANGO INCLINACIÓN (°)	DESCRIPCIÓN	CLASIFICACIÓN
0-2	Plano a casi plano	1
2-4	Suavemente inclinado	2
4-8	Inclinado	3
8-16	Moderadamente abrupto	4
16-35	Abrupto	5
35-55	Muy abrupto	6
>55	Extremadamente Abrupto	7

Fuente: autor

Figura 17 Mapa de pendientes en clases según SGC



Fuente: autor a partir de software ArcMap

Curvatura total

La curvatura puede definirse como la tasa de cambio en la convexidad o concavidad de la superficie y depende de los cambios de pendiente en el entorno del punto (Felicísimo, 1994).

Esta variable se relaciona con los movimientos en masa, en la medida en que indica el grado de

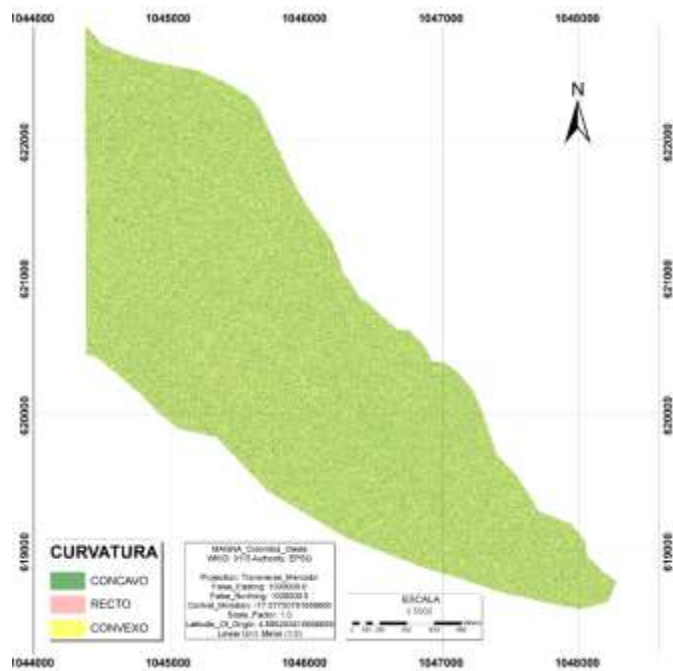
concentración o dispersión del drenaje superficial (Londoño, 2006). Se calculó con la herramienta curvatura de ArcGIS y posteriormente, fueron reclasificados en 3 rangos dispuestos así:

Tabla 19 Rangos de curvatura utilizados

Rango	Descripción
<-0.001	cóncavo
-0.001-- 0.001	recto
>0.001	convexo

Fuente: autor

Figura 18 Mapa de curvatura



Fuente: autor a partir de software ArcMap

Condiciones geológicas del área de estudio

Para la realización de esta unidad se consultó la siguiente información:

- El mapa geológico de la Plancha 430 Mocoa, a escala 1:100,000, elaborado por Ingeominas y Geoestudios en el 1998 y modificado por Núñez y Gómez (2002)

- Informe de evaluación de la amenaza por movimientos en masa en el área urbana, periurbana y de expansión del municipio de Mocoa – Putumayo Servicio Geológico Colombiano 2018
- Análisis de amenazas y vulnerabilidad geológica en la cuenca de la quebrada Taruca y Sangoyaco para el área rural, sub-urbana y urbana de la población de Mocoa, Departamento del Putumayo. Informe para Corpoamazonía, (Jojoa, 2003).
- El informe de Amenaza por movimientos en masa tipo flujo de las cuencas de las quebradas Taruca, Taruquita, San Antonio y El Carmen y los ríos Mulato y Sangoyaco, municipio de Mocoa, escala 1:5.000. Servicio Geológico Colombiano 2017

Monzogranito de Mocoa (Jmgmoc)

La unidad, corresponde a un cuerpo ígneo intrusivo fragmentado y elongado en dirección NE-SW que se extiende desde el norte del municipio hasta la frontera con Ecuador. Se caracteriza por presentar una morfología montañosa abrupta, cuyas pendientes son muy pronunciadas y contrastantes con las unidades geológicas adyacentes, donde la disección de los drenajes ha desarrollado valles en “V” profundos.

Según (INGEOMINAS 2003) se trata de un cuerpo plutónico de composición predominantemente monzogranítica, que aflora al occidente y noroccidente de Mocoa, en la franja montañosa

La composición mineralógica se caracteriza por una asociación entre cuarzo, feldespato alcalino, plagioclasa, hornblenda y biotita en proporciones variables, Adicionalmente, se

encuentra clorita, epidota y sericita como minerales de alteración y como productos de alteración hidrotermal son identificados epidota, calcita y opacos que se asocian a biotita cloritizada.(INGEOMINAS, 2003)

Jojoa (2003), describe que los afloramientos del Monzogranito de Mocoa corresponden a bloques tectónicos, levantados o hundidos, originados por el paso de la Falla Mocoa. menciona que cuando estas rocas se meteorizan, especialmente por acción tectónica, se vuelven blandas, friables, se desmenuzan fácilmente dejando una mezcla de arcilla de color rosado (producto de alteración de feldespatos) y granos de cuarzo. El grado de meteorización aumenta desde fresco en cauces de ríos y quebradas (roca friable se encontró al margen derecho aguas abajo de la quebrada Taruquita) hasta suelo residual en las partes más altas de laderas de valles.

Formación Rumiyaco (K2E1rum)

Jojoa (2003), menciona que la formación rumiyaco es Concordante sobre la Formación Villeta, está compuesta en su mayor parte por arcillolitas rojizas que varían de tonalidad roja a violeta con moteado gris, café, gris verdoso a púrpura y por arcillolitas de color gris oscuro que hacia el tope presentan restos de hojas; posee intercalaciones delgadas de areniscas arcillosas hacia la base y tope. En la parte media aparecen delgadas capas de conglomerados.. Aflora en los alrededores y al norte de Mocoa, en los ríos Pepino, Rumiyaco, Sangoyaco, Mulato, Mocoa y Ticuanayo y en la quebrada Taruca (Jojoa 2003)

Complementando INGEOMINAS, (2003) menciona que la Formación Rumiyaco está conformada por una sucesión monótona, predominantemente arcillolítica de color rojo y gris, con diversas tonalidades, en la cual se intercalan capas delgadas de conglomerados finos, areniscas cuarzosas, líticas y sublíticas. En general, las capas de arcillolitas se presentan en

estratos gruesos tabulares, con moderada a alta bioperturbación. La gran mayoría de las veces las estructuras internas de las capas se han perdido por la bioperturbación, y se observa madrigueras verticales; frecuentemente contienen óxidos de hierro. Las arenitas cuarzosas son de grano fino a medio, color rojo y matriz arcillosa. Las litoarenitas y sublitoarenitas son de color gris con tonalidades verdosas, tienen grano fino a medio, submaduras a inmaduras, localmente con laminación plana paralela continua e inclinada difusa y de bajo ángulo; se presentan en capas delgadas y en estratos medios, gruesos y muy gruesos tabulares.

