

Propuesta metodológica con enfoque hidro-geomorfológico para la evaluación de la amenaza por inundación, como herramienta de expansión urbana. Caso de estudio

Puerto López Meta.

Gerardo Alberto Rios Hormiga

Trabajo de grado para el optar por el título de Magister en Ordenamiento Territorial

Director

M. Sc. Ing. Sergio Alonso Anaya Estévez

Máster en Tecnologías de la Información Geográfica

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Maestría en Ordenamiento Territorial

2023

Dedicatoria

Inmensamente agradecido con Dios por preparar cada detalle de mi vida, por brindarme tanta felicidad y bendiciones, por cuidar mis pasos y decisiones, y sobre todo por regalarme una hermosa familia.

Agradezco a mi esposa Rudy Alejandra Rueda Amado, por su paciencia, amor y apoyo constantes en mis metas, a mis hijos Juan David, Santiago Y Sofía, por ser esos angelitos que llenan de luz y alegría mis días con sus sonrisas y ocurrencias, por ser ese motor que me da la fuerza de seguir adelante trabajando en busca de dejarles un legado para el futuro.

Agradecimientos

Agradezco a mis compañeros de la Maestría en Ordenamiento Territorial – MOT, por su apoyo y enseñanzas, a todo el cuerpo docente y en especial a mi director de trabajo de grado el ingeniero Sergio Alonso Anaya Estévez, por cada una de sus enseñanzas que ha hecho de mí una mejor persona y un mejor profesional, consiente de la necesidad que tenemos de mejorar los procesos de Ordenamiento Territorial, entendiendo su fundamento en el procesos social, y el cuidado y sostenimiento de la vida y el medio ambiente. También agradecer a la Universidad Santo Tomás, por acogernos, a la facultad de Arquitectura, por su gestión y apoyo constantes en nuestra formación.

Contenido

Introducción.....	13
1. Propuesta metodológica con enfoque hidro-geomorfológico para la evaluación de la amenaza por inundación, como herramienta de expansión urbana. Caso de estudio Puerto López Meta. ..	17
1.1 Planteamiento del problema.....	17
1.2 Justificación.....	18
1.3 Objetivos	20
1.3.1 Objetivo general	20
1.3.2 Objetivos específicos	20
2. Marco referencial.....	21
2.1 Marco teórico	21
2.2 Marco conceptual	24
2.3 Marco legal.....	28
3. Metodologías de zonificación de amenaza por inundación.....	30
3.1 Análisis multitemporal de imágenes satelitales.....	33
3.1.1 Erosión y Sedimentación.....	39
3.1.2 Resistencia de los materiales a la erosión fluvial	40
3.2 Metodología Geomorfológica – Histórica:	42
3.2.1 Metodología empleada para la Zonificación de la Susceptibilidad	44
3.2.2 Análisis de los Eventos Históricos	45
3.2.3 Análisis de geoformas asociadas a inundaciones	47
3.2.4 Generación de mapa de susceptibilidad por inundación.....	49
3.2.5 Metodología de amenaza por inundación geomorfológica	50

3.2.6	Generación del mapa de amenaza por inundaciones por geomorfología.....	52
3.3	Metodología Hidrodinámica para la amenaza por Inundación	53
3.3.1	Modelos Hidrológicos.....	54
3.3.2	Modelos Matemáticos	58
3.3.3	Software HEC-RAS	61
3.3.4	Condiciones de contorno e iniciales	62
3.3.5	Modelo hidrodinámico.....	64
3.3.6	Generación del mapa de amenaza por inundación hidrodinámica	66
3.4	Zonificación de la Amenaza utilizando las metodologías anteriores.	68
3.4.1	Metodología empleada para la zonificación de la amenaza final.....	68
4.	Modelo de análisis aplicado a la zonificación de amenaza por inundación.....	71
5.	Análisis de resultados.....	73
6.	Conclusiones y recomendaciones	77
	Referencias	79

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Ejemplos de resistencia relativa de algunos materiales litológicos a la erosión fluvial.</i>	
.....	40
Tabla 2. <i>Susceptibilidad de geoformas a fenómenos de inundación y porcentaje de ocupación del área de estudio.</i>	49
Tabla 3. <i>Clasificación de Modelos Hidrológicos.</i>	54
Tabla 4. <i>Registros de Máximos Anuales de Caudales (m³/sg).</i>	57
Tabla 5. <i>Cuantiles por estación Normal Generalizada.</i>	60
Tabla 6. <i>Cuantiles por estación Pearson tipo III.</i>	60
Tabla 7. <i>Metodología para la obtención de la amenaza por inundación final.</i>	69
Tabla 8. <i>Áreas de amenaza por metodología geomorfológica – Histórica.</i>	73
Tabla 9. <i>Áreas de amenaza por metodología Hidrodinámica.</i>	73
Tabla 10. <i>Áreas de amenaza por metodología compuesta.</i>	74
Tabla 11. <i>Análisis comparativo de la amenaza hidráulica – geomorfológica.</i>	75

Lista de figuras

Figura 1. <i>Modelo de análisis para la zonificación de la amenaza por inundación hidráulica y geomorfológica.</i>	31
Figura 2. <i>Análisis multitemporal de imágenes satelitales de Google Earth 1969 y 2010.</i>	33
Figura 3. <i>Análisis multitemporal de imágenes de radar tipo SENTINEL 2014 y 2019.</i>	34
Figura 4. <i>Análisis multitemporal de imágenes satelitales de LANDSAT y SENTINEL.</i>	35
Figura 5. <i>Análisis e interpretación de imagen satelital de ESRI IMAGERY del año 2014.</i>	36
Figura 6. <i>Superposición de imágenes satelitales.</i>	37
Figura 7. <i>Análisis multitemporal de imágenes satelitales 1969 – 2019.</i>	38
Figura 8. <i>Procesos de erosión y sedimentación del río Meta, desde el año 1969 al año 2019.</i> ..	39
Figura 9. <i>Resistencia relativa de los materiales a la erosión fluvial.</i>	42
Figura 10. <i>Esquema metodológico para la obtención de la susceptibilidad por inundaciones.</i> ...45	
Figura 11. <i>Inventario de eventos de inundación en el municipio de Puerto López.</i>	47
Figura 12. <i>Geomorfología a nivel de elementos.</i>	48
Figura 13. <i>Susceptibilidad inundación por geomorfología.</i>	50
Figura 14. <i>Esquema metodológico para la obtención de la amenaza por inundaciones.</i>	51
Figura 15. <i>Mapa de amenaza inundación por geomorfología.</i>	52
Figura 16. <i>Porcentaje de amenaza por inundación por geomorfología.</i>	53
Figura 17. <i>Diagrama-L con parámetros por estación hidrológica analizada.</i>	59
Figura 18. <i>Diagrama-L con parámetros Skewness-Kurtosis regionales.</i>	60
Figura 19. <i>Serie de tiempo de Entrada.</i>	63
Figura 20. <i>Modelo Hidrodinámico Construido.</i>	64
Figura 21. <i>Cálculo de altura de lámina de agua y velocidad Tr100 y 500 años.</i>	65

Figura 22. <i>Zonificación de Amenaza Inundación por hidrodinámica.</i>	67
Figura 23. <i>Porcentaje de Amenaza Inundación hidrodinámica.</i>	68
Figura 24. <i>Zonificación de Amenaza Inundación final.</i>	70
Figura 25. <i>Porcentaje de Amenaza Inundación final.</i>	71
Figura 26. <i>Modelo de análisis aplicado a la zonificación de amenaza por inundación.</i>	72
Figura 27. <i>Áreas de expansión libres de inundación y seguras como áreas de expansión urbana.</i>	76

Lista de apéndices

Apéndice A.	<i>Modelo de análisis aplicado a la zonificación de amenaza por inundación.</i>	82
--------------------	--	----

Resumen

Las inundaciones constituyen el fenómeno socio-natural más recurrente en el territorio colombiano, cobrando una importancia significativa a partir del fenómeno de La Niña en 2010-2011, el cual afectó a más del 60% de los municipios. Este escenario subraya la necesidad imperante de examinar con mayor detenimiento las metodologías propuestas para comprender el comportamiento de los ríos y los fenómenos de inundación. En el marco de este trabajo de grado, se abordan dos enfoques metodológicos con el fin de obtener una zonificación de la amenaza por inundaciones urbanas en el municipio de Puerto López, Meta. Uno de estos enfoques es el análisis metodológico hidráulico, un método determinístico y matemático que busca entender cómo se comporta un caudal con cierto periodo de retorno en el cauce. El segundo enfoque es el método heurístico geomorfológico histórico, cuyo propósito es analizar la dinámica fluvial a lo largo del tiempo mediante la interpretación de imágenes satelitales y modelos digitales. El objetivo principal de este trabajo es complementar ambos enfoques metodológicos para luego relacionarlos mediante una matriz de correlación. Esto dio como resultado un modelo de análisis hidro-geomorfológico que no solo puede ser replicado en otros municipios, sino que también se erige como una herramienta valiosa de ordenamiento territorial para comprender los fenómenos de inundación y su evolución tanto en términos espaciales como temporales, facilitando la identificación de áreas confiables y seguras para la expansión urbana.

Palabras clave: Hidráulica, geomorfología, ordenamiento territorial, inundación, caudal

Abstract

Floods constitute the most recurrent socio-natural phenomenon in the Colombian territory, gaining significant importance starting from the La Niña phenomenon in 2010-2011, which affected over 60% of the municipalities. This scenario underscores the pressing need to examine in greater detail the proposed methodologies to understand the behavior of rivers and flooding phenomena. In the context of this thesis, two methodological approaches are addressed to obtain zoning for urban flood threats in the municipality of Puerto López, Meta. One of these approaches is the hydraulic methodological analysis, a deterministic and mathematical method that seeks to understand how a flow behaves with a certain return period in the channel. The second approach is the historical geomorphological heuristic method, aimed at analyzing fluvial dynamics over time through the interpretation of satellite images and digital models. The main objective of this work is to complement both methodological approaches and subsequently relate them through a correlation matrix. This resulted in a hydro-geomorphological analysis model that can not only be replicated in other municipalities but also emerges as a valuable tool for territorial planning to understand flooding phenomena and their evolution in both spatial and temporal terms, facilitating the identification of reliable and safe areas for urban expansion.

Keywords: Hydraulics, geomorphology, territorial planning, flood, flow

Abreviaturas

EOT: Esquema de Ordenamiento Territorial

MDE: Modelo Digital de Elevación

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

OT: Ordenamiento Territorial

PBOT: Plan Básico de Ordenamiento Territorial

POMCA: Plan de Ordenación y Manejo de Cuenca Hidrográfica

POT: Plan de Ordenamiento Territorial

SIG: Sistemas de Información Geográfica

Introducción

Hoy en día, términos como variabilidad climática y cambio climático son ampliamente usados para abordar la problemática que enfrenta el mundo actual. Se atribuyen todos estos fenómenos al exterminio constante de ecosistemas, la contaminación del agua, del aire, el uso desmedido de los recursos naturales y la emisión de gases efecto invernadero a la atmosfera, lo que ha generado un aumento de la temperatura promedio a nivel mundial, hasta un 0.75 °C, de acuerdo con lo planteado en el Informe sobre Desarrollo Humano 2011, publicado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2011). Los gases efecto invernadero retienen la radiación solar en forma de calor, lo que ha ocasionado que el calentamiento global se acelere, aumentando así, la probabilidad de ocurrencia de fenómenos como tormentas, huracanes, ciclones tropicales, sequías e incluso inundaciones, por aumento en el régimen de precipitaciones. Según las Naciones Unidas las inundaciones representan el 43% de los desastres naturales, y han afectado más de 2300 millones de personas, dejando un saldo de 157000 vidas humanas, y pérdidas cercanas a los 662000 millones de dólares, (ONU, 2019, p.18).

Con el pasar de los siglos los fenómenos de inundación han sido vistos desde perspectivas muy diferentes, dependiendo de los entornos, las culturas y las circunstancias socio-ambientales de cada época y población:

Antiguas civilizaciones como la India, China y Egipto, aprovecharon las crecidas para generar abundancia y fertilidad. En América, las sociedades también se adaptaron y manejaron el territorio en condiciones ambientales adversas; Aztecas, Chibchas y Zenúes, habitaron zonas inundables y mediante técnicas de manejo del agua y la pesca, sostuvieron la población indígena en lo que actualmente es México y Colombia; modificando levemente el paisaje gracias a su comprensión

sobre la naturaleza de las inundaciones y de los beneficios que ofrecían. (Sedano, et ál., 2013, p.220).

El fenómeno de la Niña 2010-2011, registró precipitaciones extremas en Colombia, ocasionando el desbordamiento de la mayoría de los ríos del país, dejando un saldo de más de 500 vidas humanas (Güiza, 2012, p.25). El 88% de los desastres en el país son de origen hidrometeorológico, siendo las inundaciones unas de las más recurrentes con el 35%, superada únicamente por sequías e incendios (DNP, 2018, p.11). Actualmente Colombia ha generado importantes avances e inversión, en reducción y conocimiento del riesgo, con la guía para la zonificación del riesgo por movimientos en masa urbano del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2016), y rural (SGC, 2017), la guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación (IDEAM, 2018), y la guía metodológica para la zonificación de avenidas torrenciales recientemente lanzada (SGC, 2021). Sin embargo, esto no ocurría a mediados de la década pasada, ya que la mayoría de los recursos, se destinaban para la atención de desastres, sin ser conscientes de la importancia conocer y reducir el riesgo.

Las inversiones ejecutadas por la nación en gestión del riesgo de desastres durante el periodo comprendido entre 1998 a 2010, el 81.5% fueron destinadas al manejo de desastres, y tan solo el 2.1% se orientaron a las áreas de conocimiento e información, gobernabilidad y educación. (Banco Mundial, 2012, pp.360-370).

Para la Organización de las Naciones Unidas y el Banco Mundial, Colombia se ubica de tercero en el escalafón de países con mayor riesgo climático del mundo. (Sedano, 2013).

La zonificación de la amenaza por fenómenos de inundación es un instrumento fundamental en la toma de decisiones en el marco del ordenamiento territorial y para su designación existen varios métodos aceptados en el contexto colombiano que están consignados

en el Decreto 1077 de 2015 compilatorio del Decreto 1807 de 2014, el cual establece las metodologías, escalas e insumos mínimos a tener en cuenta en la zonificación de esta amenaza, con el fin de incorporar de manera asertiva la gestión del riesgo en el ordenamiento territorial. Sin embargo, en la información oficial publicada por fuentes del gobierno hasta el momento no hay claridad de las metodologías aplicables para la zonificación de la amenaza por inundación, ni tampoco se establecen criterios y/o procedimientos, para hacer un análisis completo que permita tener en cuenta tanto la hidrodinámica como la dinámica fluvial a través de la geomorfología y análisis multitemporales.

Desde mediados del siglo XX, la determinación de las zonas de inundación se ha realizado abordando el fenómeno como netamente natural, con fundamento en la geología y de los procesos aluviales que las originan. A partir de la incorporación de las nuevas tecnologías, se introduce la hidrodinámica para realizar el análisis de estas zonas de inundación, y de esta manera se han podido definir áreas específicas de afectación. Desde los años 1970, se ha avanzado en la creación y calibración de software especializados en hidrodinámica y modelos matemáticos, encaminados a predecir el comportamiento de ciertos caudales con una probabilidad temporal de ocurrencia conocidos como periodos de retorno, lo que ha desplazado dramáticamente el análisis de la dinámica fluvial de los cauces, generando errores en la zonificación de la amenaza, debido que los cauces de llanuras aluviales muy extensas como el río Meta pueden llegar a migrar más de 100 metros por año, perdiendo validez los modelos hidrodinámicos, que no incorporan las variables geomorfológicas históricas, generando un inadecuado ordenamiento y uso del territorio.

El municipio de Puerto López se encuentra localizado en el sector denominado los Llanos Orientales, el cual no evidencia afectaciones tectónicas importantes. Las unidades geológicas se encuentran poco consolidadas lo que promueve la migración lateral de la mayoría de los ríos de la

región. Las unidades están dispuestas de forma horizontal a subhorizontal, ligeramente plegadas, dentro del monoclinal terciario. En los mapas geológicos a escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano, se observan algunos lineamientos con rumbo tanto NE como NW (PBOT, 2019).

La investigación busca zonificar adecuadamente la amenaza por fenómenos de inundación como una herramienta fundamental en los procesos de ordenamiento y ocupación del territorio a nivel urbano. A lo largo del desarrollo del presente documento, el lector podrá encontrar la zonificación de amenaza geomorfológica histórica en el río Meta por su paso por el casco urbano del municipio de Puerto López, así como el cálculo de caudales y modelaciones de los mismos, con el fin de buscar complementarlos, y delimitar adecuadamente la amenaza por fenómenos de inundación y de esa manera obtener un modelo de análisis que podría ser usado en territorios con fuertes dinámicas fluviales.

1. Propuesta metodológica con enfoque hidro-geomorfológico para la evaluación de la amenaza por inundación, como herramienta de expansión urbana. Caso de estudio Puerto López Meta.

1.1 Planteamiento del problema

La zonificación de amenaza por cualquier fenómeno debe tener una vigencia mínima de 12 años, para el caso de la amenaza por fenómenos de inundación, esta vigencia puede verse significativamente afectada, si solo se consideran modelos hidráulicos con periodos de retorno, que solo buscan conocer hasta donde podría llegar la lámina de agua de llegarse a presentar un evento extremo, y dejan de lado la importancia de conocer la dinámica fluvial, ya que los cauces de llanuras aluviales muy extensas como el río Meta pueden llegar a migrar más de 100 metros por año, perdiendo así validez los modelos hidráulicos, que no incorporan las variables geomorfológicas históricas, generando un inadecuado ordenamiento y uso del territorio. Es por esto que es necesario realizar una correcta caracterización de la amenaza, con el fin de que las comunidades que habitan el territorio puedan realizar sus actividades económicas de forma segura y sobre todo que puedan vivir en sitios donde se mitigue o se elimine la configuración de nuevas condiciones de riesgo. Por lo mencionado anteriormente nace la necesidad de proponer un análisis de la zonificación de amenaza por inundación, a partir criterios hidro-geomorfológicos e históricos: Caso de estudio Municipio de Puerto López, Departamento del Meta, como herramienta de expansión urbana, que busca complementar ambas metodologías para que tengan mayor peso y relevancia en el ordenamiento del territorio.

La presente propuesta de investigación pretende resolver la siguiente pregunta:

¿Cómo evaluar la amenaza por inundación, a partir de una metodología con enfoque hidro-geomorfológico para el municipio de Puerto López, departamento del Meta, que ayude a proponer áreas de expansión adecuadas y seguras?

1.2 Justificación

La gestión del riesgo de desastres dentro de los planes de ordenamiento territorial se incorpora como determinante ambiental y se define así:

Es determinante ambiental la amenaza alta, por movimientos en masa, inundaciones, avenidas torrenciales, actividades volcánicas e incendios forestales, que se define como categoría de conservación y protección ambiental en la zona de uso y manejo de áreas de protección, condicionando los usos del territorio hasta tanto se realicen estudios detallados de riesgos por parte de los municipios para la toma de decisiones en la reglamentación de usos del suelo. (MinAmbiente, 2014, p.51).

Colombia por su posición geográfica, enfrenta desafíos frente al tema de amenaza por fenómenos de inundación, debido a factores condicionantes como: “El conflicto en el uso de suelos, la ubicación de asentamientos humanos en zonas de alta vulnerabilidad por inundaciones, deslizamientos y avenidas torrenciales, condiciones climáticas cambiantes y actividades que impliquen cambios significativos en la dinámica y geometría de los ríos” (Cardenas, 2018, p.40).

