

**“DETERMINACIÓN DE LA COTA DE INUNDACIÓN DEL RÍO ARAUCA
EN LA VEREDA BARRANCONES, MUNICIPIO DE ARAUCA MEDIANTE UN
MODELO HIDRODINAMICO”**

DIANA PAOLA LOPEZ RAMIREZ

DIEGO FERNANDO GÓMEZ ROJAS

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C – 2019

**“DETERMINACIÓN DE LA COTA DE INUNDACIÓN DEL RÍO ARAUCA
EN LA VEREDA BARRANCONES, MUNICIPIO DE ARAUCA MEDIANTE UN
MODELO HIDRODINÁMICO”**

DIANA PAOLA LOPEZ RAMIREZ

DIEGO FERNANDO GOMEZ ROJAS

Trabajo de grado para obtener el título de especialista en Recursos Hídricos.

ASESOR: JAIRO ALONSO ZORRO ROA

**INGENIERO CIVIL, MSC. EN INGENIERIA CIVIL CON ENFASIS EN
RECURSOS HIDRAULICOS**

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C – 2019



La presente obra está bajo una licencia:
Atribución 2.5 Colombia (CC BY 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/co/>

Usted es libre de:

- Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
- hacer obras derivadas
- hacer un uso comercial de esta obra



Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., junio de 2019.

Dedicatoria

En primera instancia a nuestras familias por el apoyo oportuno y motivación para crecer como profesionales influyentes en una sociedad con buenos principios y valores, apasionados por lo que hacemos en el campo de la ingeniería y el constante crecimiento.

Igualmente, a los docentes por su vocación a la enseñanza y proporcionarnos los conocimientos necesarios para poder desarrollar nuestra profesión como ingenieros especialistas en recursos hídricos de alta calidad.

Finalmente, a nuestro grupo de posgrado de especialización de recursos hídricos por el compañerismo y agradables momentos.

Agradecimientos

Nosotros expresamos nuestros agradecimientos a todos los que se encuentren nombrados a continuación ya que contribuyeron a la realización exitosa del presente trabajo.

Agradecemos a la universidad católica por hacer parte de nuestra formación como profesionales en lo académico y lo humano.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO.....	15
1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	15
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
<i>Antecedentes del problema</i>	<i>15</i>
<i>Pregunta de investigación</i>	<i>17</i>
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	17
1.4 OBJETIVOS.....	18
<i>Objetivo general</i>	<i>18</i>
<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>19</i>
2 MARCOS DE REFERENCIA.....	20
2.1 MARCO CONCEPTUAL	20
2.2 MARCO TEÓRICO	22
2.3 MARCO JURÍDICO.....	24
2.3.1. <i>Plan Nacional para la gestión integral del recurso hídrico (PNGIRH).....</i>	<i>24</i>
2.3.2. <i>Planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA).....</i>	<i>25</i>
2.3.3. <i>Plan básico de ordenamiento territorial del municipio de Arauca (PBOT).....</i>	<i>25</i>
2.3.4. <i>Corporación Autónoma regional de la Orinoquía (CORPORINOQUIA).....</i>	<i>25</i>
2.4 MARCO GEOGRÁFICO.....	26
2.4.1. <i>Localización general.....</i>	<i>26</i>
2.4.2. <i>Localización del río Arauca.....</i>	<i>27</i>
2.4.3. <i>Localización específica.....</i>	<i>28</i>
2.5 MARCO DEMOGRÁFICO.....	29
2.5.1. <i>Economía</i>	<i>31</i>
2.6 ESTADO DEL ARTE	32
3 METODOLOGÍA.....	34
3.1 ALCANCE Y LIMITACIONES.....	34

3.2	ENFOQUE.....	34
3.3	FASES DEL TRABAJO DE GRADO	34
3.4	HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....	37
3.4.1.	<i>Encuestas</i>	37
3.4.2.	<i>HEC-RAS</i>	38
3.4.3.	<i>ArcGIS</i>	38
4	ESTRATEGIA DE COMUNICACION Y DIVULGACION	39
5	CARACTERIZACION DEL SECTOR DE ESTUDIO	40
5.1	RED DE ESTACIONES	40
5.2	CARACTERIZACIÓN DEL RÍO EN EL PUNTO CRÍTICO DE ESTUDIO	41
5.2.1.	<i>Topografía</i>	42
5.2.1.	<i>Información recopilada en campo</i>	43
6	ANÁLISIS HIDROLOGICO.....	47
6.1	ANÁLISIS DE CAUDALES	53
6.1.1.	<i>Estimación de caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno</i>	53
7	DESARROLLO DEL MODELO HIDRODINAMICO RÍO ARAUCA SECTOR BARRANCONES	58
7.1	CONCEPTUALIZACIÓN MATEMÁTICA - MODELACIÓN EN HEC-RAS.....	59
7.1.1.	<i>Flujo permanente</i>	61
7.1.2.	<i>Flujo no permanente</i>	62
7.2	CARACTERÍSTICAS DEL MODELO.....	63
7.2.1.	<i>Morfología del cauce</i>	64
7.2.2.	<i>Coeficientes de rugosidad</i>	64
7.2.3.	<i>Condiciones de frontera</i>	65
7.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL MODELO	66
7.3.1.	<i>Manchas de inundación</i>	67
7.3.1.	<i>Riesgo por inundación</i>	69
7.3.1.1.	<i>Gestión del riesgo</i>	71
8	CONCLUSIONES	73

9	RECOMENDACIONES.....	74
10	BIBLIOGRAFÍA.....	75

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Esquema general de un río y zonas potencialmente inundables</i>	<i>23</i>
<i>Figura 2. Localización del departamento de Arauca.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3. Localización geográfica del municipio de Arauca.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4. Río Arauca y sus afluentes, donde se visualizan las zonas afectadas por inundaciones.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 5. Localización específica del área de estudio en la vereda Barrancones.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 6. Distribución de población urbana y rural del municipio de Arauca.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 7. Sectores productivos del municipio de Arauca</i>	<i>32</i>
<i>Figura 8. Esquema de la metodología del proyecto.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 9. Distribución espacial de las estaciones hidro climatológicas.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 10. Geometría del río Arauca en el sector de Barrancones (Fotografía del 2006).....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 11. Perfil longitudinal del río Arauca en la zona de Barrancones extraída de Google earth 2018.</i>	
<i>Fuente: propia.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 12. Georreferenciación de encuestados aledaños al río Arauca en la zona de Barrancones extraída de ArcGIS 10.3. Fuente: propia.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 13. Trabajo de campo, toma de puntos críticos en el sector Barrancones Fuente: propia.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 14. Levantamiento de información primaria mediante encuestas en el sector Barrancones Fuente: propia.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 15. Inundaciones del sector Barrancones ocurrida en octubre de 2018. Fuente: Noticias de Arauca.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 16. Localización de estación meteorológica para el municipio de Arauca extraída del visor CNE, IDEAM. Fuente: propia.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 17. Curvas de intensidad, frecuencia y duración para el municipio de Arauca. Fuente: IDEAM.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 18. Valores establecidos para diferentes periodos de retorno. Fuente: Hidrología Vente Chow.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 19. Dominio de computo con HEC- RAS 5.0.6. Fuente: propia.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 20. Distribución espacial del promedio de velocidades (m/s) en HEC-RAS – TR: 100 Años, río Arauca. Fuente: propia.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 21. Mapa de profundidades de lámina de agua (m) para un periodo de retorno de 100 años del río Arauca. Fuente: propia.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 22. Zonificación del riesgo representada mediante el ArcGIS 10.3. Fuente: propia.....</i>	<i>71</i>

LISTA DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 1. Resultado de pregunta No. 13 de la encuesta a la población al sector Barrancones</i>	<i>45</i>
<i>Gráfica 2. Precipitación total anual para el municipio de Arauca.</i>	<i>48</i>
<i>Gráfica 3. Serie anual de precipitación máxima en 24 horas para el municipio de Arauca.</i>	<i>49</i>
<i>Gráfica 4. Precipitación media, máxima, mínima mensual multianual para el municipio de Arauca.</i>	<i>50</i>
<i>Gráfica 5. Caudales máximos mensuales anuales del río Arauca desde el año 1999 hasta el 2006.</i>	<i>51</i>
<i>Gráfica 6. Niveles máximos mensuales anuales del río Arauca desde el año 1999 hasta el 2016.</i>	<i>51</i>
<i>Gráfica 7. Proyección de caudales máximos proyectados distribución Gumbel.</i>	<i>57</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Coordenadas geográficas, inicio y fin de la zona de estudio</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 2. Red de estaciones para la cuenca del río Arauca</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 3. Serie de caudales máximas totales para el río Arauca. Fuente: IDEAM.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 4. Parámetros de cálculo por Gumbel. Fuente: propia</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 5. Caudales de diseño. Fuente: propia.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 6. Estratificación del riesgo.</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 7. Acciones para mitigación del riesgo.....</i>	<i>72</i>

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Formato No. 001(hoja 1) de encuestas realizadas (registro fotográfico)

Anexo 2: Formato No. 001(hoja 2) de encuestas realizadas

Anexo 3: Tabulado de los resultados de encuestas

Anexo 4: Datos históricos de precipitación por el IDEAM

Anexo 5: Datos históricos de niveles y caudales por el IDEAM

Anexo 6: Mapa de manchas de inundación

Anexo 7: Mapa de riesgo por inundación

Anexo 8: Presupuesto del proyecto

Anexo 9: Cronograma del proyecto

RESUMEN

Esta investigación presenta un estudio detallado para la determinación de la cota de inundación mediante la modelación hidrodinámica del río Arauca ubicado en la cuenca de la Orinoquia en el municipio de Arauca, Arauca (Colombia) específicamente en la zona rural de Barrancones para la correcta zonificación de las áreas de riesgo por inundación.

Principalmente surge el desarrollo de este proyecto para comprender el comportamiento de las diferentes variables geométricas e hidráulicas que contribuyen a los frecuentes efectos hidrológicos de gran envergadura en el río Arauca, Colombia. Inicialmente se realiza el análisis hidrológico donde se identifica la mancha de inundación en el sector con base en información primaria como la topografía, condiciones hidrológicas, demografía y georreferenciación. Para la complementación del estudio se lleva a cabo la modelación hidrodinámica a partir de la batimetría del río en el sector de Barrancones mediante el programa HEC- RAS (Hydrologic Engineering Center) 2-D para determinar las condiciones de flujo, velocidad, profundidad media del flujo, ancho máximo, lámina de agua entre otros parámetros de análisis en la hidráulica fluvial.

Finalmente, con los resultados obtenidos se identifica la vulnerabilidad del sector a los efectos de inundación para la toma de decisiones asertivas con respecto a las medidas correctivas y/o preventivas que se deben tomar para la mitigación de eventos hidrológicos.

Palabras claves: río Arauca, modelación hidrodinámica, batimetría, topografía, hidrológico

ABSTRACT

This research presents a detailed study for the determination of the flood elevation by means of the hydrodynamic modeling of the Orinoco basin in the municipality of Arauca, Arauca (Colombia) in the rural area of Barrancones for the mitigation of the effects of the flood .

Mainly the development of this project arose to understand the behavior of the different geometric and hydraulic variables that gave rise to the frequent hydrological effects of great magnitude in the Arauca river, Colombia. Initially the hydrological analysis is carried out where the flood spot in the sector is identified based on primary information such as topography, hydrological conditions, demography and georeferencing. To complete the study, a hydrodynamic mode is carried out starting from the battle of the river in the Barrancones sector through the program HEC-RAS (Hydrological Engineering Center) 2-D to determine the flow conditions, speed, depth average of the flow, maximum width, sheet of water among other parameters of analysis in fluvial hydraulics.

Finally, with the results it is possible to identify the utility of the sector the effects of the flood for making assertive decisions with the respect of the corrective and / or preventive measures that must be taken into account for the mitigation of hydrological events..

Keywords: Arauca river, hydrodynamic modeling, bathymetry, topography, hydrological

INTRODUCCIÓN

En los últimos años Colombia presenta un incremento de zonas con alta vulnerabilidad hidrológica en consecuencia del cambio climático, falta de ordenamiento territorial, deforestación entre otras, que vienen generando escenarios desafortunados para la población asentada en las riberas y sus alrededores dado que es inevitable que los ríos presenten su dinámica fluvial por su condición natural se convierte en una amenaza que en ocasiones no ha sido atendida correctamente. En efecto se busca con este proyecto contribuir con un estudio hidrodinámico para la transformación del nivel de vulnerabilidad en una zona específica afectada por efectos de inundación en nuestro país.