Cuando no es tectónico el contacto inferior de la Formación Rumiyaco con la Formación Villeta, es concordante. En el área de Mocoa, aunque no se pudo definir bien falta de buenos afloramiento, aparentemente corresponde a una discordancia angular muy suave y progresiva hacia el sur; hacia el norte se va atenuando hasta pasar posiblemente a una paraconformidad, como se observa en las exposiciones localizadas cerca de Yunguillo. El contacto con el Miembro Inferior de la Formación Pepino se reporta como discordante, irregular y paraconforme. En el camino hacia La Punta, en la Plancha 430 Mocoa, el contacto superior con la Formación Pepino es también transicional, aunque tanto en la dirección de buzamiento como en la bioestratigrafía no es posible detectar la magnitud del hiato, éste es sugerido por la interrupción de las facies entre la Formación Rumiyaco y el Miembro Inferior de la Formación Pepino que la suprayace (INGEOMINAS, 2003).

Formación Pepino (E2E3pe)

La Formación Pepino se divide en tres miembros informales correspondientes a los miembros Inferior, Medio y Superior de acuerdo al (SGC 2017). Jojoa (2003), alude que la Formación aflora en las estribaciones del piedemonte, y con un espesor variable aumentando en

sentido sur-norte desde 450 m en el río Mulato hasta 600 m en el sector del puente sobre el río Caquetá y Verdeyaco, en la vía Mocoa Pitalito.

Miembro Inferior (E2E3pei):

Corresponde a conglomerados de clastos tamaño guijo a canto, de forma muy redondeada. Composicionalmente presenta cuarzo y chert principalmente, con algunos clastos de rocas ígneas y lodolitas silíceas en menor proporción. Los fragmentos se encuentran embebidos en matriz arcillosa; se destacan por la ocurrencia de estratificación inclinada, lentes de arena y otras estructuras sedimentarias características de ambientes fluviales de alta energía.

Miembro Medio (E2E3pem):

Presenta capas macizas de lodolitas y arcillolitas abigarradas de tonos rojos, grises y pardos rojizo; donde, se destaca la presencia de intercalaciones con niveles de arenitas, los cuales van desde arenitas de grano muy fino a arenitas conglomeráticas, las cuales tienden a presentar matriz arcillosa, o cemento silíceo.

Miembro Superior (E2E3pes): Corresponde a un conglomerado similar al Miembro Inferior, compuesto de clastos redondeados de chert y cuarzo en una matriz limoarcillosa. Se destaca la presencia de intercalaciones de arenitas y lodolitas, las cuales van en aumento hacia el tope de la unidad, más cuarzosa en la composición de los clastos respecto al Miembro Inferior.

Grupo Orito (E3N1or)

Se describe como una unidad compuesta principalmente por lodolitas, arcillolitas y limolitas de colores rojo, lila, verde, pardo y violeta, con algunas intercalaciones de. (INGEOMINAS, 2003)

(Jojoa 2003), describe que aguas arriba de la confluencia de las quebradas Taruca y Taruquita, sobre la quebrada Taruca, se observó un afloramiento de arcillolitas y lodolitas

varicoloreadas, cerca al cuerpo intrusivo; por la altitud y por su cercanía a este cuerpo, las arcillolitas y lodolitas se las puede correlacionar con la formación Orito.

Depósito fluviotorrencial muy antiguo (Qfta)

Suelo transportado abanico fluviotorrencial muy antiguo, matriz-soportado cohesivo de cantos y bloques con meteorización alta a completamente meteorizados. Presentan matriz altamente meteorizada y de color amarillo, naranja y a veces, roja, compuesta de arena y arcilla. La mayoría de los clastos se encuentran completamente meteorizados y se integran con la matriz, dando la misma coloración y textura. Estos depósitos generan suelos residuales de hasta 2 m de espesor de composición arcillosa, plástico, cohesivo y muy blando de coloración pardo amarillo a pardo. (SGC 2017)

Depósito fluviotorrencial reciente (Qftr)

Suelo transportado fluviotorrencial sub-actual, clasto-soportado no cohesivo de cantos y bloques moderadamente meteorizados localizados en las márgenes de las quebradas y ríos. Presentan matriz moderadamente meteorizada de arena y arcilla. El depósito es de color gris medio a pardo amarillo, con clastos de formas angulares a subangulares con tamaños que varían desde arenas hasta bloques de 5 m. (SGC 2017)

Depósito Coluvial (Qco)

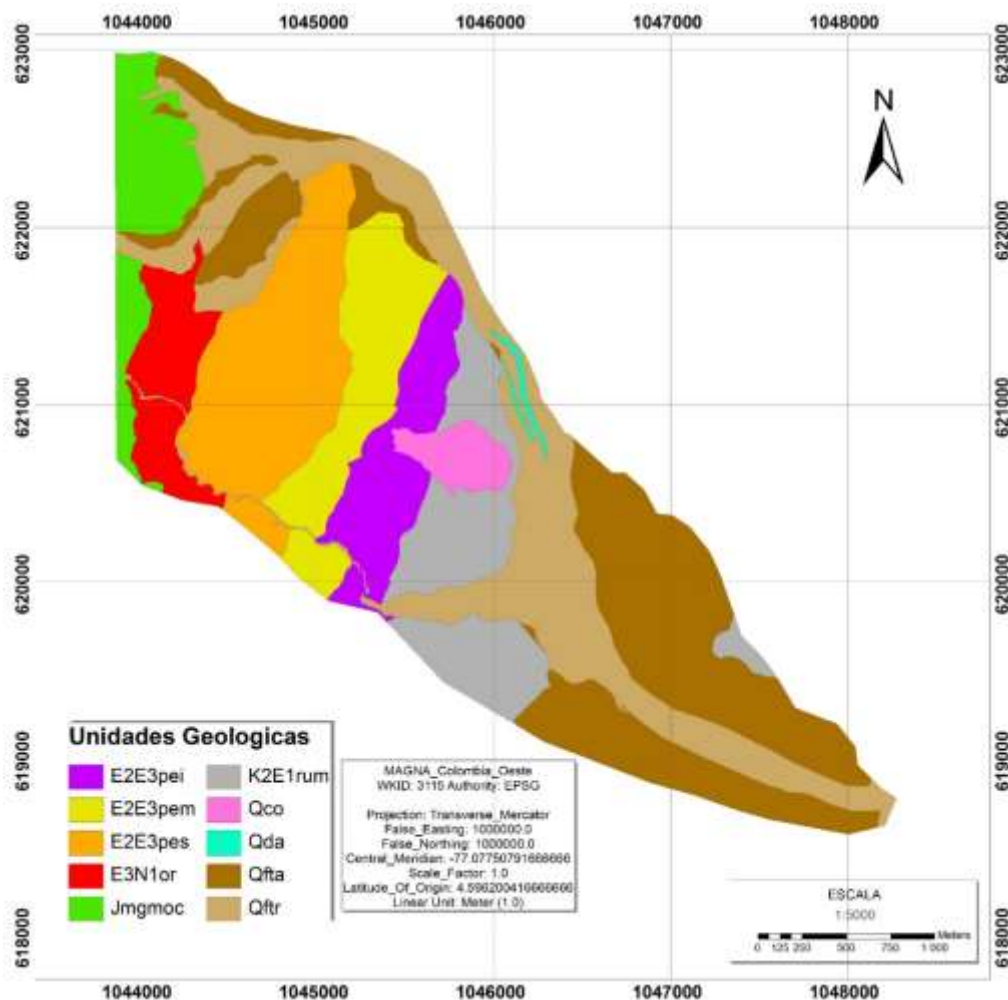
Corresponden a depósitos generados por movimientos en masa, cuyos materiales se acumulan en las laderas o en los cambios de pendiente de éstas. Su depósito está constituido por fragmentos embebidos en una matriz generalmente arcillosa a areno limo arcillosa. (SGC 2017)

Depósito Antrópico (Qda):

Corresponden a materiales heterogéneos formados a partir de la acción humana, los cuales son producto de acumulaciones por actividades extractivas, apilamiento de materiales con fines de protección

A continuación se muestra la distribución de cada una de las unidades presentes en el área de estudio

Figura 19 Mapa de Distribución de las unidades geológicas



Fuente: Elaboración propia a partir de software ArcMap

Fallas

Falla Mocoa-La Tebida: es la principal falla de la zona de estudio. Corresponde a una estructura con dirección NS en la parte sur y N45E hacia el norte con desplazamiento oblicuo inverso-dextral con longitud de más de 40 km; Es una Falla inversa o de cabalgamiento definida.

Morfológicamente la falla separa dos dominios geomorfológicos, uno de cordillera al occidente, de laderas largas y muy empinadas (30 a 45°) y otro de lomeríos de Piedemonte hacia el oriente, con laderas cortas y suaves (12 a 18°); tiene una estrecha relación con respecto a la inestabilidad de laderas, pues la mayor parte de los depósitos torrenciales y coluviales se encuentran adyacentes y al oriente de la falla.

Falla Cantayaco:

Pertenece al Sistema de Fallas del Borde Amazónico, y es la continuación al sur de la falla de Acevedo. Tiene orientación NE-SW y se considera de cabalgamiento (INGEOMINAS, 2002), la mayoría de su trayecto se encuentra cubierta por los depósitos fluvio-torrenciales muy antiguos

Falla Sangoyaco

Esta falla controla gran parte del curso del Rio Sangoyaco, genera torsiones y desplazamientos en las rocas sedimentarias, su trazo se trunca al E con el lineamiento de la Q. Taruca y al W se trunca contra el trazo de la Falla Mocoa-La Tebaida (SGC, 2017).

Condiciones geomorfológicas del área de estudio

El área de estudio, se desarrolla sobre los Ambientes de origen Estructural (S); Denudacional (D), Fluvial (F) y Antrópica (A), de la vertiente oriental de la cordillera Oriental del Sistema orogénico andino.

El relieve es montañoso; con superficies inclinadas a escarpadas y cortas a muy largas; de forma cóncavas o convexas, dependiendo del ambiente morfogenético. El gradiente altitudinal, oscila entre los intervalos de 565 y 1.690 m.s.n.m.

Insumos:

Geomorfología del estudio para el acotamiento de la ronda hídrica de los ríos Sangoyaco, Rumiayaco, Pepino y las quebradas Taruca, Taruquita, Conejo, Almorzadero en el municipio de Mocoa, departamento del Putumayo en cumplimiento del plan de Acción “Ambiente para la Paz” 2016-2019- COORPOAMAZONIA 2019

Para el área de estudio, se determinaron cuatro (4) ambientes morfogenéticos o regiones geomorfológicas:

Ambiente de origen estructural (S):

Este ambiente, corresponde a las geoformas generadas por la dinámica interna de la tierra, especialmente la asociada a las estructuras geológicas, tales como fallas, pliegues y diaclasas. Se incluyen las montañas y colinas cuya altura y formas se deben a plegamiento de las rocas superiores de la corteza terrestre y que aún conservan rasgos reconocibles de las estructuras originales a pesar de haber sido afectadas en diverso grado por los procesos de meteorización (Villota, 2005).

Ambiente de origen Denudacional (D):

Determinado por la actividad de los procesos erosivos hídricos y pluviales, y principalmente producto de procesos de meteorización, erosión y remoción en masa, sobre geoformas pre existentes.

Ambiente de origen fluvial (F):

Corresponde a las geoformas generadas por procesos (erosión – sedimentación), generadas por corrientes de agua tales como caños, arroyos, ríos, lagos o lagunas.

Ambiente de origen antropogénico (A): Este ambiente, corresponde a las geoformas generadas por la alteración significativa de la superficie terrestre por la acción del hombre. Dentro de estos procesos se destacan obras de ingeniería (diques, canales), bioingeniería, rellenos artificiales, rellenos sanitarios, excavaciones, minería a cielo abierto y embalse artificiales entre otros.

Unidades Geomorfológicas

Esta categoría, se propone como la unidad básica de la cartografía geomorfológica. El término unidad geomorfológica, se define como una geoforma individual genéticamente homogénea; mientras que la subunidad, es una subdivisión de la unidad geomorfológica. Esta última, se encuentra determinada fundamentalmente por los contrastes morfológicos y morfométricos, que relacionan el tipo de material o la disposición estructural de éstos con la correspondiente topografía del terreno.

Por último, el componente o elemento geomorfológico está establecido por los rasgos del relieve determinados por la morfometría detallada del terreno (Formas de ladera, escarpes estructurales, pendientes anómalas, perfiles de suelos residuales o remanentes, escarpes naturales o antrópicos, relieves internos de laderas o flancos, crestas, formas del valle) (Carvajal, 2012).

Este mismo concepto, lo sustenta Robertson y Otros (2013), mencionando que el componente o elemento geomorfológico corresponde al máximo nivel de detalle asociado a escarpes o cambios de pendiente (Taludes, orillares, escarpes de falla).

Con base en lo descrito anteriormente, la tabla 20 muestra la jerarquización para el área de estudio

Tabla 20 Unidades Geomorfológicas para el área de estudio

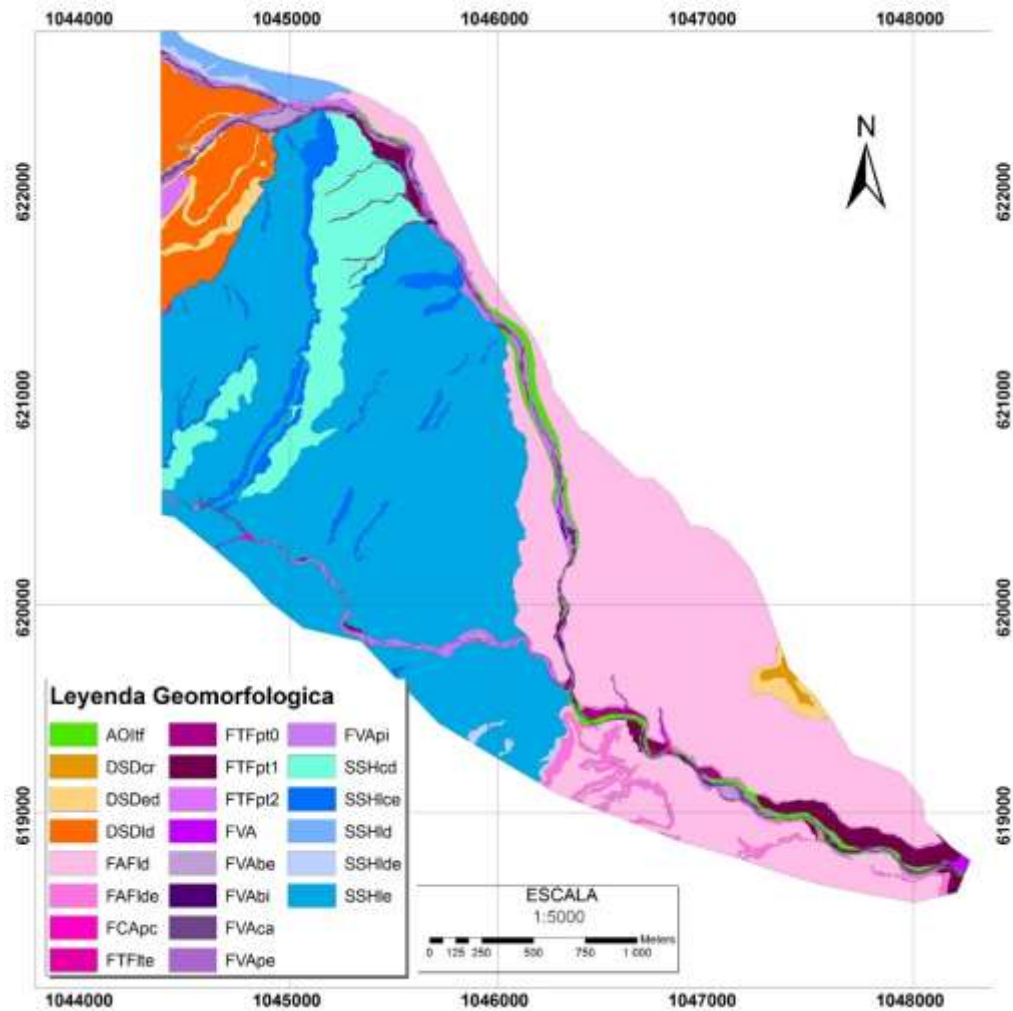
AMBIENTE	UNIDAD	SUBUNIDAD	COMPONENTE	SÍMBOLO	ÁREA	
					Ha.	%
Ambiente de origen Estructural - Denudacional (S)	Sierra homoclinal	Ladera estructural	De longitud moderada y forma convexa divergente	SSHle	286.0	41%
		Ladera de contrapendiente	Escarpe de ladera natural de longitud muy corta y de forma irregular	SSHlce	19.9	3%
		Conos de deslizamiento	Depósito coluvial con con intercalaciones de arenitas de grano fino moteadas de color gris y violeta.	SSHcd	48.2	7%
		Ladera denudada	De longitud moderada y forma convexa irregular	SSHld	7.86	1%
		Ladera denudada	Escarpe de ladera natural de longitud muy corta y de forma irregular	SSHlde	3.62	1%
Ambiente de origen Denudacional (D)	Sierra denudacional	Ladera denudada	De longitud moderada y de forma convexa e irregular	DSDld	32.66	5%
		Ladera denudada	Escarpe de ladera natural de longitud muy corta y de forma irregular	DSDed	11.33	2%
		Cerro residual	-	DSDcr	1.42	0%

Ambiente de origen Fluvial (F)	Llanura de inundación	-	-	FVA	0.95	0%
		Cauce activo	En forma de U alargada	FVAca	11.37	2%
		Barra	Barra estable	FVAbe	1.94	0%
			Barra inestable	FVAbi	1.19	0%
		Playa	Playa estable	FVApe	0.75	0%
			Playa inestable	FVApi	16.3	2%
	Terraza fluvial	Plano de terraza T0	De longitud muy corta a corta y de forma concava	FTFpt0	1.82	0%
		Plano de terraza T1	De longitud corta a moderada y de forma recta	FTFpt1	11.92	2%
		Plano de terraza T2	De longitud corta a moderada y de forma recta	FTFpt2	1.49	0%
		Ladera denudada	Escarpe de ladera natural de longitud muy corta y de forma irregular	FTFlte	0.47	0%
	Abanico fluvial	Plano de abanico	De longitud larga a muy larga y de forma recta e irregular	FAFld	222.52	32%
		Ladera denudada	Escarpe de ladera natural con clastos de esfericidad media a alta y formas angulares a subangulares	FAFlde	11.73	2%
		Cono aluvial	Plano de cono	FCAPc	0.25	0%
Ambiente de origen Antrópico (A)	Obras temporales gestión del riesgo	Terraplenes	Flancos y banco de terraplén	AOItf	8.6	1%
					702.3	100 %

El porcentaje de distribución de las geoformas por ambiente comprende un 52,1 % para las geoformas de origen origen Estructural - Denudacional (S), para las geoformas de origen

fluvial (F) 40,3 %, para las geoformas de origen Denudacional (D) 6,5% y 1,2% para las geoformas de origen Antrópico (A).

Figura 20 Mapa de Distribución de las unidades geomorfológicas



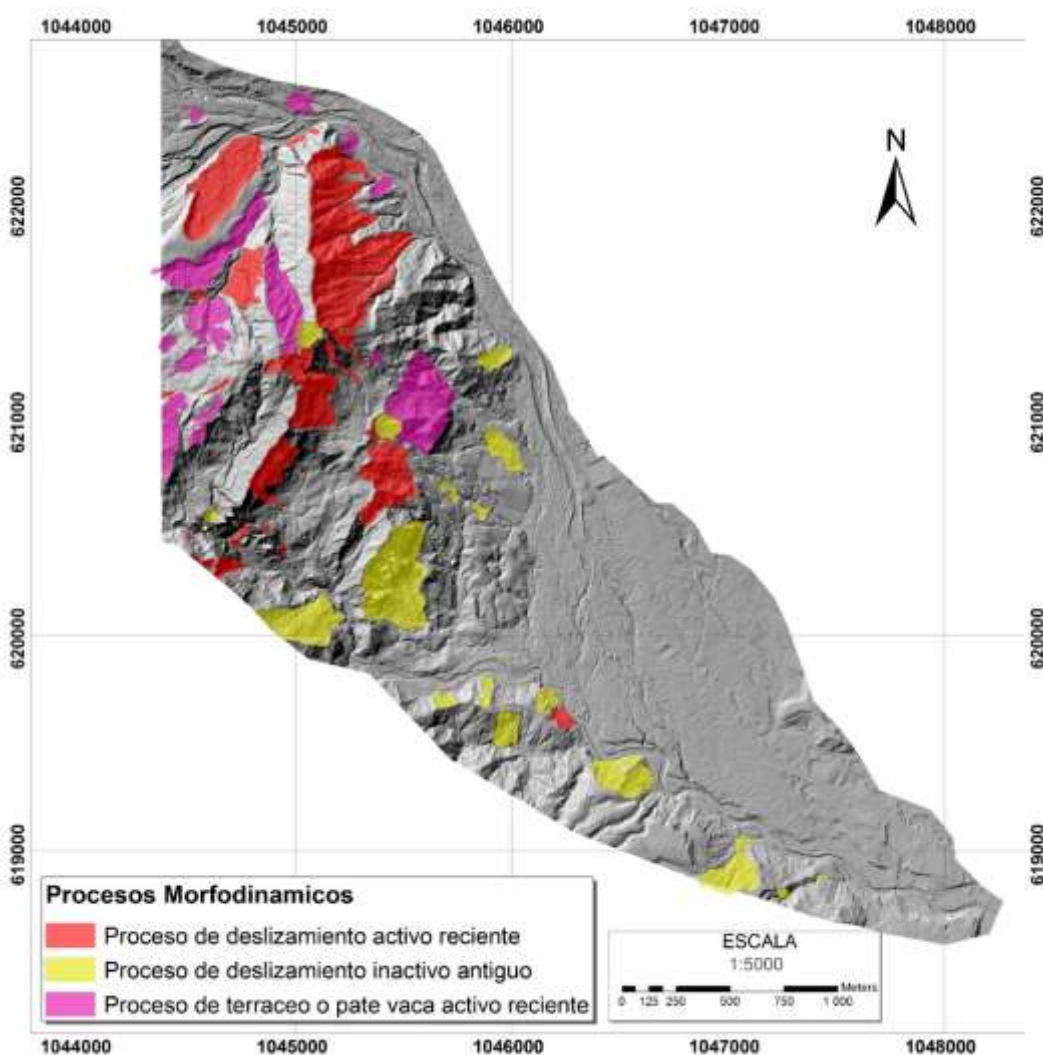
Elaboración propia a partir de software ArcMap

Procesos Morfodinámicos

Los procesos morfodinámicos están asociados a una secuencia conformada por la meteorización y erosión de un macizo rocoso, el desplazamiento y/o movimiento que se traduce en transporte de los materiales removidos y su posterior depositación. Por ende, los procesos morfodinámicos son el resultado de una serie de factores externos, de la posición geomorfológica

y sus agentes morfogenéticos, igualmente de factores internos tales como la composición mineralógica de los materiales y sus propiedades geomecánicas

En el área de estudio, se identifican movimientos en masa relacionados con el “terracedo o pate vaca”; las cuales son clasificadas por Villota (2005), como un flujo lento de suelo en estado plástico; deslizamientos activos e inactivos y desplomes definidos por Hutchinson (1988) como movimientos en masa relativamente rápidos que se presentan ladera abajo en dirección de la pendiente y que compromete materiales como rocas, detritos o tierra



Fuente: Elaboración propia a partir de software ArcMap

La tabla 21 muestra el área tanto en hectáreas como en porcentaje de los procesos morfodinámicos presentes en el área de estudio.

Tabla 21 Distribución porcentual de los Procesos Morfodinámicos

procesos Morfodinámicos	Área	
	Hectáreas (Ha)	%
Proceso de deslizamiento activo reciente	57.1	46%
Proceso de deslizamiento inactivo antiguo	34.46	28%
Proceso de terraceo o pate vaca activo reciente	31.8	26%
TOTAL	123.36	100%

Se destaca que el 18 % del total del área de estudio se encuentra afectado por procesos morfodinámicos, de ellos el 8% corresponde a deslizamientos activos recientes, 5 % de proceso de terraceo o pate vaca activo reciente y 5% por proceso de deslizamiento inactivo antiguo

Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa

Asignación de Pesos en el SIG

Tal y como se indica en el numeral de metodología, se hace una asignación o valoración para cada factor: geología, geomorfología, uso del suelo y cobertura vegetal, pendiente, curvatura, índice topográfico de humedad.

Geomorfológicamente

Las geoformas relacionadas al ambiente fluvial son determinantes en la zonificación por inundación, aunque este ambiente se con características morfométricas y morfográficas pueden incidir en la dinámica de movimientos en masa; inicialmente todas las geoformas asociadas a este ambiente se califican con el valor de uno (1) al igual que el ambiente de origen antrópico es calificado con la valoración más baja debido a que las geoformas presentes corresponde a obras de mitigación de riesgo, como flancos y banco de terraplén.

El ambiente fluvial se caracteriza por presentar acumulación de material (grava, arena, lodos) por parte del Rio Sangoyaco y la Q. Taruca, quienes generan depósitos no consolidados de sedimentos aluviales, en donde a pesar de no presentan movimientos en masa de alto riesgo para la comunidad, siguen siendo susceptibles por los de socavación que pueden detonar eventos de remoción en masa en las márgenes de los cauces principales, en época de lluvia.

El ambiente estructural- denudacional determinado por la presencia de estructuras geológicas como laderas y conos de deslizamiento es valorado con la calificación de 3 en vista de la fuerte influencia que puede tener en los movimientos en masa

Finalmente, el componente geomorfológico se tiene en cuenta los procesos morfodinámicos, los cuales son zonas de susceptibilidad alta (3) debido a su incidencia en procesos de movimientos en masa.

Tabla 22 Parámetros de valoración de geoformas

AMBIENTE	UNIDAD	SUBUNIDAD	VALORACIÓN
Ambiente de origen Estructural - Denudacional (S)	Sierra homoclinal	Ladera estructural	3
		Ladera de contrapendiente	3
		Conos de deslizamiento	3
		Ladera denudada	3
		Ladera denudada	3
Ambiente de origen Denudacional (D)	Sierra denudacional	Ladera denudada	3
		Ladera denudada	3
		Cerro residual	3
Ambiente de origen Fluvial (F)	Llanura de inundación	-	1
		Cauce activo	1
		Barra	1
			1

		Playa	1
			1
	Terraza fluvial	Plano de terraza T0	1
		Plano de terraza T1	1
		Plano de terraza T2	1
		Ladera denudada	1
	Abanico fluvial	Plano de abanico	1
		Ladera denudada	1
	Cono aluvial	Plano A<de cono	1
	Ambiente de origen Antrópico (A)	Obras temporales gestión del riesgo	1
			1

Morfometría

Pendiente:

A partir de la clasificación de la tabla 19, se distinguen 4 clases para utilizarlo en el método de valoración, definidas así:

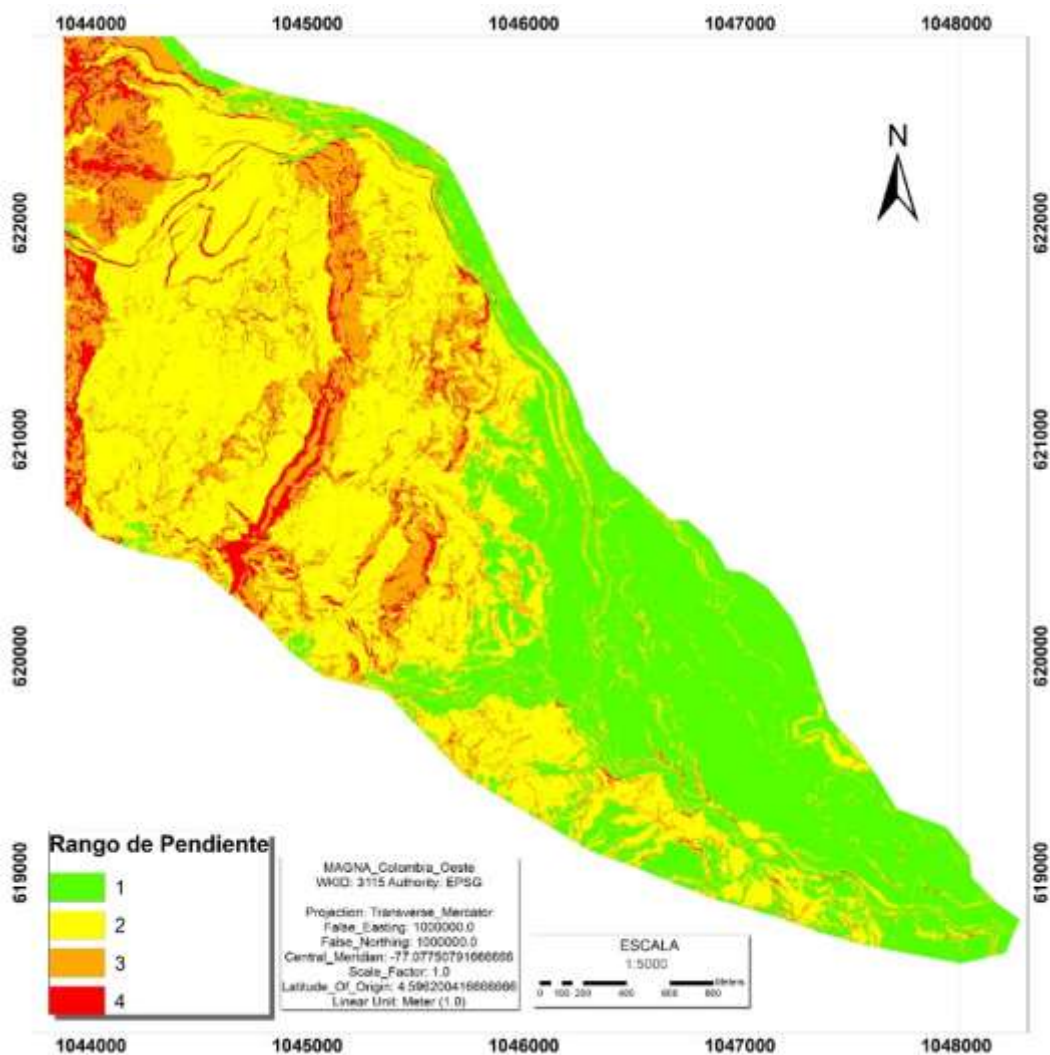
Tabla 23 Clasificación pendiente

RANGO INCLINACION (°)	DESCRIPCION	CLASIFICACION	AREA (km2)	AREA (%)
0-16	Baja	1	2.66	32%
16-31	Media	2	3.73	45%
31-45	Alta	3	1.48	18%
>45	Muy alta	4	0.41	5%

Se indica el rango 4 de calificación muy alta correspondiente a pendientes muy escarpadas con grados mayores a 45° y 5% del área de estudio, el rango de calificación alta se

presenta en un 18% con pendientes que varían entre 31° a 45° ; la calificación media correspondiente a lugares con pendientes comprendidas entre los valores de 16° y 31° y 45 % del área de estudio y la calificaciones Baja con un 32 % y pendiente que varía entre los 0° y 16° , siendo estos considerados como planos, suavemente inclinados e inclinados. En el siguiente mapa se aprecia la distribución de la Pendiente calificado según los rangos establecidos para el presente estudio.

Figura 22 Clasificación de pendientes según criterio de amenaza



Fuente: Elaboración propia a partir de software ArcMap

Geología

Las variables a tener en cuenta en la clasificación del componente geológico son:

Textura: La textura hace referencia la cantidad relativa de las diferentes partículas de suelo de tamaño menor de 2 mm de diámetro (arenas, limos y arcillas) (IDEAM 2012)

La textura, se encuentra relacionada con la velocidad de infiltración, retención y almacenamiento de humedad, aireación (difusión de gases), permeabilidad, intemperismo, volumen explorado por las raíces, manejo de suelos, fertilidad y nutrición mineral entre otras

Este mismo autor indica que el tipo de mineral de arcilla presente y el porcentaje, en proporción con el total de minerales afecta en forma considerable el comportamiento del suelo. Entre más plástico el material mayor su potencial de expansión y menor su resistencia al esfuerzo cortante, en consecuencia, hay una mayor susceptibilidad a movimientos en masa

Densidad de Fracturamiento:

La condición y estado de fracturamiento de las rocas se asocia particularmente, a las zonas de mayor deformación tectónica, que corresponde a las fallas geológicas y plegamientos de las rocas sedimentarias.

En el caso de las fallas geológicas es de esperar que la deformación y fracturamiento se intensifique con las tasas de desplazamiento de las fallas, como es el caso de la unidad del monzogranito de Mocoa y grupo orito las cuales se encuentran altamente afectado por la falla Mocoa-La tebaida y se considera con alto grado de fracturamiento

Tabla 24 Parámetros de valoración de unidades geológicas

CODIGO	NOMBRE	DESCRIPCIO	VALORACION
E2E3pei	Formación Pepino - Miembro Inferior	Capas de 1 a 10 m de espesor de conglomerado polimíctico, clastosoportado, con fragmentos redondeados de chert, cuarzo lechoso y lítico de sedimentitas de 0,5 a 20 cm de diámetro.	1
E2E3pem	Formación Pepino - Miembro Medio	Capas de 1 a 2 m de espesor de lodolitas de tonos grises y violetas con moteado gris, de comportamiento plástico hacia la base relacionado a un alto grado de meteorización.	3
E2E3pes	Formación Pepino - Miembro Superior	Conglomerados polimícticos clasto-soportados de clastos redondeados a subredondeados, con imbricación, de formas alargadas y tamaños de hasta 12 cm en el eje mayor.	1
E3N1or	Grupo Orito	Lodolitas macizas con predominio de grano muy fino, de colores grises, violetas y rojizos con moteado naranja y violeta, no fisibles, con alto grado de intemperismo.	3
Jmgmoc	Monzogranito Mocoa	Rocas ígneas intrusivas holocristalinas de afinidad félsica, textura fanerítica y tamaño de grano de medio a grueso. Presenta una textura homogénea.	1
K2E1rum	Formación Rumiyaco	Secuencia de lodolitas rojizas y violáceas dispuestas en capas de hasta 5 m de espesor, con intercalaciones de arenitas de grano fino moteadas de color gris y violeta.	3
Qda	Depósito antrópico	Corresponden a materiales heterogéneos formados a partir de la acción humana, los cuales son producto de acumulaciones por actividades extractivas, apilamiento de materiales con fines de protección	1

Qftr	Depósito fluviotorrencial subreciente	Depósitos clasto-soportados, con un porcentaje de matriz de 30% y de clastos de 70%. El tamaño de grano máximo en la matriz es arena muy gruesa, el mínimo arcilla y predomina la arena media.	2
Qfta	Depósito fluviotorrencial muy antiguo	El tamaño de los clastos varía de 5 cm a 1,5 m, poseen una selección baja, con una esfericidad media a alta y formas angulares a subangulares.	2
Qco	Depósito coluvial	Depósitos matriz-soportados de selección baja a muy baja. En cuanto a la matriz, se compone de tamaños entre arcilla y arena fina, predominando la arcilla.	3

Uso de Suelos: para la clasificación de esta categoría se tuvo en cuenta la siguiente tabla

Tabla 25 Parámetros de valoración de usos de suelo

FACTOR	CATEGORIA	VALORACION	CLASIFICACION
COBERTURA- USO DE SUELO	Área Urbana	1	BAJA
	Cultivos y reforestación	2	MEDIA
	Terrenos Áridos o sin vegetación	3	ALTA
	Bosques Maduros y Secundarios	1	BAJA

Fuente: autor

Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa

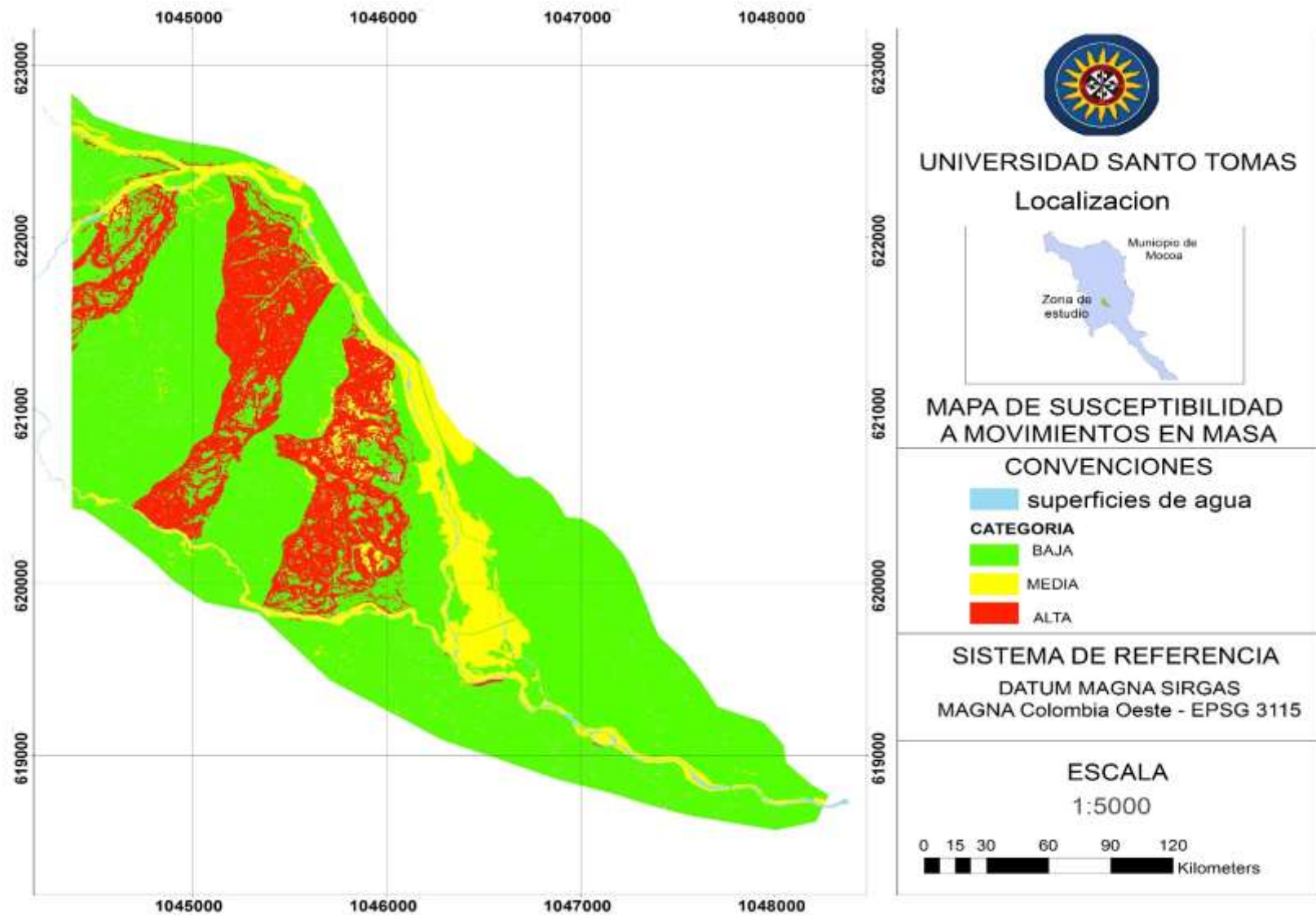


Figura 23 Mapa de Susceptibilidad a Movimientos en Masa

Convenciones del Mapa de Amenaza por Movimientos en Masa
Amenaza Alta

Geomorfológicamente corresponde a zonas de pendientes altas con presencia de afectaciones directas por movimientos en masa, se encuentra principalmente en la zona alta de la Q. Taruca, donde predominan pendientes superiores a 45° y están directamente afectadas por la actividad de la falla Mocoa-La tebaida, así como en las laderas denudadas asociadas al Rio Sangoyaco

Amenaza Media

Las zonas de amenaza media se caracterizan por la presencia de movimientos en masa antiguos, con predominancia de pendientes altas de 31 a 45° que generalmente se encuentran cerca de las zonas delimitadas como amenaza alta,, estas zonas se contemplan en función de posibles alteraciones o detonantes que modifiquen las condiciones generales del terreno, como intervenciones antrópicas sin estudios previos, vibraciones provenientes de sismos, aumento de presión de poros, o cualquier incremento de cargas por aumento de peso sobre el terreno

Amenaza Baja

Las zonas de amenaza baja corresponden a zonas con pendientes planas y no existe evidencia de la presencia de movimientos en masa antiguos, particularmente corresponde a zonas en protección.

Limitaciones

El análisis de amenaza por movimiento en masa corresponde a un escenario de amenaza normal correspondiente a la condición típica de la zona de estudio, sin tener en cuenta factores detonantes como sismos o lluvia debido a que en el análisis hidrológico se determinó el régimen monomodal que presenta la zona de estudio, que en términos generales quiere decir que el municipio no presenta una alta variación en términos de intensidad y que las lluvias son constantes durante todo el año. Por otro lado, en la búsqueda de información sísmica se pudo establecer dos factores importantes en este análisis 1. Eventos sísmicos con magnitudes iguales o superiores a 4 son susceptibles de ser detonantes de movimientos en masa 2. Eventos sísmicos con magnitudes inferiores a 4 pueden detonar movimientos en masa, no obstante, el área de afectación es marginal y muy cercana a unos pocos kilómetros del epicentro. Por lo anterior se define como magnitud crítica para detonantes de movimientos en masa a eventos sísmicos iguales o mayores a 4.0, pero al buscar registros de eventos sísmicos tomando como centro el municipio de Mocoa en el servicio geológico colombiano, no se encontraron presencia de eventos sísmicos dentro del área municipal Ahora bien, la Norma Sismoresistente Colombiana del 2010 (NSR-10) determina que Mocoa tiene un nivel de amenaza sísmica Alta, considerando la aceleración pico efectiva esperada para un periodo de retorno de 475 años es de $A_a=0,3\text{ g}$

Conclusiones y Recomendaciones

La susceptibilidad a movimientos en masa del área de estudio, es el resultado de una combinación de variables temáticas de Geomorfología, Geología, Hidrología, uso y cobertura de suelo que tuvieron como consecuencia el mapa de Susceptibilidad a movimientos de masa a escala 1:5000 que abarca las clasificaciones de amenaza alta, media y baja descritas anteriormente.

Geológicamente la zona de estudio presenta dos unidades litológicas, en términos generales, las unidades ígneas se presentan en la formación Monzogranito y la unidad sedimentaria está compuesta por las formaciones Rumiyaco, Pepino y Formación Orito lo cual quiere decir que la zona de estudio corresponde principalmente a un dominio sedimentario.

En la evaluación de los factores geomorfológicos es de resaltar que tienen una gran relevancia ya que son parámetros que cambian de forma lenta en el tiempo, debido a su poca dependencia a factores externos como el clima.

A partir de las geoformas fluviales se identifican diferentes formas de terrazas en ambos márgenes del cauce, resultantes de los procesos de erosión y deposición a lo largo del tiempo, las unidades T0 y T1 tienen niveles muy bajos razón por la cual son muy susceptibles a inundaciones constantes y otras unidades más altas como FTFpt0 y FTFpt1 se encuentran en constante modificación debido a la erosión causada por la corriente del cauce principal y canales producto de avenidas torrenciales pasadas, demostrando la gran influencia de la morfotectónica en la zona de estudio.

.Es importante tener en cuenta que las crecidas hidrológicas y las crecientes súbitas inciden sobre procesos de inestabilidad que pueden generar obstrucciones en el cauce que además de disminuir su capacidad hidráulica pueden llegar a ocasionar magnitudes de eventos

superiores, debido a la gran liberación de energía que ocurre en estos casos y los cuales no se tienen como consideración en el alcance de este documento.

Morfológicamente la zona de estudio se ve directamente afectada por elementos estructurales de gran importancia, como la falla La Tebaida-Mocoa que separa dos dominios geomorfológicos, uno con laderas largas y empinadas y otro de lomeríos con laderas cortas y suaves, particularmente esta falla también está relacionada con la inestabilidad de laderas, pues según el SGC (2018) en las unidades de roca identificadas en el área de las cuencas Taruca y Sangoyaco están constituidas por rocas intrusivas de calidad regular y mala lo que se convierte en zona de mayor concentración de depósitos torrenciales y coluviales.

En el factor detonante sísmico, se encontró que el Municipio se encuentra en una zona de sismicidad alta según la NSR-10, razón por la cual se determina el valor de aceleración de 0,3 g que es aplicable a todo el municipio de Mocoa por ende también a la zona de estudio que se encuentra en un nivel de amenaza alta y puede verse afectada por sismos de magnitud mayor a 6, razón por la cual no se incluye en la modelación.

Los mapas de amenaza resultantes de este estudio se contemplan como un insumo o elemento respecto a la planificación y el ordenamiento territorial y no pretende limitar la intervención en los terrenos siempre y cuando se realicen bajo criterios expertos y análisis detallados que permitan visualizar mejor las condiciones reales de la estabilidad del terreno.

Referencias

- Colombia, Ley 388 de 1997, Por la cual se modifica la Ley 9ª de 1989, y la Ley 3ª de 1991 y se dictan otras disposiciones. (Julio 18 de 1997) 18 Jul, 1997
- Colombia, Ley 1523 de 2012, Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. (Diario Oficial No. 48411, abril 24 de 2012) 24 Abr, 2012
- Colombia, Decreto 1807 de 2014, Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones. 19 Sep, 2014 Núm. 49279.
- Consorcio Evaluación de Riesgos Naturales - América Latina - Consultores en Riesgos y Desastres, CAPRA, ERN, ITEC, & CIMNE. (2017). Tomo I. metodología de modelación probabilista de riesgos naturales; informe técnico ERN-capra-T1-7 módulos de software. (). Colombia España México: CAPRA, ITEC, CIMNE,
- Decreto número 1082 de 2015, por medio del cual se expide el decreto único reglamentario del sector administrativo de planeación nacional, Decreto U.S.C. (2015). Retrieved from <http://app.vlex.com.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/#CO>

- Departamento Nacional de Planeación. (2017, 31 de octubre). Plan para la reconstrucción del municipio de Mocoa, 2017-2022 (Documento CONPES 3904). Bogotá D.C., Colombia: DNP
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2019). IGAC 80 años. Recuperado de <https://www.igac.gov.co/es/contenido/igac-80-anos>
- Servicio Geológico Colombiano (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. recuperado de: [https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2017\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2017).pdf)
- Consejo Departamental Gestión del Riesgo de Desastres del Putumayo. (2018). Plan de contingencia departamental para temporada de lluvias. Recuperado de: https://www.putumayo.gov.co/images/documentos/gestion_Rdesastres/PLAN_CONTINGENCIAS_DEPTAL_TEMPORADA_LLUVIAS%202018.pdf
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (2015). Plan nacional de gestión del riesgo de desastres. Recuperado de <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/PNGRD-2015-2025->
- Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. (1998). Navegando entre brumas; la aplicación de los sistemas de información geográfica al análisis de riesgo en América Latina. (). Lima (Perú): La Red. Retrieved from

http://www.desenredando.org/public/libros/1998/neb/neb_cap02-LA_nov-09-2002.pdf

- Universidad de los Andes. (2017). Metodología de evaluación probabilista de riesgos naturales. Recuperado de:
<https://ecapra.org/es/documentos/metodolog%C3%ADa-de-evaluaci%C3%B3n-probabilista-de-riesgos-naturales>
- Servicio Geológico Colombiano (2018). valuación de la amenaza por movimientos en masa en el área urbana, periurbana y de expansión del municipio de Mocoa –putumayo escala 1:5.000. recuperado de:
[https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM\(2018\).pdf](https://www2.sgc.gov.co/Archivos/GM(2018).pdf)
- IDEAM (2017). Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Inundación OMM No. 385 de 2012. Recuperado de:
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/023774.html>