El municipio de Puerto López ha sido afectado históricamente por fenómenos de inundación, relacionados a la dinámica fluvial de los ríos: Meta, Guayuriba, Negro, Humea, Caño el Tigre, Caño Pachaquiario, entre otros. Puerto López fue uno de los municipios más afectados durante la ola invernal del fenómeno “La Niña” 2010-2011, lo que ocasiono pérdidas millonarias al municipio y sus pobladores. Desde mediados del año 2019, el municipio de Puerto López,

realizó la actualización de los estudios básicos de gestión del riesgo de desastres, en el marco de la actualización del Plan Básico de Ordenamiento Territorial, en el que se le ha dado especial relevancia a los fenómenos socio-naturales de inundación, destinando recursos para más de 10 estudios detallados en sectores críticos de las localidades de: La Balsa, Puerto Porfía, Chaviva, Pachaquiario, Remolino, Puerto Guadalupe, Bocas de Guayuriba, Casco urbano de Puerto López, entre otros. Lo cual refleja el gran interés del municipio en aumentar el conocimiento y la reducción del riesgo por inundación, disminuyendo considerablemente la vulnerabilidad de la población frente a los fenómenos de inundación.

Se propone la investigación, porque es necesario una revisión metodológica para la correcta zonificación de la amenaza por fenómenos de inundación. Se puede realizar con la comparación de la metodología geomorfológica histórica, la cual se encarga de relacionar las formas del terreno y los eventos históricos de inundación, y la metodología hidrodinámica, la cual busca conocer las zonas posiblemente afectadas, con una simulación computarizada de una inundación con cierto periodo de retorno. Estas metodologías difieren considerablemente en su aplicación y coherencia, por lo cual se hace necesario conocer el uso correcto y su campo de aplicación.

Es importante mencionar que las áreas de amenaza alta por cualquier fenómeno natural son consideradas como de conservación y protección, hecho relevante a la hora de proponer áreas de expansión urbana. Por ello es necesario realizar una correcta caracterización de la amenaza por fenómenos de inundación, con el fin de proteger las comunidades que habitan el territorio, y realicen sus actividades económicas de forma segura, en donde se mitigue o se elimine la configuración de nuevas condiciones de riesgo.

La investigación tiene como finalidad, proponer una metodología de zonificación de amenaza por inundación, con enfoque hidro-geomorfológico para ayudar a entidades territoriales,

a poder zonificar adecuadamente la amenaza por inundación, y de esa manera hacer un correcto uso y ordenamiento del territorio. Cuidando la integridad de las personas y disminuyendo los asentamientos en lugares incorrectamente zonificados en amenaza baja, subestimando la migración lateral del río Meta a su paso por el municipio de Puerto López.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Proponer una metodología con criterios hidro-geomorfológicos para la zonificación de amenaza por inundación, como herramienta de expansión urbana: Caso de estudio Municipio de Puerto López, Departamento del Meta.

1.3.2 *Objetivos específicos*

Realizar un análisis multitemporal de las últimas cuatro décadas, de la dinámica fluvial del río Meta, en su paso por el casco urbano del municipio de Puerto López, departamento del Meta.

Zonificar la amenaza por fenómenos de inundación del río Meta, con base en criterios geomorfológico histórico, en su paso por el casco urbano del municipio de Puerto López, departamento del Meta.

Zonificar la amenaza por fenómenos de inundación del río Meta, con base en criterios hidrodinámicos, en su paso por el casco urbano del municipio de Puerto López, departamento del Meta.

Proponer un modelo de análisis aplicado al caso de estudio, con enfoque hidro-geomorfológico, como herramienta para la localización de zonas de expansión urbana libre de amenaza por inundación del municipio de Puerto López, departamento del Meta.

2. Marco referencial

2.1 Marco teórico

Para que esta incorporación de la gestión de riesgo de desastres surja el efecto deseado en el ordenamiento territorial, es importante una articulación de las entidades territoriales, y un fortalecimiento de las mismas, de esa manera llevar a cabo procesos efectivos de monitoreo y control; esto se logra a través de fortalecer la capacidad técnica de los profesionales idóneos de las administraciones municipales, los cuales promoverán conocimiento y conciencia, a las comunidades con respecto a los riesgos a los que se encuentran expuestos, y disminuir así nuevas condiciones de riesgo.

Uno de los fenómenos socio-naturales más frecuente en el territorio nacional, son las inundaciones, las cuales ha generado pérdidas de vidas humanas y materiales. Recientemente, es normal atribuir que las catástrofes por inundaciones a “la Variabilidad (VC) y al Cambio Climático (CC), que están generando frecuentes anomalías en la precipitación” (Sedano, 2013, p.47).

Las inundaciones según la definición de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres son definidas como: Acumulación temporal de agua fuera de los cauces y áreas de reserva hídrica de las redes de drenaje (naturales y construidas). Se presentan debido a que los cauces de escorrentía superan la capacidad de retención e infiltración del suelo y/o la capacidad de transporte de los canales. Las inundaciones son eventos propios y periódicos de la dinámica natural

de las cuencas hidrográficas. Las inundaciones se pueden dividir de acuerdo con el régimen de los cauces en: lenta o de tipo aluvial, súbita o de tipo torrencial, por oleaje y encharcamiento. (UNGRD, 2017, p. 39).

Las inundaciones son uno de los fenómenos generadores de mayores desastres, tanto en Colombia como en el mundo, su impacto está en función de su magnitud y de las características sociales de la población afectada. Aunque los fenómenos de inundación ocurren frecuentemente en el mundo, en países subdesarrollados como Colombia, estos desastres tienen mayor impacto, no simplemente por las condiciones morfológicas del terreno, sino también las condiciones socioculturales y socioeconómicas de la población, (pobreza, falta conocimiento de los riesgos, y exposición de la población) facilitando a este tipo de eventos naturales que generen severas consecuencias en muchos casos irreversibles por la falta de resiliencia tanto de los afectados como de sus gobernantes.

En Colombia se ha optado por definir el tipo de metodología aplicada para la elaboración de los mapas de amenaza por inundación, con base en información disponible, o en la escala de trabajo, dejando las escalas rurales con análisis geomorfológico históricos, y las escalas urbanas y detalladas con metodologías hidrodinámicas, sin embargo expertos en el tema dicen: “El mapeo de inundaciones requiere la combinación e integración de datos geomorfológicos y métodos hidrológico-hidráulicos; sin embargo, a pesar de esto, hay muy poca información científica literatura que compara y valida ambos métodos” (Lastra, et ál, 2008, p.2).

Las inundaciones han sido analizadas inicialmente como un fenómeno netamente natural, con análisis de la geología y procesos aluviales que las originaban, con la incorporación de las nuevas tecnologías y ayudas de los sensores remotos, se han podido definir áreas específicas de afectación, desde los años 1970 se ha avanzado en la creación y calibración de software

especializados en hidrodinámica y modelos matemáticos encaminados a predecir el comportamiento de ciertos caudales con una probabilidad temporal de ocurrencia conocidos como periodos de retorno, lo que ha desplazado dramáticamente el análisis de la dinámica fluvial de los cauces, generando errores en la zonificación de la amenaza, trayendo un inadecuado ordenamiento territorial y exposición de población vulnerable.

El área de estudio comprende el río Meta, en su paso por el casco urbano del municipio de Puerto López, rodeada de grandes planicies aluviales, con procesos morfodinámicos activos, en donde se pueden apreciar geoformas de mayor a menor grado de susceptibilidad a inundación como: Cauce aluvial, barras de arena longitudinales, barras de arena tipo islas, barras de arena puntuales, terrazas bajas, terrazas de divagación lateral, terrazas antiguas elevadas, entre otras geoformas.

El área de estudio se encuentra localizado en la cuenca del río Meta, que pertenece al área hidrográfica del Orinoco, la cual es descrita desde su nacimiento por el Estudio Nacional del Agua 2014:

La mayor parte de las corrientes que pertenecen al área hidrográfica del Orinoco nacen en la cordillera Oriental, en los departamentos de Boyacá, Meta y Cundinamarca; luego transcurren a través de los llanos orientales por corrientes de grandes caudales como las de los ríos Meta, Guaviare, Inírida, Arauca, Vichada, Guayabero y Upía. El régimen hidrológico en toda el área es de tipo monomodal, con caudales máximos entre junio y agosto, mientras que los caudales mínimos tienen lugar entre enero y marzo. La extensión de la cuenca del río Meta alcanza el 24% de la vertiente, exhibiendo caudales medios mensuales que oscilan en el rango de 1.000 m³/s a 10.100 m³/s cerca de su desembocadura al río Orinoco. En la estación Aceitico, en la frontera con Venezuela, los caudales con el 5% de excedencia pueden ser de 10.900 m³/s y los de 95% de

excedencia de 1.600 m³/s. Los principales tributarios del río Meta son el río Upía, con un caudal medio anual de 418 m³/s en la estación Guaicaramo, los ríos Guayuriba y Meta con valores medios anuales de 155 m³/s y 369 m³/s respectivamente. (IDEAM, 2014, p.58).

2.2 Marco conceptual

En la siguiente sección, se clarifican algunos conceptos que son necesarios para la comprensión del proyecto.

Amenaza: peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, (...) bienes, infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales” (Ley 1523 de 2012, p.5.).

Amenaza Socio-Natural: peligro latente asociado con la probable ocurrencia de fenómenos físicos cuya existencia, intensidad o recurrencia se relaciona con procesos de degradación o transformación ambiental y/o de intervención humana en los ecosistemas. (UNGRD, 2017, p.38.).

Creciente Súbita: aunque las áreas de afectación son menores, el poder destructivo es potencialmente mayor y cobra el mayor número de vidas cuando se presentan, responden rápidamente a la ocurrencia de fuertes precipitaciones en las partes altas de las cuencas, los incrementos de nivel son del orden de metros en pocas horas, y el tiempo de permanencia de estas inundaciones en las zonas afectadas son igualmente de horas o pocos días, estas se presentan en todas las cuencas de alta pendiente de la región Andina principalmente. (IDEAM).

Desastre: es el resultado que se desencadena de la manifestación de uno o varios eventos naturales o antropogénicos no intencionales que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en las personas, los bienes, la infraestructura, los medios de subsistencia, la

prestación de servicios o los recursos ambientales, causa daños o pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, generando una alteración intensa, grave y extendida en las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad, que exige del Estado y del sistema nacional ejecutar acciones de respuesta a la emergencia, rehabilitación y reconstrucción, (Ley 1523 de 2012, p.6.).

Geomorfología Fluvial: el sistema fluvial es entendido como el conjunto de geoformas, procesos morfodinámicos, cauces, escorrentías y movimiento de sedimentos en ladera, redes de drenaje y zonas de sedimentación, relacionados entre sí por el proceso de flujo de agua, sedimentos y nutrientes entre las partes del conjunto. En tal sentido, comprende las interrelaciones de las diferentes tipologías de sistemas lóticos y lénticos presentes en las cuencas hidrográficas del país. Como muchos de los sistemas geomorfológicos, el fluvial está compuesto por subsistemas relacionados entre sí de manera jerárquica (Charlton, 2008).

Gestión del riesgo: es el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible. (Ley 1523 de 2012, p.7.).

Hidráulica: la hidráulica es una rama de la física que se dedica al análisis del movimiento y del equilibrio de los fluidos. en sistemas lóticos el cual tiene capacidad hidráulica para transitar el flujo de caudales asociados a la ocurrencia de eventos de crecientes propias de la dinámica hidrológica de un período intranual normal, es decir, los eventos producidos principalmente por el paso de la zona de convergencia intertropical. (Hernández, 2014, p.2.)

Inundación: acumulación temporal de agua fuera de los cauces y áreas de reserva hídrica de las redes de drenaje (naturales y construidas). Se presentan debido a que los cauces de escorrentía superan la capacidad de retención e infiltración del suelo y/o la capacidad de transporte de los canales. Las inundaciones son eventos propios y periódicos de la dinámica natural de las cuencas hidrográficas. Las inundaciones se pueden dividir de acuerdo con el régimen de los cauces en: lenta o de tipo aluvial, súbita o de tipo torrencial, por oleaje y encharcamiento, (UNGRD, 2017, p.39.).

Inundación Lenta: son las que ocurren en las zonas planas de los ríos y con valles aluviales extensos, los incrementos de nivel diario son de apenas del orden de centímetros, reporta afectaciones de grandes extensiones, pero usualmente pocas pérdidas de vidas humanas, el tiempo de afectación puede fácilmente llegar a ser del orden de meses, en Colombia el ejemplo más claro es la región de la Mojana. (IDEAM, 2014, p.58.).

Ordenamiento territorial: el ordenamiento del territorio municipal y distrital comprende un conjunto de acciones político-administrativas y de planificación física concertadas, emprendidas por los municipios o distritos y áreas metropolitanas, en ejercicio de la función pública que les compete, dentro de los límites fijados por la Constitución y las leyes, en orden a disponer de instrumentos eficientes para orientar el desarrollo del territorio bajo su jurisdicción y regular la utilización, transformación y ocupación del espacio, de acuerdo con las estrategias de desarrollo socioeconómico y en armonía con el medio ambiente y las tradiciones históricas y culturales (Ley 388 de 1997).

Periodo de retorno: intervalo de tiempo medio a largo plazo transcurrido entre un fenómeno hidrológico y otro de igual o mayor magnitud (OMM y UNESCO, 2012), por ejemplo, caudal o nivel máximo de crecida.

Prevención de riesgo: medidas y acciones de intervención restrictiva o prospectiva dispuestas con anticipación con el fin de evitar que se genere riesgo. Puede enfocarse a evitar o neutralizar la amenaza o la exposición y la vulnerabilidad ante la misma en forma definitiva para impedir que se genere nuevo riesgo. Los instrumentos esenciales de la prevención son aquellos previstos en la planificación, la inversión pública y el ordenamiento ambiental territorial, que tienen como objetivo reglamentar el uso y la ocupación del suelo de forma segura y sostenible. (Ley 1523 de 2012, p.8.).

Reducción del riesgo: es el proceso de la gestión del riesgo, está compuesto por la intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes, entiéndase: mitigación del riesgo y a evitar nuevo riesgo en el territorio, entiéndase: prevención del riesgo. Son medidas de mitigación y prevención que se adoptan con antelación para reducir la amenaza, la exposición y disminuir la vulnerabilidad de las personas, los medios de subsistencia, los bienes, la infraestructura y los recursos ambientales, para evitar o minimizar los daños y pérdidas en caso de producirse los eventos físicos peligrosos. La reducción del riesgo la componen la intervención correctiva del riesgo existente, la intervención prospectiva de nuevo riesgo y la protección financiera. (Ley 1523 de 2012, p.9.).

Riesgo: la combinación de la probabilidad de que se produzca un evento y sus consecuencias negativas. (UNISDR, 2009, p.29.).

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 (Ley 1523 de 2012, p.10.).

2.3 Marco legal

Uno de los alcances más importantes en tema de gestión del riesgo de desastres a nivel internacional que aún siguen vigentes es el Marco de Sendai, Japón, aceptada como la Tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, la cual ha ayudado a implementar de manera más concisa el Marco de Acción de Hyogo, determinar modalidades de cooperación y adquirir estrategias institucionales, regionales y nacionales con respecto a la reducción de desastres, esto a su vez dio paso en el mismo año 2015 a los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, que buscan erradicar la pobreza, cuidar el medio ambiente en busca de un desarrollo sostenible. En 2018 se llevó a cabo la tercera reunión de ministros y autoridades del alto nivel sobre la implementación del Marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres 2015-2030 en las Américas y El Caribe: Declaración de Cartagena.

Con la Ley 1523 nace el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia, “PNGRD una Estrategia de Desarrollo”; “Es el instrumento que define los objetivos, programas, acciones, responsables y presupuestos, mediante las cuales se ejecutan los procesos de conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y de manejo de desastres, en el marco de la planificación del desarrollo nacional”. (Ley 1523 de 2012, p. 26). A raíz de la Ley 1523 y el nuevo Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres de Colombia, y el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (2012), el Estudio Nacional de Agua (2014), y surgen algunos decretos regulatorios como lo es Decreto 1807 de 2014, el cual 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, el cual a su vez fue retomado por el Decreto 1077 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, y se dictan algunas disposiciones adicionales. Posteriormente la Presidencia de la Republica emite el Decreto 308 de 2016 por medio del cual se adopta el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres. Actualmente en Colombia se cuenta con el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), liderado por el Presidente de la República, el cual hace parte del Consejo Nacional para la Gestión del Riesgo, que a su vez lidera a la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), con extensiones a nivel departamental con los Consejos Departamentales Para la Gestión del Riesgo, y a nivel municipal con los Consejos municipales Gestión del Riesgo de Desastres, los cuales se encargan de velar que la Gestión del Riesgo de Desastres se realice de manera integral, desde los comités para conocimiento del riesgo, reducción del riesgo, y manejo de desastres, entendiendo la responsabilidad social que implica el desarrollo de sus funciones.

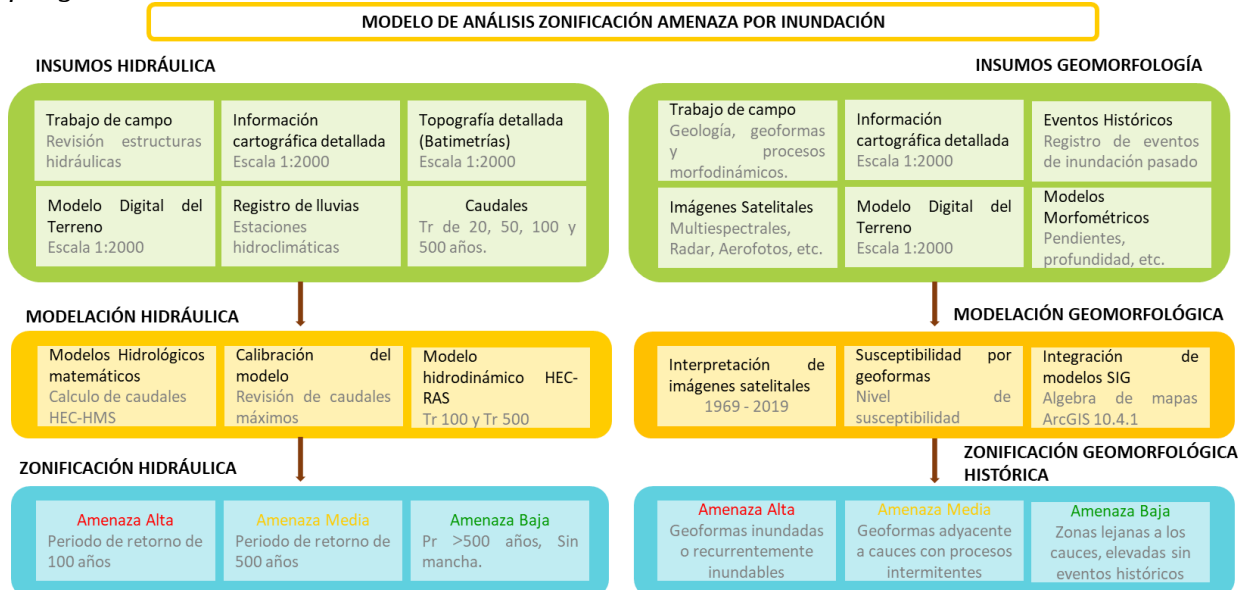
El paso más importante en la zonificación de amenazas, y en la gestión integral del riesgo de desastres, es que estos procesos sean incluidos en el ordenamiento territorial y sean una herramienta en la planeación y conservación de los territorios. En Colombia se incorporan estos procesos en los Planes de Ordenamiento Territorial, siguiendo las directrices del Decreto 1077 de 2015. “Es necesario priorizar las amenazas y riesgos a incluir en el ordenamiento territorial, es recomendable iniciar con aquellas que representen el riesgo más alto, tengan alta frecuencia y que tengan mayor relación con los procesos de uso y ocupación del territorio” (PREDECAN, 2009, p.73).

3. Metodologías de zonificación de amenaza por inundación

Para la zonificación de la amenaza por fenómenos de inundación existen diversas maneras y métodos, la aceptadas para el territorio colombiano están consignadas en el Decreto 1077 de 2015 compilatorio del Decreto 1807 de 2014, el cual establece las metodologías, escalas e insumos mínimos a tener en cuenta en la zonificación de esta amenaza con el fin de incorporar de manera más asertiva la gestión del riesgo en el ordenamiento territorial.

La zonificación de la amenaza por fenómenos de inundación en cuencas hidrográficas es aceptada la metodología geomorfológica histórica ya que solo se llega a una escala rural 1:25.000, según lo dispuesto en el Decreto 1640 de 2012, “Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones”. Sin embargo, en el Protocolo de Incorporación se deja la posibilidad de realizar análisis hidrológicos hidráulicos, si existe información topográfica detallada de los cauces, lo cual no es completamente claro debido a que se pueden realizar modelos hidráulicos con la información topográfica disponible como modelos digitales de elevación gratuitos con resolución acorde a la escala de trabajo.

La metodología propuesta conlleva el desarrollo y análisis de la metodología geomorfológico – histórica, la caracterización de eventos históricos y obtención de los modelos hidrodinámicos del municipio, obtenidos a través de la Alcaldía Municipal de Puerto López, para así realizar un modelo de análisis para la determinación de áreas de expansión urbana libres de amenaza por inundación. A continuación, se hace una relación de las fases a desarrollar:

Figura 1. Modelo de análisis para la zonificación de la amenaza por inundación hidráulica y geomorfológica.

Fase 1: recolección y análisis de información preexistente, relacionado con fenómenos de inundaciones dentro del municipio de Puerto López.

- ✓ En esta fase se recopila toda la información disponible de bases de datos de la universidad Santo Tomas, y otras fuentes de consulta especializada.
- ✓ Se solicitará información a la Alcaldía Municipal de Puerto López y Corporación Autónoma Regional, referente al conocimiento de la amenaza por inundación dentro del municipio.
- ✓ Descarga y análisis de imágenes satelitales disponibles de manera gratuita, como pancromáticas, multiespectrales, radar, etc.

Fase 2: análisis de la zonificación de amenaza por inundación a partir de geomorfología fluvial del área de estudio.

- ✓ Zonificación y análisis de imágenes satelitales, buscando zonas de erosión socavación, zonas de depositación de sedimentos y zonas potencialmente estables sin rastro de inundación.
- ✓ Caracterización de las geoformas de origen fluvial, para la zonificación de la amenaza por fenómenos de inundación, junto con la documentación de los eventos históricos.
- ✓ Zonificación de la amenaza por fenómenos de inundación con enfoque geomorfológico histórico.

Fase 3: elaboración de modelos hidráulicos, con el fin de conocer la dinámica de los caudales en el área de estudio.

- ✓ Adecuación y ajuste de modelo digital de terreno (DEM), con el fin de asegurar una correcta simulación de inundaciones, en el sector de análisis.
- ✓ Se elaborarán modelos hidráulicos con diferentes periodos de retorno con el fin de conocer la zonificación de la amenaza por fenómenos de inundación. Usualmente los estudios de amenaza hidrodinámica se construyen a partir de modelos hidrodinámicos/hidráulicos, comúnmente empleando software libre como Hec-RAS.

Fase 4: modelo de análisis hidro-geomorfológico para zonificación de la amenaza por fenómenos de inundación, como herramienta para la evaluación de zonas de expansión urbana.

- ✓ En esta fase se realizará una comparación de los modelos de inundación, los actualmente usados en el Ordenamiento Territorial Nacional como el geomorfológico histórico, y los modelos hidráulicos con diferentes periodos de retorno.
- ✓ Se realizará la propuesta metodológica con enfoque hidro-geomorfológico, con el fin de evaluar de manera correcta la amenaza por inundación, y así conocer el potencial de las áreas de expansión urbana dentro del área de estudio.

3.1 Análisis multitemporal de imágenes satelitales

Los materiales litológicos ya sea en rocas, depósitos inconsolidados o sedimentos activos presentan una resistencia relativa a la erosión fluvial. Estos materiales repercuten en la dinámica fluvial la movilidad y la estabilidad del cauce. Esta resistencia relativa de los materiales se ve traducida en una migración del cauce en donde esta disminuye y conforme la corriente presenta mayor energía y potencial de erosión.

Con el fin de conocer la dinámica fluvial del río Meta y su migración lateral en su paso por el casco urbano de Puerto López, se realizó análisis multitemporal de imágenes satelitales e imágenes aéreas, con las cuales se determinaron los principales cambios morfológicos que ha sufrido el cauce del río.

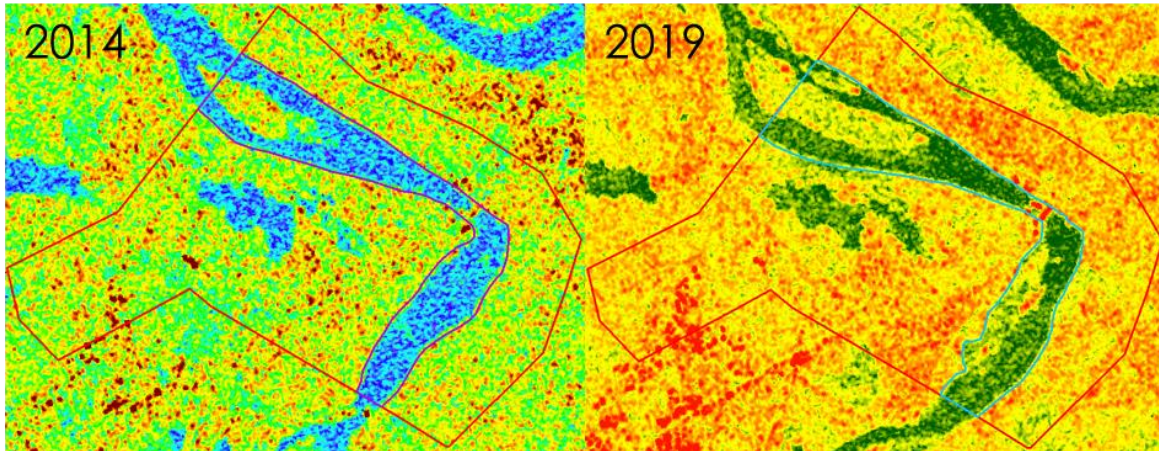
A continuación, se hace la relación de las interpretaciones de los años 1969 y 2010 con imágenes satelitales de Google Earth.

Figura 2. Análisis multitemporal de imágenes satelitales de Google Earth 1969 y 2010.



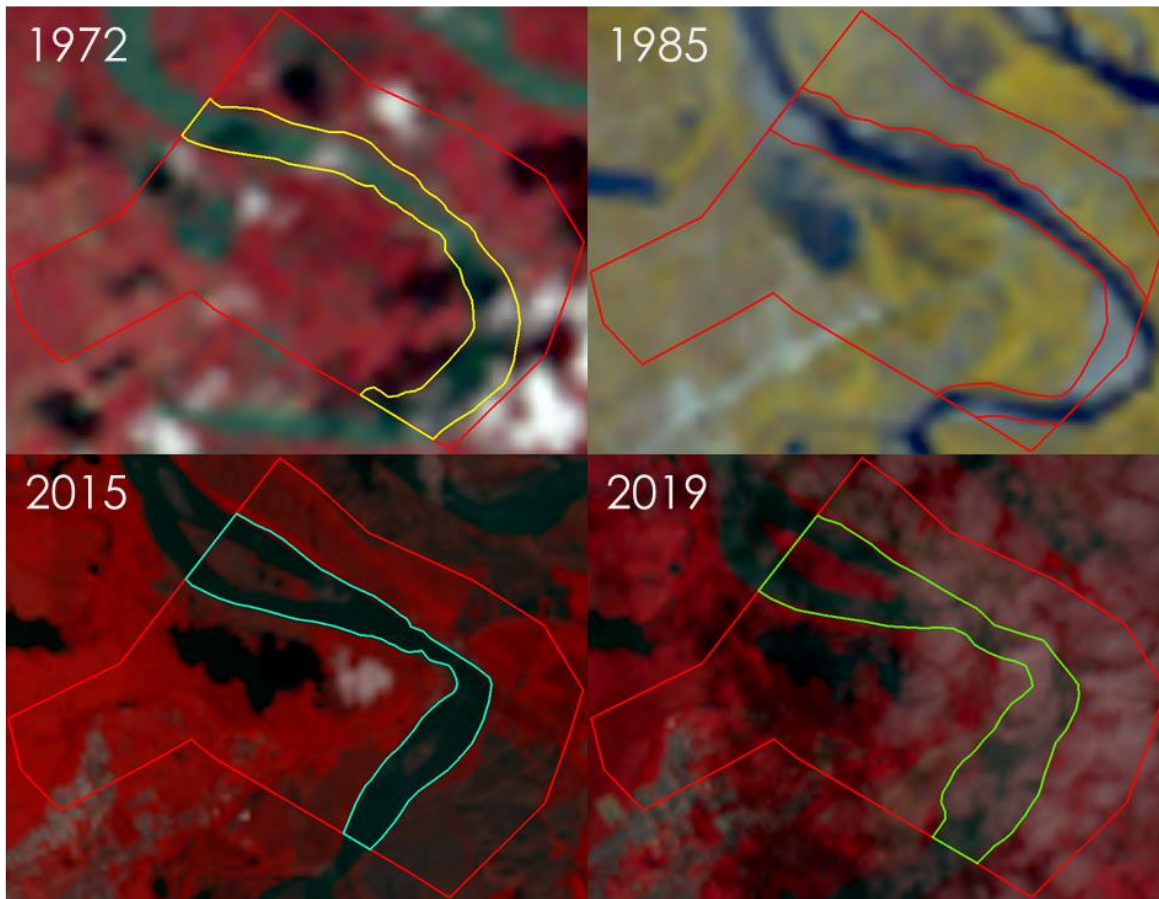
Se interpretaron imágenes de radar tipo Sentinel del año 2014 y 2019, este tipo de imágenes son de gran utilidad debido a que no presentan interferencia por nubosidad.

Figura 3. *Análisis multitemporal de imágenes de radar tipo SENTINEL 2014 y 2019.*



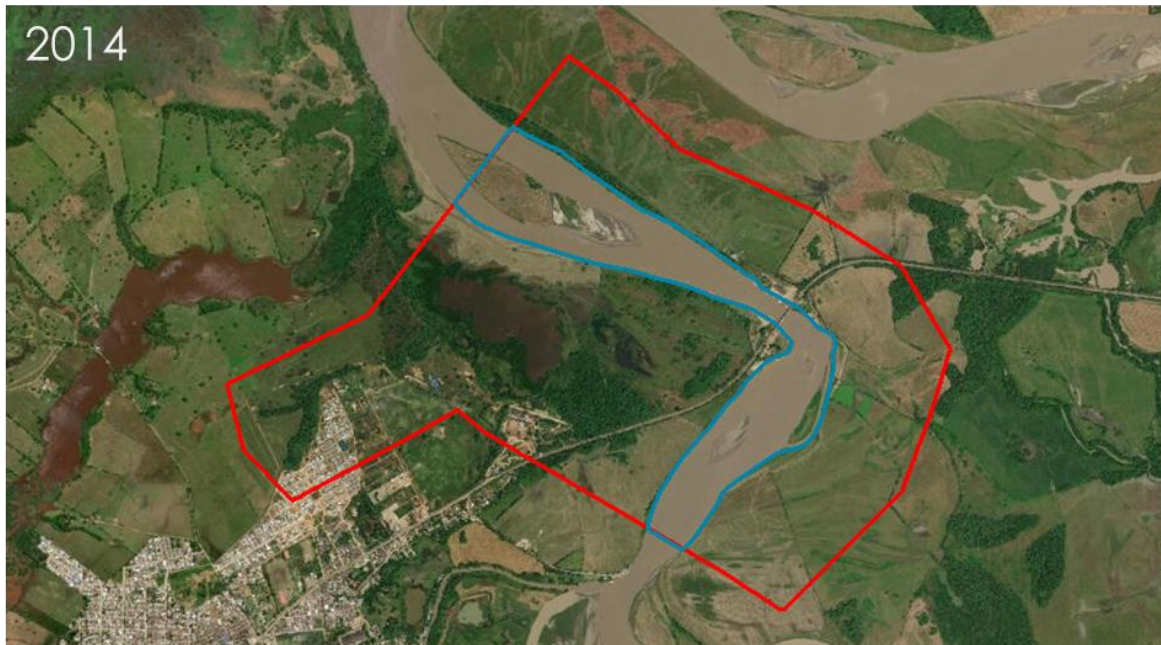
Se realizó la descarga, adecuación e interpretación de imágenes satelitales de Landsat de los años 1972, 1985, 2015 y 2019, en composición RGB de falso color, lo cual ayuda a la interpretación de los cuerpos de agua, para conocer la divagación del río Metica.

Figura 4. *Análisis multitemporal de imágenes satelitales de LANDSAT y SENTINEL.*

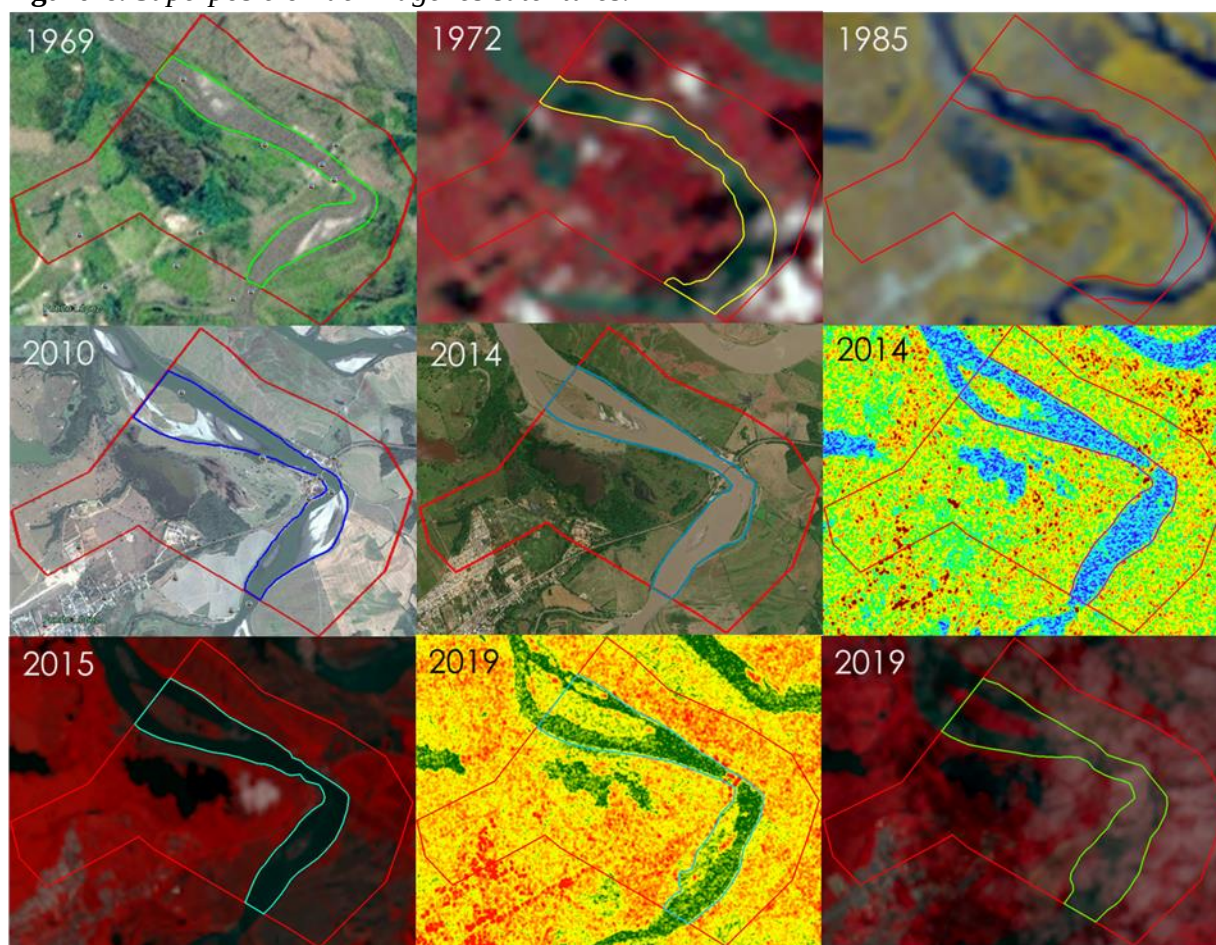


Se realizó la interpretación de las imágenes disponibles en el servidor de ArcGIS, las cuales son tipo World Imagery del año 2014, en las cuales se reconocen leves variaciones con respecto al cauce actual del río Metica.

Figura 5. *Análisis e interpretación de imagen satelital de ESRI IMAGERY del año 2014.*



Para poder determinar la socavación y migración lateral del cauce del río Meta, se realizó una superposición de las diferentes interpretaciones de ronda hídrica, desde el año 1969 hasta el año 2019, con un periodo de 50 años de análisis, en las que se evidencio fuertes variaciones en la morfología del cauce sobre la llanura aluvial, generando procesos de erosión y depositación de sedimentos.

Figura 6. Superposición de imágenes satelitales.

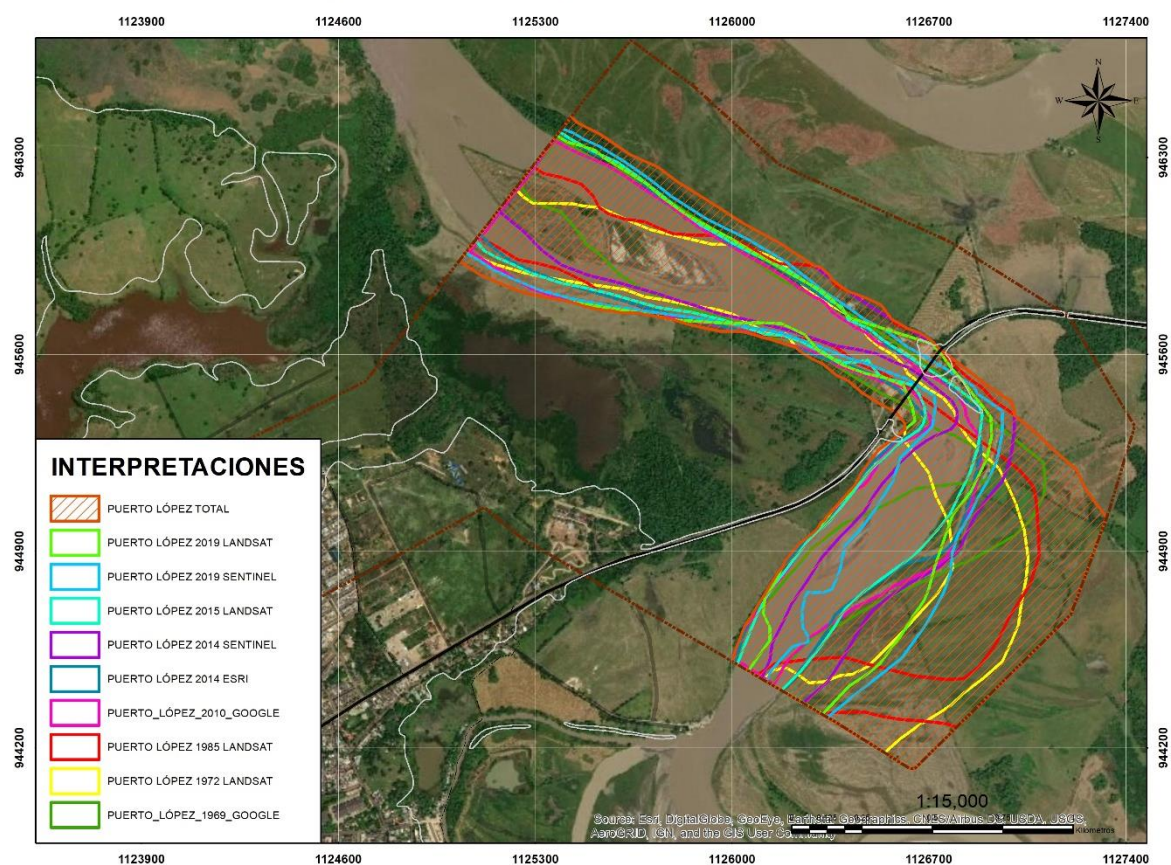
1969-1972: en este lapso de tiempo el cauce del río Meta, presenta una fuerte migración hacia el sureste del área de estudio, con una migración de hasta 400 metros en solo 3 años, es decir alrededor de 133 metros por años.

1972-1985: continua la migración del cauce hacia el sureste sin embargo de manera más progresiva, solo 250 metros en el lapso de 13 años, es decir tan solo 19 metros por año.

1985-2010: comienza una época de migración contraria a la que presentaba el cauce principal del río Meta, y se acerca más al casco urbano de Puerto López, migrando 730 metros en el lapso de 25 años, decir socavando y dejando una terraza aluvial de divagación lateral en los procesos de sedimentación, alrededor de 30 metros por año.

2014-2019: en estos últimos 5 años de análisis el cauce del río Meta migró hacia el sureste sobre la terraza de divagación lateral, un máximo de 220 metros, alrededor de 44 metros por año, mostrando una tendencia de migración y sedimentación del sector sureste del área de estudio. A continuación, se ilustra la superposición de las diferentes interpretaciones analizadas.

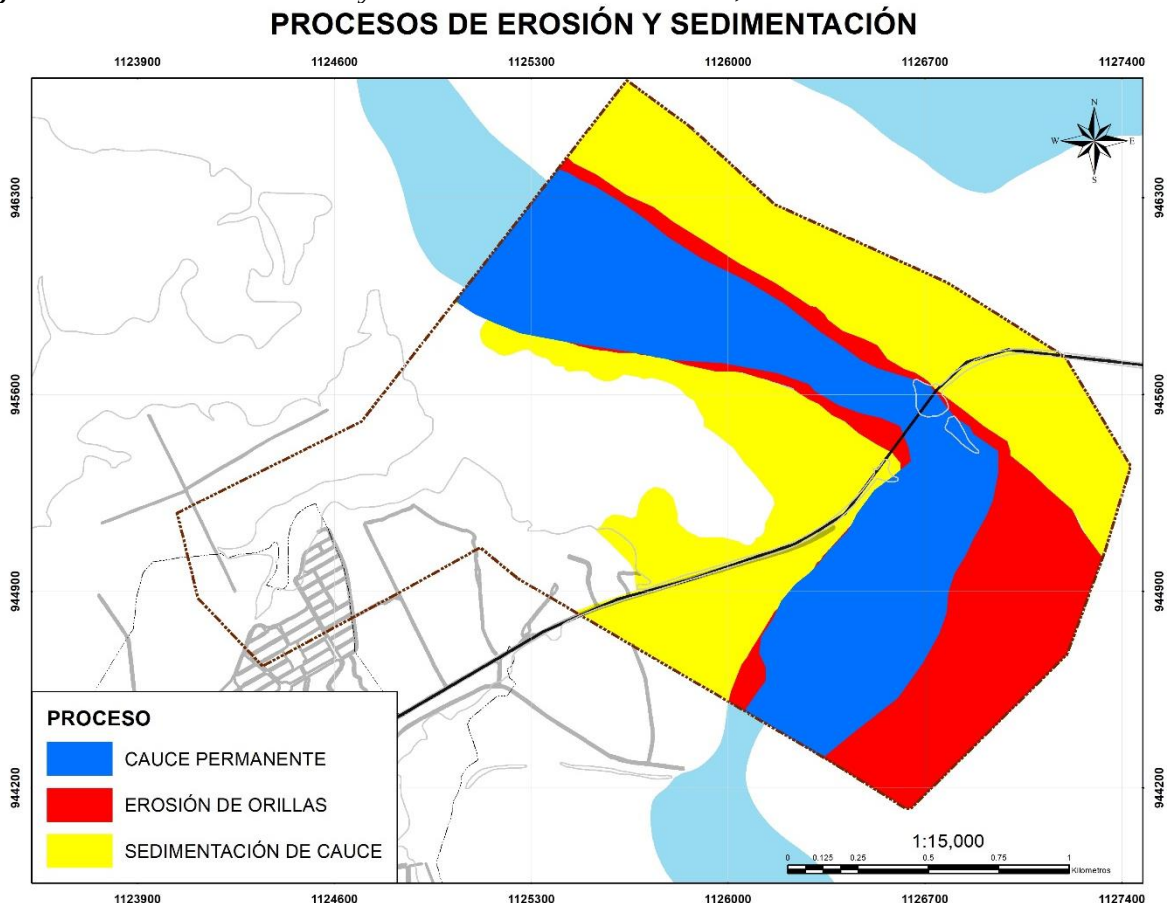
ANÁLISIS MULTITEMPORAL 1969 - 2019



3.1.1 Erosión y Sedimentación

Los ríos en sus procesos naturales erosionan transportan y depositan material dentro del lecho mayor y sus orillas. Estos procesos varían de acuerdo a la dinámica del río y los periodos climáticos normales y de variabilidad climática (NIÑO, NIÑA). El análisis de estos procesos se establece sobre dos condiciones requeridas de acuerdo a los objetivos de los estudios, comúnmente se busca la relación de una línea base normal del cauce del río y otra de referencia por contemporaneidad o valoración de un comportamiento extremo. (Vargas 2012).

Figura 8. *Procesos de erosión y sedimentación del río Meta, desde el año 1969 al año 2019.*



El río Meta presenta una fuerte dinámica fluvial en su paso por cercanías del casco urbano de Puerto López, en donde los últimos 50 años se ha apreciado la constante migración lateral del cauce, como se muestra en la ilustración anterior, en donde se definen las zonas de depositación y de potencial de erosión. De no llegar a intervenir la socavación y migración lateral del cauce, el río podría socavar hasta 50 metros por año según lo dispuesto en el análisis multitemporal, afectando los predios y fincas aledaños, sin embargo, el centro poblado no presenta amenaza por estos fenómenos de erosión, debido a que se encuentra en una terraza aluvial alta resistente a la erosión y socavación lateral.

3.1.2 Resistencia de los materiales a la erosión fluvial

Los materiales litológicos ya sea en rocas, depósitos inconsolidados o sedimentos activos presentan una resistencia relativa a la erosión fluvial. Estos materiales repercuten en la dinámica fluvial la movilidad y la estabilidad del cauce.

Teniendo en cuenta la geología (litología) y geomorfología del cauce se realiza la zonificación de la resistencia relativa de los materiales. Algunos ejemplos de materiales y geoformas se presentan en la siguiente tabla.

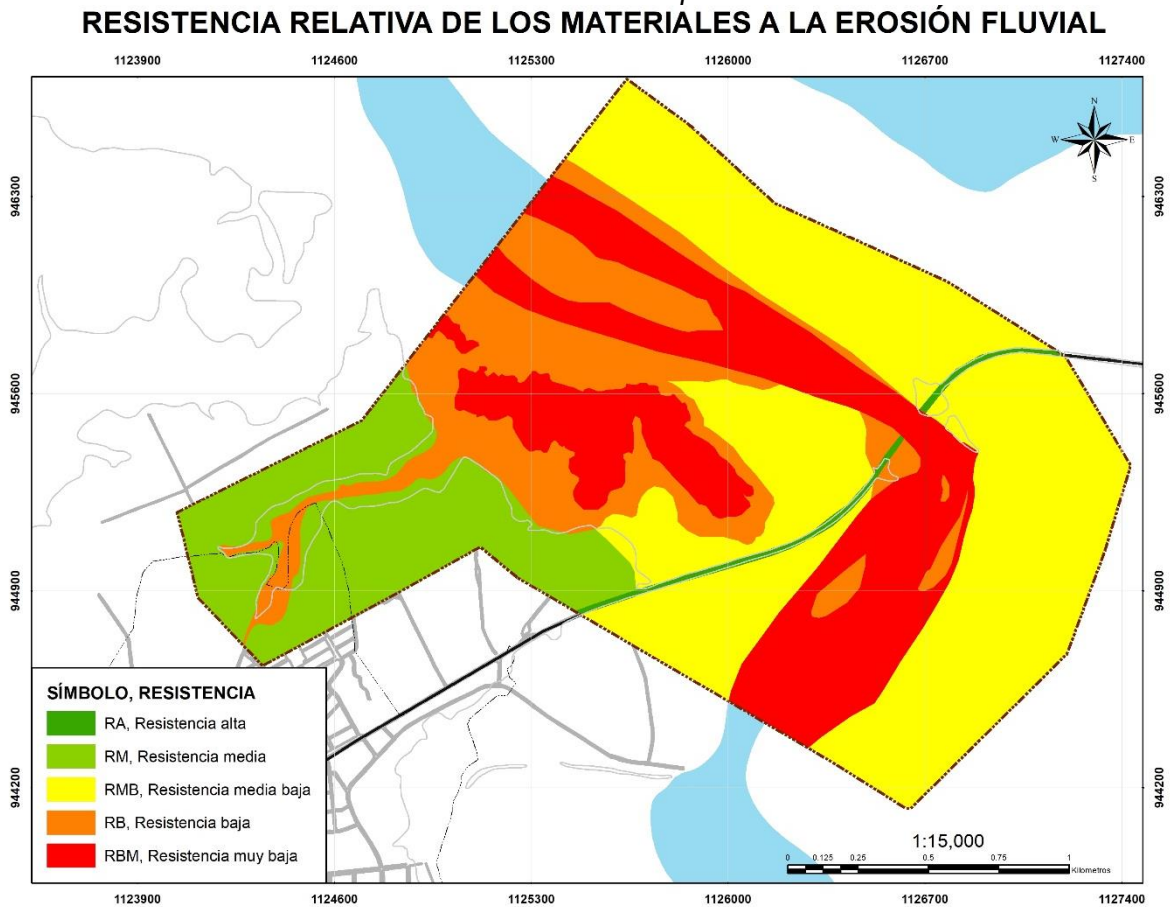
Tabla 1. Ejemplos de resistencia relativa de algunos materiales litológicos a la erosión fluvial.

Clase de material litológico	Tipo de material	Geomorfología	Descripción	Símbolo
Rocas cristalinas	Rocas ígneas (granitos, riolitas, granodioritas, gabros, basaltos, etc.) y rocas metamórficas (neises, esquistos, filitas, cuarcitas, etc.)	Colinas, cerros y cadenas montañosas denudacionales y estructurales	Resistencia muy alta	RMA
Rocas sedimentarias	Rocas sedimentarias químicas y detríticas con cemento (cherts, cuarzoarenitas, calizas, etc.)	Colinas, cerros residuales y/o en cadenas montañosas denudacionales y estructurales	Resistencia muy alta	RMA
Rocas piroclásticas y rocas	Cenizas, tobas y aglomerados piroclásticos y rocas sedimentarias detríticos o	Escarpes, terrazas, colinas, cerros residuales y/o en cadenas montañosas	Resistencia alta	RA

Clase de material litológico	Tipo de material	Geomorfología	Descripción	Símbolo
sedimentarias detríticas	clásticas (conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas no cementadas)	denudacionales y estructurales		
Depósitos inconsolidados de origen aluvial	Conglomerados, arenas, limos y/o arcillas	Terrazas aluviales, planicies aluviales, diques aluviales	Resistencia media	RM
Depósitos inconsolidados de origen fluvio lacustre	Arcillas, limos y lodos orgánicos	Llanuras de inundación recientes y subrecientes, cubetas de ciénagas, manglares, marismas, etc.	Resistencia media baja	RMB
Depósitos aluviales Subrecientes	Arenas y limos con niveles de conglomerados moderadamente compactos	Vegas de divagación subrecientes, islas fluviales subrecientes y terrazas bajas	Resistencia baja	RB
Depósitos aluviales de canal activo	Arenas, limos y gravas	Barras de arena, Islas fluviales recientes, playas, lechos activos, vegas de divagación recientes	Resistencia muy baja	RBM

Nota: se describen los tipos de materiales y sus geoformas asociadas, calificando su resistencia relativa según el criterio experto. Adaptado Vargas (2012).

A continuación, presentamos la zonificación de las unidades de Resistencia Relativa de los materiales a la erosión fluvial en el área de estudio.

Figura 9. Resistencia relativa de los materiales a la erosión fluvial.

3.2 Metodología Geomorfológica – Histórica:

De acuerdo al protocolo para la gestión del riesgo las inundaciones son un fenómeno de anegamiento temporal de terrenos que no están normalmente cubiertos de agua y sedimentos. Debido a la amplia variedad de definiciones existente en el ámbito técnico, científico y de toma de decisiones, se resume a continuación una síntesis de tipología de inundaciones de acuerdo con UNAL & SGC (2013).

La transformación permanente de la superficie terrestre se realiza por la acción de procesos exógenos, el modelo geomorfológico es importante porque a través de ellos se pueden identificar patrones de flujo hídrico, según la morfología del suelo y las dinámicas fluviales, aportando huellas

históricas de inundación en los territorios. Según Thorndycraft et al. (2008), La geomorfología fluvial estudia la historia de las formas del río, tratando de entender sus procesos y predecir su dinámica, combinando para ello observaciones de campo, estudios experimentales y modelos numéricos.

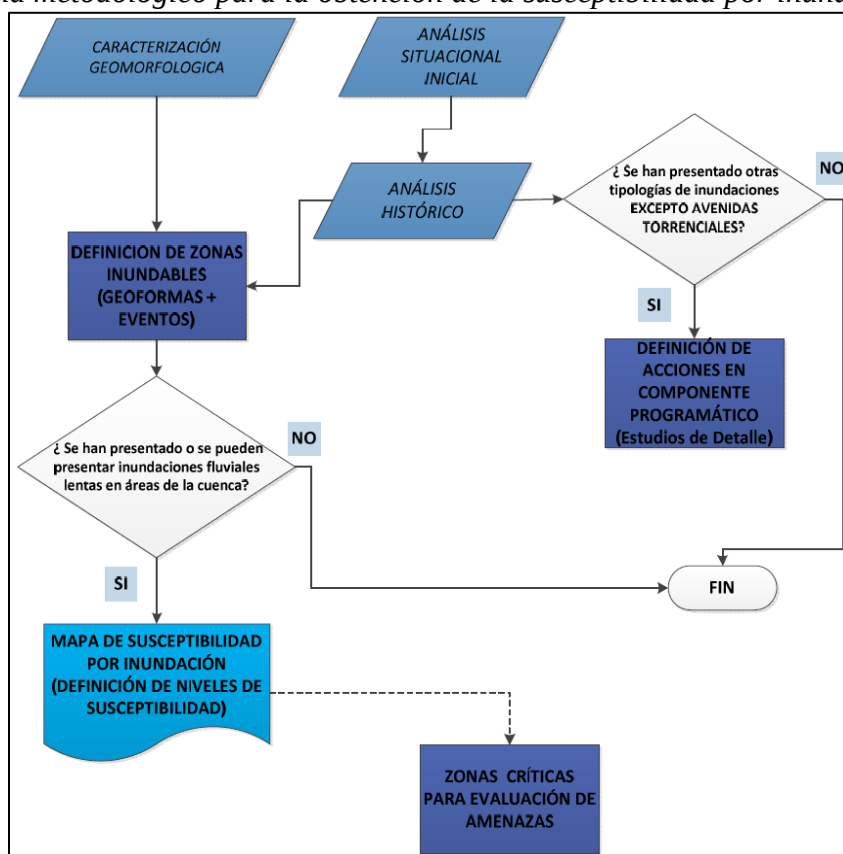
Según el documento Protocolo para la Incorporación de la Gestión del Riesgo en los POMCAS, Minambiente, 2014, se clasifican las inundaciones como: fluviales, pluviales, costeras o de otro tipo. Las inundaciones fluviales son inundaciones producidas por el flujo excedente de agua y sedimentos transportados por corrientes (ríos, quebradas), el cual desborda la capacidad de transporte del cauce. Las inundaciones fluviales pueden ser lentas y repentinas. Las inundaciones fluviales lentas son producidas normalmente por precipitaciones prolongadas, pero también pueden ser producidas por huracanes, ciclones tropicales, deshielo, entre otras. Las inundaciones fluviales repentinas son producidas normalmente, por precipitación convectiva, pero también pueden ser producidas por la movilidad de grandes volúmenes de flujos provenientes de glaciares, movimientos en masa, escombros o represas. Las inundaciones pluviales se producen por: la acumulación de agua precipitada en una determinada superficie (generalmente plana o cóncava) sin que esta provenga del desbordamiento del cauce; también puede ser producida por la incapacidad de los sistemas de alcantarillado o canales de desagüe en eventos de lluvia de gran magnitud o intensidad. Las inundaciones costeras pueden ser originadas por el aumento en la marea causada por fuertes vientos de tormenta, ciclones tropicales o extra tropicales, o también por las tormentas de mar y los tsunamis. Otro tipo de inundaciones puede ser el producido por eventos extraordinarios como: terremotos, erupciones volcánicas, rotura de infraestructuras hidráulicas de almacenamiento de agua. (MinAmbiente, 2014)

De acuerdo con la duración: las inundaciones pueden ser: súbitas o de tipo torrencial; lento o de tipo aluvial; y encharcamiento. Las inundaciones súbitas o de tipo torrencial suelen producirse en ríos de montaña o en corrientes cuyas áreas de drenaje presentan fuertes pendientes y suelen ser producidas por crecidas repentinas y de corta duración (minutos a horas). Las inundaciones lentas o de tipo aluvial se producen por el desbordamiento del cauce anegando áreas planas aledañas al mismo y suelen ser originadas por crecidas progresivas y de larga duración (horas a días, inclusive meses en algunas zonas del país). El fenómeno de encharcamiento se origina por la saturación del suelo en zonas moderadamente onduladas a planas con duración de horas a días y en general pueden darse por ausencia o falencia en los sistemas de drenaje de aguas pluviales en áreas urbanizadas. (MinAmbiente, 2014)

Para la zonificación de la susceptibilidad se realiza mediante la incorporación de la metodología propuesta por el Fondo Adaptación (2014) en el Protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los POMCA, la cual hace énfasis a la identificación de geoformas asociadas a inundación y la caracterización de eventos históricos.

3.2.1 Metodología empleada para la Zonificación de la Susceptibilidad

Las inundaciones son definidas en el glosario internacional de hidrología (OMM/UNESCO, 1974) como un aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce definiéndose como nivel normal aquella elevación de la superficie del agua que no causa daños, es decir, una elevación mayor a la habitual en el cauce, por lo que puede generar pérdidas.

Figura 10. Esquema metodológico para la obtención de la susceptibilidad por inundaciones.

Adaptado del protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los POMCA de acuerdo con los alcances técnicos del proyecto (Fondo Adaptación, 2014).

Para llevar a cabalidad el desarrollo de los objetivos propuestos se ha desarrollado la metodología para la evaluación de la susceptibilidad, a partir del protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los POMCA.

3.2.2 *Análisis de los Eventos Históricos*

La recopilación y tratamiento de la información histórica permite realizar un análisis de los impactos producidos por fenómenos naturales en el pasado.

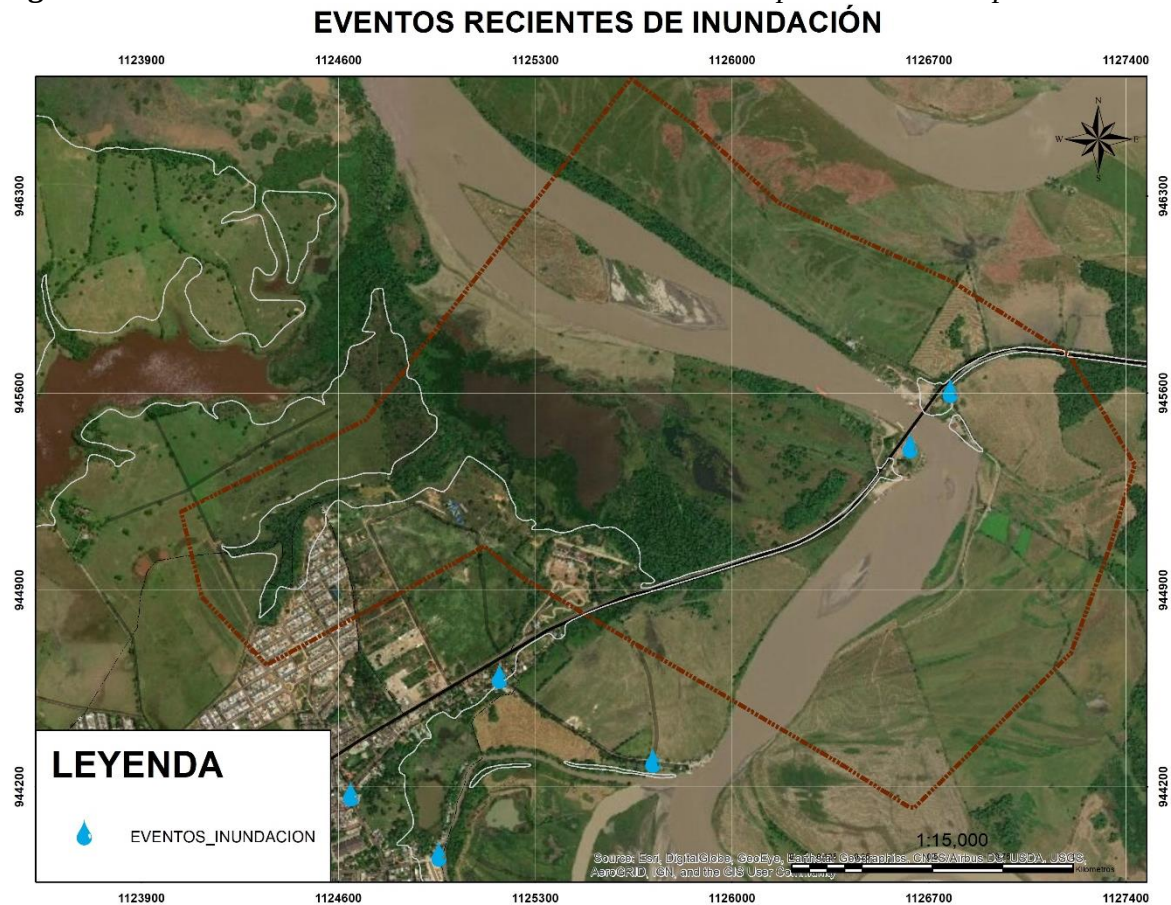
Para obtener una base de datos sobre los fenómenos históricos lo más completa y homogénea posible, se ha realizado una búsqueda de material documental de información de los eventos conocidos y/o incorporación de nuevos episodios.

Uno de los problemas más comunes cuando se desarrolla recopilación de información a partir de fuentes documentales, es que estas suelen ser poco precisas y pueden no cubrir con igualdad de razonamiento todo el territorio. Adicionalmente, los eventos de mayores consecuencias son los que generalmente se registran, debido a sus altos impactos.

Las principales fuentes de información referentes a los eventos que se consultaron en el ámbito de este trabajo corresponden a las siguientes entidades:

- ✓ Cuerpos Oficiales de Bomberos.
- ✓ Informes Técnicos
- ✓ Sistema de Inventario de Efectos de Desastres (DesInventar).
- ✓ Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD).
- ✓ Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA)

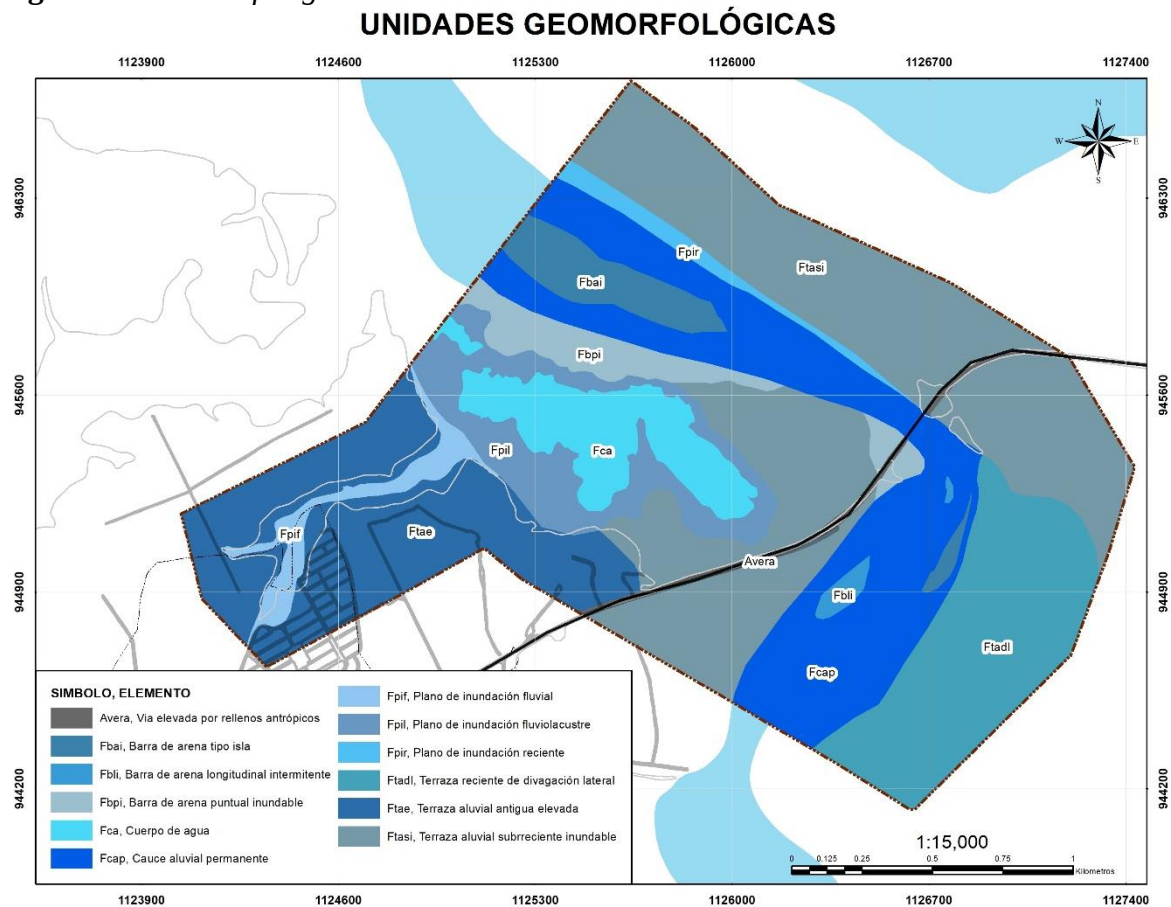
Del mapa de eventos de inundación se aprecian los sectores afectados por procesos de erosión hídrica o inundación. El principal afluente que afecta el área de estudio es el río Meta. Los eventos están registrados con datos de localización geográfica, sin embargo, en la consulta de las demás fuentes de información se evidencio la carencia de la información geográfica pertinente para poder especializar estos eventos.

Figura 11. *Inventario de eventos de inundación en el municipio de Puerto López.*

Adaptado Plan Básico de Ordenamiento Territorial Puerto López (PBOT, 2019).

3.2.3 *Análisis de geoformas asociadas a inundaciones*

Para el análisis de las inundaciones dentro del municipio de Puerto López, se tuvieron en cuenta los procesos y las geoformas asociadas a la dinámica fluvial, esto debido a que van a ser las áreas más susceptibles a presentar eventos de inundación por desborde de los cauces en creciente progresivas o súbitas. Con el resultado de la interpretación geomorfológica se extrajeron las geoformas fluviales que permitieron caracterizar los procesos morfodinámicos dominantes en los fenómenos de inundación, de acuerdo con las características texturales y geométricas.

Figura 12. Geomorfología a nivel de elementos.

Las principales características morfológicas utilizadas en el proceso de interpretación y zonificación geomorfológica se basaron en la metodología del Servicio Geológico Colombiano (SGC-metodología Carvajal-2011), que se encarga de la evaluación de las amenazas naturales, y utiliza la interpretación cartográfica y define subunidades y elementos geomorfológicos para los ambientes fluviales y glaciares. Dentro de las geoformas que se encuentran asociadas a los eventos de inundación en el municipio de Puerto López, están las planicies de inundación, las terrazas aluviales, los cauces y las barras de arena.

Tabla 2. *Susceptibilidad de geoformas a fenómenos de inundación y porcentaje de ocupación del área de estudio.*

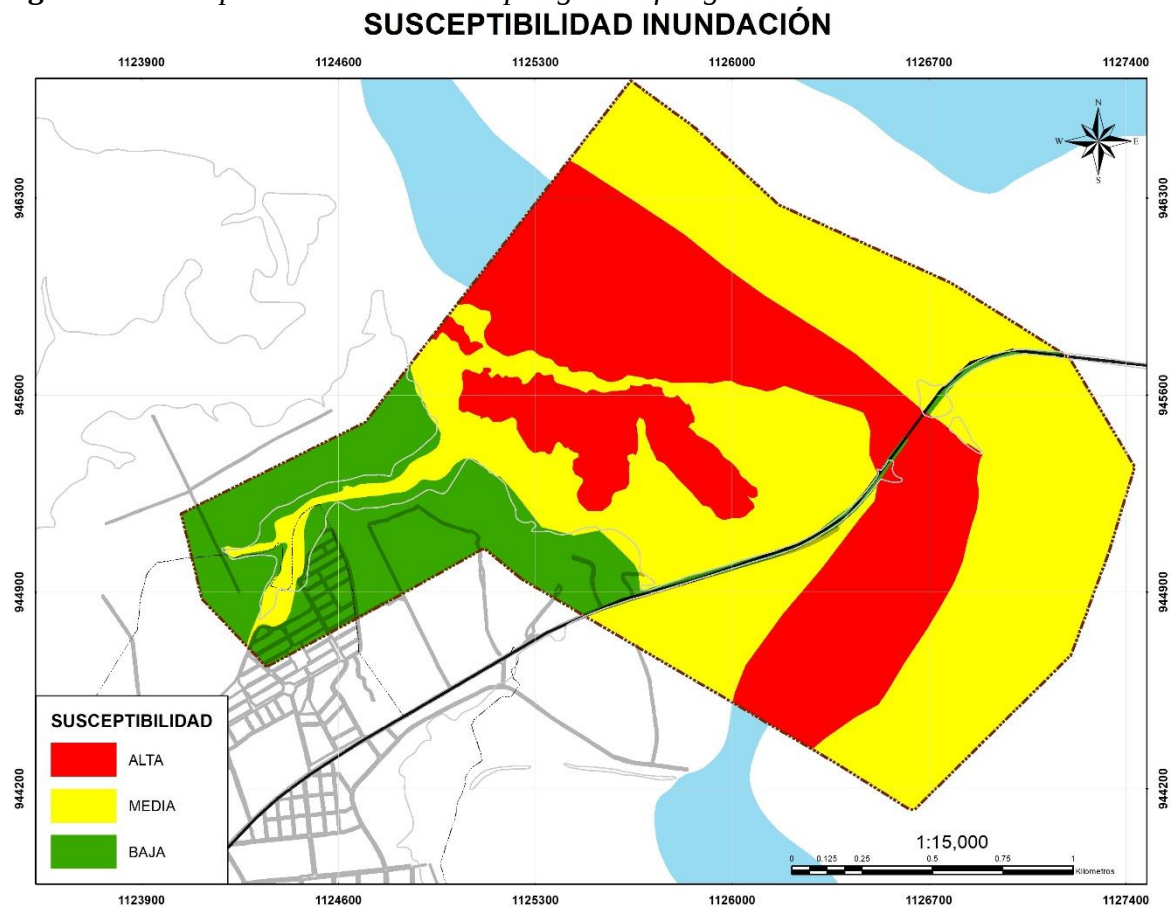
Elemento	Símbolo	Susceptibilidad	Área (ha)	%
Vía elevada por rellenos antrópicos	Avera	BAJA	4.345256	1.0%
Barra de arena tipo isla	Fbai	ALTA	14.350144	3.3%
Barra de arena longitudinal intermitente	Fbli	ALTA	2.132024	0.5%
Barra de arena puntual inundable	Fbpi	ALTA	15.65505	3.6%
Cuerpo de agua	Fca	ALTA	26.247905	6.0%
Cauce aluvial permanente	Fcap	ALTA	77.255717	17.5%
Plano de inundación fluvial	Fpif	MEDIA	9.270752	2.1%
Plano de inundación fluviolacustre	Fpil	MEDIA	29.355994	6.7%
Plano de inundación reciente	Fpir	ALTA	5.984118	1.4%
Terraza reciente de divagación lateral	Ftadl	MEDIA	52.845671	12.0%
Terraza aluvial antigua elevada	Ftae	BAJA	67.46319	15.3%
Terraza aluvial subreciente inundable	Ftasi	MEDIA	135.908685	30.8%

Nota: se describen los elementos geomorfológicos, calificando su grado de susceptibilidad a presentar fenómenos de inundación, se calculan su área y porcentaje de ocupación.

El casco urbano del municipio de Puerto López está conformado por geoformas de origen principalmente fluvial, asociadas a procesos antiguos o recientes de inundación.

3.2.4 Generación de mapa de susceptibilidad por inundación

El relieve del área de estudio puede dividirse principalmente en dos zonas: la primera corresponde a la parte más elevada de terraza antigua, y la segunda corresponden a geoformas aluviales como los planos de inundación, terraza subreciente, cauce aluvial y barras de arena. A continuación, se hace un análisis de susceptibilidad a inundación para el municipio con base en la cartografía geomorfológica.

Figura 13. *Susceptibilidad inundación por geomorfología.*

En la **Figura 13**, se presenta los porcentajes de susceptibilidad a inundación por geomorfología en el área de estudio, y se obtuvo como resultado que el 32% se encuentra en una susceptibilidad alta a inundación, un 52% susceptibilidad media, y el 16% en susceptibilidad baja.

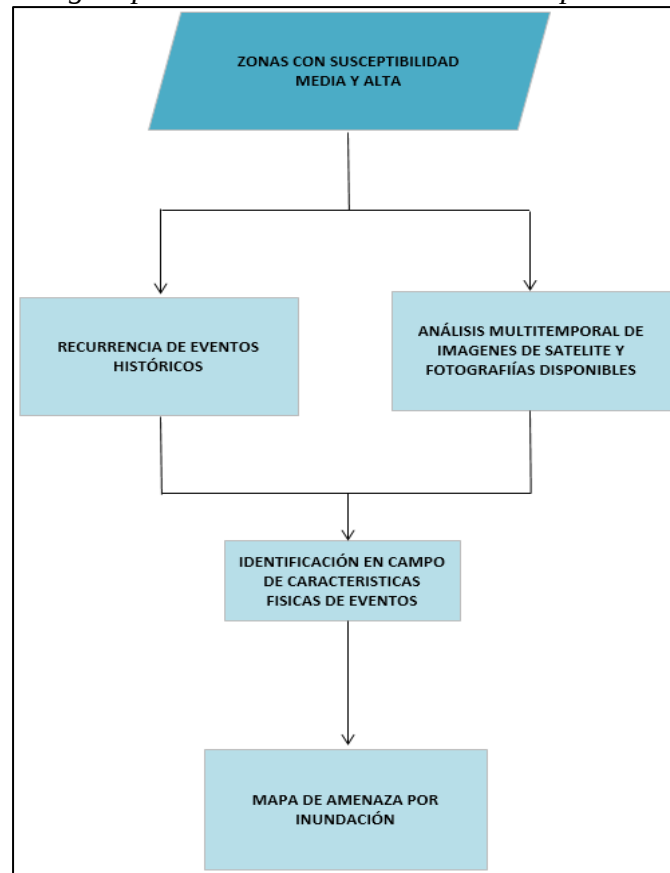
3.2.5 Metodología de amenaza por inundación geomorfológica

El nivel de amenaza por inundación tiene por finalidad reconocer las áreas que son afectadas por el desborde de los drenajes producto de un aumento del nivel de agua sobre las llanuras aluviales, con esto se obliga a reconocer el comportamiento de las áreas que aportan los caudales a las corrientes principales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas

sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas (IDEAM, 2010).

Se presenta a continuación una síntesis del método, para la zonificación de áreas de amenaza por inundaciones:

Figura 14. Esquema metodológico para la obtención de la amenaza por inundaciones.



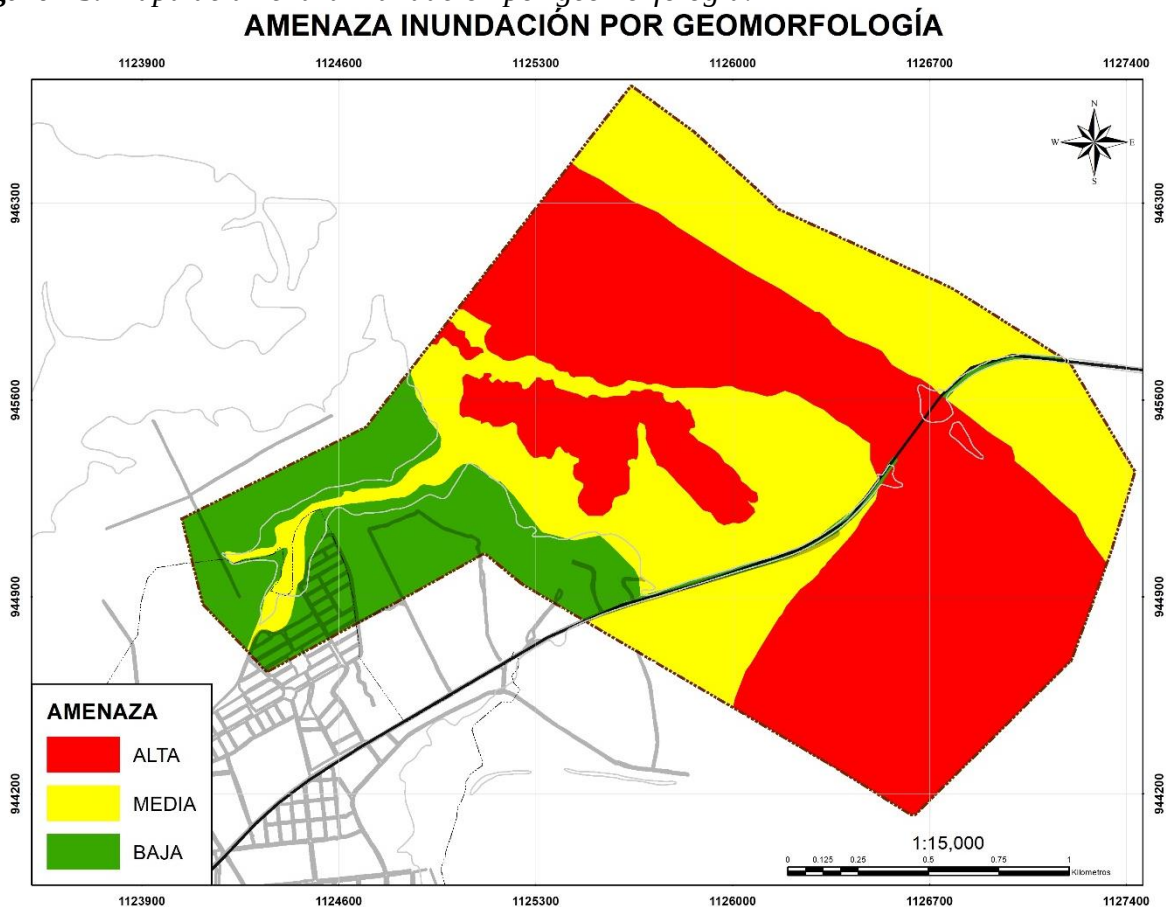
Adaptado del Fondo de adaptación, 2014. Protocolo para la incorporación de la Gestión del Riesgo en los POMCA.

Los datos de recurrencia de eventos históricos, análisis geológico - geomorfológico, y análisis multitemporal de las imágenes disponibles, fueron los insumos necesarios para obtener la amenaza por inundación.

3.2.6 Generación del mapa de amenaza por inundaciones por geomorfología

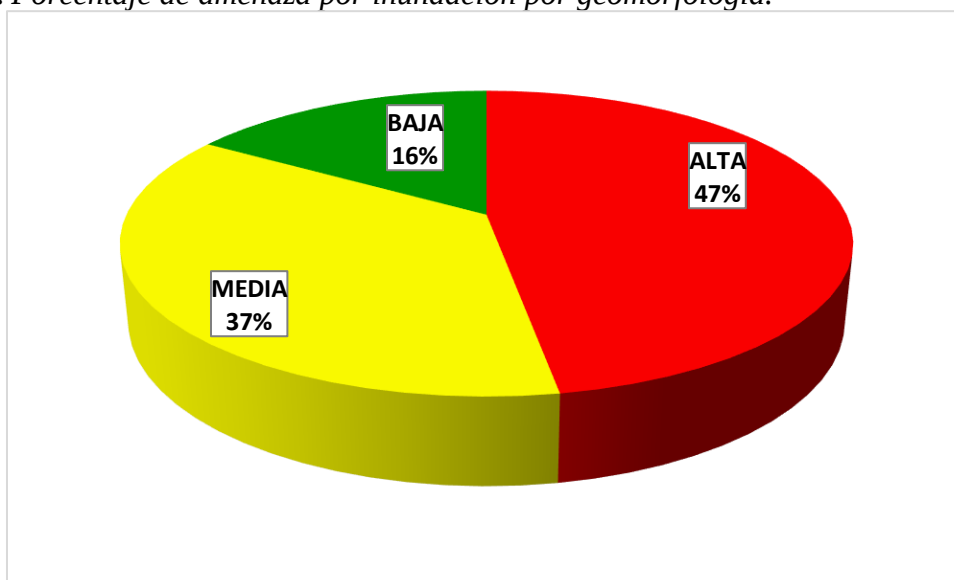
Para la generación final del mapa de amenaza de inundación por geomorfología, se tomó como base la zonificación de susceptibilidad a inundación, junto con la recurrencia de eventos históricos de inundación y la interpretación de imágenes satelitales, en las que se determinó las zonas de erosión y sedimentación del río Meta, en su paso por cercanías del casco urbano del municipio de Puerto López.

Figura 15. Mapa de amenaza inundación por geomorfología.



En la **Figura 16**, se presenta los porcentajes de amenaza a inundación por geomorfología en el área de estudio, y se obtuvo como resultado que el 47% se encuentra en amenaza alta a inundación, un 37% en amenaza media, y el 16% en amenaza baja.

Figura 16. *Porcentaje de amenaza por inundación por geomorfología.*



3.3 Metodología Hidrodinámica para la amenaza por Inundación

Para la zonificación de la amenaza por inundación hidrodinámica, se deben establecer la morfología detallada del cauce con secciones transversales del mismo, las cuales fueron tomadas en campo, y con la ayuda de modelos hidrológicos poder establecer los caudales con periodos de retorno de 100 y 500 años, con el fin de realizar un modelo hidráulico, con el fin de conocer el comportamiento de los niveles de inundación que podría alcanzar el río Meta en su paso por el casco urbano del municipio de Puerto López. A continuación, se muestra el cálculo de los parámetros hidrológicos e hidráulicos con los cuales se realizó el modelo hidrodinámico para el área de estudio:

3.3.1 Modelos Hidrológicos

Los modelos hidrológicos, usualmente interpretaciones simplificadas, suelen ser usados para análisis de sistemas complejos y por ende resultan ser aproximaciones de los procesos reales, generalmente no lineales, registrados en una cuenca. Las clasificaciones de los modelos hidrológicos son como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3. Clasificación de Modelos Hidrológicos.

Categoría	Subcategoría
Determinístico	Lineal
	No lineal
	Conceptual
	Caja Blanca
	Respecto al espacio (Agregado o Distribuido)
	Respecto al tiempo (eventual o continuo)
Estadísticos/Estocásticos	Generación de series de tiempo
	Regresión
	Probabilísticos
Modelos de Optimización	Programación Lineal
	Programación Dinámica

Nota: se muestran la calificación de los tipos de modelos hidrológicos con sus subcategorías. Adaptado del Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica, IDEAM 2018.

Estos modelos son de carácter matemático y en términos generales, los modelos hidrológicos permiten procesar la información hidrológica de una manera más práctica y eficiente, al mismo tiempo que se logra evaluar el beneficio, desde una perspectiva social-económica y ambiental, de decisiones políticas en la distribución del territorio.

Las problemáticas por simplificación de los procesos hidrológicos en estos modelos se acentúan cuando se consideran factores de cambio globales, como el fenómeno ENSO, y, aunque

no a una escala detallada y tampoco muy global o menos importante, factores antrópicos de urbanización, deforestación, entre otros. Por consiguiente, se requiere de una constante evaluación hidrológica e hidrodinámica de corrientes que bañan un asentamiento urbano, generalmente erróneamente planificado y desarrollado, con alta exposición a eventos naturales como inundaciones y avenidas torrenciales.

El modelo hidrológico acá presentado es de característica agregada y eventual, es decir, considera valores promedios de los procesos espaciales y temporales registrados sobre una cuenca hidrográfica como unidad de análisis para ser usados como parámetro de entrada en un modelo de lluvia-escorrentía como el racional, Soil Conservation Service, hidrograma triangular, Snyder, USBR, entre otros. De esta forma se es posible estimar valores de escorrentía o caudal en un punto determinado de una corriente en interés.

El modelo hidrológico acá usado es **estocástico** y consiste en realizar un análisis de frecuencias a funciones de probabilidad generalizadas de tres parámetros. Este análisis se realiza de manera regional, es decir, haciendo uso de la información de caudales de las estaciones de Cabuyaro, Humapo y Puente Lleras – Automática.

La etapa del proceso de análisis acá seguida es la sugerida por el **Handbook Of Hydrology** de David Maidment (1993) en el capítulo 18, redactado por Jerry Roswell Stedinger et. al, titulado: FREQUENCY ANALYSIS OF EXTREME EVENTS. De manera corta, el paso a paso es como se describe a continuación:

Estimar, a partir de una muestra de población, los parámetros λ_1 , λ_2 , λ_3 y λ_4 de los métodos de momentos de orden L. Con el fin de agregar una mayor robustez al proceso de regionalización, la estimación de estos parámetros se acompaña de un análisis de Bootstrapping que busca generar parámetros menos sesgados, límites de confianza de los mismos, entre otros. Los estimadores de

orden L son por sí mismos métodos que reducen el sesgo, pero tratando de considerar un poco la incertidumbre asociada al tamaño de muestra

Estimar, por cada λ , su promedio ponderado regional de la siguiente manera:

$$\widehat{\lambda_r R} = \frac{\sum_{k=1}^k W_k \left(\frac{\lambda_r(k)}{\lambda_1(k)} \right)}{\sum_{k=1}^k W_k}$$

Donde $\widehat{\lambda_r R}$ corresponde al parámetro 1, 2, 3 o 4 regionalizado y W_k son los pesos asignados a cada estación. Debido a que se buscó tener registros consistentes en longitud, W_k es igual a 1 para cada estación.

Con los anteriores parámetros regionalizados/normalizados, para estimar los parámetros de la función de probabilidad de interés.

Con dichos parámetros estimados para una función de distribución en particular, estimar el cuantil **regional** a partir de la recurrencia de interés (100 y 500 años en este caso).

Estimar el cuantil del **sitio** de interés, a partir del **regional**, mediante la siguiente expresión.

$$\widehat{X_p}(k) = \lambda_1(k) * \widehat{X_p R}$$

Donde $\lambda_1(k)$ corresponde a la media del sitio de interés mediante el método de momentos de orden L

A priori al procedimiento indicado anteriormente, fue necesario aplicar en primera instancia una prueba de Outliers y de Homogeneidad Regional para poder permitir unificar las series históricas. Para la prueba de Outliers se usó la prueba de Grubbs y para la homogeneidad regional se usó la de Hosking-Wallis.

Debido a que los datos originales tienden a seguir funciones de distribución no normalizadas, se realizó una transformación logarítmica de los datos para buscar que estos se alineen con la hipótesis de Grubbs de que los datos siguen una distribución normal. Una vez realizada dicha transformación, se encontró que el dato de Pte Lleras – Automática de 1986 con valor de 1647 (m^3/sg), y el de Cabuyaro de 2001 con valor de 1412 (m^3/sg), se consideran valores atípicos y por ende se excluyen del análisis.

La prueba de homogeneidad arrojó, omitiendo los datos anteriormente mencionados, que corresponden los **registros históricos de máximos anuales** de las estaciones de Cabuyaro, Humapo y Puente Lleras – Automática corresponden a una sola familia de distribución de probabilidad de misma media, desviación y asimetría.

Los registros históricos de máximos anuales son como se presentan a continuación:

Tabla 4. *Registros de Máximos Anuales de Caudales (m^3/sg).*

Fecha	Cabuyaro	Humapo	PteLleras
01/01/1979	2223	3504	1132
01/01/1980	2860	4109	1191
01/01/1981	1796	3605	928.5
01/01/1982	2756	4531	1385
01/01/1983	2106	3738	1059
01/01/1984	2416	3990	1199
01/01/1985	2540	3551	1074
01/01/1986	2365	4346	
01/01/1987	1912	3418	1289
01/01/1988	2271	3500	1100
01/01/1989	2034	3209	1172
01/01/1990	2364	3342	1568
01/01/1991	2357	3134	925
01/01/1992	1925	2823	850.2

Fecha	Cabuyaro	Humapo	PteLleras
01/01/1993	2487	3415	961.2
01/01/1994	2458	3960	1089
01/01/1995	2384	4095	906
01/01/1996	2675	3592	1019
01/01/1997	2457	3613	874
01/01/1998	2352	3290	871
01/01/1999	2550	3646	877
01/01/2000	2223	3237	1069
01/01/2001		3007	887.8
01/01/2002	2708	3938	1108
01/01/2003	2210	3862	1044
01/01/2004	2480	4728	1156
01/01/2005	2344	4035	1058
01/01/2006	2480	4021	1151
01/01/2007	2518	4465	1151
01/01/2008	2430	4414	1103
01/01/2009	2083	3729	1085
01/01/2010	2234	3888	1098
01/01/2011	2174	3610	1015
01/01/2012	2113	4088	949.7
01/01/2013	2005	3175	1308.12
01/01/2014	2162	3902	1072
01/01/2015	2368	4502	1173.74

Nota: se presentan los registros de caudales máximos anuales por cada una de las estaciones hidrometeorológicas que se encontraban cercanas al área de estudio. Adaptado Plan Básico de Ordenamiento Territorial Puerto López (PBOT, 2019).

3.3.2 Modelos Matemáticos

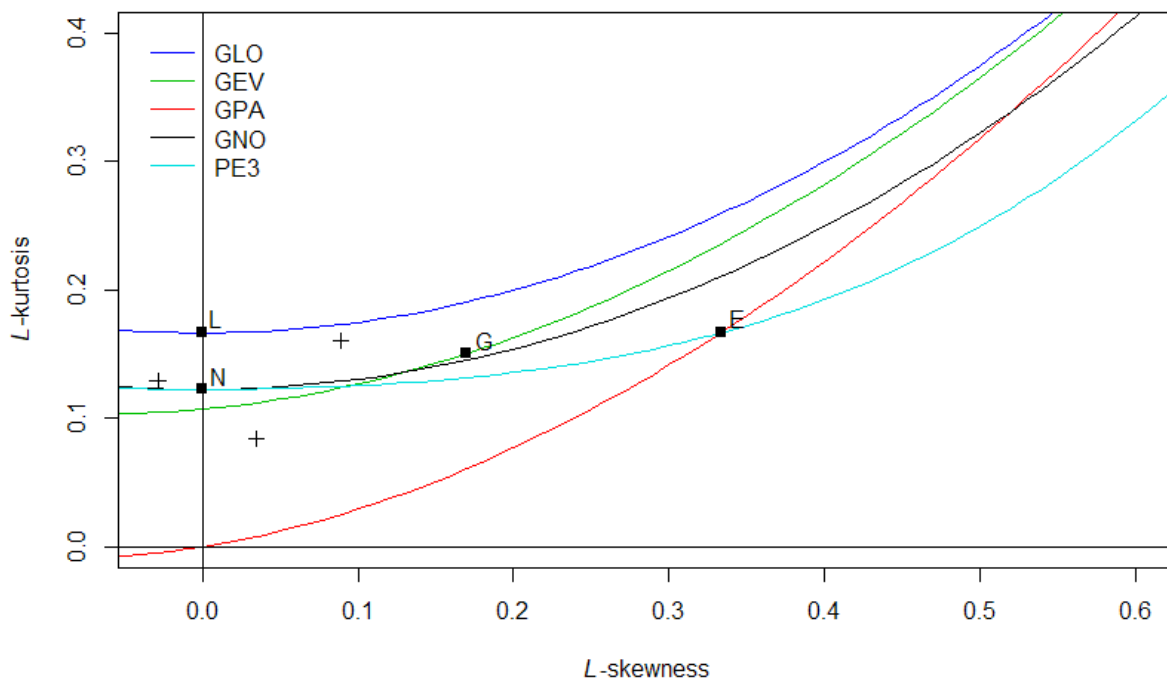
Las funciones de distribución consideradas fueron:

- ✓ Generalizada de Valores Extremos (GEV)
- ✓ Generalizada Normal (GNO)

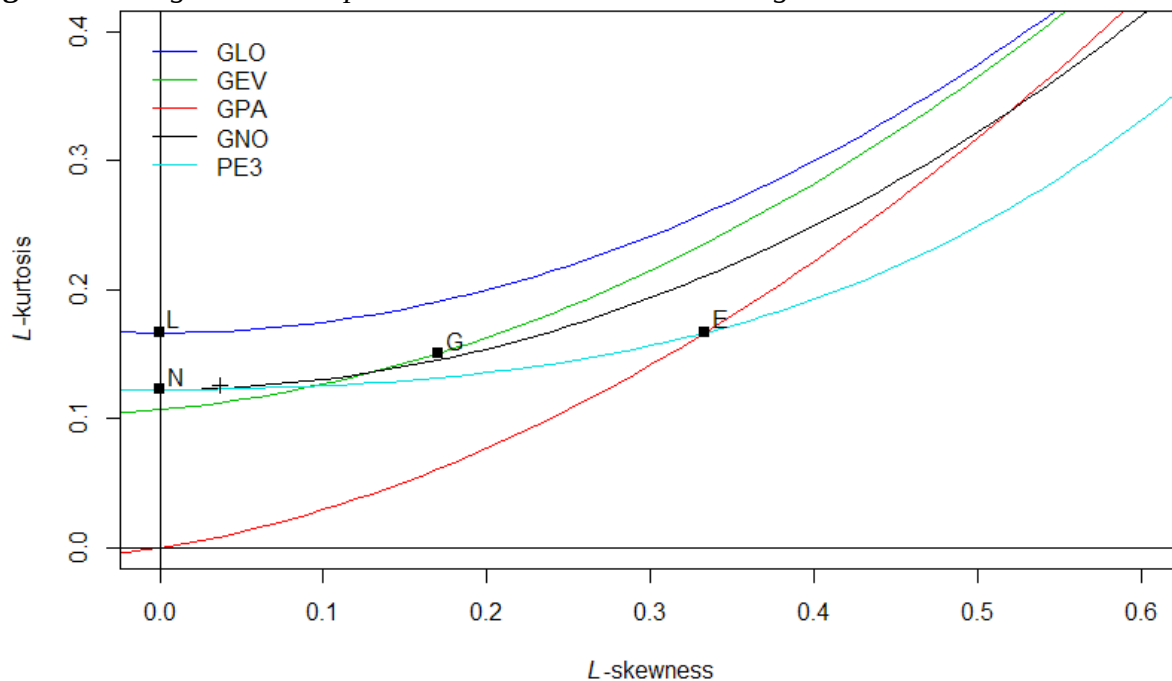
- ✓ Generalizada Logística (GLO)
- ✓ Pearson tipo 3 (PE3)
- ✓ Generalizada de Pareto (GPA)

De acuerdo con el diagrama-L propuesto por Hosking, como se puede apreciar en la **Figura 17** y **Figura 18** las funciones más cercanas son la Pearson tipo 3 y la Normal Generalizada.

Figura 17. Diagrama-L con parámetros por estación hidrológica analizada.



Adaptado Alcaldía de Puerto López. (2019).

Figura 18. Diagrama-L con parámetros Skewness-Kurtosis regionales.

Adaptado Alcaldía de Puerto López. (2019).

Con las funciones PE3 y GNO se realizó el análisis de frecuencias regional y por sitio, dando como resultado los siguientes cuantiles para la estación de Puente Lleras – Automática.

Tabla 5. Cuantiles por estación Normal Generalizada.

Estación	Función Normal Generalizada Q (m ³ /sg)	
	Tr100	Tr500
Cabuyaro	3024.582	3211.514
Humapo	4886.442	5188.445
PtoLopez	1404.329	1491.123

Nota: cálculo de caudales por estación hidrometeorológica según la función normal generalizada. Adaptada Alcaldía de Puerto López. (2019).

Tabla 6. Cuantiles por estación Pearson tipo III.

Estación	Función Pearson III Generalizada Q (m ³ /sg)	
	Tr100	Tr500

Cabuyaro	3023.413	3208.529
Humapo	4884.553	5183.623
PtoLopez	1403.786	1489.737

Nota: cálculo de caudales por estación hidrometeorológica según la función Pearson tipo III. Adaptada Alcaldía de Puerto López. (2019).

El anterior análisis se realizó mediante la construcción de un algoritmo en R y usando los paquetes de libre distribución de **lmom** de Hosking. Los caudales de simulación son los de la función Normal Generalizada.

3.3.3 Software HEC-RAS

Usualmente los estudios de amenaza hidrodinámica se construyen a partir de modelos hidrodinámicos/hidráulicos, comúnmente empleando Hec-RAS.

El **HEC-RAS** es un software computacional de dominio público, que modela el flujo de agua a través de canales simulando cauces naturales o ríos. El programa fue desarrollado por Hydrologic Engineering Center (HEC) del U.S. Army Corps of Engineers (USACE), con el fin de gestionar los ríos, puertos y otras obras públicas de su administración o interés. El procedimiento básico de cálculo de HEC-RAS para el flujo continuo se basa en la solución de la ecuación de energía unidimensional o en las ecuaciones de aguas someras para modelos bidimensionales, como es el caso de estudio. Las pérdidas de energía son evaluadas por la fricción y la contracción/expansión del canal. La ecuación de momento se puede utilizar en situaciones donde el perfil de flujo es rápidamente variado. Estas situaciones incluyen resaltos hidráulicos, hidráulica de puentes y los perfiles en las confluencias del río.

Las ecuaciones de aguas someras que se resuelven, **numéricamente mediante volúmenes finitos**, en notación tensorial es como se presenta a continuación:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial V_i h}{\partial X_i} = 0$$

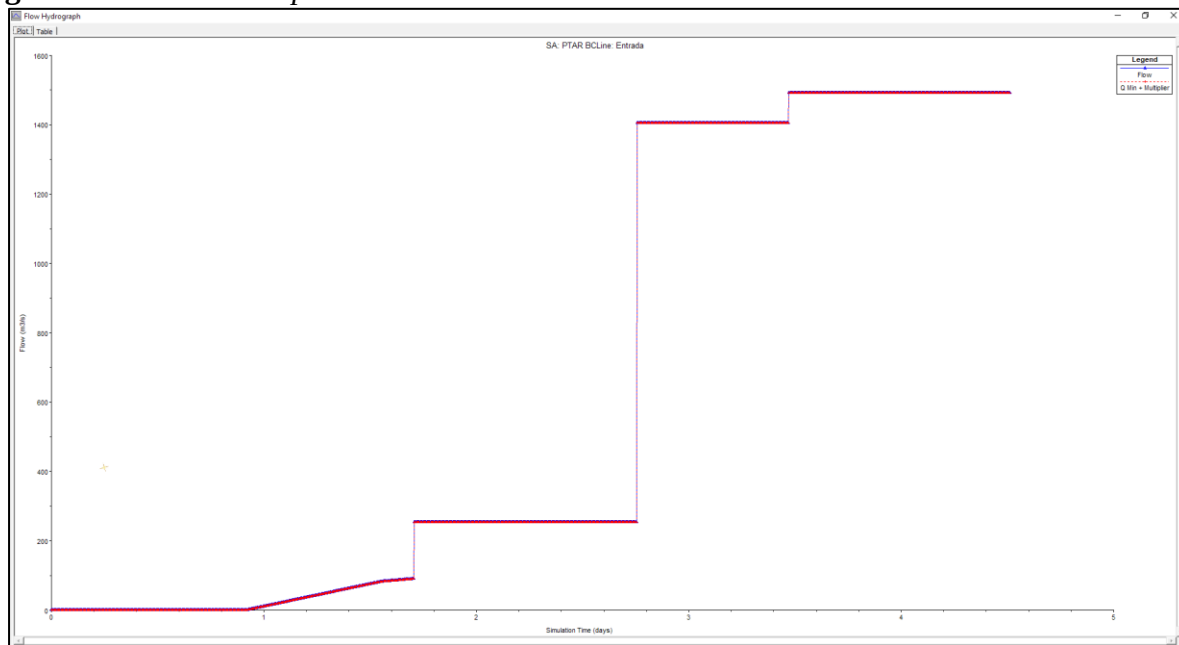
$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + V_j \frac{\partial V_i h}{\partial X_j} = -g \frac{\partial h}{\partial X_i} + S$$

Donde los subíndices i/j representan el eje coordenado analizado (x o y) y S corresponde a términos fuente. Usualmente el término fuente está asociado a la fricción, en donde se ve involucrado el coeficiente de Manning. Cabe resaltar que el coeficiente de Manning implica la aceptación de la teoría de flujo Uniforme, es decir, en dónde ocurre un balance únicamente entre las fuerzas de la gravedad y la fricción.

Para llegar a las ecuaciones de aguas someras, a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, que gobiernan el movimiento de un Fluido en su máxima expresión, se considera irrelevante/independiente la variación de las variables de estado del flujo con respecto al eje vertical. Como consecuencia directa, no existe la posibilidad de evaluar morfo-dinámicamente el comportamiento del río, como también se considera la presión hidrostática.

3.3.4 Condiciones de contorno e iniciales

Como condición de contorno se estableció un hidrograma inicialmente ficticio/sintético de forma tal que se permitiera un calentamiento del modelo hidrodinámico y posteriormente evaluar las condiciones permanentes de las condiciones medidas en campo y de los periodos de retorno especificados. Dicho hidrograma es como se muestra a continuación.

Figura 19. *Serie de tiempo de Entrada.*

Adaptado Alcaldía de Puerto López. (2019).

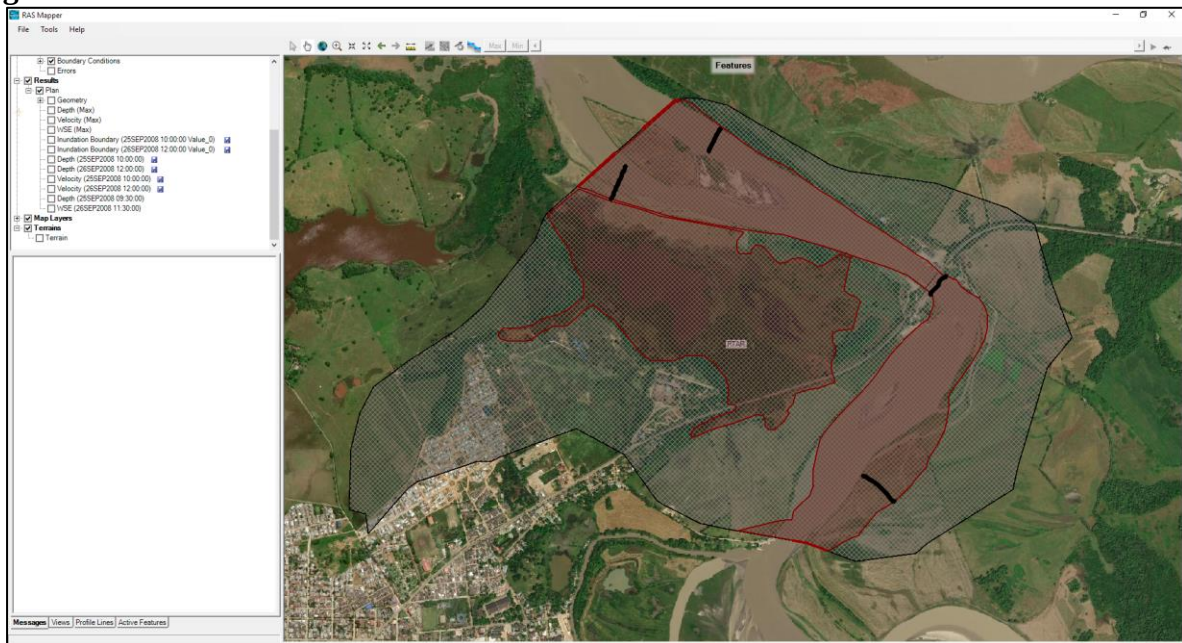
Los caudales de período de retorno son los dos últimos escalones mostrados en la anterior gráfica. Como condición de salida se estableció **Normal Depth**, asociada a la pendiente que genera una profundidad normal en flujo uniforme. Este valor es igual a 0.0003.

El modelamiento de las condiciones de aforamiento en campo permitió identificar que para poder garantizar el apropiado modelamiento hidrodinámico era necesario establecer una cota de lámina de agua como condición inicial, igual a 171 (msnm). Lo anterior debido a que el río, en su control geológico/estrechamiento en el puente, presenta una aceleración del flujo y por ende mayores profundidades de lámina de agua, que al salir de esta condición hidráulica, se presenta un ensanchamiento y por ende procesos de agradación del lecho, es decir, el río presenta una resistencia de lecho bastante importante al movimiento del agua en este sector y como consecuencia numéricamente arrojaba errores bastante grandes si como condición inicial no se establecía una cota de lámina de agua superior a este “represamiento” natural.

3.3.5 Modelo hidrodinámico

El modelo hidrodinámico construido de forma bidimensional es como se muestra a continuación.

Figura 20. Modelo Hidrodinámico Construido.



Adaptado Alcaldía de Puerto López. (2019).

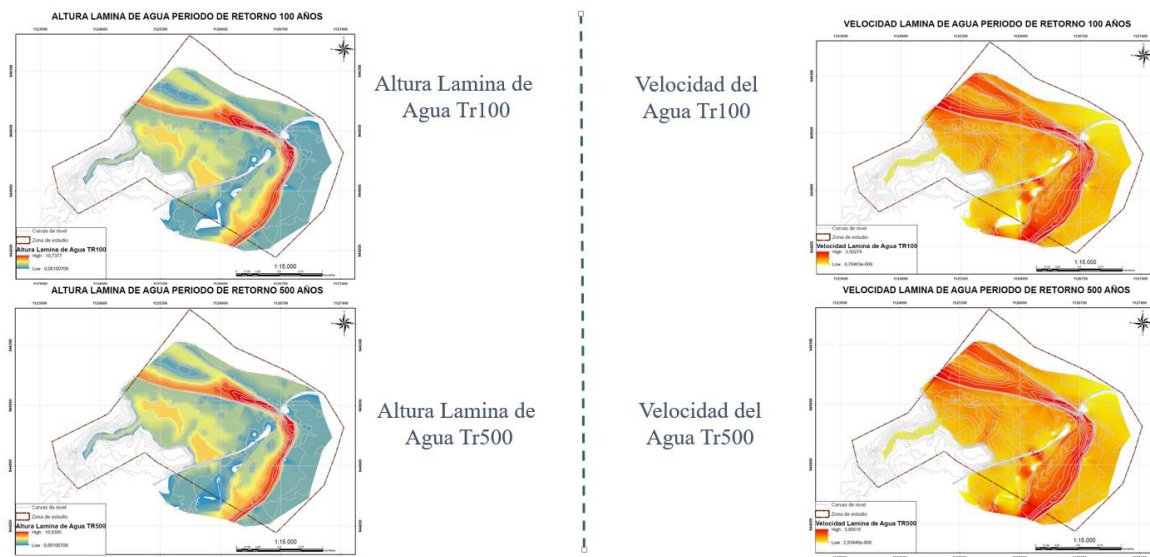
3.3.5.1 Calibración

El proceso de calibración no fue el ideal debido a que los cuerpos de agua no pudieron ser caracterizados con batimetría, sino que se usaron las tres secciones de aforo líquido y se realizó procesos de interpolación entre ellas. Por lo anterior, esta etapa se consideró con mucha incertidumbre y como manera de control de simulación se tomó en cuenta el nivel máximo registrado en los estribos del puente para los periodos de retorno de 100 y 500 años.

3.3.5.2 Escenarios de Periodo de Retorno

Las profundidades para periodos de retorno y velocidades son como se muestran a continuación.

Figura 21. Cálculo de altura de lámina de agua y velocidad Tr100 y 500 años.



Adaptado Alcaldía de Puerto López. (2019).

El nivel máximo de inundación registrado en los estribos del puente corresponde a una cota de 174.97 (msnm) y las cotas de inundación en estribos de puente para un periodo de retorno de 100 y 500 años es de 174.72 (msnm) y 174.82 (msnm). Lo anterior quiere decir que históricamente el modelo tiene un margen de error de 25 y 15 centímetros respectivamente.

3.3.6 Generación del mapa de amenaza por inundación hidrodinámica

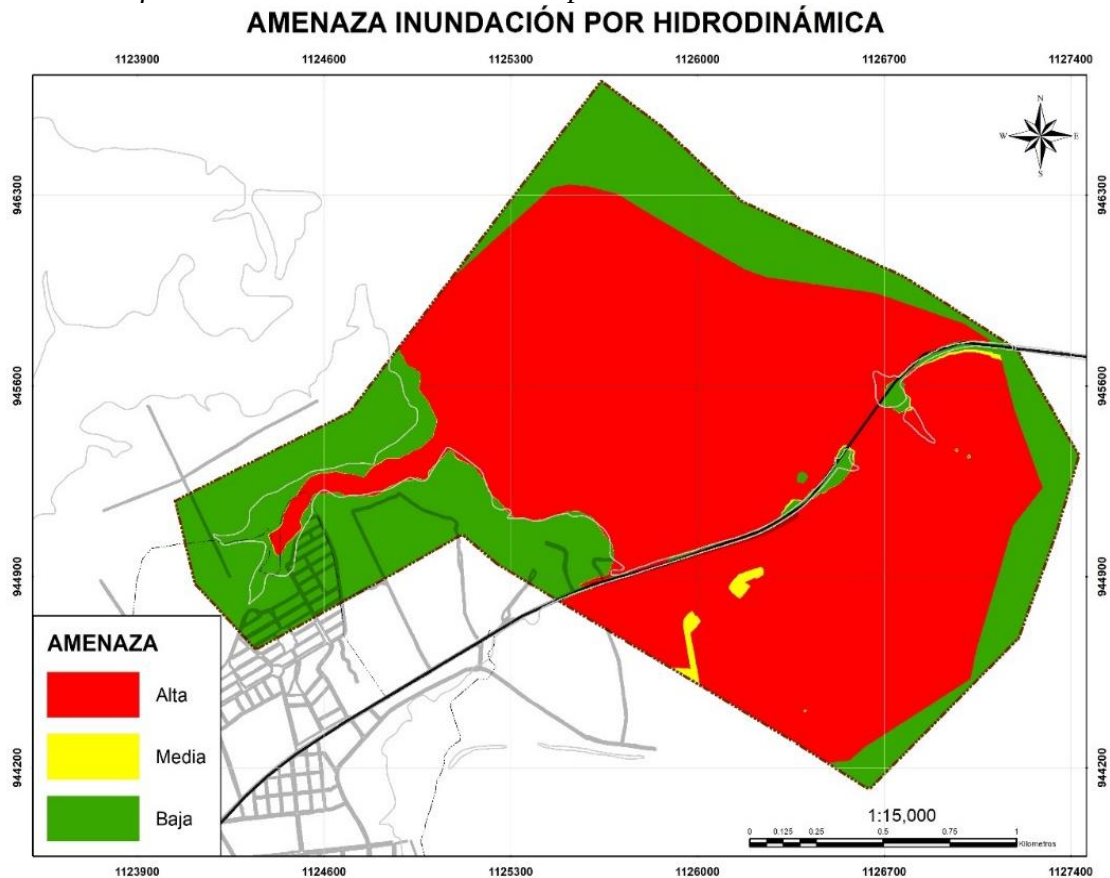
Debido a la necesidad de una metodología para zonificación de amenaza por inundación a nivel nacional, se usó la sugerida por la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB, 2009), la cual se detalla a continuación:

Amenaza Alta: se considera amenaza alta todas aquellas áreas que se encuentren inundadas para un periodo de retorno de 100 años.

Amenaza Media: se considera amenaza media toda área que este dentro de la mancha de inundación para un periodo de retorno de 500 años y por fuera de la mancha de inundación para un periodo de retorno de 100 años.

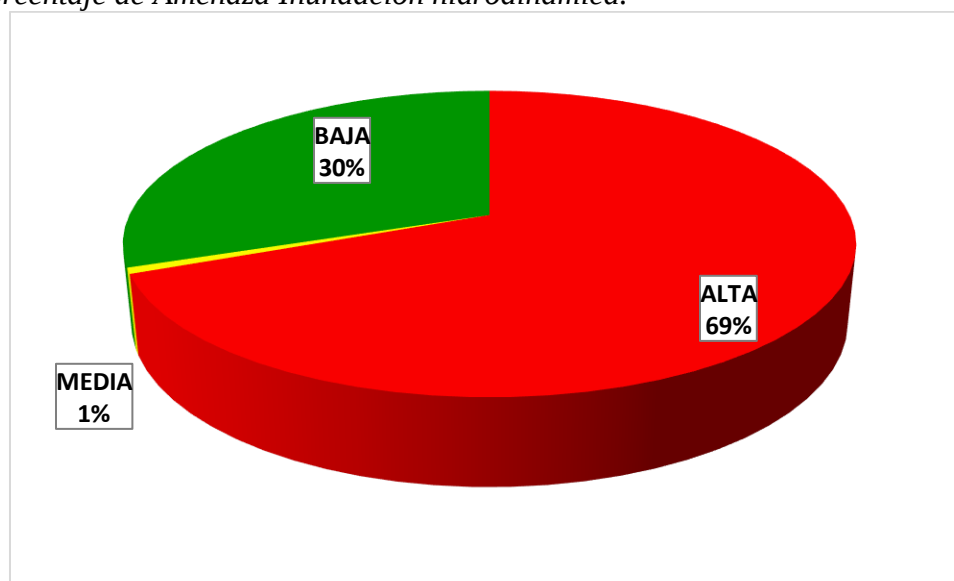
Amenaza Baja: sin mancha de inundación.

Dicho lo anterior, la zonificación de inundación es como se muestra a continuación:

Figura 22. Zonificación de Amenaza Inundación por hidrodinámica.

Adaptado Alcaldía de Puerto López. (2019).

En la **Figura 23** se presenta los porcentajes de amenaza a inundación por hidrodinámica en el área de estudio, y se obtuvo como resultado que el 69% se encuentra en amenaza alta a inundación, el 1% en amenaza media, y el 30% en amenaza baja.

Figura 23. *Porcentaje de Amenaza Inundación hidrodinámica.*

Adaptado Alcaldía de Puerto López. (2019).

3.4 Zonificación de la Amenaza utilizando las metodologías anteriores.

Para la zonificación final de amenaza se propone la elaboración de un modelo que incorpore los resultados geomorfológicos históricos, con los resultados de modelamiento hidrodinámico del cauce del río Meta.

3.4.1 Metodología empleada para la zonificación de la amenaza final

A continuación, se propone una metodología que pueda ser aplicada en la zonificación de amenaza por fenómenos de inundación, en el territorio nacional, rescatando lo mejor de los avances metodológicos propuestos hasta el momento en estudios previos, como los son la metodología geomorfológica histórica, y la metodología de modelamiento hidrodinámico, sea 1D o 2D. Lo que se quiere alcanzar es que esta metodología pueda ser aplicable en los diferentes niveles de trabajo, ya sea en trabajos regionales o detallados, utilizando las herramientas e insumos disponibles, como lo son software, modelos de elevación digital, e imágenes satelitales. En estudios de detalle se

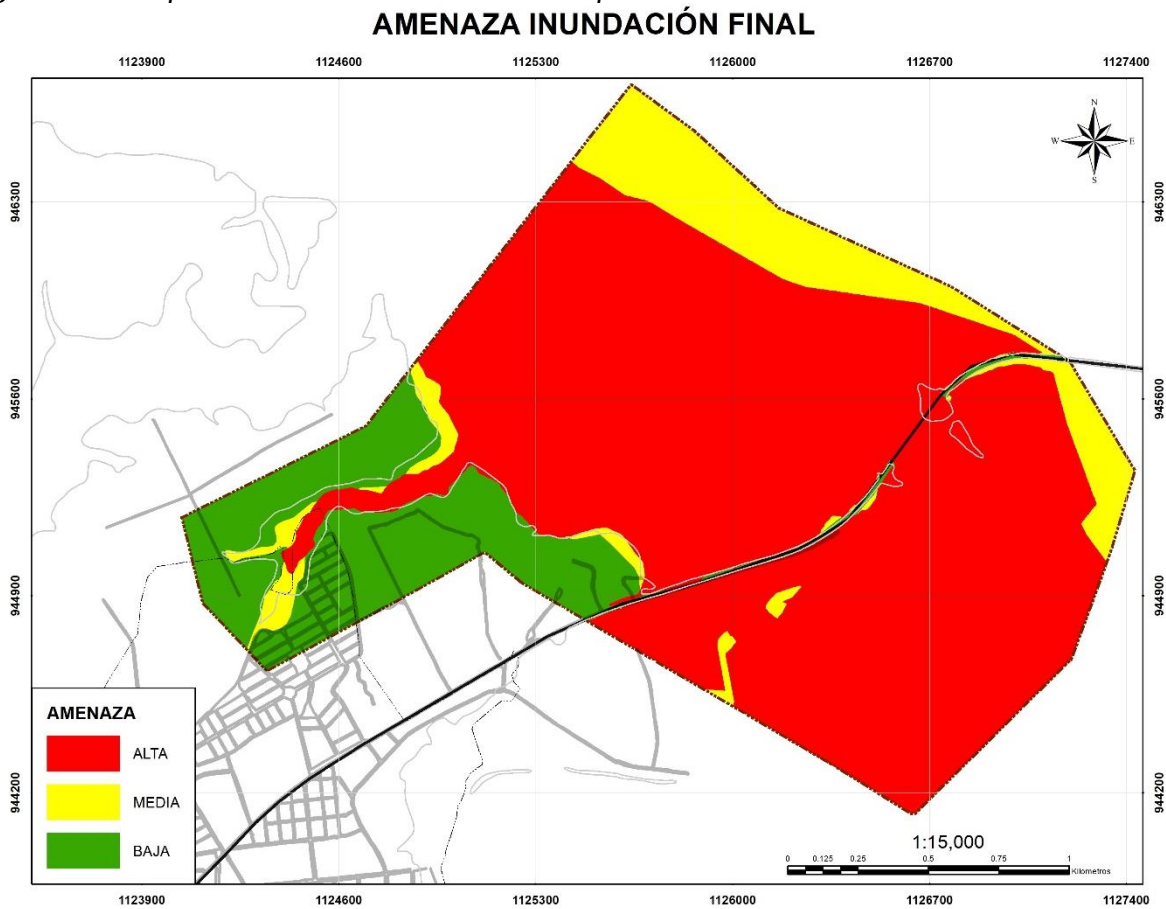
requiere la elaboración de topografía detallada de los cauces, y fotografías aéreas actuales del área de interés. A continuación, se muestra la propuesta metodológica del autor para la integración de los modelos previos de amenaza por inundación geomorfológica histórica e hidrodinámica:

Tabla 7. Metodología para la obtención de la amenaza por inundación final.

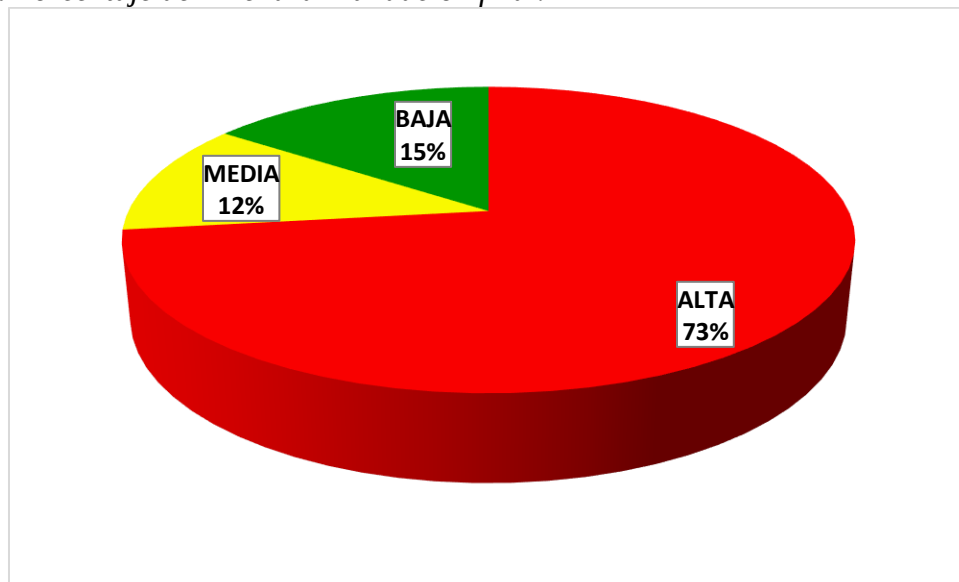
Amenaza Hidráulica	Amenaza Geomorfológica Histórica		
	Baja	Media	Alta
Baja ($Pr > 500$ años)	Baja	Media	Media
Media ($100 < Pr < 500$ años)	Media	Media	Alta
Alta ($0 > Pr \leq 100$ años)	Alta	Alta	Alta

Nota: comparación de la zonificación de amenaza por método hidráulico y por método geomorfológico con el fin de realizar una zonificación final de amenaza.

Para la obtención de la amenaza final o total, se utiliza la zonificación de amenaza geomorfológica histórica y la zonificación de amenaza hidrodinámica, se integran los modelos con la ayuda de herramientas SIG, y se realiza la comparación de los rangos de amenaza, con la guía de la **Tabla 7**. A continuación, se muestra la zonificación final de amenaza por fenómenos de inundación del casco urbano del municipio de Puerto López.

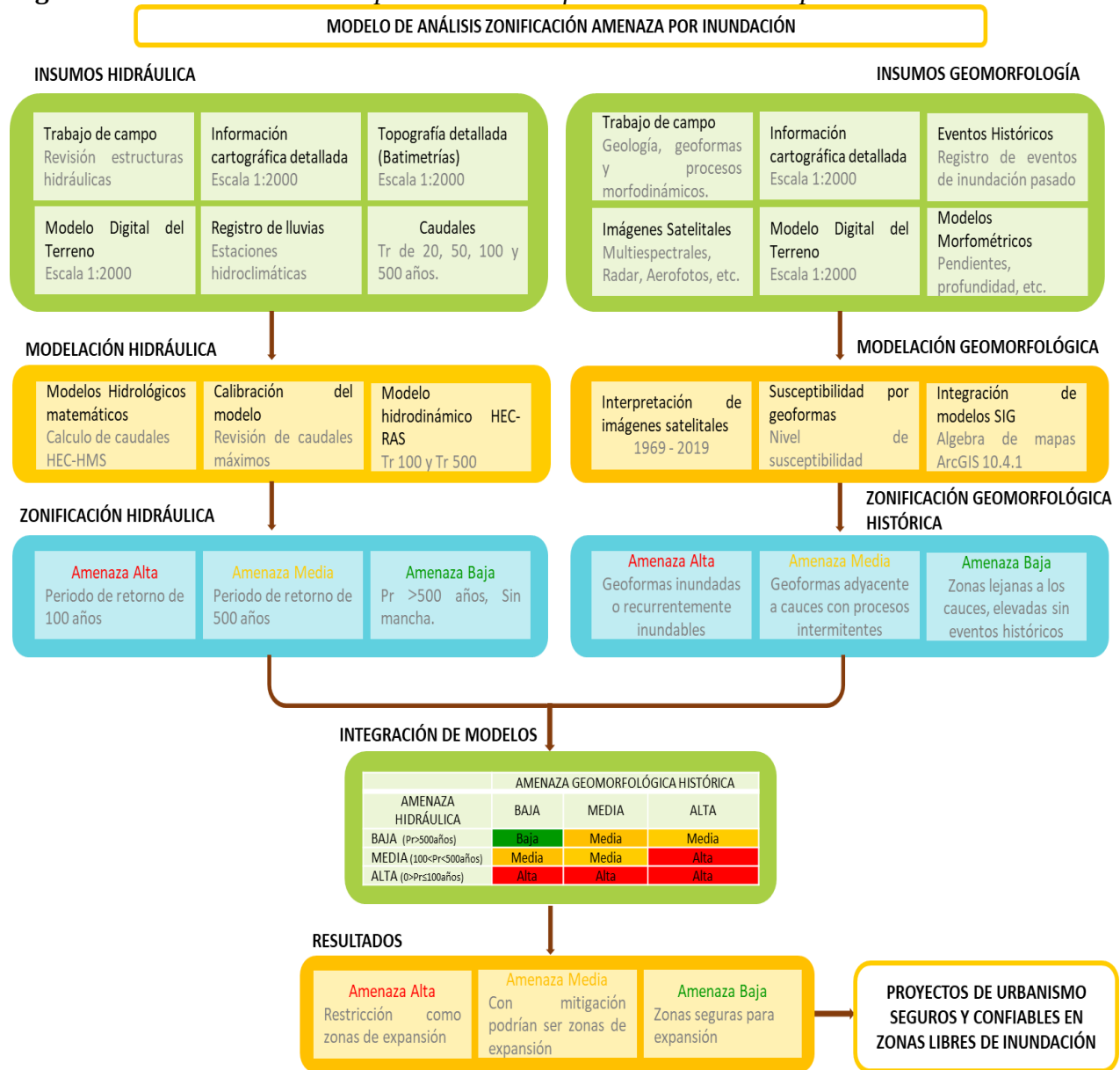
Figura 24. Zonificación de Amenaza Inundación final.

En la **Figura 25**, se presenta los porcentajes de amenaza a inundación final en el área de estudio, y se obtuvo como resultado que el 73% se encuentra en amenaza alta a inundación, el 12% en amenaza media, y el 15% en amenaza baja.

Figura 25. *Porcentaje de Amenaza Inundación final.*

4. Modelo de análisis aplicado a la zonificación de amenaza por inundación

El principal resultado de este trabajo de grado es proporcionar un modelo de análisis para la integración de modelos de amenaza geomorfológicos históricos con modelos de amenaza hidráulica o hidrodinámica, con el fin de determinar zonas seguras de expansión libre de fenómenos de inundación, que pueda ser replicado y usado a escalas básicas y detalladas tanto por la administración municipal de Puerto López, como por consultores e instituciones adscritas al ordenamiento territorial. A continuación, se plasma gráficamente el resumen del modelo de análisis que se puede seguir para zonificar fenómenos de amenaza por inundación, dando cumplimiento a lo establecido por el decreto 1807 de 2014.

Figura 26. Modelo de análisis aplicado a la zonificación de amenaza por inundación.

5. Análisis de resultados

Respecto a los resultados y análisis, se resalta lo siguiente:

Tabla 8. Áreas de amenaza por metodología geomorfológica – Histórica.

Categoría de Amenaza	Porcentaje (%)
Alta	47%
Media	37%
Baja	16%

Nota: análisis de los porcentajes de amenaza por inundación, calculados a partir de la metodología geomorfológica histórica.

Según la Tabla 8 el 47% del área presenta unidades geomorfológicas susceptibles a fenómenos por inundación, el 37% amenaza media y el 16% amenaza baja.

Tabla 9. Áreas de amenaza por metodología Hidrodinámica.

Categoría de Amenaza	Porcentaje (%)
Alta	69%
Media	1%
Baja	30%

Nota: análisis de los porcentajes de amenaza por inundación, calculados a partir de la metodología hidrodinámica.

Según la Tabla 9 el área de afectación con un periodo de retorno de 100 años es del 69%, considerado el escenario de amenaza alta en el área, por amenaza media se tiene el 1% y por amenaza baja el 30%.

Al combinar estas dos metodologías utilizando la mancha de inundación de 100 años y las unidades geomorfológicas susceptibles a inundación, la amenaza alta ocupa el 73% del área analizada, el 12% en amenaza media y 15% de amenaza baja.

Tabla 10. *Áreas de amenaza por metodología compuesta.*

Categoría de Amenaza	Porcentaje (%)
Alta	73%
Media	12%
Baja	15%

Nota: análisis de los porcentajes de amenaza total por inundación, calculados a partir de la metodología híbrida propuesta.

Como se observa en las Tabla 8, Tabla 9, las áreas de amenaza varían, siendo menor la analizada por el componente geomorfológico, indicando la evidencia de geoformas susceptibles a inundación, pero que no involucra la dinámica de río Meta, caso contrario con la metodología hidrodinámica que presenta un área de amenaza del 69%, que contiene análisis de caudales y sus dinámicas, indicando que el río puede tener una afectación mucho mayor; al analizar la metodología híbrida que se propone en el presente estudio, se tiene en cuenta tanto la actividad actual y futura del río Meta, como los vestigios de este a través de geoformas del terreno, siendo un complemento necesario que se ajusta a la realidad del territorio de Puerto López, estando en amenaza alta el 73% del territorio, conociendo con eventos históricos y teniendo en cuenta periodos de retorno y geoformas con características de susceptibilidad.

A continuación, se presenta un análisis comparativo de las metodologías analizadas:

Tabla 11. *Análisis comparativo de la amenaza hidráulica – geomorfológica.*

Proceso	Metodología Hidrodinámica	Metodología Geomorfológica - Histórica
Zonificación de amenaza con niveles de lámina de agua.	Sí	No
Simulación de inundación con caudales predictivos y periodos de retorno.	Sí	No
Tiene en cuenta los eventos de Inundación Históricos.	No	Sí
Se tiene en cuenta la geomorfología y la migración lateral del cauce.	No	Sí

Nota: comparación de los dos modelos de zonificación de amenaza por fenómenos de inundación, según el proceso metodológico que desarrollan cada uno.

Según la Tabla 11, se mencionaron los procesos a tener en cuenta dentro del análisis de la amenaza total por inundación en el río Meta, y su respectivo análisis en cada metodología, concluyendo que efectivamente cada una complementa a la otra con diferentes insumos, desarrollando un análisis desde todos los procesos técnicos del fenómeno, consolidando una metodología que pueda dar respuesta a las condiciones territoriales del casco urbano del municipio de Puerto López, para proponer áreas de expansión urbana, libres de procesos de inundación.

Figura 27. *Áreas de expansión libres de inundación y seguras como áreas de expansión urbana.*



Según la Figura 27, hay 63.8 hectáreas libres de amenaza por fenómenos de inundación que pueden ser usada por el municipio de Puerto López para incorporarlas como áreas de expansión urbana, en su Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT). Lo que deja apreciar la eficacia del modelo de análisis hidro-geomorfológico, para la zonificación de amenaza por fenómenos de inundación, en zonas influenciadas por ríos de fuerte dinámica fluvial.

6. Conclusiones y recomendaciones

Los análisis multitemporales de imágenes satelitales ayudan a entender como es la migración lateral de los ríos como el Meta, y a su vez son una herramienta muy útil para determinar áreas potencialmente inundables en el futuro, y tener modelos de inundación más competentes para el territorio.

La amenaza geomorfológica – histórica, puede quedarse corta ante las dinámicas fluviales, ya que su zonificación se desarrolla de acuerdo a formas de terreno de origen fluvial, siendo una evidencia antigua de manchas de inundación, pero no contempla las dinámicas naturales del río Meta.

La zonificación de la amenaza por inundación a través de la metodología hidrodinámica del río Meta, muestra la mancha de inundación de 100 y 500 años muy similares, lo que no deja apreciar la amenaza media y a su vez deja zonas de divagación del río zonificadas en amenaza baja.

Para ríos de gran caudal y fuerte migración lateral, identificado en el análisis multitemporal de imágenes satelitales como el río Meta, se debería acompañar de los análisis hidrodinámicos, de análisis geomorfológicos - históricos, con el fin de caracterizar adecuadamente la amenaza por inundación dentro del territorio.

Complementar los modelos de amenaza por inundación, podría ayudar a generar un resultado más acertado a la realidad, teniendo en cuenta no solo las evidencias en terreno con las unidades geomorfológicas, sino también, los posibles cambios del cauce con periodos de retorno que complementa la caracterización del fenómeno.

El territorio nacional cuenta con gran cantidad de afluentes, sobre los cuales se han desarrollado poblaciones urbanas y rurales, sin ningún reparo acerca de los posibles fenómenos,

lo que ha acarreado pérdidas millonarias para el país, siendo necesaria la inversión en estudios hidrodinámicos, geomorfológicos, caudales e hidrológicos, para poder generar medidas que mitiguen y controlen los impactos de estos fenómenos.

El modelo de análisis propuesto para la integración de metodologías de zonificación de amenaza por inundación, busca ser una herramienta para determinar zonas seguras de expansión urbana, libres de fenómenos de inundación, que pueda ser replicado y usado a escalas básicas y detalladas, tanto por la administración municipal de Puerto López, como por contratistas y entidades adscritas al ordenamiento territorial.

El modelo de análisis aplicado a escala detallada en el sector nororiental del casco urbano del municipio de Puerto López, determino que el municipio cuenta con 63.8 hectáreas que pueden ser incluidas como áreas de expansión urbana, en donde el municipio puede realizar sus proyectos de vivienda.

El municipio de Puerto López cuenta con un buen recurso de imágenes satelitales del área de estudio, disponibles de manera gratuita, de diferentes años como: Landsat, spot, World Imgerly entre otras. Con las cuales se realizará el análisis multitemporal.

El municipio de Puerto López cuenta con buena información hidroclimática de precipitación y caudales, de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM, y un modelo digital de terreno detallado del río Meta, en su paso por el casco urbano del municipio. Con lo cual se zonificará la amenaza por inundación con criterios hidrodinámicos.

El municipio de Puerto López cuenta con planchas geológicas y geomorfológicas a escala rural, disponibles gratuitamente, las cuales constituyen uno de los principales insumos, junto con el análisis multitemporal, para realizar la zonificación de elementos geomorfológicos.

Referencias

- Alcaldía Municipal Puerto López. (2019). Plan Básico de Ordenamiento Territorial - PBOT. Puerto López.
- Banco Mundial, C. (2012). Estado de la gestión del riesgo en Colombia. Bogotá D.C. 360-370.
- Cardenas, K. (Julio - Diciembre de 2018). Análisis General de la Gestión del Riesgo por Inundación en Colombia. Revista Científica en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad (CAS), 40-45.
- Charlton, R. (2008). Fundamentals of Fluvial Geomorphology. Routledge. Taylor and Francis Group. 234.
- Congreso de la República de Colombia. (1997, 18 de julio). Ley 388. Por la cual se modifica la Ley 9 de 1989, y la Ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=339#:~:text=Posibilizar%20a%20los%20habitantes%20el,y%20los%20servicios%20p%C3%BAblicos%20domiciliarios.>
- Congreso de la República de Colombia. (2012, 24 de abril). Ley 1523. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>
- Congreso de la República de Colombia. (2012, 02 de agosto). Decreto 1640. Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=49987>

Congreso de la Republica de Colombia. (2014, 19 de septiembre). Decreto 1807. 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.

Bogotá

D.C.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=59488>

Congreso de la Republica de Colombia. (2015, 26 de mayo). Decreto 1077. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio.

Bogotá

D.C.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77216>

Departamento Nacional de Planeación - DNP. (2018). Índice Municipal de Gestión del Riesgo en Colombia. Bogotá D.C. Gobierno Nacional de Colombia. 11.

Departamento Nacional de Planeación - DNP. (2012). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Bogotá D.C. Gobierno Nacional de Colombia.

Güiza Suarez, L. (2012). Gestión del riesgo de inundaciones en Colombia. Letras Verdes, 25-41.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua. Bogotá D.C. Gobierno Nacional de Colombia. 58.

Lastra, J., Diez-Herrero, A., Fernandez Iglesias, E., & Marquínez, J. (2008). Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: An example in the Northern Iberian Peninsula. Natural Hazards. 2.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Soltenible. (2014). Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordencación y Manejo de Cuencas Hidrográficas – POMCAS. Anexo B. Gestión del Riesgo. Bogotá D.C. Gobierno Nacional de Colombia. 51.

Organización de las Naciones Unidas - ONU. (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. París: UNESCO. Recuperado el 14 de Septiembre de 2020. 18.

Proyecto Apoyo a la Prevención de Desastres en la Comunidad Andina – PREDECAN, (2009). Incorporando la gestión del riesgo de desastres en la planificación y gestión territorial. Guía Técnica para la Interpretación y Aplicación del Análisis de Amenazas y Riesgos. Biblioteca Nacional N° 2009-09903. Perú. 70-73.

Sedano, K. C. (2013). Variabilidad Climática, Cambio Climático y gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia. Revista Semillas, 47-53.

Sedano, K., Carvajal, Y., Ávila, Á., (2013). Análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia. Universidad de Caldas. Manizales, Colombia. 219-238.

Servicio Geológico Colombiano (2018). Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1: 25.000. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá D. C.

Servicio Geológico Colombiano (2016). Guía Metodológica para Estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa. Escala Detallada. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá D. C.

Unidad Nacional para la Gestión de Riesgos de Desastres - Colombia (2017). Terminología sobre gestión de desastres y fenómenos amenazantes. Bogotá D.C., Colombia, 39.

Apéndice A. Modelo de análisis aplicado a la zonificación de amenaza por inundación.**MODELO DE ANÁLISIS ZONIFICACIÓN AMENAZA POR INUNDACIÓN**