De acuerdo con la situación actual que presenta la zona oriental de la cuenca el Orinoco en el río Arauca por los repetidos eventos hidrológicos se ha elegido como zona de estudio la vereda Barrancones en el área rural del municipio de Arauca, Arauca. Este sector hace parte de los puntos más críticos en la ciudad debido a que las fuertes precipitaciones han provocado el crecimiento del río y a su vez la destrucción de las deterioradas estructuras hidráulicas generando constantes inundaciones de gran envergadura. Además, que la falta de recursos no ha permitido la elaboración de estudios hidrológicos e hidráulicos que determinen cuales son las zonas de mayor vulnerabilidad de inundación.

Teniendo en cuenta el déficit de análisis hidrodinámicos y la vulnerabilidad de la zona al sufrir frecuentes eventos de inundación, se desarrolla un modelo hidrodinámico para la determinación de las cotas de inundación máximas para un periodo de retorno de 100 años, donde principalmente se realiza un análisis de la problemática con base en información climatológica, cartografía, demográfica, beneficiarios o afectados, encuestas, georreferenciación y esquemas. Una vez se haya recopilado la información necesaria se llevará a cabo el procesamiento de la misma, con esta información se sacaran los parámetros necesarios para alimentar el modelo el cual se desarrolla en el software HEC- RAS, con la ayuda de este software se modelaran las secciones transversales y parámetros hidráulicos del río, utilizando el motor de cálculo 2D, dando como resultado las áreas que ocuparan las manchas de inundación provocadas por el caudal proyectado a 100 años, posteriormente para el análisis y la representación de los resultados se utilizará el software ArcGIS, obteniendo finalmente la identificación de los escenarios más críticos de inundación en sus respectivo periodo de retorno; de esta manera bajo un criterio técnico e ingenieril se brindaran las mejores recomendaciones para la gestión del riesgo.

1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO

1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

El proyecto está definido por la línea de investigación de hidrología, hidráulica y gestión del riesgo ya que se tiene previsto utilizar modelos especializados que permitan determinar la cota de inundación en un área específica en el sector de Barrancones en el municipio de Arauca a través del análisis de diferentes características en campo y variables procesadas computacionalmente.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Antecedentes del problema

La cuenca hidrográfica del río Arauca ubicada al norte del departamento de Arauca pertenece a la cuenca del Orinoco la cual se encuentra al norte de Suramérica, siendo uno de los ríos más largos de Suramérica con 2150 Km de recorrido (Judith Rosales, Cesar F Suárez y Carlos A. Lasso, 2010).

En los últimos años se ha manifestado una mayor frecuencia de los eventos hidrológicos extremos en donde se presentan procesos erosivos y de sedimentación del cauce del río Arauca, generando un incremento de las áreas afectadas por las inundaciones, ocasionando perjuicio sobre las comunidades ribereñas y pérdidas en sus cadenas productivas.

En diferentes comunicados se expresa la situación de amenaza y vulnerabilidad que sufre el municipio de Arauca en el último año, siendo afectado por la ola invernal en donde el río Arauca ha sido posicionado en alerta naranja y roja según los informes hidrológicos diarios desde el mes de mayo a octubre de 2018 realizados por el instituto de hidrología,

meteorología y estudios ambientales en los cuales se expresa que se viene presentando crecientes súbitas en los ríos aportantes a la cuenca del río Arauca presentándose un evento hidrológico máximo, ocasionando el desbordamiento de este río en el mes de junio de 2018 superando la cota máxima de 7,8 metros llegando a 8,04 metros (IDEAM, http://www.ideam.gov.co/web/pronosticos-y-alertas/boletin-hidrologico-diario/-/document_library_display/), en consecuencia de los excesos de precipitación cuando la normal es de 300mm y se ha incrementado en un veinte y cuarenta por ciento teniendo precipitaciones de 360 a 400 mm para el municipio de Arauca (Barros, 2018).

La vereda Barrancones del municipio de Arauca corresponde a un sector socioeconómicamente bajo debido a su ubicación geográfica, aglomeración de habitantes de nacionalidad colombiana y del vecino país de Venezuela que se han localizado en los últimos años de manera informal, resguardos indígenas y la poca influencia del estado. Este sector sufre de inundaciones frecuentes y el 11 de octubre del 2018 se presentó una de las situaciones más alarmantes para el municipio de Arauca debido a la rotura del dique perimetral y el desbordamiento del río Arauca en esta vereda, provocando la inundación de grandes extensiones de llanura y exponiendo a los habitantes de zona rural a daños materiales en sus viviendas y producciones agropecuarias según el comunicado de prensa por Caracol Radio el 11 de octubre del 2018. (Radio, 2018)

De esta manera se considera conveniente realizar un análisis detallado para determinar la cota de inundación del río Arauca con diferentes periodos de retorno en este sector de Barrancones para que se tomen las medidas necesarias y correctas con respecto a la mitigación de los efectos de inundación. Igualmente, el déficit de estudios hidrodinámicos de este sector impide tener una perspectiva técnica para entender la ocurrencia de eventos extremos, las tendencias de largo plazo en el nivel del río y las zonas inundables.

Así que es necesario realizar una investigación de las principales características geográficas, demográficas, socioeconómicas, hidrológicas del sector de Barrancones, como a su vez tener un levantamiento topobatimétrico del área de estudio para así obtener la suficiente información con la que se alimentara el modelo hidrodinámico el cual se desarrollara con la herramienta computacional HEC- RAS a través del motor de modelación en dos dimensiones, calculando así la cota máxima de inundación del río Arauca para la vereda Barrancones.

Pregunta de investigación

¿Cuál es la cota de inundación máxima para la cuenca del río Arauca en la vereda Barrancones para un periodo de retorno de 100 años y como se pueden mitigar los efectos de inundación en beneficio para la comunidad afectada?

1.3 JUSTIFICACIÓN

El municipio de Arauca no cuenta con suficientes estudios referentes a la cuenca del río Arauca que permitan hacer adecuada atención a la amenaza por efectos de inundación donde se prevenga, mitigue y reduzca el nivel de riesgo que presentan las poblaciones ribereñas en condiciones más vulnerables con respecto a la zona urbana.

La vereda Barrancones conformada aproximadamente por 300 familias, no cuenta con suficientes recursos económicos para llevar a cabo un estudio hidrodinámico del río Arauca, una de las grandes preocupaciones es que además de estas familias, el sector se está poblando cada día más por la llegada de personas de nacionalidad Venezolana, por lo cual se ve la necesidad de realizar un modelo hidrodinámico, el cual nos permita saber el nivel de inundación, para así zonificar las áreas de mayor riesgo de inundación en el sector, con el fin de mitigar el peligro que allí se presenta. Además, ya que la población se ha visto afectada por constates desastres causados por las inundaciones, en donde se han comprometidos los cultivos, viviendas y carreteras.

Este proyecto se basa principalmente en determinar las cotas de inundación máximas para un caudal con un periodo de retorno de 100 años, mediante la recopilación de información primaria y análisis exploratorio a través de visitas de campo para conocer la realidad de la problemática y con esto realizar un modelo utilizando herramientas computacionales que permita calcular y representar los niveles de inundación en la zona rural, vereda Barrancones del municipio de Arauca.

De esta manera es fundamental contribuir con estudios detallados de hidrología e hidráulica como antecedentes para análisis futuros, en el campo laboral a través de consultoría que beneficien a los diseñadores hidráulicos en el caso de proponer sistemas de protección y mitigación en zonas de la ribera del río Arauca, como también para diferentes planes de gestión del riesgo. Igualmente, el presente documento puede ser conveniente para que las entidades gubernamentales generen escenarios bajo un plan de acción ante los efectos de inundación con datos confiables y técnicos plasmados en el presente proyecto. Finalmente, los mayores beneficiados deben ser los habitantes de la zona que en el transcurso de los años han venido sufriendo constantemente por causa de los eventos de inundación, lo anterior provocando un retroceso físico, social y económico en sus viviendas por consiguiente la afectación en su calidad vida.

1.4 OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar la cota de inundación máxima para un periodo de retorno de 100 años mediante un modelo hidrodinámico en la vereda Barrancones en el municipio de Arauca con el fin de mitigar sus efectos.

Objetivos específicos

- Recopilación de información primaria mediante encuestas in situ de los habitantes de la vereda Barrancones, al igual que los efectos negativos causados por las inundaciones.
- Adquisición y procesamiento de información geomorfológica, hidrológica e hidráulica del río Arauca para el desarrollo de la modelación hidrodinámica 2D mediante la herramienta computacional HEC-RAS y Arc GIS para determinar la cota máxima de inundación en un escenario proyectado a 100 años.
- Diagnosticar los efectos causados por las inundaciones del río Arauca en el sector de la vereda Barrancones, zonificación del riesgo por inundación en el sector de estudio, recomendaciones para la gestión del riesgo, lo anterior basado en los resultados de la modelación realizada.

2 MARCOS DE REFERENCIA

Para la comprensión del presente proyecto de investigación se describen diferentes aspectos relevantes con respecto a la determinación de cota inundación en la vereda Barrancones en el municipio de Arauca y la gestión del riesgo mediante los diferentes marcos que estructuran este documento.

2.1 MARCO CONCEPTUAL

Es imprescindible realizar una descripción de algunos conceptos que permitan comprender con mayor facilidad el desarrollo de este proyecto.

La composición natural de la tierra cuenta con el recurso hídrico que puede expresarse en diferentes formas sólido, líquido o gaseoso y su mayor parte se encuentra en los mares y océanos que corresponden al agua salada y por otro se localiza el agua dulce en una pequeña proporción, sin embargo, esta garantiza la vida humana, animal y natural mediante el proceso del ciclo hidrológico.

Este tiene como finalidad mantener una constante recirculación del agua a través de diferentes etapas como la evaporación que se adquiere mediante la energía que transforma el agua en vapor la cual se alcanza indirectamente de la radiación solar y del calor originario de la atmósfera; generalmente la evaporación que se provoca a partir de una cobertura vegetal mediante la transpiración de agua por la vegetación se le denomina la etapa de evapotranspiración. Como resultado el agua que llega a la atmósfera se transforma en forma de nubes cuando es enfriado el aire hasta lograr su punto de rocío se le llama condensación y desde esta se provoca la lluvia que se precipita a través de la superficie y parte de esta puede infiltrarse, desaparecer por efectos de evaporación y/o retenerse por capilaridad, como

resultado el excedente de agua es descargado por los ríos que finalmente llegan al mar (Mook, 2002-01-01)

Una cuenca hidrográfica es un sector topográficamente bien delimitado con una red de drenajes dentro de ella y donde las aguas escurren hacia el nivel más bajo y generalmente este punto hace parte del perímetro de la cuenca. Las redes hidrográficas siguen un patrón ramificado basado en un motivo detritico para replicarse a sí mismo en diferentes escalas. En términos más simples una cuenca es una superficie de terreno en la que transita agua superficial proveniente de la precipitación, ríos, quebradas, riego etc. y que finalmente llegan directamente al nivel mar. (M., 2010)

Una manera de proteger y prevenir a la población ante un evento de inundación es conociendo las cotas de inundación máximas las cuales están referenciadas topográficamente con una estación hidrológica del IDEAM, que puede ser mediante una mira o reglilla que tienen demarcado un nivel de referencia y se configura como un nivel de referencia únicamente para la zona urbana, generalmente esto es debido a que los ríos poseen una alta dinámica en donde las variables hidráulicas pueden variar. (IDEAM).

Para determinar las cotas de inundación se puede obtener mediante una modelación hidrodinámica para la cual se implementan diferentes softwares que utilizan modelos de simplificación y/o matemáticos y se basa en un procedimiento técnico para demostrar un fenómeno natural puntual con el fin de determinar el movimiento del agua o dinámica fluvial.

Para llevar a cabo esto se debe relacionar la modelación hidrológica que se basa en la cantidad de volumen de agua que hay en un sistema y la modelación hidráulica que se enfoca hacia el movimiento del fluido donde se rige bajo diferentes variables como cotas, velocidad, caudales y tiene la facilidad que permite determinar estas variables en diferentes puntos de

interés. (IDEAM, PROTOCOLO DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA, 2018)

Una manera de atender los eventos hidrológicos ocurrido es a través de la gestión del riesgo que se fundamenta en que la unidades nacionales y gubernamentales lleven a cabo el proceso de planificación, ejecución, seguimiento, evaluación de políticas y consigo las acciones permanentes para dar a conocer a las comunidades el concepto de riesgo y su concientización con el objetivo de evitarlo o mitigarlo de manera que se consiga el bienestar, seguridad y calidad de vida de la población.

2.2 MARCO TEÓRICO

Generalmente las inundaciones son ocasionadas cuando la cantidad de precipitación sobrepasa la capacidad de retención e infiltración del suelo o de igual manera cuando la capacidad máxima de transporte de un río es superada provocando que el cauce principal se desborde y se produzcan estos eventos naturales como las inundaciones. En la *Figura 1* se representa un esquema de un río desde la cuenca alta, media a baja donde comúnmente esta zona se identifica como llanura de inundación. (IDEAM, REPORTE DE AVANCE DEL ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA ENA 2018, 2018)

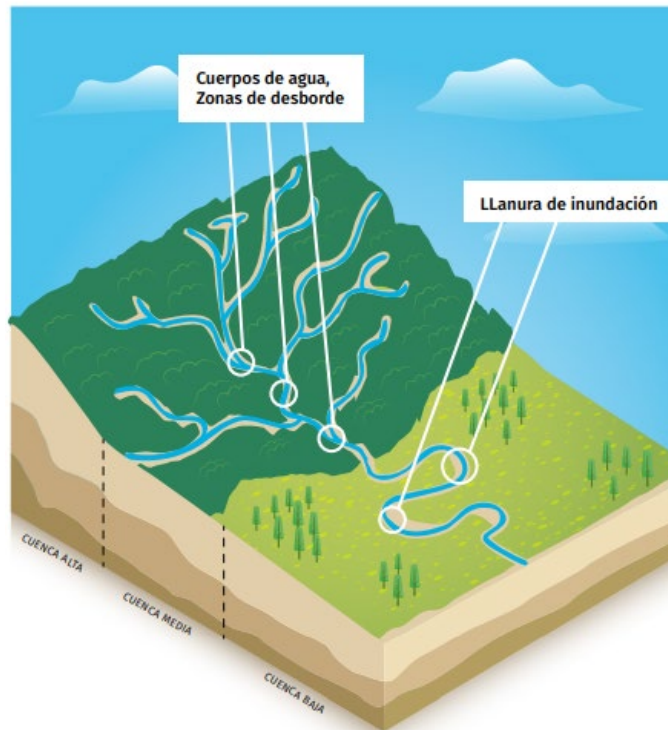


Figura 1. Esquema general de un río y zonas potencialmente inundables
Fuente: (IDEAM, REPORTE DE AVANCE DEL ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA ENA 2018, 2018, pag 18)

Un estudio hidrodinámico es una alternativa que busca mediante la aplicación de herramientas determinar la dinámica de los ríos para el análisis de los diferentes parámetros hidráulicos y escenarios futuros, donde sea posible determinar mapas de velocidades, profundidad de lámina de agua las cuales son fundamentales para el desarrollo de los mapas de amenaza por inundación y mapas de zonificación. Para esto se requiere de la delimitación de la zona con posibilidad de ocurrencia de un evento, periodos de ocurrencia, grado de afectación probable (IDEAM, REPORTE DE AVANCE DEL ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA ENA 2018, 2018)

A partir del plan de acción de biodiversidad de la cuenca el Orinoco, su región hidrográfica se ubican seis de los once ríos de Colombia con caudales superiores a 1.000 m³/seg, en donde las aguas procedentes de las cuencas altas de la cordillera Oriental se calculan en 6,200 m³/s y en 21.400 m³/seg para el río Orinoco. Así que de esta manera el 38,7% de las microcuencas del país son contribuyentes a la cuenca del Orinoco. (Correa, H. D, Ruiz, S. L. y Arévalo, L. M., 2005-2015)

Una vez se identifican los posibles riesgos en una zona por posibles inundaciones es imprescindible realizar la evaluación de este; el cual se encuentra basado en componentes principales como riesgo de inundación, exposición, vulnerabilidad. Cuando es evidente el peligro por inundación se tienen en cuenta características como la profundidad, velocidad, descarga y frecuencias de inundación, y es definido según la probabilidad y la magnitud; existen variables que actúan sobre la magnitud de las inundaciones tales como características meteorológicas, hidrológicas, hidráulicas, topografía de las cuencas hidrográficas, canales y planicies aluviales aguas arriba y aguas abajo del sector de estudio las cuales deben ser analizadas. (Kheradmanda. S, Seidou. O, Konte.D, Barmou. M, 2018)

2.3 MARCO JURÍDICO

Para garantizar la viabilidad de este proyecto es necesario tener en cuenta que se debe regir bajo unas dependencias normativas y regulatorias que deben ser cumplidas a cabalidad si lo requiere, a continuación, se presentan cada una de estas:

2.3.1. Plan Nacional para la gestión integral del recurso hídrico (PNGIRH)

Es una política generada por el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial con el objetivo de orientar la planificación, administración, seguimiento y monitoreo del recurso hídrico a nivel nacional bajo un criterio de gestión integral del mismo cumpliendo con 6 objetivos, estrategias, metas, indicadores y líneas de acción estratégica para el manejo del

recurso hídrico en el país, desde el 2010 hasta el 2022. (MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2010)

2.3.2. Planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA)

Esta guía establece los criterios técnicos, procedimientos y metodologías que se deben tener en cuenta en las fases de aprestamiento, diagnóstico, prospectiva y zonificación ambiental, formulación, ejecución y seguimiento y evaluación, así como los lineamientos para abordar los temas de participación y la inclusión del riesgo para la formulación de los planes de ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas (POMCA).

2.3.3. Plan básico de ordenamiento territorial del municipio de Arauca (PBOT)

Este documento establece el conjunto de acciones político, administrativas y de planificación física concertadas, emprendidas por el municipio, en ejercicio de la función pública que le 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 culturales.

2.3.4. Corporación Autónoma regional de la Orinoquía (CORPORINOQUIA)

Es la encargada de otorgar las licencias, permisos, concesiones, autorizaciones y salvoconductos requeridos por la ley, para el uso y aprovechamiento o movilización de los recursos naturales renovables. Promulga normas para el manejo de cuencas hidrográficas, ordenamiento territorial para la utilización, protección, preservación y recuperación del medio ambiente, funciones establecidas en el artículo 31 de la ley 99. (Corporinoquía, 2016)

2.4 MARCO GEOGRÁFICO

2.4.1. Localización general

El departamento de Arauca se encuentra ubicado en el sector norte de la Orinoquía colombiana en el límite con Venezuela y está compuesto por siete municipios: Arauca (ciudad capital), Arauquita, Cravo Norte, Fortul, Puerto Rondón, Saravena y Tame; su superficie es de 23.818 km² que corresponde al 2,1% del total nacional. El departamento limita por el norte con el río Arauca, que lo separa de la República de Venezuela; por el este, con la República de Venezuela; por el sur, con los ríos Meta y Casanare, que lo separan de los departamentos del Vichada y Casanare; y por el oeste, con el departamento de Boyacá. (FUPAD, 2013)

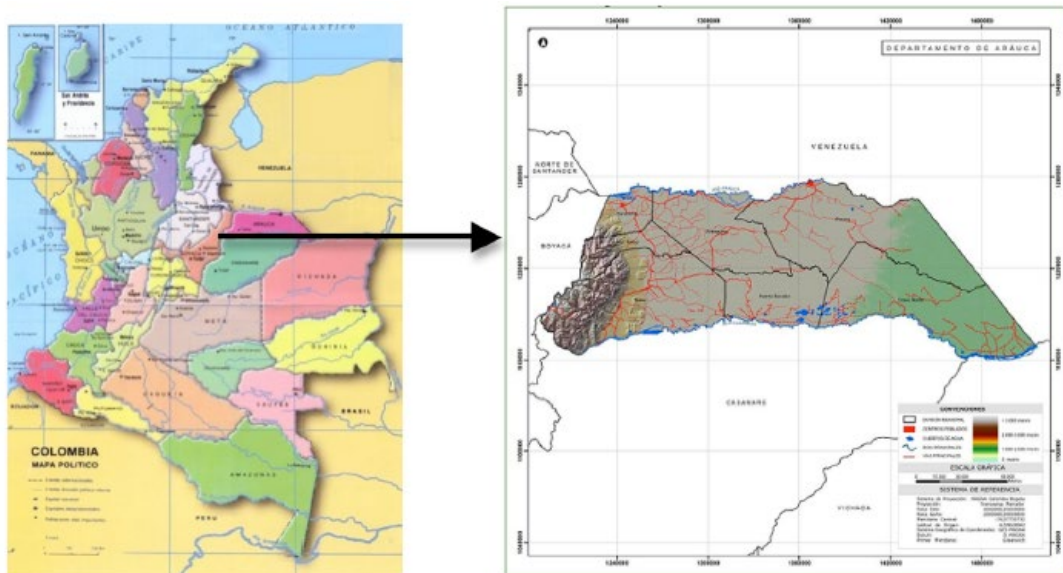


Figura 2. Localización del departamento de Arauca
Fuente: Sociedad geográfica de Colombia

El municipio de Arauca se encuentra ubicado en el departamento de Arauca al oriente colombiano en los límites de la Orinoquía Colombiana y venezolana. El cual se localiza por

el norte con la frontera internacional Colombo-Venezolana (río Arauca)- por el sur con el Municipio de Cravo Norte y Puerto Rondón- por el oriente con la república de Venezuela- por el occidente con los municipios de Arauquita y Tame. El área total del municipio es de 584.126 has, el casco urbano posee 2.052 has y el resto está asignada a la zona rural.



Figura 3. Localización geográfica del municipio de Arauca
Fuente: CDIM ESAP

2.4.2. Localización del río Arauca

El río Arauca nace en la cordillera oriental de Colombia en el páramo del Almorzadero ubicado en Santander ; en el sector más alto es llamado Río Chitagá a cuatro mil metros sobre el nivel del mar cerca del nevado del cocuy, cambiando su rumbo hacia el Oriente y a su lado derecho recibe afluentes del Río Cubugon y el Cobaría procedentes de la Sierra Nevada de Chita y al llegar a tierras planas llegan a su derecha los ríos Róyota, Bojabá y Banadía y por la izquierda el río Cutufí y finalmente llega a tierras venezolanas desembocando en el

Orinoco en Venezuela. En la *Figura 4* se visualiza el río Arauca y sus afluentes como también los puntos de afectación por inundación, deslizamiento y zonas de influencia.

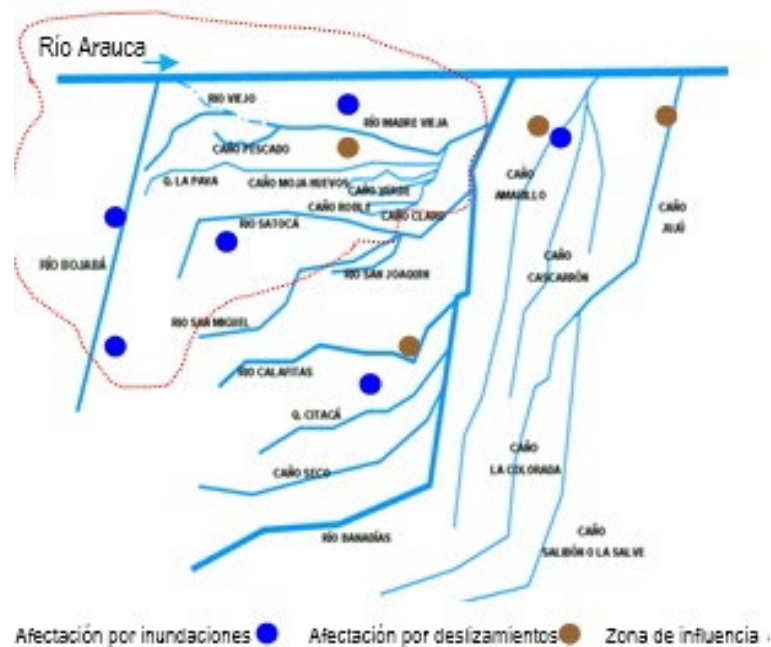


Figura 4. Río Arauca y sus afluentes, donde se visualizan las zonas afectadas por inundaciones
Fuente: (OJEDA., Mayo,2015)

El río Arauca alcanza una extensión longitudinal de 1050 km, de los cuales 700 km son navegables con 447.175,419 Ha de la cuenca total del río. El ancho de su cauce normal varía notablemente, siendo muy amplio (1km) hasta la difluencia del brazo Bayonero, donde se empieza a angostar hasta un ancho medio de unos 200 m. Su sección transversal presenta una altitud relativa entre 2 y 3 m.

2.4.3. Localización específica

El sector de estudio considerado como un punto crítico se encuentra localizado hacia el sector oriental y a unos 2 km aproximadamente del área urbana del municipio de Arauca. Este sector está ubicado desde Guatitas hasta Barrancones, las coordenadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas geográficas, inicio y fin de la zona de estudio

<i>Zona de Estudio</i>	<i>Latitud</i>	<i>Longitud</i>
<i>Inicio</i>	7° 4'11.90"N	70°49'17.16"O
<i>Fin</i>	7° 4'52.95"N	70°47'55.09"O

En este sector se encuentra el punto crítico paralelo a la vía terciaria así mismo al dique que ha sufrido en diferentes circunstancias daños, en una longitud aproximada de 300 metros, la cual tiene problemas de deslizamiento.

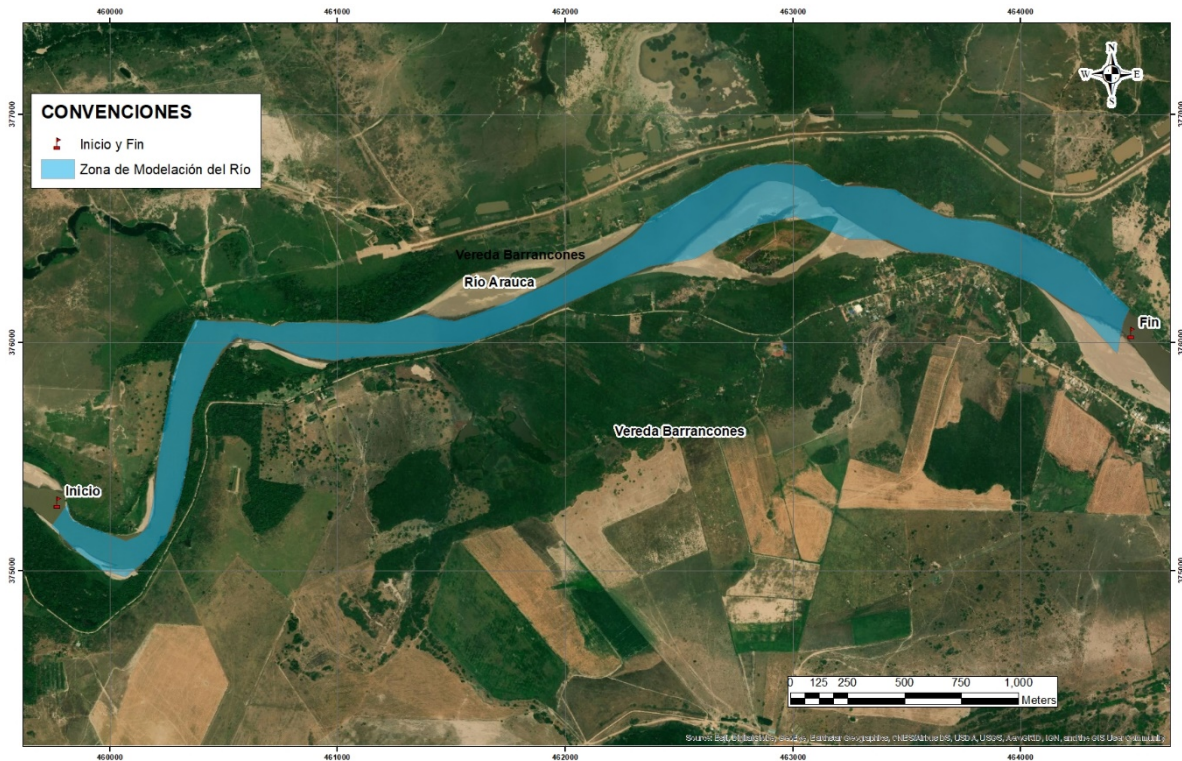


Figura 5. Localización específica del área de estudio en la vereda Barrancones
Fuente: Imágenes 2018 de Google earth

2.5 MARCO DEMOGRÁFICO

De acuerdo con el censo realizado para el año 2016 el DANE estimó su población en 89.712 habitantes (33% del total departamental); de los cuales el 86% es urbana y el restante 14% rural. La población entre 15 y 59 años representa el 55% del total departamental.

Dado el cierre de la frontera de Venezuela y la crisis del sector petrolero la situación económica del municipio ha sido duramente afectada, por tanto, indicadores como el sacrificio de ganado, las exportaciones, el área aprobada para construcción, despachos de cemento, la compra de vehículos, la captación financiera, el transporte de pasajeros y de carga presentan resultados poco alentadores. Por lo anterior, la tasa de desempleo pasó del 12% al 16% entre 2015 y 2016 duplicando el promedio nacional (8%).

El DANE no realiza un cálculo de la inflación del municipio, sin embargo, la ubicación geográfica y el comportamiento de su economía permiten prever que en Arauca el costo de vida es superior al promedio nacional. (Dirección general de apoyo fiscal, diciembre 2016)

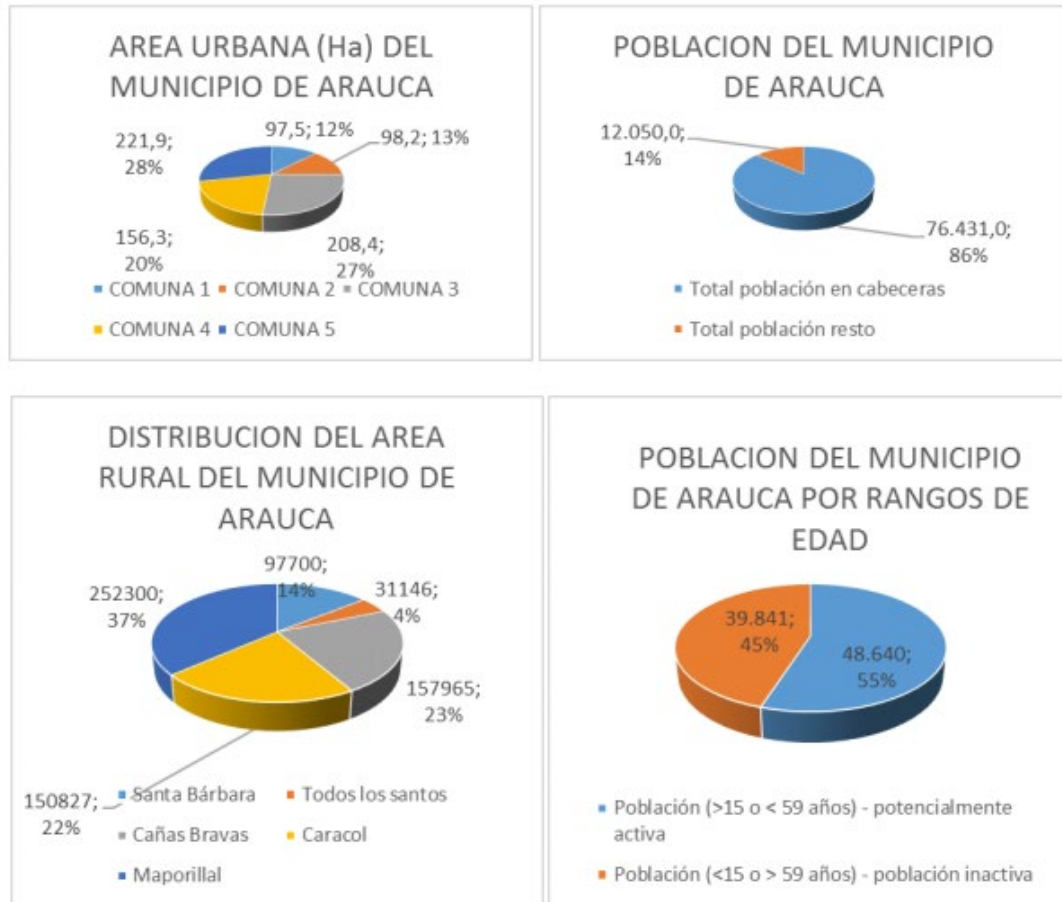


Figura 6. Distribución de población urbana y rural del municipio de Arauca.
Fuente: plan de desarrollo del municipio de Arauca periodo 2016-2019 realizado por el concejo municipal de Arauca

2.5.1. Economía

La economía de Arauca muestra una marcada concentración en el sector minero. Las actividades agropecuarias se perfilan como la segunda vocación productiva del departamento, siendo sus principales sectores económicos agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca.

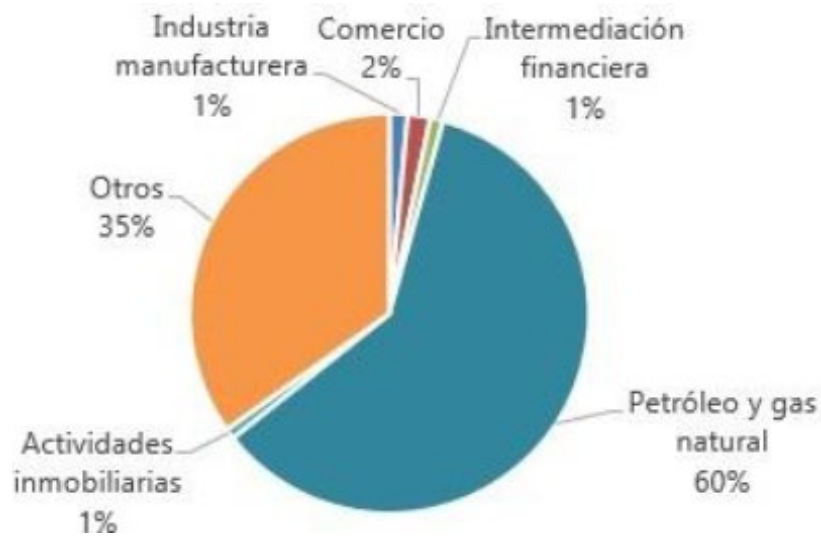


Figura 7. Sectores productivos del municipio de Arauca

Fuente: plan de desarrollo del municipio de Arauca periodo 2016-2019 realizado por el concejo municipal de Arauca

2.6 ESTADO DEL ARTE

En los últimos años debido al crecimiento poblacional del municipio de Arauca, Arauca y sus alrededores, se ha venido presentando desastres a causa de las inundaciones provocadas por las crecientes del río Arauca. Son muy pocos los estudios hídricos e hidráulicos que en esta zona se han realizado por la falta de recursos y conocimiento del tema. Se detectó que las amenazas naturales más relevantes en el municipio de Arauca fueron debidas a las constantes inundaciones, lo anterior en concordancia con Corporinoquia y aplicando una base de datos de hechos históricos de DESINVENTAR (Cuellar 2014). El plan de contingencia ante esta amenaza se ha definido en el PBOT 2009 (El Plan Básico de Ordenamiento Territorial) el cual clasifica las zonas de amenaza baja, media y alta; plan definido sin ningún estudio hídrico e hidráulico. La vereda Barrancones municipio de Arauca no cuenta con estudios de zonificación relacionado a las inundaciones provocados por el río Arauca.

Un estudio desarrollado por (Kheradmanda. S, Seidou. O, Konte.D, Barmou. M, 2018) se basa en la implementación de un modelo hidrodinámico para el río Níger, partiendo de secciones transversales de llanuras de inundación con los datos de contornos de elevación con el fin de estimar la superficie del agua, donde aplicaron las herramientas de GIS y HEC-GeoRAS para convertir los perfiles de la superficie del agua en todas las secciones transversales del modelo HEC-RAS representando finalmente mapas de inundación donde determinaron que es imprescindible realizar un plan de adaptación de la población lo cual debería ser evaluado en términos de costo; también concluyen que se deben mejorar los programas de conciencia pública, políticas, leyes y su aplicación, cambios en el uso de tierra, cambios en la construcción de viviendas y estructuras de protección.

Un análisis realizado por (V. Moya Quiroga, S.Kure,K. Udo,A. Mano, 2016) donde pusieron a prueba los beneficios de la modelación con el HEC-RAS versión 5 para simular la inundación de febrero de 2014 en la Amazonía Boliviana que en comparación con una imagen satelital del evento demuestra un mayor desempeño con respecto a que permite la presentación de variables como profundidad de agua, velocidad del flujo y variación de la inundación en el tiempo. Adicionalmente obtuvieron la identificación de lugares específicos donde se inicia a inundar la planicie y a su vez las zonas expuestas de amenaza.

3 METODOLOGÍA

3.1 ALCANCE Y LIMITACIONES

Algunas de las limitaciones en este proyecto es el poco conocimiento regional y local sobre estudios hidráulicos e hidrológicos, por la precaria información acerca del tema, la cual no se halla con facilidad en fuentes digitales y/o físicas.

Desde la perspectiva de la modelación hidrodinámica los limitantes pueden ser el requerimiento alto de información o datos.

3.2 ENFOQUE

Este proyecto se enfoca principalmente en representar detalladamente un modelo hidrodinámico del río Arauca mediante herramientas computacionales, para determinar principalmente las cotas máximas de inundación a través de mapa de amenaza por inundación con diferentes periodos de retorno y así generar resultados cualitativos y cuantitativos del comportamiento del cauce para establecer una zonificación del sector con el fin de mitigar el nivel de vulnerabilidad, alertando sobre los posibles riesgos por inundación.

3.3 FASES DEL TRABAJO DE GRADO

La investigación planteada es definida como tesis exploratoria y proyectiva debido al conjunto de actividades para caracterizar un evento de estudio a través de investigación en campo y a su vez la elaboración de un modelo para analizar eventos futuros de inundación.

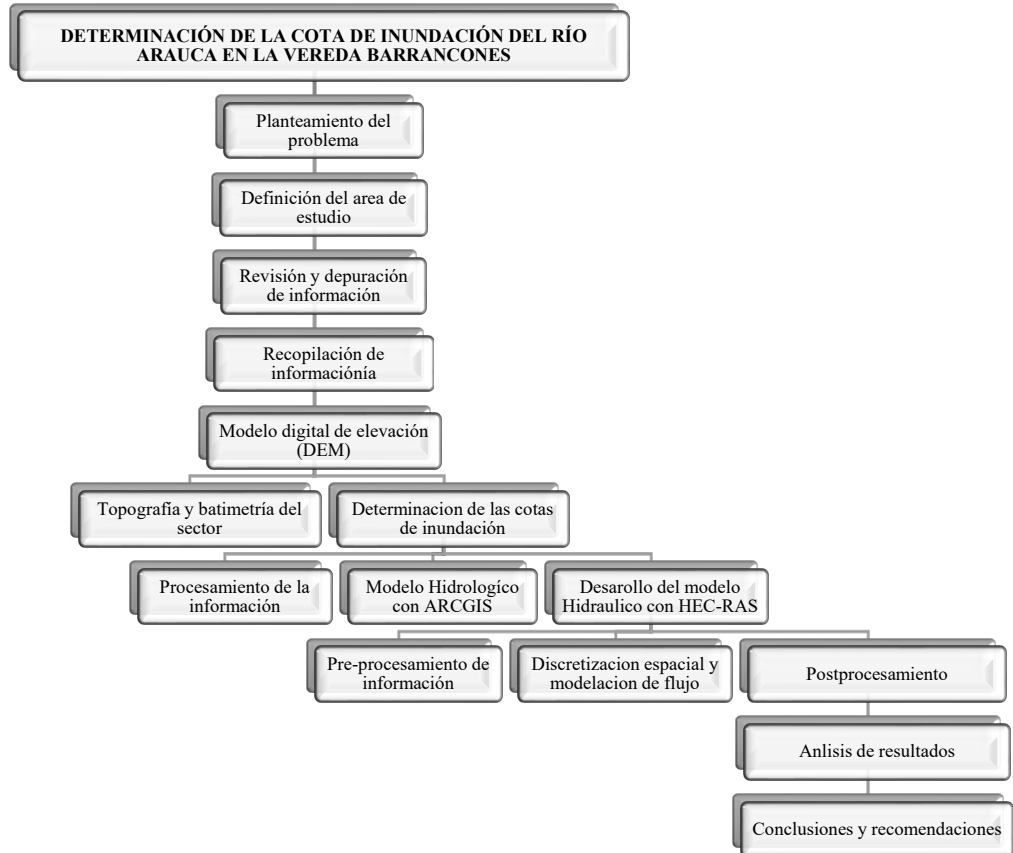


Figura 8. Esquema de la metodología del proyecto
Fuente: propia

Fase 1: Planteamiento del Problema

Inicialmente se definió el área de influencia teniendo en cuenta la cartografía digital por Google Earth donde se detecta la situación de amenaza que surge en el municipio de Arauca en la vereda Barrancones por el río Arauca debido al desbordamiento por la frecuencia de eventos hidrológicos. Igualmente se canaliza la información y se busca obtener una solución a la necesidad.

Fase 2: Recopilación de información

Se realiza una búsqueda de información conceptual de la zona en lo que se refiere a sus condiciones geográficas y demográfica. Igualmente, información primaria y secundaria respecto al problema presentado obtenidas a través de diferentes fuentes de investigación para obtener un soporte teórico e histórico en lo que concierne a los efectos de inundación por los eventos hidrológicos. Adicionalmente se realiza un registro para el reconocimiento de la población vulnerable mediante encuestas casa a casa. También fue recopilada información meteorológica por medio del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). Seguidamente se obtuvo información de batimetría y topografía en el tramo de estudio la cual fue realizada a través del contrato de consultoría No. 000 589 de 2014 cuyo objeto es *“ESTUDIOS TECNICOS Y DISEÑOS A DETALLES DE PROYECTOS ENMARCADOS EN EL CONTRATO PLAN ARAUCA, DEPARTAMENTO DE ARAUCA” componente 2: ESTUDIOS Y DISEÑOS REHABILITACIÓN DIQUE DE PROTECCION EN PUNTOS CRITICOS IDENTIFICADOS*, como unidad contratante la secretaria departamental de Arauca. Con base en el levantamiento topo batimétrico del sector de Barrancones en el municipio de Arauca se logra comprender el comportamiento y las principales características hidrodinámicas a partir de la implementación de un modelo computarizado en HEC-RAS, donde se presentan las láminas de agua, caudales parámetros hidráulicos y geometría del cauce.

Fase 3: Desarrollo del modelo hidrodinámico

Para determinar las cotas máximas de inundación para un periodo de retorno de 100 años se realiza un modelo hidrodinámico donde se procesó la información mediante el uso de análisis estadísticos, informativos y geoespaciales. El desborde frecuente del río y la amplitud de la llanura de inundación hace necesario la representación de un modelo 2D que garantice de forma confiable la dinámica del flujo durante la creciente proyectada.

Para la implementación de los ejercicios de simulación se emplea el software HEC-RAS con el apoyo visual de la herramienta computacional ArgGIS. Teniendo como datos de entrada secciones transversales a lo largo del cauce en la zona específica de estudio, coeficientes de rugosidad y un hidrograma que represente la crecida máxima a 100 años.

Seguidamente se lleva a cabo la discretización espacial y se obtiene la modelación de flujo para finalmente realizar un post procesamiento el cual genera los resultados finales de la superficie de inundación visualizados en mapas.

Fase 4: Análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con los resultados obtenidos de la cota de inundación máxima para un periodo de retorno de 100 años se realiza un análisis de este para brindar recomendaciones de posibles medidas de mitigación respecto a la atención de la amenaza de inundación en la cuenca del río Arauca sector Barrancones con el fin de contribuir a la gestión del riesgo.

3.4 HERRAMIENTAS UTILIZADAS

A continuación, se describen cada una de las herramientas fundamentales para el desarrollo del proyecto:

3.4.1. Encuestas

Es un medio a emplear en la visita de campo mediante un formato que representa una serie de preguntas formuladas por los autores del proyecto tipo cuestionario para el reconocimiento poblacional en el sector crítico y su afectación con respecto a los eventos de inundación con la finalidad de describir y analizar los datos recopilados.

3.4.2. HEC-RAS

HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System) es un software con un conjunto de herramientas que nos permiten modelar la hidráulica de los ríos a partir de unos parámetros de entrada para el caso de estudio se va a desarrollar un modelo en dos dimensiones.

3.4.3. ArcGIS

Con esta herramienta computacional se puede representar los resultados debidamente georreferenciados de las manchas de inundación arrojados por el software HEC-RAS, haciendo una superposición de shape, se podrá representar las cotas y áreas afectadas en la zona de estudio, así como la zonificación del riesgo.

4 ESTRATEGIA DE COMUNICACION Y DIVULGACION

Dentro del plan estratégico de divulgación y comunicación del proyecto se pretende que sea de una manera efectiva con el propósito de generar confianza y viabilidad del proyecto ante la audiencia, además de compartir experiencia, resultados, ventajas y beneficios. Así mismo, se pretende aportar los conocimientos empleados a los diferentes interesados en el recurso hídrico. A continuación, se plantean las diferentes fuentes de divulgación del presente proyecto:

- Presentaciones públicas: Principalmente a través de la Alcaldía municipal de Arauca se tiene idealizado organizar reuniones para presentar la propuesta y exponerlo ante las partes interesadas basados información real para eventos futuros.
- Medios de comunicación: Por otro lado, mediante el apoyo de canales de televisión regionales se aspira ser socializado ante la comunidad Araucana para brindar un concepto más claro de las zonas más vulnerables ante la amenaza de inundación.

5 CARACTERIZACION DEL SECTOR DE ESTUDIO

5.1 RED DE ESTACIONES

Para el procesamiento y análisis de datos históricos se solicitó la información disponible que comprende la red de estaciones del IDEAM para la cuenca del río Arauca, donde se identificaron 2 estaciones limnimétricas localizada aguas arriba en estado suspendido y aguas abajo ubicada bajo el puente internacional José Antonio Páez en el municipio de Arauca de la cual se obtiene los datos históricos de caudales y niveles máximos, medio, mínimos. Por otro lado, para el registro de precipitación se halló la estación de categoría sinóptica principal localizada en el aeropuerto Santiago Pérez Quiroz. En la Tabla 2 se encuentra la información general de las estaciones.

Tabla 2. Red de estaciones para la cuenca del río Arauca

Nombre estación	Tipo	Código	Estado	Parámetros climatológicos obtenidos
GUARDULIO	LM	337057050	SUSPENDIDA	12/12/2008
PTE. INTERNACIONAL	LM	37057060	ACTIVA	Caudal máximo mensual Caudal medio mensual Caudal mínimo mensual
APTO ARAUCA	SP	37055010	ACTIVA	Precipitación máxima 24 horas mensual Precipitación total mensual Precipitación máxima mensual Precipitación media mensual Precipitación mínima mensual

En la **Figura 9** se representa espacialmente las estaciones limnimétricas y sinóptica principal para la cuenca del río Arauca.

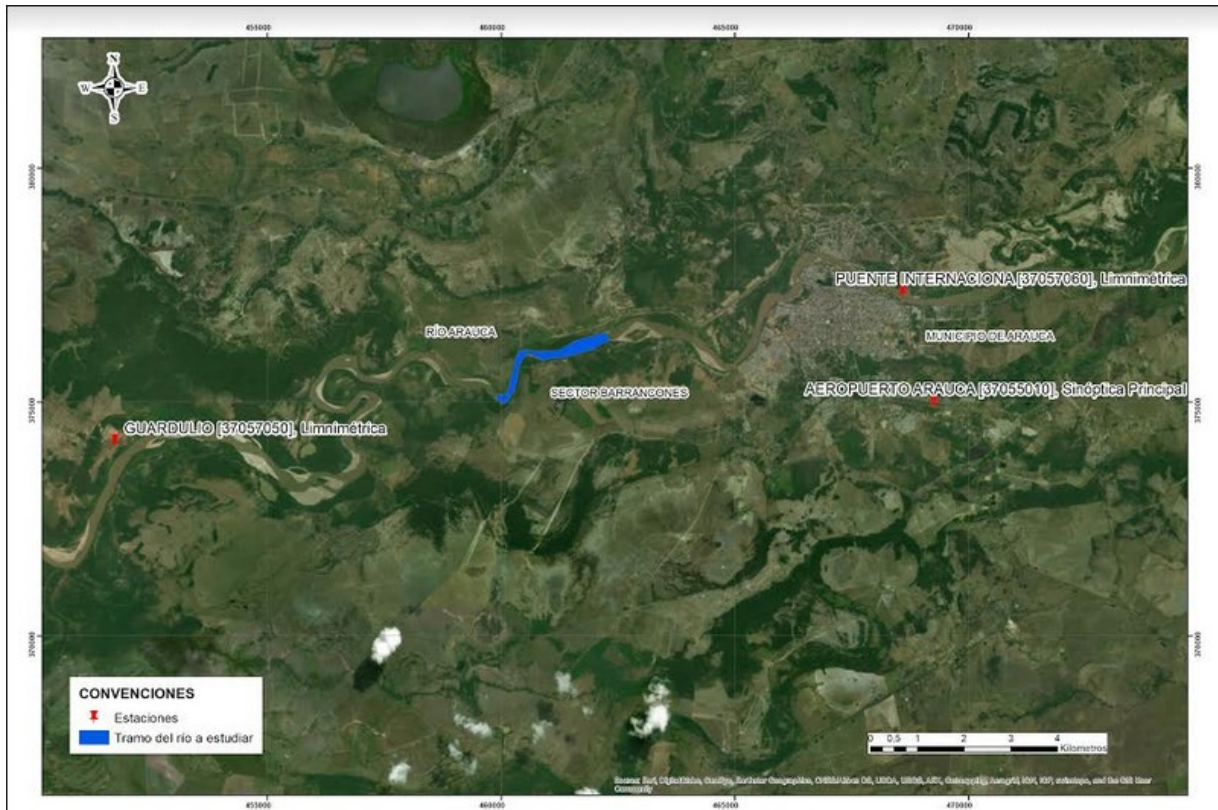


Figura 9. Distribución espacial de las estaciones hidro climatológicas
Fuente: Propia

5.2 CARACTERIZACIÓN DEL RÍO EN EL PUNTO CRÍTICO DE ESTUDIO

Tomando como referencia los criterios de Schumm (1977), el río Arauca se puede clasificar como un cauce aluvial esto debido que el río fluye en un canal cuyo fondo y márgenes están constituidos por material transportado en las condiciones actuales de flujo. En este se ajusta dimensiones, forma, patrón y pendiente del cauce, en respuesta a los cambios que se produzcan.

El río Arauca se clasifica según su geometría en meandrónico, con sinuosidad alta (mayor a 1,5). Su característica principal son los meandros que se forman, la cual es una curva completa sobre la canal, compuesta por dos arcos sucesivos, cambiando de geometría constantemente debido a su carácter erosivo (generalmente, en la parte cóncava de la curva

o meandro) y sedimentario (en la orilla convexa). Eso por las diferencias de las velocidades de las aguas en las dos orillas.



Figura 10. Geometría del río Arauca en el sector de Barrancones (Fotografía del 2006)
Fuente: Otros autores

5.2.1. Topografía

La zona de Barrancones corresponde a un tipo de topografía plano cóncavo con pendientes suaves del 1,2 al 5% con altitudes de 125 msnm y 140 msnm de acuerdo con el perfil longitudinal encontrándose en la cuenca baja y con velocidades de flujo bajas, donde generalmente se presenta estancamiento de aguas por desborde y así mismo las aguas lluvias y pequeños tributarios.



Figura 11. Perfil longitudinal a orillas del río Arauca en la zona de Barrancones extraída de Google earth 2018. Fuente: propia

5.2.1. Información recopilada en campo

Principalmente se realizó una visita de campo en el punto crítico de análisis en la vereda Barrancones el día 19 de enero y 21 de enero de 2019 en temporada de verano donde se empleó un levantamiento de información primaria basada en encuestas con preguntas sobre el efecto del riesgo por inundación y su vulnerabilidad física, económica, política y ambiental. Con la información extraída en campo se procedió al análisis estadístico para la comprensión de los resultados con el fin de evidenciar una mejor representación de estos y a su vez generar una buena calibración del modelo hidrodinámico en HEC- RAS 2.0. A continuación, en la **Figura 12** se observan la georreferenciación de los puntos de encuestas representados reflejados en ArcGIS 10.3 . **Anexo 3:** Tabulado de resultados de encuestas

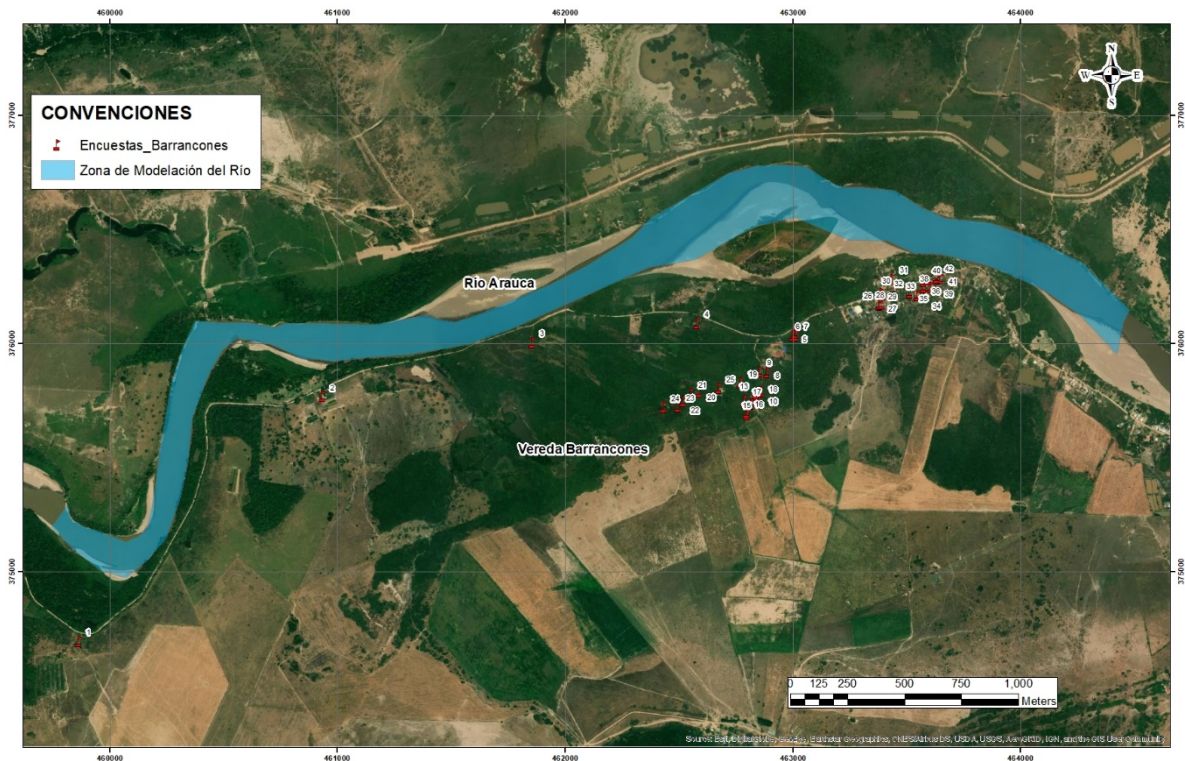


Figura 12. Georreferenciación de encuestados aledaños al río Arauca en la zona de Barrancones extraída de ArcGIS 10.3. Fuente: propia

En la visita de campo realizada en la zona de estudio se logró evidenciar el estado de las viviendas las cuales en su gran mayoría no cumplen a nivel física ni de uso de suelo lo cual presentan un alto nivel de exposición al riesgo por inundación debido a que los últimos diez años el 97,62% de la población de Barrancones ha sufrido por los efectos de inundación como se observa en la *Gráfica 1*.



Gráfica 1. Resultado de pregunta No. 13 de la encuesta a la población al sector Barrancones Fuente: propia

En la **Figura 13** se observa una de las orillas internas del río en el sector de análisis donde se evidenciaron procesos de erosión y socavación del talud. Así mismo se realizó toma de coordenadas geográficas con GPS Garmin.



Figura 13. Trabajo de campo, toma de puntos críticos en el sector Barrancones Fuente: propia

En la **Figura 14** se observa el registro de la toma de información primaria y así mismo se visualiza las condiciones de hábitat de las personas para el sector de Barrancones en el municipio de Arauca.



Figura 14. Levantamiento de información primaria mediante encuestas en el sector Barrancones Fuente: propia

De acuerdo con lo captación de información en octubre de 2018 los habitantes del sector de Barrancones sufrieron uno de los eventos extremos de inundación debido al desbordamiento del dique perimetral como se observa en la **Figura 15**. lo cual genero aproximadamente unos 3000 damnificados para el municipio de Arauca sufriendo afectaciones en sus viviendas, cultivos y animales.



Figura 15. Inundaciones del sector Barrancones ocurrida en octubre de 2018. Fuente: Noticias de Arauca

6 ANALISIS HIDROLOGICO

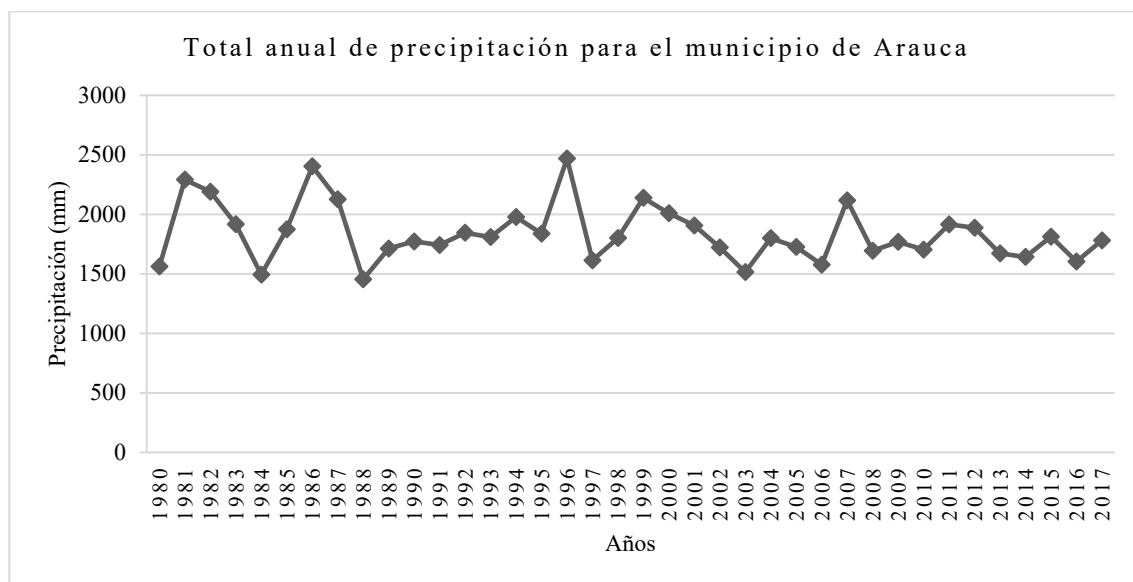
Para el análisis de datos históricos de precipitación se solicitó la información disponible que comprende la red de estaciones del IDEAM, para este caso se obtuvo información únicamente de tipo de estación meteorológica de categoría sinóptica con el código de identificación 37055010 localizada en el aeropuerto Santiago Pérez Quiroz y estación limnométrica con código de identificación de 37057060 localizada aguas abajo del río en el puente internacional.



Figura 16. Localización de estación meteorológica para el municipio de Arauca extraída del visor CNE, IDEAM. Fuente: propia

A partir de la serie de datos obtenidos por el IDEAM se determinaron las precipitaciones totales anuales durante 36 años desde el año 1980 hasta el 2017. Por consiguiente, en la **Gráfica 2** se observa el comportamiento que ha tenido la precipitación en el tiempo donde se obtuvo variaciones súbitas para el año 1996 con un valor máximo total de 2469,20 mm y un valor mínimo total 1454,30 mm para el año 1988. Sin embargo, para los últimos 10 años no

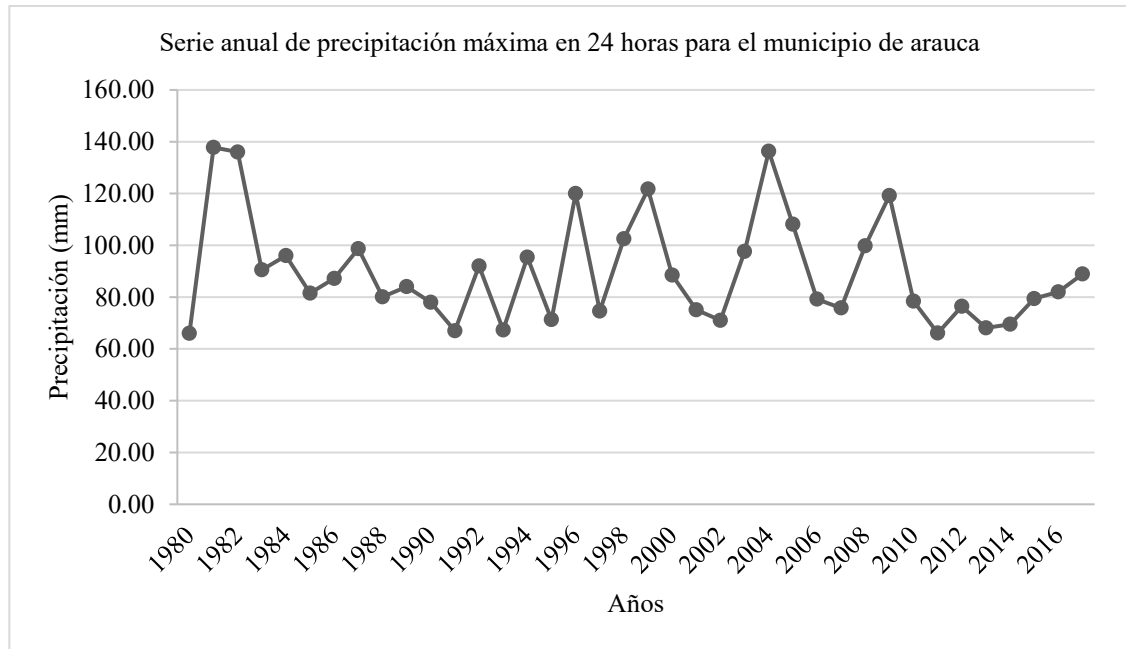
hay gran fluctuación en la precipitación total anual manteniéndose entre los 1600 mm y 1800 mm al año.



Gráfica 2. Precipitación total anual para el municipio de Arauca. Fuente: propia

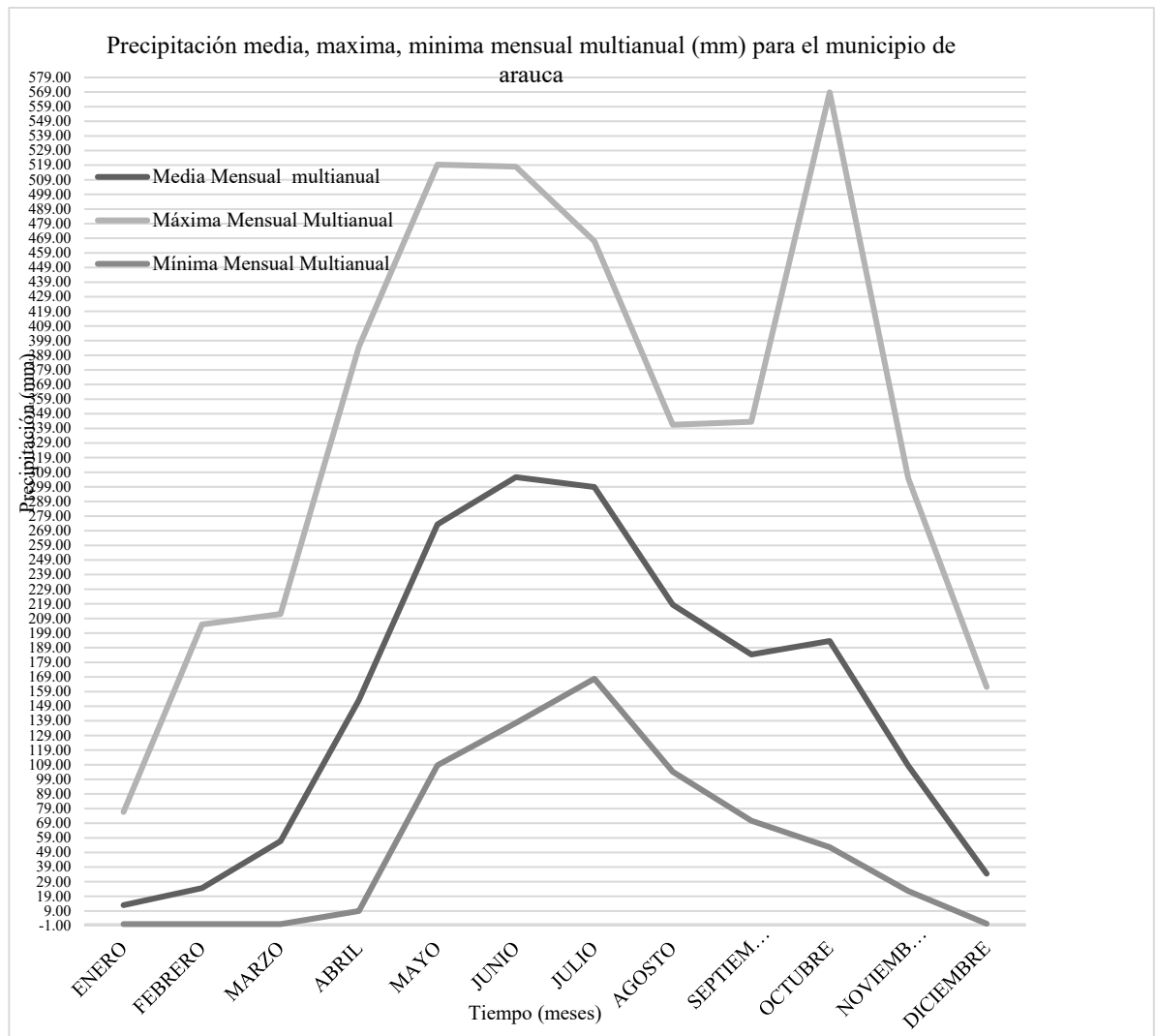
De acuerdo con los datos de la *Gráfica 3* se obtiene que para el año 1981 se registró la máxima precipitación de 137,80 mm y mínima de 66 mm para el año 1980 durante 24 horas.

Tomando la serie de datos arrojados por la estación y hallando los máximos mensuales multianuales, se obtienen valores máximos para los meses de mayo a junio y en octubre. De acuerdo con los resultados obtenidos, se sigue observando un régimen mono modal de precipitación, cuyos picos máximos se presentan entre mayo a octubre siendo los otros seis meses la temporada mejor definida como seca o de verano.



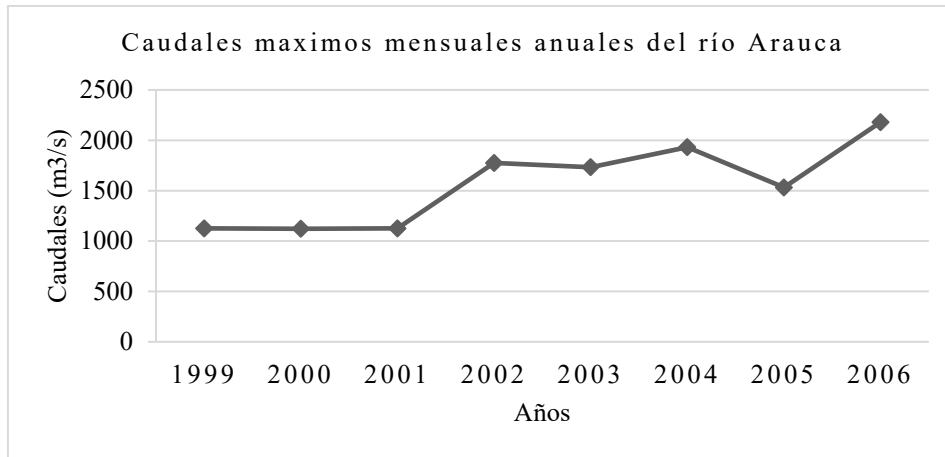
Gráfica 3. Serie anual de precipitación máxima en 24 horas para el municipio de Arauca. Fuente: propia

Respecto a los mínimos mensuales multianuales, se puede observar en la *Gráfica 4*, que el mínimo de precipitación se encuentra en los meses de enero, febrero, marzo, abril y diciembre llegando a niveles de precipitación de 0 mm sufriendo temporadas fuertes de verano y con ello efectos de sequía.



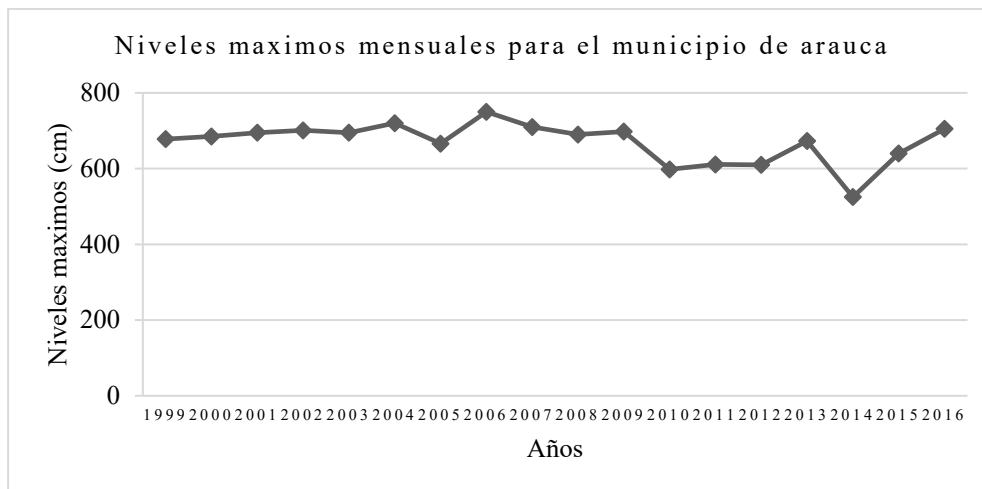
Gráfica 4. Precipitación media, máxima, mínima mensual multianual para el municipio de Arauca.
Fuente: propia

De la información disponible de caudales máximos mensuales para la estación ubicada sobre el río Arauca, se encontró que presenta vacíos desde el año 2007, sin embargo, en la **Gráfica 5** se observa la variabilidad de los caudales máximos la cual presenta una tendencia creciente. El caudal máximo más alto se registró en el año 2006 con 2180 m³/s, seguido por el año 2004 con 1932 m³/s y el caudal máximo más bajo en el año 2000.



Gráfica 5. Caudales máximos mensuales anuales del río Arauca desde el año 1999 hasta el 2006. Fuente: propia

De acuerdo con el análisis de los niveles máximos mensuales anuales para el municipio de Arauca se obtuvo un registro des el año 1999 hasta el año 2016, en este histórico se presenta el nivel máximo mensual para el año 2006 con 750 cm y el nivel máximo más bajo fue para el 2014 con 525 cm.



Gráfica 6. Niveles máximos mensuales anuales del río Arauca desde el año 1999 hasta el 2016. Fuente: propia

De acuerdo con el Reglamento técnico del sector del agua potable y saneamiento básico (RAS-2000) en su Capítulo D.4.3.3 define que las curvas de intensidad, duración y frecuencia

sintetizan las características de los eventos extremos máximos de precipitación de una determinada zona y definen la intensidad media de lluvia para diferentes duraciones de eventos de precipitación con periodos de retorno específicos.

Se tomaron las curvas IDF con los datos de la estación del municipio de Arauca perteneciente al IDEAM, las cuales se describen a continuación:

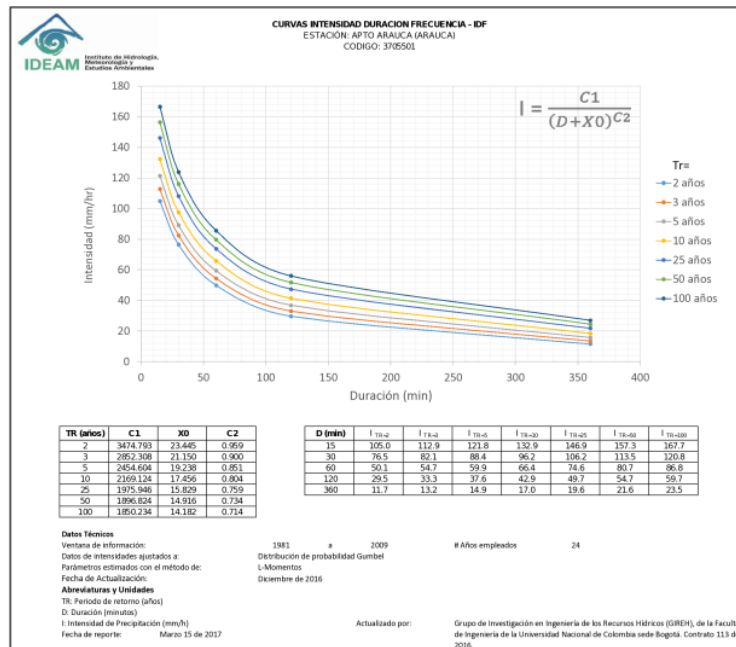


Figura 17. Curvas de intensidad, frecuencia y duración para el municipio de Arauca. Fuente: IDEAM

En la **Figura 17** se visualiza una curva que entrega la intensidad media en función de la duración y la frecuencia para diferentes periodos de retorno 2, 3, 5, 10, 25, 50, 100 años donde el municipio de Arauca presenta lluvias de poca duración, pero de alta intensidad, considerando que para un aguacero de duración de 15 min en 50 años su intensidad se incrementara posiblemente en un 50%.

6.1 ANÁLISIS DE CAUDALES

Dentro del balance hidrológico de una cuenca es indispensable realizar un análisis de régimen de caudales del cauce para identificar los eventos extremos históricos y a su vez la capacidad hidráulica de un cuerpo de agua. El río Arauca cuenta con la estación limnométrica del Puente Internacional que toma el aforo de caudales aguas abajo del cauce sin embargo esta se encuentra con deficiencias, en consecuencia, se obtuvieron registros de caudales desde el año 1999 hasta el 2006 lo que fue necesario optar por métodos aproximados para la estimación de caudales.

6.1.1. Estimación de caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno

La ocurrencia de eventos extremos de inundación o crecientes es característico de caudales máximos que generan el rebose del cauce. Para el río Arauca se realizó una proyección de caudales en función de diferentes periodos de retorno el cual está definido como el tiempo promedio, expresado en años, en que el valor del caudal pico de una creciente determinada es igualado o superado una vez. El periodo de retorno fue definido de acuerdo con las estructuras de control de agua de los cauces en este caso para el sector de Barrancones se definió un tipo de estructura (Dique) en fincas y alrededor de ciudades debido a la proximidad con la zona urbana del municipio de Arauca como se observa en la *Figura 18*.

Criterios de diseño generalizados para estructuras de control de agua		
Tipo de estructura	Periodo de retorno (años)	ELV
Alcantarillas de carreteras		
Volúmenes de tráfico bajos	5-10	-
Volúmenes de tráfico intermedios	10-25	-
Volúmenes de tráfico altos	50-100	-
Puentes de carreteras		
Sistema secundario	10-50	-
Sistema primario	50-100	-
Drenaje agrícola		
Culverts	5-50	-
Surcos	5-50	-
Drenaje urbano		
Alcantarillas en ciudades pequeñas	2-25	-
Alcantarillas en ciudades grandes	25-50	-
Aeropuertos		
Volúmenes bajos	5-10	-
Volúmenes intermedios	10-25	-
Volúmenes altos	50-100	-
Diques		
En fincas	2-50	-
Alrededor de ciudades	50-200	-
Presas con poca probabilidad de pérdidas de vidas (baja amenaza)		
Presas pequeñas	50-100	-
Presas intermedias	100+	-
Presas grandes	-	50-100%
Presas con probabilidad de pérdidas de vidas (amenaza significativa)		
Presas pequeñas	100+	50%
Presas intermedias	-	50-100%
Presas grandes	-	100%
Presas con probabilidad de altas pérdidas de vidas (alta amenaza)		
Presas pequeñas	-	50-100%
Presas intermedias	-	100%
Presas grandes	-	100%

Figura 18. Valores establecidos para diferentes periodos de retorno. Fuente: Hidrología aplicada Ven Te Chow

Una vez determinado el valor típico de periodo de retorno, considerando las obras de protección se considera realizar un análisis de caudales con periodos de retorno de 2.33, 10, 25, 50, 75 y 100 años para determinar el caudal pico para el río Arauca.

De acuerdo con los caudales máximos anuales registrados por la estación limnométrica del IDEAM ubicada en el puente internacional aguas abajo del cauce se obtienen los datos de la **Tabla 3.**

Tabla 3. Serie de caudales máximas totales para el río Arauca. Fuente: IDEAM

Año	Caudal (m3/s)
1999	1126
2000	1122
2001	1126
2002	1775
2003	1733
2004	1932
2005	1532
2006	2180

Esta serie de caudales se ajusta con la distribución Gumbel, recomendada para evaluar valores máximos. Ese método probabilístico de Valores Extremos Tipo I o Gumbel, representa la probabilidad de ocurrencia de una variable donde los valores extremos son valores máximos o mínimos en un conjunto de datos. Para este caso corresponde con los valores máximos registrados durante cada año y para una serie de años, estos conforman el conjunto de valores extremos de análisis de acuerdo con (VenTeChow. Hidrología Aplicada, pg 374, 387)

Una vez definido el conjunto de datos se realizar una caracterización de distribución el cual se encuentra basado en parametros estadísticos que definan la tendencia central y la dispersión entre la serie de valores para lo que es necesario determinar la media aritmetica χ y desviación esandar σ , las cuales se determinaron de la siguiente manera

$$\alpha = \frac{\sqrt{6} * \sigma}{\pi} \text{ y } \mu = 0,5772 * \alpha \quad \text{Ecuación 1. Alhpa y Miu}$$

Donde el parámetro de estandarización Y, se define como:

$$Y = \left(-\ln(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)) \right) \quad \text{Ecuación 2. Parámetro}$$

de estandarización (Y)

Finalmente para obtener el caudal máximo con cada periodo de retorno definido se calcula de la siguiente manera :

$$Q = \mu + \alpha * Y \quad \text{Ecuación 3. Caudal máximo}$$

Mediante las expresiones anteriores se logra determinar los parámetros estadísticos por la distribución probabilística de Gumbel del conjunto de datos de caudales máximos mensuales anuales para el río Arauca:

Tabla 4. *Parámetros de cálculo por Gumbel. Fuente: propia*

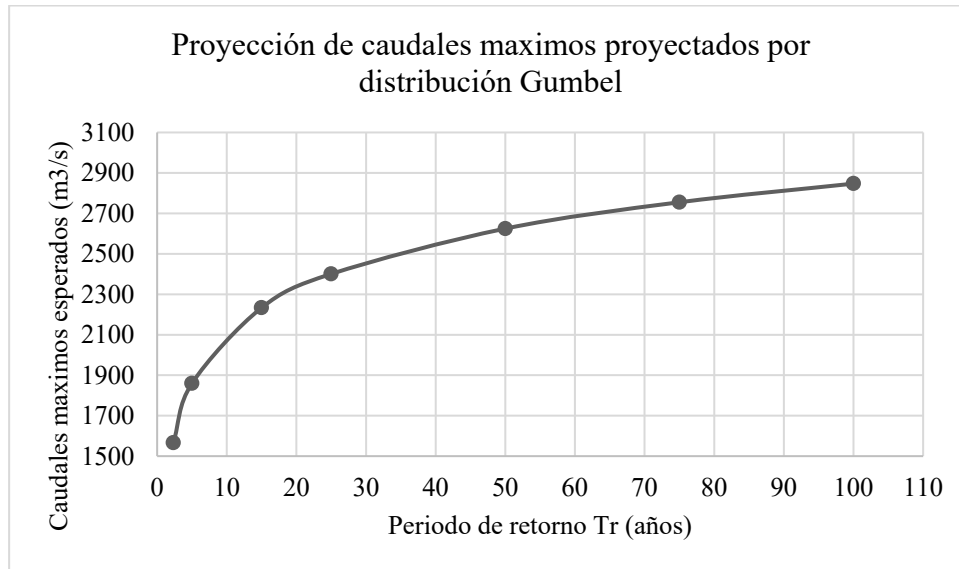
Parámetros de cálculos por Distribución Gumbel	
Media aritmética (γ)	1565.8
Desviación estándar (σ)	408.5
Alpha (α)	318.49
Miu (μ)	1381.92

Aplicando la **Ecuación 3** se obtienen los caudales máximos para los diferentes periodos de retorno para el río Arauca.

Tabla 5. *Caudales de diseño. Fuente: propia*

<i>Periodo de retorno</i>	<i>T (años)</i>	2.33	5	10	25	50	75	100
Caudal Máximo	Q (m3/s)	1566.2	1859.63	2098,62	2400.6	2624.7	2754.9	2847.0

En la **Gráfica 7** se observa la distribución de caudales proyectados para los periodos de retorno de 2.33, 10, 25, 50, 75 y 100 años lo que indica que este caudal obtenido puede presentarse para cada periodo de años considerado.



Gráfica 7. Proyección de caudales máximos proyectados distribución Gumbel. Fuente: propia

En efecto, se considera adoptar como caudal de diseño el valor de 2847.0 m^3/s para un periodo de retorno de 100 años puesto que al analizar la **Gráfica 5** se observa que para el año 2006 ocurre el evento más caudaloso con un valor de 2180 m^3/s lo cual se asemeja al orden de magnitud de caudal proyectado ocurrido para el periodo de retorno de 100 años.

7 DESARROLLO DEL MODELO HIDRODINAMICO RÍO ARAUCA SECTOR BARRANCONES

Con el objetivo de representar el comportamiento hidráulico del río Arauca, demostración de la inundación y zonificación del riesgo por inundación causada por el desbordamiento del río en la vereda Barrancones; se han constituido un conjunto de ejercicios de modelación numérica (utilizando el software HEC-RAS 5.0.6 desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América, USACE) para un escenario de inundación.

La zona modelada corresponde a una longitud de cauce de 5.41 km para el río Arauca en el sector de Barrancones con el principal objetivo de determinar las cotas de inundación en el área de estudio la cual es de 6,94 km².

La constitución de los modelos implementados obedece a la necesidad de valorar para la condición de un periodo de retorno de 100 años con el funcionamiento hidráulico del río Arauca en el tramo objeto de análisis, permitiendo el diagnóstico de puntos de rebose donde se requiere la conformación de algún tipo de obra de protección que pueden ser analizadas y estudios futuros con base en la zonificación del riesgo de inundación desarrollado en el presente proyecto.

Para la estructuración del modelo se ha considerado la totalidad de la información primaria recopilada en cuanto a conformación topológica del río Arauca (cauce principal y zonas de desborde) en el tramo de análisis, información que corresponde a un ráster de 12 x 12 m de resolución el cual abarca toda la zona de estudio y una batimetría detallada de 300 m la cual corresponde al punto más crítico de desborde. Ese Raster fue descargado de la página Alaska de la NASA (ALOS PALSAR) y las batimetrías fueron suministradas por la Unión Temporal Doble Calzada.

La condición hidrológica de valoración corresponde con un evento asociado a un periodo de retorno de 100 años de acuerdo con la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) La información referente se presenta en el **Anexo 5**.

Los archivos de modelación en HEC-RAS se presentan en el **Anexo 7** del respectivo informe.

7.1 CONCEPTUALIZACIