



**Evaluación de la amenaza por inundación del río Mocoa y río
Caquetá en el sector Puerto Limón, Putumayo (Colombia)**

Mirla Alexandra López Jamioy

11792129736

Universidad Antonio Nariño

Programa Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá D.C, Colombia

2023

Evaluación de la amenaza por inundación del río Mocoa y río Caquetá en el sector Puerto Limón, Putumayo (Colombia)

Mirla Alexandra López Jamioy

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en Sistemas de Información Geográfica.

Director:

Andrés Felipe Carbajal Vanegas, Dr

Universidad Antonio Nariño

Programa Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá D.C, Colombia

2023

Contenido

Resumen.....	9
Abstract.....	10
1. Introducción.....	11
2. Estado del conocimiento.....	13
3. Objetivos.....	16
3.1 Objetivo General	16
3.2 Objetivos específicos.....	16
4. Marco teórico	17
4.1 Inundaciones.....	17
4.1.1 Patrón morfológico de los cauces en planta	17
4.1.2 Reconocimiento de inundaciones a partir de llanuras de inundación.....	19
4.2 Cartografía social de inundaciones	20
4.3 Conceptos en la gestión del riesgo	21
4.3.1 Riesgo	21
4.3.2 Amenaza	21
4.3.3 Vulnerabilidad	21
4.3.4 Exposición	21
4.3.5 Áreas con condición de amenaza y con condición de riesgo (Dec 1807/2014)	22
4.4 Teledetección	22
4.5 Índices morfométricos.....	23
6. Metodología.....	25
6.1 Área de estudio.....	25
6.2 Área de drenaje río Mocoa y río Caquetá	29
6.3 Susceptibilidad a inundaciones	29
6.3.1 Análisis multitemporal del cauce activo.....	29
6.3.2 Geología y geomorfología.....	30
6.3.3 Aplicación del índice topográfico de humedad	31
6.3.4 Zonificación de áreas susceptibles a inundación.....	32
6.4 Cartografía social	32
6.5 Zonificación de amenaza por inundación.....	32
7. Resultados y discusión.....	34
7.1 Área de drenaje río Mocoa y río Caquetá	34
7.2 Susceptibilidad a inundaciones	38
7.2.1 Análisis multitemporal del cauce activo.....	38

7.2.2 Geología y geomorfología	44
7.2.3 Aplicación del índice topográfico de humedad	47
7.2.4 Susceptibilidad a inundaciones.....	49
7.3 Cartografía social	50
7.4 Zonificación de amenaza por inundación.....	53
8. Conclusiones.....	56
9. Bibliografía.....	59

Lista de Figuras

Figura 1. Patrones morfológicos de cauces basados en sinuosidad y grado de subdivisión de canales (Abel Basile, 2018).	17
Figura 2. Relación de indicadores naturales con diferentes tiempos de retorno de inundación (MINAMBIENTE, 2018).	20
Figura 3. Generación del ITH y su posterior clasificación (Roa-Lobo & Kamp, 2012).	24
Figura 4. Metodología general.....	25
Figura 5. Ubicación del área de estudio.....	26
Figura 6. Foto aérea del centro poblado Puerto Limón, Putumayo.	27
Figura 7. Orillas expuestas a socavación lateral e inundación: Izquierda orilla del río Mocoa y derecha orilla del río Caquetá.	27
Figura 8. Cobertura de la tierra en el sector Puerto Limón 2022.....	28
Figura 9. Fotografías captadas con drone mini para el reconocimiento de coberturas.	28
Figura 10. Distribución de las elevaciones en las áreas de drenaje y Subzona hidrológica.	35
Figura 11. Cobertura de la tierra del año 2018, Corine Land Cover nivel 1.	36
Figura 12. Distribución de las estaciones IDEAM utilizadas para el análisis de precipitación.	37
Figura 13. Distribución espacial de las precipitaciones máximas diarias multianuales.	37
Figura 14. Precipitación promedio mensual multianual.	38
Figura 15. Imagen satelital Google Earth año 1969.	40
Figura 16. Imagen satelital Google Earth año 1985.	40
Figura 17. Aerofoto IGAC año 1995.	41
Figura 18. Imagen satelital Google Earth año 2004.	41
Figura 19. Imagen Bing Satélite año 2017.....	42
Figura 20. Imagen satelital ESRI año 2020.	42
Figura 21. Imagen satelital Google año 2022.	43
Figura 22. Frecuencia del trazado de los ríos Mocoa y Caquetá.	44
Figura 23. Mapa Geológico.	46
Figura 24. Mapa Geomorfológico.....	47

Figura 25. Zonificación de la susceptibilidad a inundaciones a partir del índice ITH.	48
Figura 26. Mapa de susceptibilidad a inundación por el río Mocoa y río Caquetá.	49
Figura 27. Registro fotográfico del primer taller de cartografía social realizado en la comunidad de Puerto Limón.	51
Figura 28. Mapa en el que se desarrolló la cartografía social.	52
Figura 29. Zonificación de amenaza por inundación del río Mocoa y río Caquetá.	55

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de frecuencias.	30
Tabla 2. Clasificación ITH.....	31
Tabla 3. Fuente de imágenes históricas del área de estudio.	38
Tabla 4. Resumen información recolectada con cartografía social.	52
Tabla 6. Clasificación de la amenaza relativa por inundación de los ríos Mocoa y río Caquetá.	54

.....

Resumen

El objetivo general del estudio es realizar la evaluación de la amenaza por inundaciones del río Mocoa y río Caquetá en el sector Puerto Limón, Putumayo (Colombia). Teniendo en cuenta que la zona no cuenta con información detallada y muy poca información escala básica que permita describir la dinámica de la amenaza del río Mocoa y del río Caquetá al ser un factor amenazante en la sostenibilidad del centro poblado Puerto Limón. Este estudio aplico una metodología de zonificación de amenaza por inundación basada en sistemas de información geográfico. La información recopilada permitió realizar un diagnóstico biofísico básico, un análisis de susceptibilidad y cartografía social, la cual fue procesada con sistemas de información geográfico. Finalmente se obtuvo un mapa de zonificación de amenaza tanto para el río Mocoa como para el río Caquetá. Adicionalmente se comprobó que el centro poblado Puerto Limón se encuentra en amenaza media de inundación generada tanto por el río Mocoa como por el río Caquetá.

Palabras clave: inundación, amenaza, exposición, desborde, socavación, imágenes satelitales.

Abstract

The general objective of the study is to assess the threat of flooding in the Mocoa River and Caquetá River in the Puerto Limón sector, Putumayo (Colombia). Taking into account that the area does not have detailed information and very little information on a basic scale that allows describing the dynamics of the threat of the Mocoa River and the Caquetá River as it is a threatening factor in the sustainability of the Puerto Limón populated center. This study applied a flood hazard zoning methodology based on geographic information systems. The information collected allowed a basic biophysical diagnosis, a susceptibility analysis and social mapping, which was processed with geographic information systems. Finally, a threat zoning map was obtained for both the Mocoa river and the Caquetá river. Additionally, it was verified that the town of Puerto Limón is in medium threat of flooding caused by both the Mocoa river and the Caquetá river.

Keywords: flood, threat, exposure, overflow, scour, satellite images.

1. Introducción

La relación hombre-naturaleza ha llevado a determinar las causas y consecuencias de los cambios que se han presentado en el medio ambiente, lo anterior se ve reflejado en los desastres naturales que día a día ocurren en diferentes partes del planeta.(Tsyganskaya et al., 2019) Un buen ejemplo sobre el deterioro y las transformaciones del territorio son las inundaciones, las cuales se ven marcadas con más intensidad en los meses de mayo a agosto, ya que en esta época es donde se presenta mayor precipitación ocasionando el aumento del nivel del agua de las fuentes hídricas principalmente del río Caquetá y Mocoa, generando desbordamientos y con ello afectaciones, humanas, económicas, materiales y ambientales.(Cristo García & Cruz Rodríguez, 2019)

Puerto Limón, Putumayo cada año se ve amenazado por diferentes inundaciones y avenidas torrenciales, causadas por los ríos Mocoa y Caquetá, esto ha hecho que algunas familias se vean en la obligación de desplazarse de la zona rural hacia el casco urbano, muchos de estos sucesos se han intensificado por causas antrópicas, esta zona se encuentra habitada por comunidades Indígenas, los cuales se aferran al territorio ya que para ellos este no es solo un pedazo de tierra, sino la vida misma, es donde siembran su alimento diario, se encuentran en armonía con los espíritus de la flora, fauna, hidrografía y de los mismos antepasados. Además de las comunidades indígenas en esta zona habitan comunidad afro y colonos.(Vásquez Santamaría et al., 2018)

Para realizar una investigación ajustada a la realidad de la zona, se hizo una revisión del estado del conocimiento, cuyo fin consistió en recopilar información para lograr adaptarla al estudio, puesto que esta zona urbana de Puerto Limón carece de información georreferenciada o si existe no está disponible, debido a esto, en los últimos años se hace necesario de imágenes y datos capturados desde el espacio por medio de la variedad de satélites disponibles de manera comercial o de acceso libre.

Este tipo de estudios permiten mostrar el comportamiento de un cuerpo de agua a lo largo de varios años, con lo cual se podría argumentar planes y programas que apoyen a la gestión del riesgo por inundación. De esta forma y complementando con estudios hidrológicos y meteorológicos que abarquen los periodos de retorno por lluvias torrenciales, se podría evitar catástrofes naturales causadas por estos fenómenos.

Esta investigación tiene como objetivo realizar la evaluación de la amenaza por inundaciones del río Mocoa y Caquetá en el sector de Puerto Limón Municipio de Mocoa departamento del Putumayo.

2. Estado del conocimiento

En cuanto al análisis multitemporal y zonas de inundación respecta, diversos profesionales y distintas instituciones forman parte del grupo que se han preocupado por abordar temas relacionados. Tales son los casos siguientes:

- Evaluación de amenaza y vulnerabilidad por desbordamiento del río Cusiana en la zona urbana de Mani Casanare, autores (Acuña & Ordoñez, 2018), el proyecto estaba enfocado en determinar los niveles de amenaza que se presentaban y como se podían evitar, para ello lo dividieron en tres partes; primero identificando el lugar afectado por medio de fotografías aéreas observando las huellas que ha dejado el río y así determinar su área de inundación; segundo: una vez identificado se dirigen directamente a la comunidad afectada a realizar unas encuestas donde se determine estadísticamente su vulnerabilidad en diferentes entornos y tercero: por medio de modelaciones teniendo en cuenta los caudales pico de la zona, se hace una estimación de cuáles son los caudales que afectarían notoriamente la población y así producir la cartografía de zonificación de amenaza por inundación.
- Modelamiento de zonas de inundación para el sector comprendido entre los municipios de Corrales – Paz del río a lo largo del río Chicamocha, departamento de Boyacá, autores (Mora & Ochoa, 2016). Este trabajo fue enfocado en dos aspectos, el social dirigido a los habitantes del municipio de Corrales a Paz del Río, el otro es la parte técnico – científica, en el ámbito de procesamiento de datos geospaciales y ambientales para la producción de resultados válidos, logrando simular satisfactoriamente el comportamiento hidrológico del río Chicamocha y prever su comportamiento en periodos de retorno de 5, 20, 50 y 100 años. De igual forma se suministraron datos e información validada de acuerdo con el actual estado del arte de la modelación hidráulica para el área de estudio de gran utilidad para las autoridades municipales y ambientales.

- Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, Trujillo-Venezuela, autores (José & Ulrich, 2012) El objetivo del este trabajo era determinar la localización óptima del Hospital del Seguro Social del municipio Trujillo, estado Trujillo-Venezuela, por medio de la zonificación de amenaza por inundación de detritos en el área determinada a partir de los niveles de concentración del escurrimiento superficial, calculados principalmente por el índice topográfico de humedad (ITH), e información asociada, que luego fue integrada a través de un análisis booleano estándar. Como resultado y dado el grado de detalle del trabajo, la zonificación de amenaza por inundación de detritos se determinó a partir de los niveles de concentración del escurrimiento superficial, calculados principalmente por el índice topográfico de humedad (ITH). La alta información del ITH y la manipulación de esta información bajo un sistema SIG, permitió, la generación de nuevas capas de información, asociadas a la susceptibilidad a inundaciones como la traza de los patrones de ‘muy alta’ y ‘alta’ concentración del escurrimiento, de los cuales se establece distancias que se ajusten a los requerimientos discretos de localización para este trabajo. Obteniendo 10 áreas consideradas potencialmente aptas para la localización del nuevo hospital, de las cuales solo 3 cumplen con el total de los requerimientos. Todas estas áreas se ubican adyacentes y en paralelo al eje vial Valera-Trujillo.
- En el trabajo elaborado por (Hernandez, 2017), el cual tuvo como objetivo principal evaluar los cambios ocurridos en la cobertura del suelo mediante un análisis multitemporal, en la zona de inundación de la represa Hidro Sogamoso; ubicada en el departamento de Santander, utilizando dos imágenes satelitales del programa LANDSAT, una de ellas escogida antes de la construcción de la represa, año 2001, Landsat 5 (sensor TM) y una después de la construcción de la represa, del año 2015 Landsat 8 (sensor OLI). El resultado de dicha investigación presentó que el impacto generado por la construcción de está represa obliga a replantear el ordenamiento del municipio, y a generar nuevos proyectos que solucionen problemas generados directamente por el embalse.

- A nivel departamental también se han realizado estudios multitemporales, es el caso del proyecto de grado elaborado por (Gomez, 2019), en donde se analizó la pérdida de cobertura vegetal entre los años 2013 al 2018 con el uso de imágenes satelitales, el cual tuvo como resultado cambios en la cobertura de Bosque denso, encontrando una pérdida del 4.6%, equivalentes a 261,38 ha. Adicionalmente, se puede ver el avance de la colonización del área por parte de las comunidades, puesto que las zonas urbanizadas aumentaron 0.58%. Así mismo, los pastos limpios y los pastos arbolados tuvieron un aumento significativo del 12.2% y 7,9% respectivamente, es importante señalar que, en las imágenes satelitales las coberturas de pastos se desarrollan en zonas aledañas a las viviendas con el propósito de fomentar la agricultura.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Realizar la evaluación de la amenaza por inundaciones del río Mocoa y río Caquetá en el sector Puerto Limón, Putumayo (Colombia).

3.2 Objetivos específicos

- Generar un diagnóstico biofísico del área de drenaje del río Mocoa y río Caquetá que puede influir en el sector Puerto Limón, Putumayo.
- Efectuar una zonificación de susceptibilidad a inundaciones a partir de un índice morfométrico para un tramo del río Mocoa y río Caquetá.
- Realizar una gestión de conocimiento de los eventos de inundación históricos a partir de cartografía social.
- Proponer una zonificación de amenaza por inundación del río Mocoa y río Caquetá en el tramo en el que se ubica el centro poblado Puerto Limón.

4. Marco teórico

4.1 Inundaciones

4.1.1 Patrón morfológico de los cauces en planta

De acuerdo a Leopold y Wolman (1957) citados por (Abel Basile, 2018), acorde al patrón morfológico los cauces se pueden definir en tres tipos básicos de ríos (o tramos de río): meándricos, rectos y entrelazados (trenzados). En la actualidad se conoce un espectro más amplio de tipologías, incluyendo diferentes combinaciones de los tres originales (patrones transicionales) y una variedad de cauces anastomosados (Abel Basile, 2018) (Figura 1).

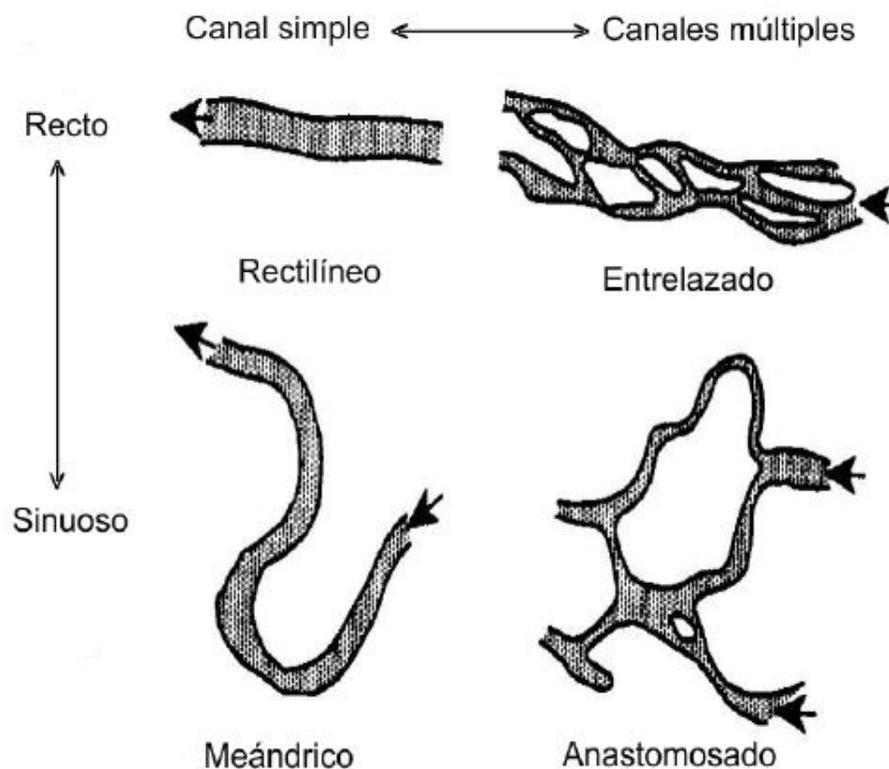


Figura 1. Patrones morfológicos de cauces basados en sinuosidad y grado de subdivisión de canales (Abel Basile, 2018).

- **Cauces rectos:** estos tramos rectos pueden formarse bajo ciertas condiciones de pendiente y tipo de sedimentos del cauce, o en tramos rectificadas artificialmente.

Por tal motivo, en la naturaleza es difícil encontrar ríos rectos de considerable longitud. Generalmente, aun cuando las márgenes conformen un cauce de tipo rectilíneo las zonas de máximas profundidades a lo largo del curso pueden mostrar distintos grados de sinuosidad. De igual forma, en zonas de pendientes elevadas y sedimentos gruesos se pueden observar trayectos rectos con configuración de hoyas y rápidos, tal patrón morfológico configura un sistema de expansiones y contracciones verticales del flujo (Abel Basile, 2018).

- **Cauces meándricos:** este presenta una configuración planimétrica sinuosa, formada por una serie de recorridos curvos unidos mediante tramos rectos relativamente cortos. En los tramos curvos la fuerza centrífuga origina una pendiente transversal de la superficie del agua y un flujo helicoidal. Este flujo helicoidal, cuya magnitud es aproximadamente 10-15 % de la velocidad media longitudinal, en la parte superior fluye hacia la margen cóncava (zona externa de la curva) y en la parte inferior (lecho) fluye hacia la margen convexa (zona interna de la curva). La velocidad media longitudinal es máxima en la zona externa de la curva, donde se verifica erosión de margen y se desarrollan hoyas profundas en el lecho, mientras en la zona interna se originan barras puntuales por deposición de sedimentos (Abel Basile, 2018).
- **Cauces entrelazados:** este tipo de cauce presentan una forma de múltiples brazos, denominados anabranches, separados por barras, son anchos, las márgenes no se hallan bien definidas y son inestables. En periodos de caudales bajos se observan dos o más brazos que se entrecruzan, dándole una forma de aspecto trenzado. En crecidas, para condiciones de márgenes llenas, el agua puede sumergir las barras y el cauce adquiere un aspecto de canal único. Los cauces entrelazados muestran una evolución muy dinámica (Abel Basile, 2018).
- **Cauces anastomosados:** en estos cauces se presentan aspectos similares a los entrelazados diferenciándose por: i) múltiples canales separados por islas, ii) existencia de grandes islas con vegetación (no sumergidas en crecidas para condiciones de márgenes llenas), iii) amplia diversidad de tipos de barras y bancos, iv) pendientes más bajas (cerca del nivel de base) y sedimentos más finos. Para este tipo de cauces la vegetación juega un rol importante como elemento de fijación del

contorno. En efecto, las características de cohesión del sedimento de margen en conjunción con el efecto de las raíces que desarrolla la vegetación, les confieren a las márgenes una mayor resistencia a la erosión y consecuentemente una baja celeridad de migración lateral.

4.1.2 Reconocimiento de inundaciones a partir de llanuras de inundación

En muchos casos de modelación hidrológica e hidráulica no se cuenta con información limnigráfica o limnimétrica para realizar la calibración de los datos y la generación de las diferentes manchas de inundación (Martín, 2003). Por lo tanto, el reconocimiento de la morfometría del terreno (bancas llenas) y el comportamiento de la vegetación son indicadores de gran utilidad en zonas donde las condiciones de información no permiten tener una total certeza en el ajuste de los datos (Martín, 2003; MINAMBIENTE, 2018).

Las llanuras de inundación son las áreas próximas al cauce principal del río que frecuentemente resultan inundadas. El caso más característico son los ríos de poca pendiente con morfología meandriforme (ríos aluviales de llanura), en un corte transversal puede aparecer plano, ligeramente cóncavo o ligeramente convexo, con diferentes terrazas formadas por la depositación de material de arrastre (Martín, 2003).

En la Figura (2) se observa que la vegetación riparia como el flujo base son alimentados por los niveles freáticos (A). Crecientes de diferente magnitud y frecuencia mantienen la diversidad de vegetación riparia y el hábitat acuático: pequeñas crecidas que transportan sedimentos finos mantienen la alta productividad bentónica y posibilitan hábitat para peces (B); crecientes intermedias inundan las terrazas bajas permitiendo el establecimiento de especies pioneras, además de acumular materia orgánica dentro del cauce ayudando a mantener su forma (C); las grandes crecidas inundan terrazas aluviales permitiendo el establecimiento de especies de sucesión (D); inundaciones raras arrastran material que puede permitir el establecimiento de hábitat para diversas especies (E) (MINAMBIENTE, 2018).

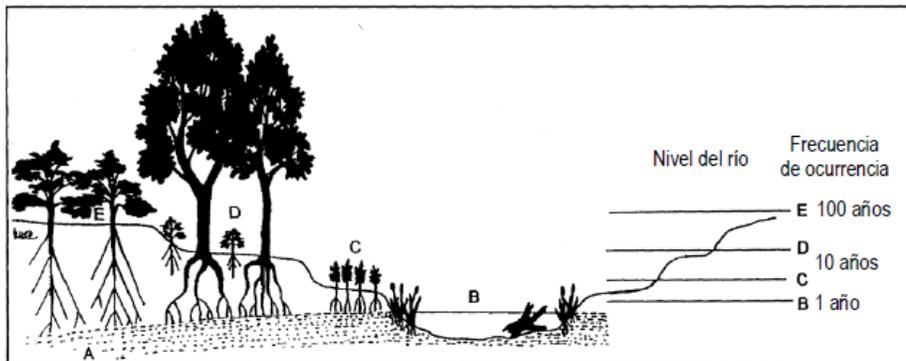


Figura 2. Relación de indicadores naturales con diferentes tiempos de retorno de inundación (MINAMBIENTE, 2018).

4.2 Cartografía social de inundaciones

La cartografía social es considerada como una iniciativa metodológica que permite ilustrar una aproximación de una concepción sobre determinado territorio en permanente cambio, a la vez que permite fortalecer el sentido de pertenencia a partir de representaciones gráficas de la realidad existente en la comunidad (Betancurth et al., 2020).

Además, en la cartografía social se asume el mapa como una representación gráfica de aquellas problemáticas presentes en una comunidad se concibe como un medio, no como un fin—, en el cual se resume la realidad existente y las relaciones territoriales a través de signos, símbolos y palabras que se identifican por medio de convenciones y que tienen significados compartidos y proyecciones colectivas (Betancurth et al., 2020).

Para este proceso es necesario tener en cuenta las características individuales, sociales y políticas de los colectivos pues esto determinará la manera en que se llevará a cabo la cartografía con el fin de garantizar todas las condiciones necesarias para que los participantes puedan reflexionar y exponer las percepciones, representaciones e interpretaciones de su realidad. Por lo anterior, la cartografía social se sitúa en el enfoque comprensivo-crítico que contribuye a develar aquellos aspectos simbólicos que les permite a los sujetos interpretar su mundo y transformarlo (Betancurth et al., 2020).

Por lo anterior, para reconocer la cartografía social como una opción metodológica es necesario partir desde una perspectiva territorial que permita el fortalecimiento comunitario

desde la creación de autorrepresentaciones, autorreconocimiento y análisis de la información (Betancurth et al., 2020).

4.3 Conceptos en la gestión del riesgo

4.3.1 Riesgo

El riesgo es el resultado de la interacción de 3 factores, la vulnerabilidad, la exposición y la amenaza (IPCC, 2014). En este estudio se entiende como el impacto potencial que una amenaza puede generar en un sistema (comunidad, infraestructura etc.)

4.3.2 Amenaza

De acuerdo al IPCC (2014) una amenaza se define como el “acaecimiento potencial de un suceso o tendencia físico de origen natural o humano, o un impacto físico, que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos sobre la salud, así como daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, prestaciones de servicios, ecosistemas y recursos ambientales”. En este documento se entiende como amenaza a un suceso físico relacionado con el clima.

4.3.3 Vulnerabilidad

En este documento se comprende la vulnerabilidad como la relación entre la sensibilidad, frente a un daño, de un sistema (infraestructura, personas etc.) y la falta de capacidad de respuesta y adaptación (IPCC, 2014).

4.3.4 Exposición

De acuerdo al IPCC (2014) la exposición se refiere a “la presencia de personas; medios de subsistencia; especies o ecosistemas; funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructura; o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente”.

4.3.5 Áreas con condición de amenaza y con condición de riesgo (Dec 1807/2014)

Las áreas con condición de amenaza son áreas zonificadas como de amenaza alta y media en las que se establezca la necesidad de clasificarlas como suelo urbano, de expansión, suburbano o centro poblado para permitir su desarrollo (MADS, 2014).

Las áreas con condición de riesgo son clasificadas de amenaza alta urbanizadas, ocupadas o edificadas y/o con elementos expuestos (viviendas, vías, equipamientos e infraestructura de servicios públicos); o de amenaza media en donde en la revisión o expedición del POT se proponga cambio de densidad o cambio en usos del suelo que puedan generar o incrementar el riesgo en la zona (MADS, 2014).

4.4 Teledetección

También llamada percepción remota ('Remote Sensing') es una disciplina científica que integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías utilizadas para la observación, el análisis y la interpretación de fenómenos terrestres y atmosféricos. Sus principales fuentes de información son las medidas y las imágenes obtenidas con la ayuda de plataformas aéreas y espaciales. Como su nombre indica, la teledetección supone la adquisición de información a distancia, sin contacto directo con el objeto estudiado (López, 2020).

Los actuales sistemas de teledetección, a diferencia de los existentes en los inicios del desarrollo de estas tecnologías, han experimentado un acelerado desarrollo, especialmente en la última década, siendo una tecnología imprescindible en el seguimiento de múltiples procesos que afectan a la superficie terrestre y atmósfera circundante, de gran impacto, especialmente, para nuestro planeta, como puede ser el cambio climático, la deforestación, la desertificación, etc (López, 2020).

Los sistemas de teledetección, principalmente aquellos ubicados sobre satélites, proporcionan una visión repetitiva y sinóptica de la Tierra de inestimable valor en su monitorización y análisis del efecto de las actividades humanas sobre la misma como puede ser la evaluación y monitorización del entorno (crecimiento urbano, residuos peligrosos), detección y monitorización de cambios globales (reducción del ozono atmosférico,

deforestación, calentamiento global), exploración, tanto de recursos no- renovables (minerales, petróleo, gas natural) como de recursos naturales renovables (océanos, bosques, terrenos), meteorología (predicción meteorológica, procesos dinámicos atmosféricos), mapeado (topografía, utilización de tierras, ingeniería civil), etc (López, 2020).

4.5 Índices morfométricos

Este índice está relacionado con la humedad edáfica y refleja la tendencia del suelo a la generación de escorrentía, debido a que los perfiles con mayor humedad son más proclives a saturarse, por lo que la precipitación caída sobre ellos puede convertirse más fácilmente en escorrentía (Roa-Lobo & Kamp, 2012a). Así, cuando más elevado es el valor de este índice, mayor humedad debe presentar la celda en función de su configuración topográfica, la cual es extraída de un Modelo de Elevación Digital (MED) (Roa-Lobo & Kamp, 2012b).

La viabilidad de asociar procesos geomorfológicos con métodos como el Índice Topográfico de Humedad (ITH) ha sido demostrada en diferentes trabajos (Roa-Lobo & Kamp, 2012b). Maneta y Schnabel (2003) citado por (Roa-Lobo & Kamp, 2012)), plantea que la variabilidad espacial y temporal de la distribución de la humedad en el suelo es producto de una cantidad de factores que lo determinan y que se influencia mutuamente, pero agrega que autores como Beven y Kirkby (1979), Florinsky et al. (2002); Qiu et al. (2001) y Western et al. (1999), coinciden en considerar el relieve como el factor determinante de los patrones de humedad del suelo, dando lugar al desarrollo de índices o métodos que pone en relación las formas del terreno como propiedades del suelo (Roa-Lobo & Kamp, 2012b). De allí que, el ITH sea un factor fundamental en el modelado de procesos geomórficos por contribuir a su cuantificación, considerando igualmente que el análisis cuantitativo de la geomorfología no solo describe las características topográficas sino revela también procesos geomorfológicos (Dong et al., 2008 citado por (Roa-Lobo & Kamp, 2012)).

El ITH combina la contribución al escurrimiento de un área local drenada y de pendiente de la misma, y es comúnmente usado para cuantificar el control topográfico sobre los procesos hidrológicos y está definido como (Sorensen et al., 2005 citado por (Roa-Lobo & Kamp, 2012):

$$ITH = \ln \left(\frac{af}{\tan \beta} \right)$$

Ec. 1

Donde:

af = Área local drenada para un punto de cálculo

$\tan \beta$ = Pendiente direccional de la celda de interés (y de las 8 vecinas en caso de utilizar un algoritmo D(8))

Este modelo expresa parcialmente el volumen relativo y la cantidad de movimiento de flujo que pasará por cada punto del terreno (Roa-Lobo & Kamp, 2012b). A mayor área drenada y menor pendiente se incrementa la concentración y saturación hídrica en los suelos, áreas con valores altos de ITH son zonas de alta concentración de escurrimiento y se la puede asociar a la alta probabilidad de ser inundado (Alcántara- Ayala, 2000 citado por (Roa-Lobo & Kamp, 2012). El proceso grafico se presenta en la Figura (3).

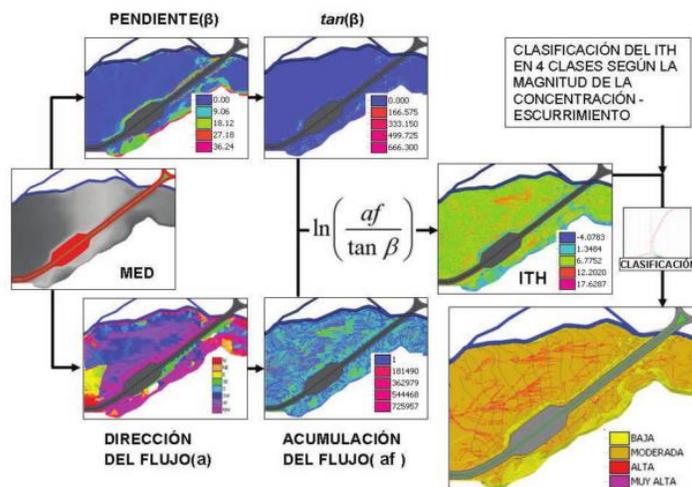


Figura 3. Generación del ITH y su posterior clasificación (Roa-Lobo & Kamp, 2012).

6. Metodología

La metodología tiene como punto de partida el estudio de doctorado realizado por la investigadora (Rodríguez-Gaviria, 2016) denominado “Diseño metodológico para la evaluación del riesgo por inundación a nivel local con información escasa”, en la cual se plantea una metodología para evaluar el riesgo por inundaciones a nivel local con información escasa. Sin embargo, la metodología fue adaptada a la disponibilidad de información de la zona de estudio y limitada a la evaluación de la amenaza (Figura 4).

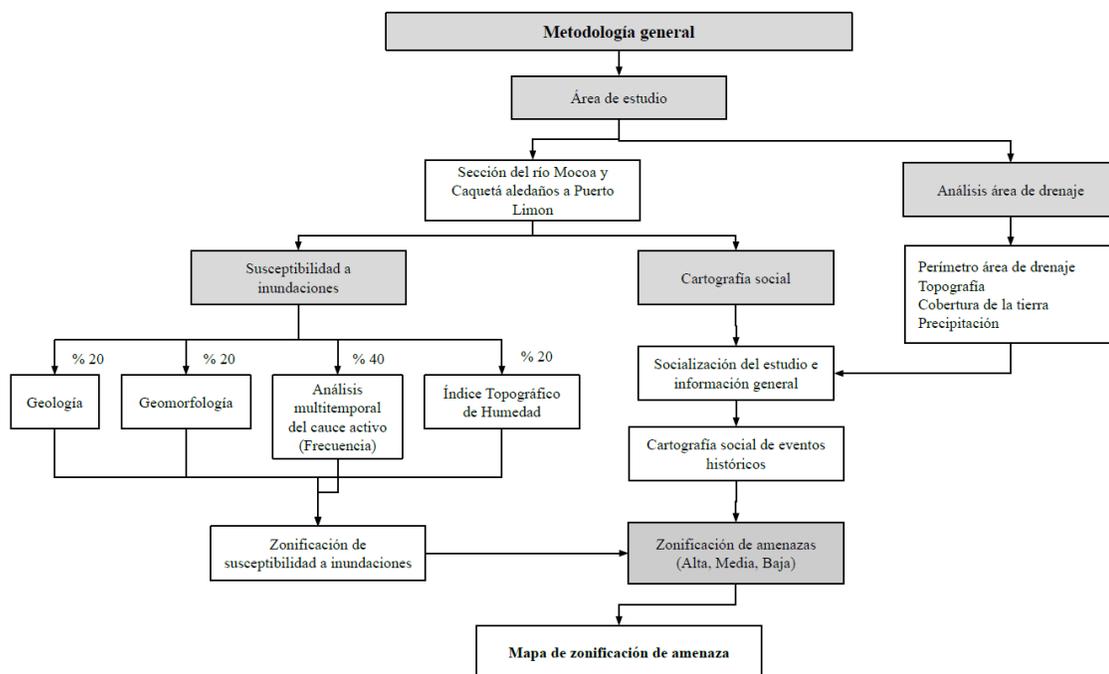


Figura 4. Metodología general.

6.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra localizada en la vereda Puerto Limón, municipio Mocoa, departamento del Putumayo. El estudio se enfocó principalmente en el centro poblado Puerto Limón, por el cual pasa el río Mocoa y el río Caquetá. Aproximadamente el estudio cubre un tramo de 3 km del río Mocoa y de 5 km del río Caquetá. La Subzona hidrográfica

Alto Caquetá se localiza en su mayor proporción en el departamento del Cauca y en menor proporción en el departamento del Putumayo (Figura 5).

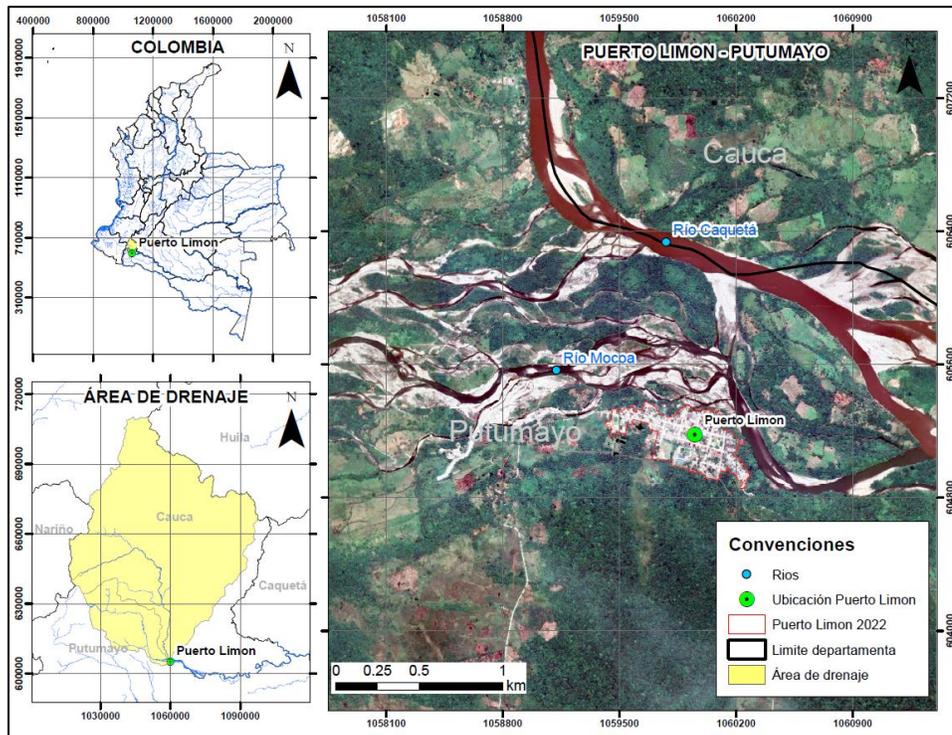


Figura 5. Ubicación del área de estudio.

El centro poblado Puerto Limón se encuentra ubicado en la orilla del río Mocoa (700 m) y en la orilla del río Caquetá (400 m), lo cual hace de esta zona un lugar altamente expuesto a inundaciones (Figura 6)(Figura 7).



Figura 6. Foto aérea del centro poblado Puerto Limón, Putumayo.



Figura 7. Orillas expuestas a socavación lateral e inundación: Izquierda orilla del río Mocoa y derecha orilla del río Caquetá.

Alrededor del centro poblado se han desarrollado diferentes actividades de aprovechamiento agropecuario, lo cual ha incentivado la expansión de estructuras y aumentando el número de viviendas y actividades económicas altamente expuestas. Las actividades agropecuarias no solo se desarrollaron en las llanuras de inundación a lado y lado de los ríos, sino también en las grandes islas que se forman en las partes internas de los ríos, las cuales han modificado sus dimensiones en el tiempo (Figura 8)(Figura 9). A partir de imágenes satelitales se puede notar los cambios en los cuerpos de agua, cobertura de pastos y cultivos, cobertura forestal, desarrollo urbano, formación de islas y barras de arena.

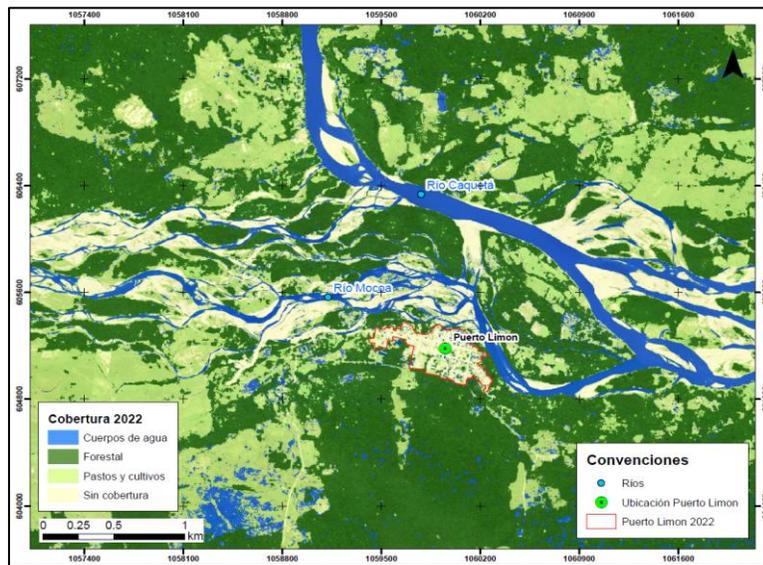


Figura 8. Cobertura de la tierra en el sector Puerto Limón 2022.

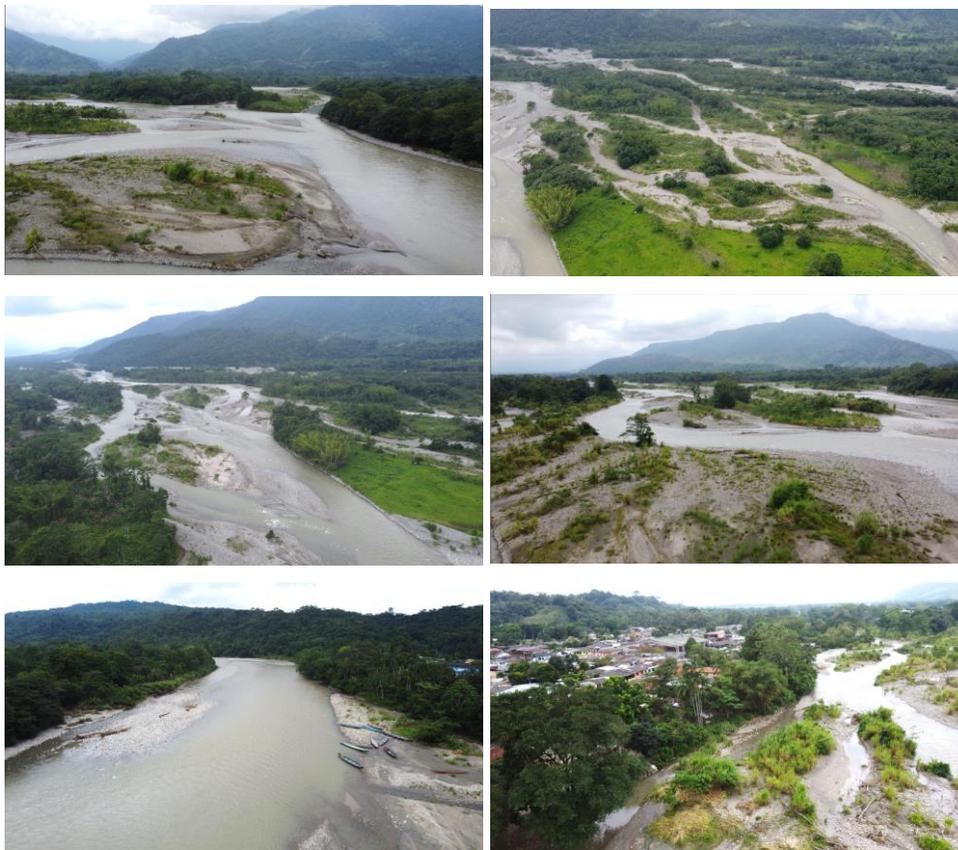


Figura 9. Fotografías captadas con drone mini para el reconocimiento de coberturas.

6.2 Área de drenaje río Mocoa y río Caquetá

En este apartado se realizó una descripción general del área de drenaje del río Mocoa y del río Caquetá, con el fin de ampliar el panorama de análisis. La información utilizada corresponde principalmente a perímetro de las cuencas, topografía, cobertura de la tierra y descripción de la precipitación.

El perímetro del área de drenaje del río Mocoa y río Caquetá se lo genero a partir de la capa de subzona hidrográfica del Alto Caquetá perteneciente al IDEAM, red de drenaje sencilla del IGAC y Modelo de elevación digital Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). La información fue procesada en el software Arcgis 10.8.

La capa de cobertura de la tierra 2018 fue obtenida del Geovisor SIAC (<http://www.siac.gov.co/>) y posteriormente procesada en el software Arcgis 10.8 tomando como punto de referencia la clasificación Corine Land Cover nivel 1.

Teniendo en cuenta que el principal detonante en una inundación es la lluvia, en este apartado se realizó un análisis de precipitaciones máximas diarias multianuales y un análisis de precipitación promedio mensual multianual. Esta información permite correlaciona los eventos extremos de lluvia con la información reportada por la comunidad y de esta forma saber si se pueden presentar eventos mayores o establecer un estimado en la frecuencia. Para este análisis se utilizaron 4 estaciones distribuidas en la parte baja, media y alta de las áreas de drenaje.

6.3 Susceptibilidad a inundaciones

La susceptibilidad a inundaciones fue estimada a partir de cuatro variables: frecuencia a partir de un análisis multitemporal del cauce activo, geología, geomorfología e índice topográfico de humedad.

6.3.1 Análisis multitemporal del cauce activo

El análisis multitemporal del cauce activo del río Mocoa y del río Caquetá se lo realizo a partir de 7 imágenes satelitales de libre acceso, con el fin de establecer la variación de la

dinámica fluvial. La información fue recolectada de plataformas como Colombiaenmapas (<https://www.colombiaenmapas.gov.co/#>) y SAS Planet (Bing Satellite, Esri Satellite y Google Earth). El procesamiento de la información se la realizó en el software Arcgis 10.8.

A partir de la información histórica se generó una capa de frecuencias de la dinámica del cauce activo tanto del río Mocoa como del río Caquetá. La capa consistió en un archivo shp en el que se simplificó el trazado de los ríos Mocoa y Caquetá en los diferentes años en los que se cuenta con imágenes satelitales. Para lo cual, el polígono considera los bancos de arena, islas y cuerpos de agua como una unidad, ya que frecuentemente son modificados por la dinámica de los ríos. La tabla de atributos se conformó por una columna de años, número de años que las imágenes satelitales muestran el mismo recorrido y finalmente una clasificación de frecuencias en alta, media y baja (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de frecuencias.

No.	Frecuencia	Descripción
1	Alta	6 o 7 imágenes que muestran el mismo recorrido
2	Media	3 a 5 imágenes que muestren el mismo recorrido
3	Baja	1 a 2 imágenes que muestren el mismo recorrido

6.3.2 Geología y geomorfología

Para el análisis geológico y geomorfológico se utilizó la información levantada en el Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Mocoa escala 1:25.000. Tanto la geología como la geomorfología fueron utilizados para identificar indicadores que permitan comprender la historia del río Mocoa y del río Caquetá en el área de análisis.

6.3.3 Aplicación del índice topográfico de humedad

Se utilizó un Modelo de Elevación Digital (DEM) SRTM con resolución de pixel de 30*30 metros. El DEM fue cortado para reducir el trabajo computacional y después se rellenaron los datos faltantes y sumideros en el software Qgis con las herramientas Fill null y Fill Sink.

Posterior al procesamiento del DEM, el archivo raster fue importado en el software SAGA GIS en el cual el algoritmo ITH se encuentra programado y facilita la aplicación. La capa raster resultante tiene un rango de valores entre 0 y 20, con la cual se puede hacer una reclasificación por categorías. Teniendo en cuenta que el ITH representa no solo la mancha de inundación sino que también las zonas que pueden presentar retención de humedad por topografía fue necesario realizar ajustes con la herramienta recorte y tomando como referencia información de coberturas, geología, geomorfología y análisis multitemporal.

El índice ITH fue clasificado en cuatro categorías de susceptibilidad (Alta, Media, Baja y Nula), utilizando los rangos recomendados por otros autores (Tabla 2) (Drover et al., 2015; Roa-Lobo & Kamp, 2012a). La categoría Alta corresponde a la zona más próxima al cauce activo y por tanto con mayor frecuencia de inundación. La categoría media corresponde a las barras de arena laterales o llanuras de inundación reciente que son desbordadas en frecuencias menores a la categoría alta pero tienen mayor magnitud. La categoría Baja corresponde a las llanuras de inundación antiguas que son desbordadas con poca frecuencia pero que representan una alta magnitud. La clasificación Nula corresponde a las zonas que topográficamente no pueden ser desbordadas por el río Mocoa y por el río Caquetá.

Tabla 2. Clasificación ITH.

Clasificación	Rango ITH
Nulo	<5
Bajo	5-8
Medio	5-12
Alto	>12

6.3.4 Zonificación de áreas susceptibles a inundación

Para realizar la clasificación de susceptibilidad para cada una de las variables se partió de diferentes estudios científicos (Roa-Lobo & Kamp, 2012a; Skilodimou et al., 2019). Los niveles de susceptibilidad fueron clasificados en 5 niveles al igual que se les dio un valor numérico para las operaciones en SIG. Se clasifico en Muy Bajo (1), Bajo (2), Medio (3), Alto (4) y Muy Alto (5). La siguiente ecuación simplifica el proceso realizado con las diferentes capas para la estimación de la susceptibilidad.

$$\text{Susceptibilidad} = [\text{Sc_twi_valor}]^{*0.2} + [\text{Geolg_Valor}]^{*0.2} + [\text{Geomorf_Valor}]^{*0.2} + [\text{Frec_Valor}]^{*0.4}$$

Ec. 2

Donde

Sc_twi_valor = Capa de susceptibilidad índice topográfico de humedad

Geolg_Valor = Capa de geología

Geomorf_Valor = Capa de geomorfología

Frec_Valor = Capa de frecuencia de trazado de ríos

6.4 Cartografía social

Se desarrollaron actividades de gestión de conocimiento comunitario a partir de cartografía social de áreas de amenaza por inundación y zonas afectadas. Para lo cual se siguieron tres pasos. En primer lugar se realizó la convocatoria de actores clave o representantes comunitarios, en segundo lugar se presentaron las características generales de los ríos y el avance del presente estudio, finalmente se realizó la actividad de cartografía social utilizando un mapa planteado en el que las personas localizaron los diferentes eventos, fechas, pérdidas y frecuencia estimada.

6.5 Zonificación de amenaza por inundación

La zonificación de amenaza por inundación se realizó articulando mediante sistemas de información geográfico la zonificación de susceptibilidad a inundaciones y la cartografía

social de eventos históricos. Esto con el fin de clasificar la amenaza en tres categorías: Alta, Media y Baja (Rodríguez-Gaviria, 2016).

7. Resultados y discusión

7.1 Área de drenaje río Mocoa y río Caquetá

Hidrográficamente el área de estudio se encuentra localizada en la desembocadura del río Mocoa en el río Caquetá, la cual pertenece a la Subzona hidrográfica (Szh) Alto Caquetá. Para facilitar el estudio, la Szh se subdividió en la cuenca del río Mocoa y la cuenca del río Caquetá que drenan en la sección en la que se localiza el centro poblado Puerto Limón.

La cuenca del río Mocoa definida en este estudio, tiene un área de 671 km² definida a partir de los 3400 m.s.n.m en su nacimiento y una desembocadura en los 2670 m.s.n.m en el que se localiza Puerto Limón (Figura 10). Por otra parte, la cuenca del río Caquetá presenta un área de 4456 km² con nacimiento en los 4159 m.s.n.m y una desembocadura a la altura del centro poblado Puerto Limón.

Esta información permite dimensionar las áreas de captación de agua de cada uno de los ríos que pueden afectar el centro poblado Puerto Limón y de esta forma también aportar en la valoración de la zonificación de amenaza.

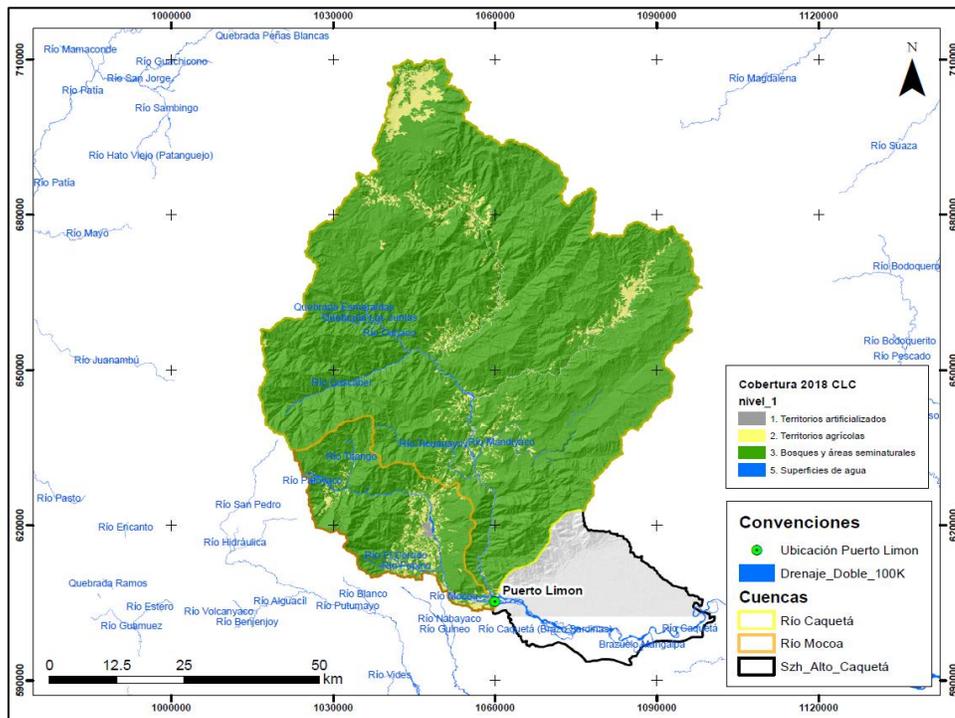


Figura 11. Cobertura de la tierra del año 2018, Corine Land Cover nivel 1.

En la Figura (12) se muestra la distribución espacial de cuatro estaciones pluviométricas que aportaron la información diaria multianual (Puerto Limón, Campucana, Condagua y Chontillal). La distribución espacial de las precipitaciones máximas se muestra en la Figura (13), en esta se pudo identificar que las estaciones localizadas en la parte alta de la cuenca (estación Chontillal) presenta las precipitaciones máximas más bajas y a medida que se llega a la parte baja (estación Limón) las precipitaciones máximas tienen una mayor magnitud.

En la Figura (14) se muestra el comportamiento de la precipitación promedio mensual multianual. La parte alta y media de la cuenca del río Mocoa y Caquetá presentan un comportamiento interanual de tipo monomodal en el que se identifica que los meses más lluviosos son Mayo, Junio y Julio, mientras que en la parte baja de las dos cuencas, el comportamiento de la precipitación es bimodal con dos picos de lluvia en los meses Mayo y Noviembre.

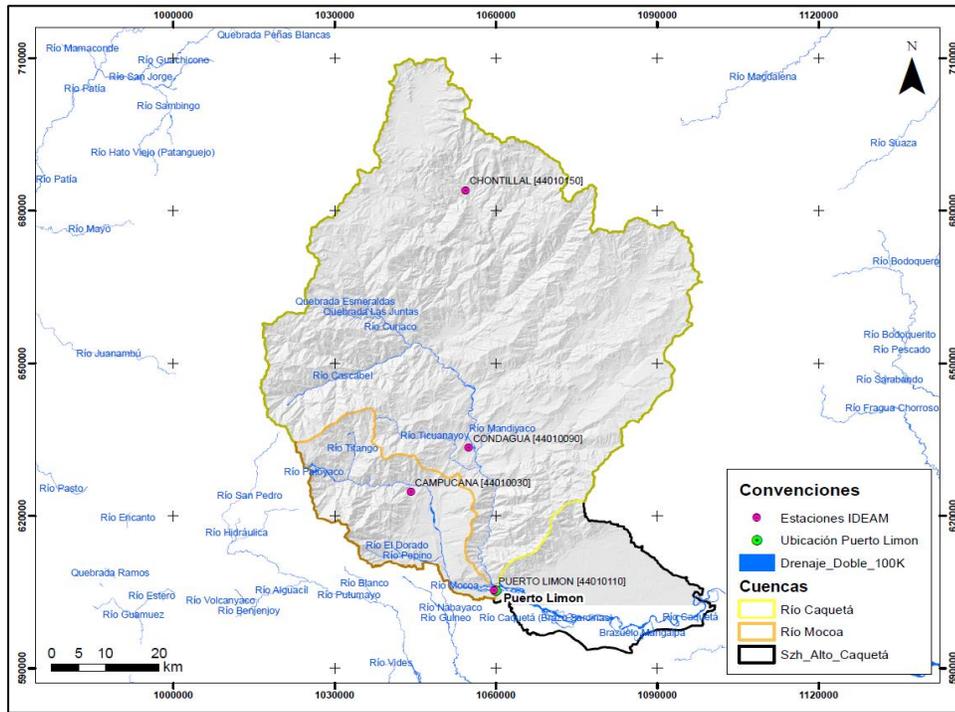


Figura 12. Distribución de las estaciones IDEAM utilizadas para el análisis de precipitación.

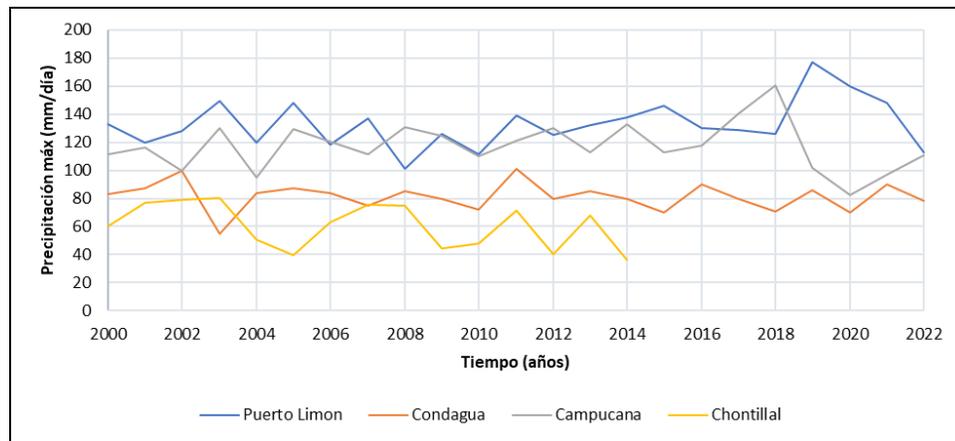


Figura 13. Distribución espacial de las precipitaciones máximas diarias multianuales.

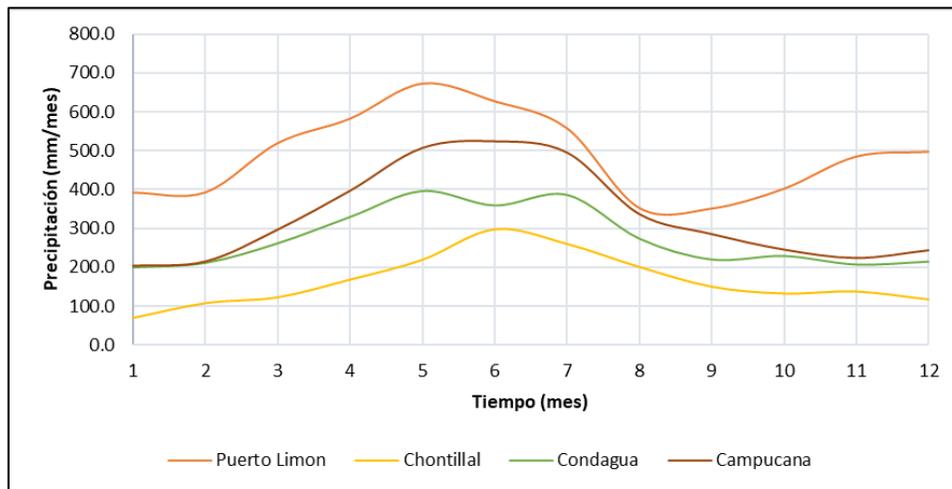


Figura 14. Precipitación promedio mensual multianual.

7.2 Susceptibilidad a inundaciones

La susceptibilidad a inundación fue calculada a partir de diferentes indicadores geológicos, geomorfológicos, geomofométricos y de análisis multitemporal del cauce activo de los dos ríos en estudio.

7.2.1 Análisis multitemporal del cauce activo

A partir de la revisión de imágenes satelitales de alta resolución de libre acceso se realizó un análisis multitemporal del cauce activo, islas y barras de arena del río Mocoa y del río Caquetá (Tabla 3). El análisis multitemporal se realizó con información entre 1984 hasta el año 2022 (53 años). En total se analizó 7 imágenes de las cuales dos son de baja resolución (Figura 15) (Figura 16) y 5 de alta resolución (Figura 17), (Figura 18), (Figura 19), (Figura 20) y (Figura 21).

Tabla 3. Fuente de imágenes históricas del área de estudio.

No.	Imagen	Año	Fuente
1	Google earth	1969	Google Earth
2	Google earth	1985	Google Earth
3	Aerofoto IGAC	1995	colombianemapas

No.	Imagen	Año	Fuente
4	Google earth	2004	Google Earth
5	Bing Satélite	2017	SAS Planet
6	Esri Satélite	2020	SAS Planet
7	Google Satélite	2022	SAS Planet

A partir del análisis multitemporal de los ríos se puede concluir que el tramo analizado presenta 3 tipos de variaciones geomorfológicas aluviales, antes y después del centro poblado Puerto Limón.

- Río Mocoa: el río es de tipo entrelazado debido a sus múltiples brazos, separado por barras de arena, las márgenes no se encuentran bien definidas y son inestables. En periodos de bajos caudales se observan diferentes brazos que se entrecruzan pero en crecidas, el agua puede sumergir las barras y el cauce adquiere un aspecto de canal único.
- Río Caquetá antes de Puerto Limón: el río es de tipo recto antes de llegar al abanico aluvial, debido a las condiciones de alta pendiente y márgenes bien definidas.
- Río Caquetá después de Puerto Limón: después de la desembocadura del río Mocoa en el río Caquetá, las características geomorfológicas del río Caquetá cambian, dando un aspecto de río anastomosado. Esto se debe a que presenta múltiples canales separados por islas, existencia de grandes islas con vegetación que pueden no ser desbordadas en evento de crecidas y canales más estables.

Identificar la clasificación geomorfológica aluvial del río Mocoa y del río Caquetá permite tener un panorama teórico del comportamiento de los ríos en la presencia de una inundación y a su vez la dinámica de la amenaza de inundación en el centro poblado Puerto Limón. Adicionalmente las imágenes satelitales permiten ver el desarrollo espacial del centro poblado y su infraestructura de comunicación.

Tanto el río Mocoa como el río Caquetá presentan en el área de estudio una variación constante en la formación de islas, barras y nuevos trazados desde 1969 hasta la actualidad, lo cual permite concluir que el centro poblado puede ser amenazado no solo por el desborde de los dos ríos sino también por la socavación lateral.



Figura 15. Imagen satelital Google Earth año 1969.



Figura 16. Imagen satelital Google Earth año 1985.

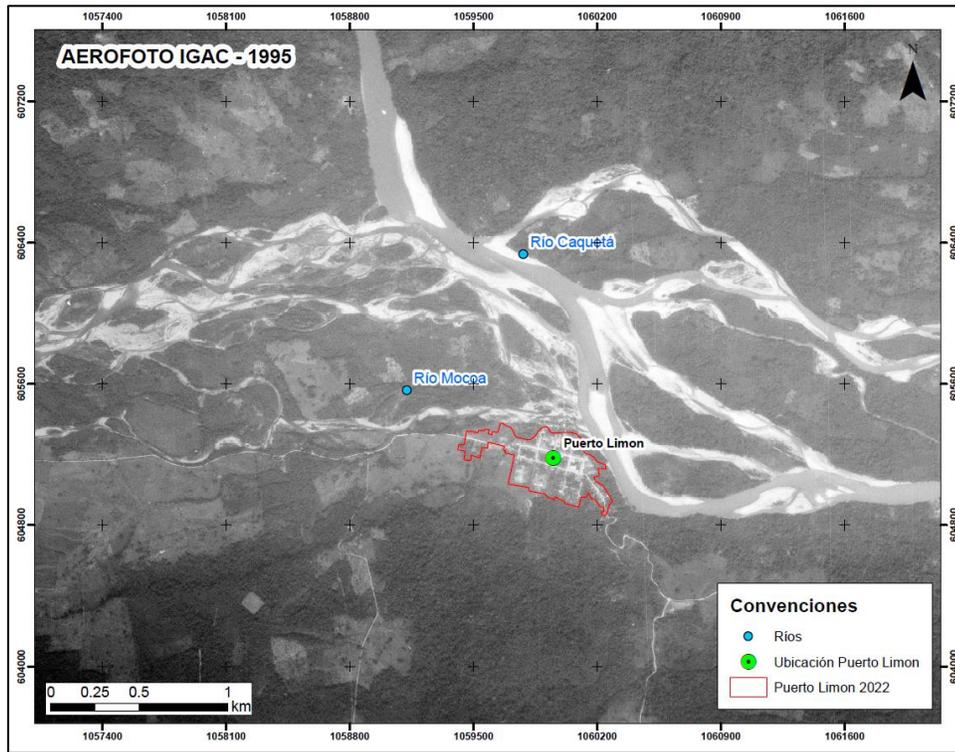


Figura 17. Aerofoto IGAC año 1995.



Figura 18. Imagen satelital Google Earth año 2004.

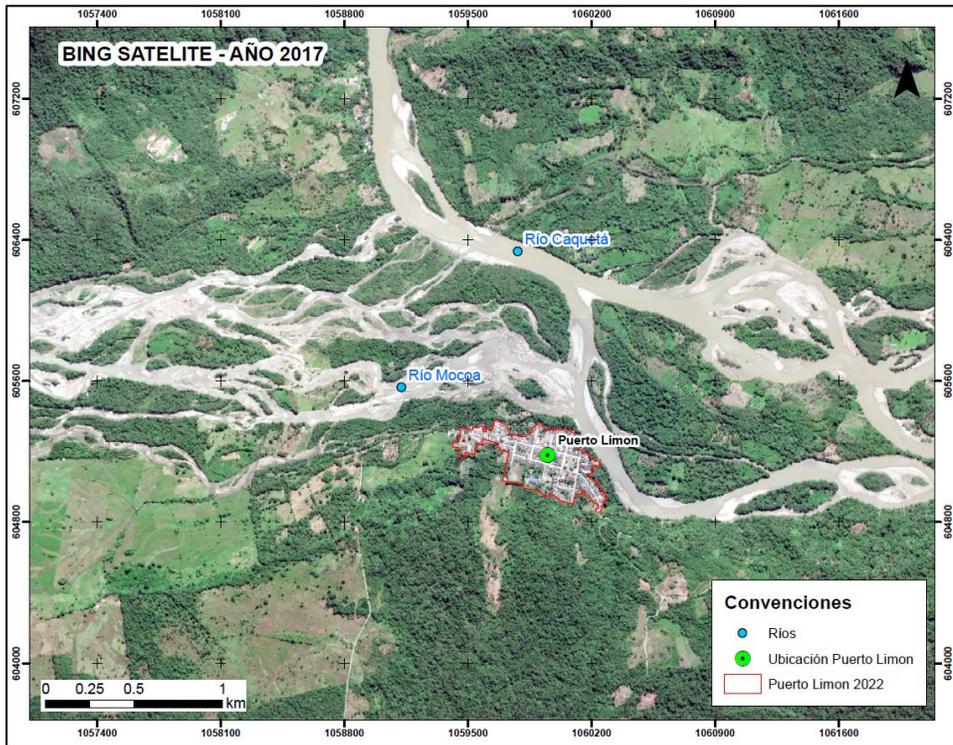


Figura 19. Imagen Bing Satélite año 2017.

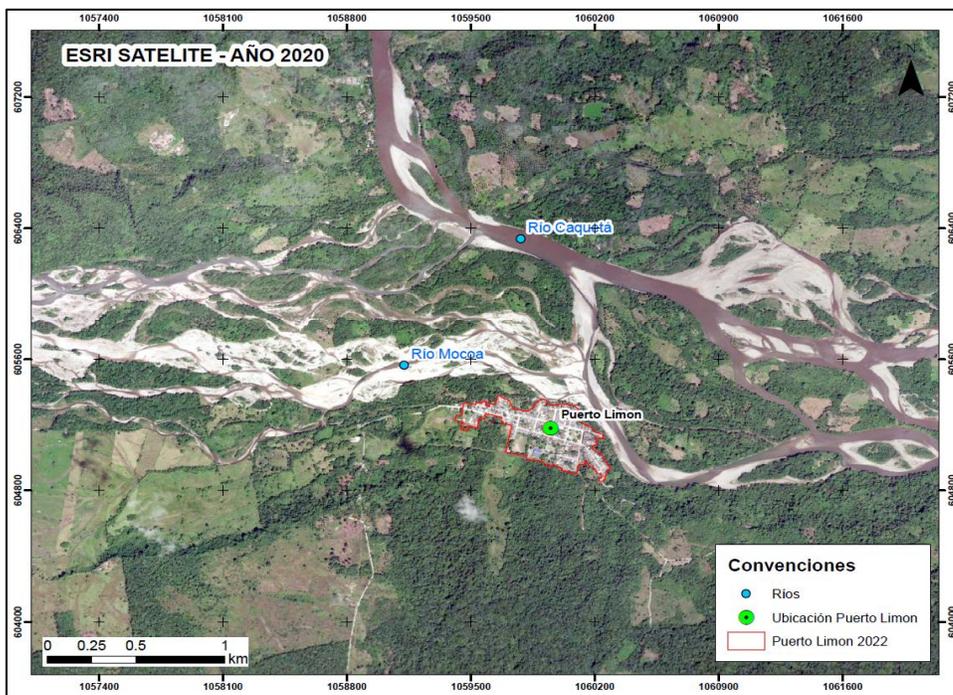


Figura 20. Imagen satelital ESRI año 2020.

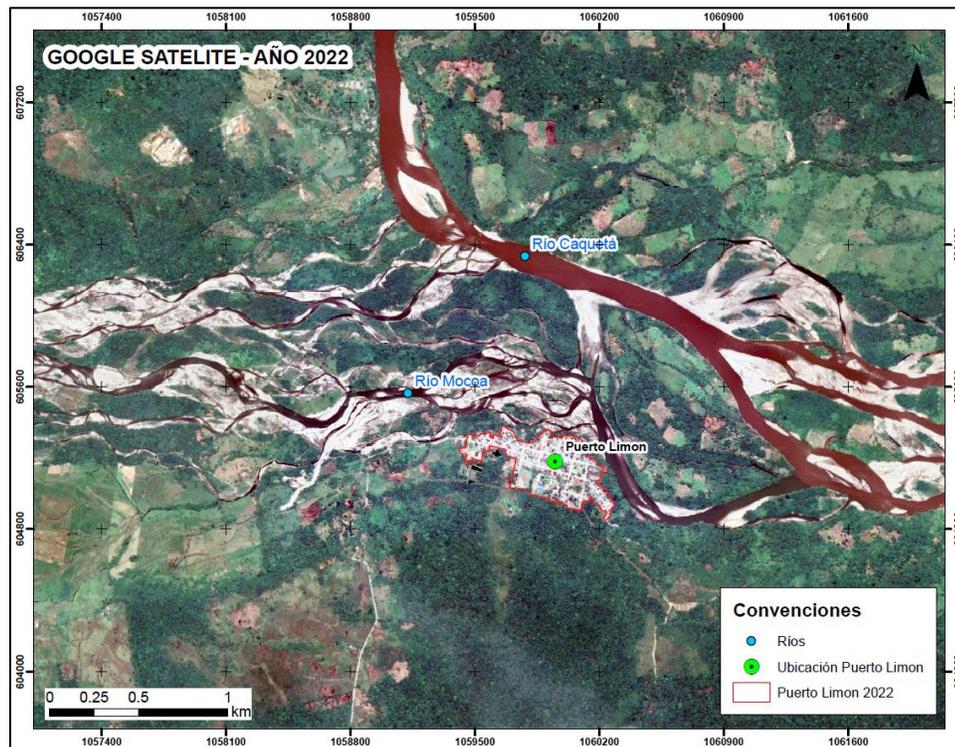


Figura 21. Imagen satelital Google año 2022.

Tanto el río Mocoa como el río Caquetá cambian de trazado constantemente en su llanura de inundación, lo cual permitió simplificar el comportamiento asumiendo que el río se conforma de los cuerpos de agua, barras de arena e islas formadas temporalmente. El análisis multitemporal muestra que el trazado de los ríos tenía una mayor curvatura y alcanzaban a cubrir gran parte de las llanuras de inundación antes de 1985. En el 2022 se alcanza a diferenciar que extensiones de tierra que antes le pertenecían al río, en la actualidad son utilizadas para aprovechamiento agropecuario. En el lapso de 53 años analizado se puede identificar la formación y desaparición de grandes islas que pueden llegar a tener anchos iguales a los 700 metros, lo cual muestra que los ríos pueden presentar procesos de socavación muy elevados y que difícilmente se pueden mitigar utilizando obras puntuales. En la Figura (22) se muestra la clasificación de frecuencia de trazado de los ríos realizada en el presente estudio, el cual es un indicador muy importante a la hora de zonificar la amenaza de inundación y sus derivados como la socavación de orillas.

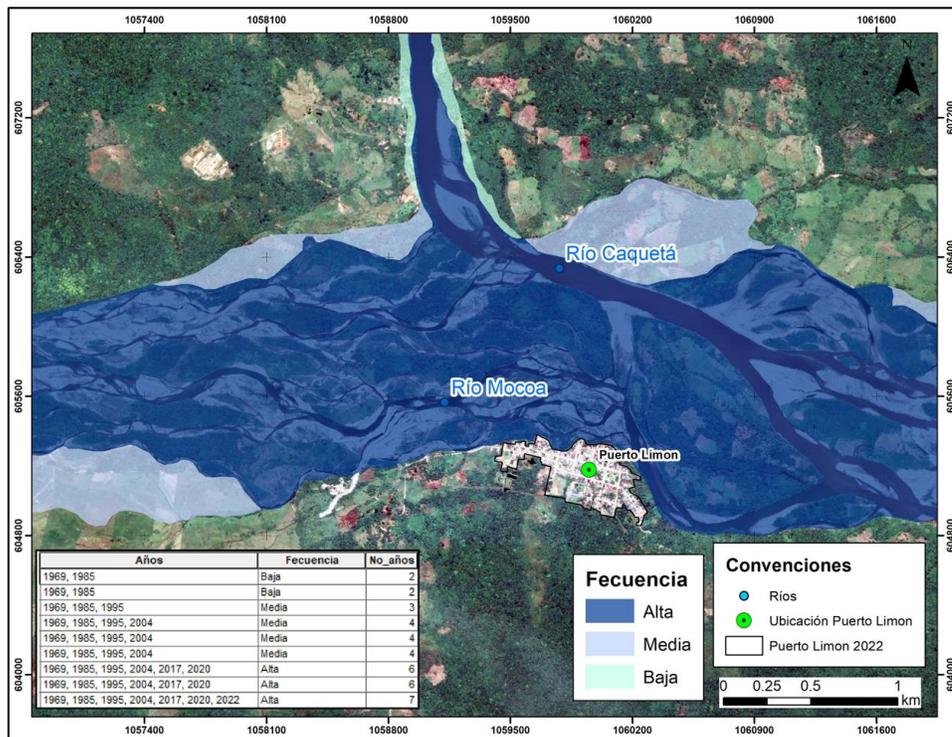


Figura 22. Frecuencia del trazado de los ríos Mocoa y Caquetá.

7.2.2 Geología y geomorfología

En la Figura (23) se muestra el mapa geológico de la zona extraído del EOT del municipio de Mocoa. En la zona de estudio se identifican 6 unidades geológicas.

- Deposito 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.
- Deposito 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.
- 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.

- 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.
- Formación Saldaña: Rocas ígneas volcánicas de textura afanítica de color rojizo a violáceo (5YR2/2), compuesta principalmente por feldespatos alcalinos (72,5%), plagioclasa (12,5%) y cuarzo (15,0%).
- 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.
-

El centro poblado Puerto Limón se encuentra localizado sobre Depósitos fluvio-torrenciales subreciente, lo cual significa que en algún momento de la historia, tanto el río Mocoa como el río Caquetá pasaron por esa zona y existe la posibilidad de que esto se repita. Por lo tanto, esta información permite concluir que el centro poblado puede ser afectado en su totalidad por un evento extremo de inundación.

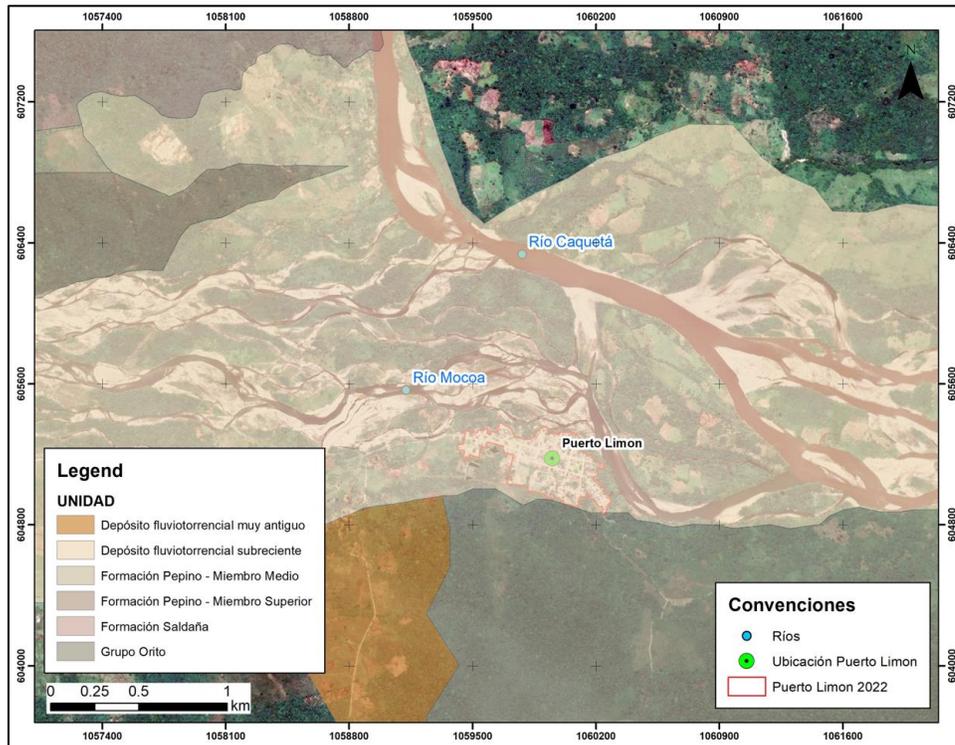


Figura 23. Mapa Geológico.

En el área de estudio se identificaron 10 unidades geomorfológicas (Figura 24):

- Dld: Loma denudada
- Dmo: Montículo y ondulaciones denudacionales
- Fea: Escarpe de abanico fluvio-torrencial
- Fil: Isla longitudinal
- Fpi: Plano o llanura de inundación
- Fta: Terraza de acumulación
- Sm: Meseta estructural
- Sme: Escarpe de meseta estructural
- Ssalc: Ladera de contrapendiente de sierra anticlinal
- Ssale: Ladera estructural de sierra anticlinal

Entre las unidades geomorfológicas que permiten estimar las zonas susceptibles a inundación son la Fea, Fil, Fpi y Fta, ya que son formas geológicas generadas por eventos

de inundaciones y avenidas torrenciales históricos. Al igual que en el análisis geológico, en el análisis geomorfológico se identifica que el centro poblado se localiza en una zona susceptible a ser inundada denominada terraza de acumulación.

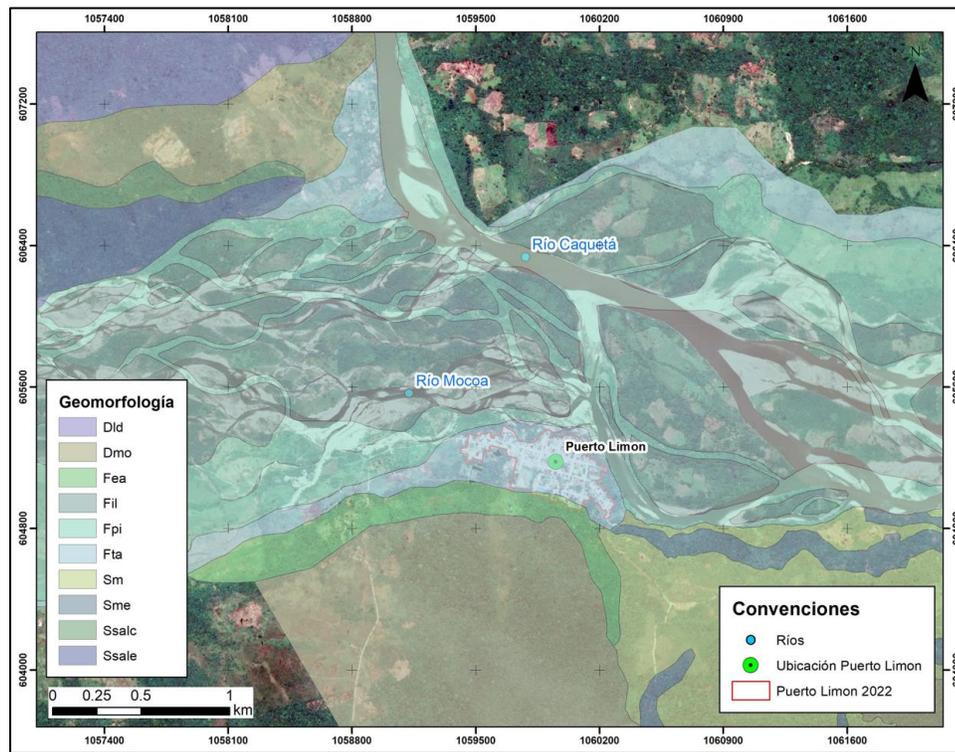


Figura 24. Mapa Geomorfológico.

7.2.3 Aplicación del índice topográfico de humedad

Una vez corregido los sumideros y los datos faltantes del modelo de elevación digital SRTM, el archivo se cargó en el software SAGA GIS y se aplicó el Índice Topográfico de Humedad (ITH o TWI en inglés), el cual no solo muestra las zonas que concentran el flujo como los ríos, sino también las zonas que concentra la humedad por condiciones topográficas (hundimientos y zonas planas). El índice presentó resultados que van desde 1 hasta 26, siendo 1 el valor que representa menor retención de humedad y 26 el mayor grado de retención de humedad.

Los resultados raster fueron clasificados en las cuatro categorías (Nulo, Baja, Media, Alta) y posteriormente convertido a formato vector para ser utilizado en la etapa de zonificación

de susceptibilidad ya que representan la susceptibilidad del terreno a presentar una inundación por desborde fluvial. La clasificación de susceptibilidad baja corresponde al rango del índice ITH entre 5 – 8, la clasificación de susceptibilidad media al rango del ITH entre 8 – 12, y la clasificación Alta corresponde al rango de valores del índice de 12 a 26 (Figura 25). La clasificación Nulo corresponde a las áreas que no son susceptibles a presentar inundaciones por desborde fluvial de los ríos analizados.

En este estudio se evidencio los resultados obtenidos en otros estudios cuando el índice topográfico de humedad se aplica en zonas relativamente planas (Drover et al., 2015; Roa-Lobo & Kamp, 2012a), debido a que la dirección de flujo juega un punto importante en la ecuación del ITH, los resultados en zona plana tienden a ser dispersor simulando zonas de estancamiento, por tanto es necesario realizar el ajuste tomando como referencia los limites de unidades geológicas y geomorfológicas que muestren inundaciones como las llanuras de inundación, abanicos aluviales entre otras.

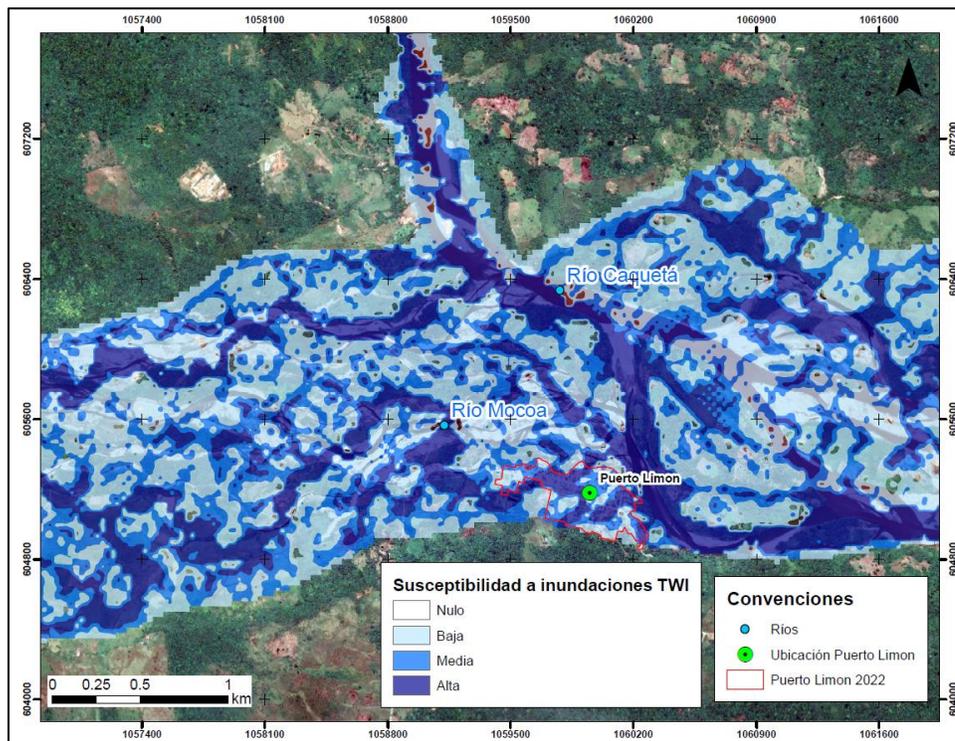


Figura 25. Zonificación de la susceptibilidad a inundaciones a partir del índice ITH.

7.2.4 Susceptibilidad a inundaciones

La susceptibilidad a inundaciones tanto del río Mocoa como del río Caquetá pueden ser estimados a partir de indicadores cartográficos como la geología, geomorfología, frecuencia e índices morfométricos al igual que en los resultados obtenidos en otros estudios (Rodríguez-Gaviria, 2016; Skilodimou et al., 2019), sin embargo, por las características trezadas de los ríos evaluados es necesario incluir variables que permitan representar esos comportamientos como los aplicados por (Roa-Lobo & Kamp, 2012). En la Figura (26) se muestra el mapa de susceptibilidad a inundación y las variables de estimación.

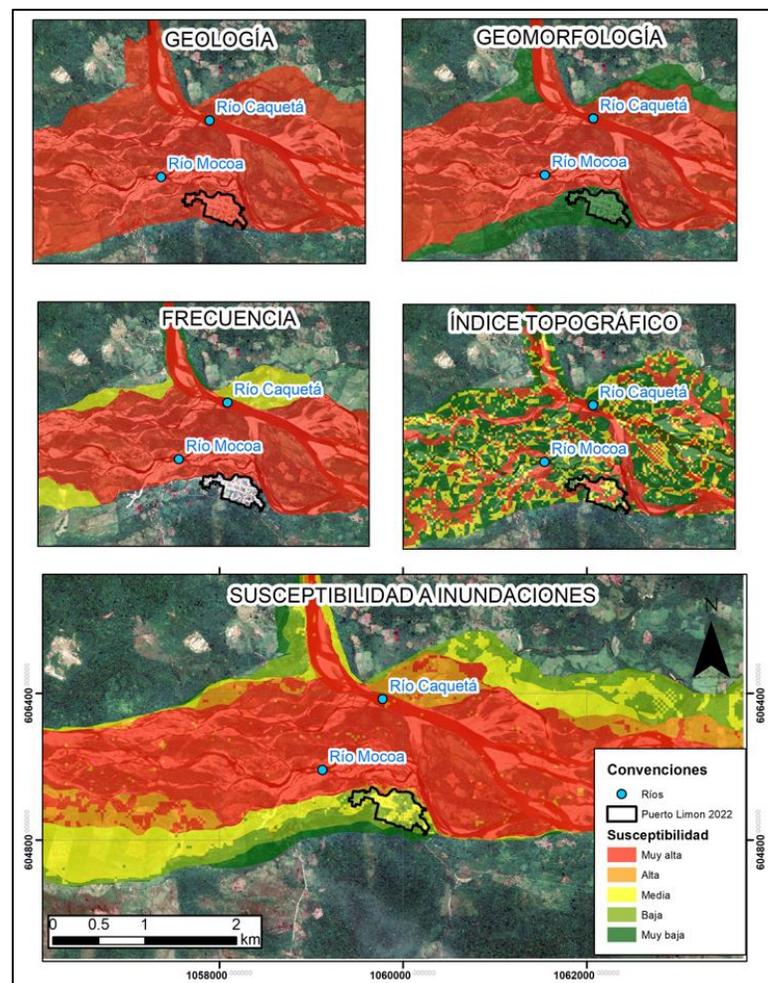


Figura 26. Mapa de susceptibilidad a inundación por el río Mocoa y río Caquetá.

7.3 Cartografía social

Esta etapa es de suma importancia para recolectar información de eventos históricos y validar información generada hasta la fecha, incluida el índice topográfico de humedad. Previo al taller de cartografía social se realizó el diagnóstico del área de drenaje y se avanzó en la estimación de la susceptibilidad a inundaciones de la zona para contrastar la información técnica con información social.

Entre el viernes 20 y sábado 21 se convocó a los actores clave de la comunidad de Puerto Limón para realizar el taller de cartografía social el día 25 de Abril del 2023 y recolectar información histórica de eventos de inundación generados por el río Mocoa y el río Caquetá. El taller se realizó en el Cabildo indígena Inga Pakai y asistieron 30 participantes.

Para iniciar la reunión se presentó el objetivo de la reunión y la información actualmente recolectada, posteriormente se describió la dinámica y se organizaron grupos con un representante encargado de compartir el conocimiento y localizar la información en el mapa impreso (Figura 27).



Figura 27. Registro fotográfico del primer taller de cartografía social realizado en la comunidad de Puerto Limón.

En la Figura (28) y Tabla (4) se muestran los resultados del taller de cartografía social. La cartografía social permitió recolectar información referente a la localización, tipo de evento (inundación, avenida torrencial, socavación del río), estructura dañada y diferenciación del río causante del evento.



Figura 28. Mapa en el que se desarrolló la cartografía social.

Tabla 4. Resumen información recolectada con cartografía social.

No.	Evento	Fecha	Descripción	Daños	# heridos
1	inundación rio Caquetá	1971	Desplazamiento de familias zona rural hacia el casco urbano	perdida de viviendas, animales, enceres, chagras. Perdida del cementerio.	1 muerto
2	Inundación rio Mocoa	1992	desbordamiento del rio	Afectación a viviendas, chagras. Pérdida de animales.	N

No.	Evento	Fecha	Descripción	Daños	# heridos
3	Inundación río Caquetá	2019	desbordamiento río	el río vuelve a su cauce, pérdida de chagras.	N
4	Inundación río Caquetá	2019	desbordamiento del río	Contaminación río Mocoa sector Puerto Limón y aguas abajo por crudo debido al daño ocasionado a la línea de paso de crudo desde los pozos Moqueta a Costayaco.	
5	Inundación río Caquetá	2021	desbordamiento río	pérdida de animales, enceres, chagras.	N
6	Avenida torrencial río Mocoa e inundación	2002	desbordamiento del río	Pérdida del puente que comunica a Puerto Limón con Villa Garzón. Afectaciones chagras, viviendas	N
7	Avenida torrencial río Mocoa e inundación	7/19/2021	desbordamiento del río	pérdida de un tramo de la placa huella, afectación de potreros, cultivos, viviendas	N
8	Inundación río Mocoa	jul-22	desbordamiento del río	Afectación de cultivo, de algunas viviendas y del Jarillón (en construcción)	N

7.4 Zonificación de amenaza por inundación

Una vez se tuvo el mapa de susceptibilidad a inundaciones y el panorama global de la comunidad con respecto a las amenazas de inundación del río Mocoa y del río Caquetá, se organizó la información en SIG para tener un mapa que contenga la información de susceptibilidad estimada técnicamente y la información de detonante a partir de la información suministrada por la comunidad. El mapa final de zonificación de amenaza por

inundación fue simplificado en tres categorías de amenaza y ajustado con ayuda de la comunidad (Tabla 6) (Figura 29).

Tabla 5. Clasificación de la amenaza relativa por inundación de los ríos Mocoa y río Caquetá.

Amenaza	Descripción
ALTA	Zona en la cual las inundaciones se presentan de forma frecuente al igual que la socavación de orillas. Esta zona puede presentar inundaciones con una frecuencia de 1 a 5 años. En esta zona los ríos se han desplazado libremente durante los últimos 53 años creando y deformando islas y llanuras de inundación. 7 imágenes satelitales de 7 analizadas muestran el trazado de sus cauces activos en esta zona. El nivel de pérdida económica, estructural y social es alto.
MEDIA	Zona ubicada en las llanuras de inundación laterales que ha presentado inundaciones menos frecuentes. De las 7 imágenes satelitales que cubren 53 años, en esta zona el trazado del río solo se muestra en 4 imágenes. Estas llanuras pueden ser desbordadas por las inundaciones superiores a 10 años y la socavación lateral no es tan intensa como en las islas. El nivel de pérdida económica, estructural y social es medio.
BAJA	Zonas que no son inundadas hace mas de 30 años y en la actualidad presentan otro tipo de cobertura. De las 7 imágenes satelitales solo se muestra que los ríos fueron trazados por esa zona en 2 imágenes de 1985 y 1969. Por tanto su frecuencia es mayor a 30 años.

A partir de la clasificación se puede identificar que el centro poblado Puerto Limón se encuentra en categoría de amenaza media, la cual corresponde a que la zona puede ser afectada por socavación lateral y por desborde fluvial con una frecuencia mayor a 10 años. Como se evidenció en el análisis de imágenes satelitales y en esta zonificación de amenazas, el centro poblado no solo puede ser afectado por el río Mocoa sino también por el río Caquetá. De forma complementaria, en campo se identifico que la amenaza que puede

afectar en mayor proporción al centro poblado es por socavación lateral tanto del río Mocoa como del río Caquetá.

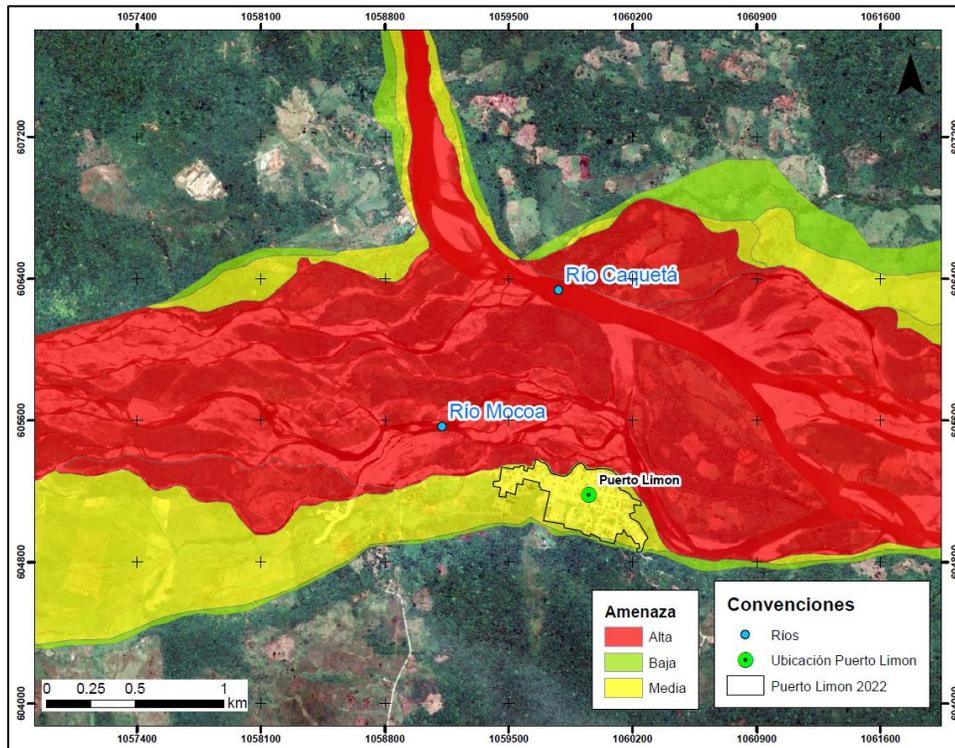


Figura 29. Zonificación de amenaza por inundación del río Mocoa y río Caquetá.

Los resultados pueden ser utilizados como punto de partida para la toma de decisiones en medidas de adaptación y mitigación no estructural gracias a la aplicación de los SIG, que permiten representar la información espacialmente e incluso contrastarla con otras amenazas independientes al igual que el estudio de (Skilodimou et al., 2019) en el que se evalúan diferentes amenazas y se articulan utilizando SIG.

8. Conclusiones

El análisis del área de drenaje de los ríos Mocoa y Caquetá permitieron mostrarle a la comunidad del centro poblado Puerto Limón posibles causas del comportamiento del río, tanto por el alto aporte de material de arrastre en la zona, como por las grandes extensiones de terreno con topografía plana aledañas al centro poblado (llanuras de inundación antiguas y recientes). La comunidad comprende que si los ríos Mocoa y Caquetá son modificados desde sus nacimientos, se puede generar una repercusión negativa en el lugar que actualmente se ubica el centro poblado, tanto por el posible aumento de los caudales pico como del aumento de caudal sólido.

A partir de la información existente en los instrumentos de planificación en la zona y con ayuda del análisis de diferentes herramientas de Sistemas de Información Geográfica se puede elaborar una estimación de los diferentes factores que muestran las áreas que pueden ser susceptibles a presentar inundaciones. Si bien, la información geológica y geomorfológica disponible en los instrumentos de planificación de la zona, permiten comprender la existencia de eventos como inundaciones y avenidas torrenciales, para realizar un proceso de toma de decisiones es necesario contar con un mayor detalle que lo puede proporcionar el análisis multitemporal de imágenes satelitales y modelos de elevación digital del terreno.

La cartografía social es una fuente importante de información que permite validar los resultados de la estimación de susceptibilidad a inundaciones e incluso entender los diferentes detonantes de los eventos. Al combinar la información técnica con conocimiento

comunitario, se puede generar un instrumento para la toma de decisiones como es un mapa de zonificación de amenaza.

Si bien los modelos numéricos son precisos, estos requieren una gran inversión económica y de conocimiento, que a su vez también se limitan por los softwares utilizados. En el presente estudio se identificaron fuentes de amenaza a partir de la cartografía y de la gestión de conocimiento comunitario que pueden ser muy difíciles de estimar con modelos numéricos. Entre los casos identificados se encuentra: los altos procesos de socavación que generan constantemente modificaciones en las islas localizadas en las partes internas de los ríos; la unión de dos ríos que presentan diferente dinámica; dinámicas socio culturales que aumentan la vulnerabilidad de la población del centro poblado Puerto Limón; una reubicación puede llegar a ser más eficiente que continuar con los procesos de mitigación.

Actualmente el centro poblado Puerto Limón se encuentra localizado en una zona de amenaza media por inundación por desborde fluvial, sin embargo, puede estar expuesta a una amenaza alta por socavación lateral del río Mocoa y río Caquetá, lo cual se evidencio con el análisis multitemporal de imágenes y las comunidades que habitan la zona.

9. Bibliografía

- Abel Basile, P. (2018). Transporte de sedimentos y morfodinamica de rios aluviales. In *Biomass Chem Eng.*
- Acuña, C. C., & Ordoñez, M. J. del P. (2018). Evaluación de amenaza y vulnerabilidad por desbordamiento del río Cusiana en la zona urbana de Mani – Casanare. *Ingeniería Civil.*
- Betancurth, D., Vélez-Álvarez, C., & Sánchez, N. (2020). Cartografía social : construyendo territorio a partir de los activos comunitarios en salud * Social cartography : building territory from community assets in health Mapeamento social : construindo território a partir de ativos de saúde da comunidade. *Entrenando, 16*(1), 138–151.
- Cristo García, J. P., & Cruz Rodríguez, O. (2019). *Evaluación de la vulnerabilidad frente a la amenaza por inundación en los predios ubicados en la margen del Río Ariari en la vereda la Camachera del municipio de San Martin - Meta.*
- Drover, D. R., Jackson, C. R., Bitew, M., & Du, E. (2015). Effects of DEM scale on the spatial distribution of the TOPMODEL topographic wetness index and its correlations to watershed characteristics. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 12*(11), 11817–11846. <https://doi.org/10.5194/hessd-12-11817-2015>
- Gomez, A. (2019). Estudio Multitemporal De Fragmentación Y Conectividad Ecológica En La Microcuenca De La Quebrada Lorenzo Del Municipio De Puerto Asís, Putumayo. *Gastronomía Ecuatoriana y Turismo Local., 1*(69), 5–24.
- Hernandez, E. (2017). *Análisis Multitemporal Del Cambio En La Cobertura Del Suelo, En La Zona De Inundación De La Represa Hidrosogamoso, Departamento De Santander, Años 2001 Y 2015.* 53(9), 129.
- IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad- Resumen para responsables de politicas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* (C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir,

M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White, Eds.). IPCC.

José, R.-L., & Ulrich, K. (2012). Uso del índice topográfico de humedad (ITH) para el diagnóstico de la amenaza por desborde fluvial, Trujillo-Venezuela. In *Revista Geográfica Venezolana* (Vol. 53, Issue 1).

López, C. (2020). Fundamentos Básicos para la Teledetección Ambiental. In *Universidad Católica del Norte* (Issue July, p. 49). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20684.44161>

MADS. (2014). *Anexo B. Gestión del Riesgo. Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de cuencas Hidrográficas POMCAS*. (Vol. 1, p. 54). MADS. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Martín, J. (2003). *Ingeniería de Ríos* (UPC, S.L). Universidad Politecnica de Catalunya.

MINAMBIENTE. (2018). *Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia*. (pp. 1–86).

Mora, W., & Ochoa, R. (2016). Modelamiento de zonas de inundación por medio de las herramientas HEC-RAS, GEO-RAS y ARCGIS, para el sector comprendido entre los municipios de Corrales - Paz del Rio a lo largo del Río Chicamocha, en el departamento de Boyacá. *Aristizábal Murillo, Mauricio. «Modelos Hidrológicos e Hidráulicos de Zonificación de La Amenaza Por Inundación En La Dorada Caldas.» 2012., 97.*

Roa-Lobo, J., & Kamp, U. (2012a). Use of the topographic wetness index (TWI) for the diagnosis of the river overflow threat, Trujillo State-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 53 (1), 109–126. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Roa-Lobo, J., & Kamp, U. (2012b). Use of the topographic wetness index (TWI) for the diagnosis of the river overflow threat, Trujillo State-Venezuela. *Revista Geográfica Venezolana*, 53 (1), 109–126. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Rodríguez-Gaviria, E. M. (2016). Diseño metodológico para la evaluación del riesgo por inundación a nivel local con información escasa. *Biblioteca Digital, Universidad Nacional de Colombia*, 379.
- Skilodimou, H. D., Bathrellos, G. D., Chousianitis, K., Youssef, A. M., & Pradhan, B. (2019). Multi-hazard assessment modeling via multi-criteria analysis and GIS: a case study. *Environmental Earth Sciences*, 78(2), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-8003-4>
- Tsyganskaya, V., Martinis, S., & Marzahn, P. (2019). Flood monitoring in vegetated areas using multitemporal Sentinel-1 data: Impact of time series features. *Water (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/w11091938>
- Vásquez Santamaría, J. E., Gómez Vélez, M. I., & Martínez Hincapié, H. D. (2018). The Mocoa tragedy: Example of a retrospective without an end point in the management of the risk of disasters detonated by natural events? *Revista de Derecho Uninorte*, 50, 145–186. <https://doi.org/10.14482/dere.50.0007>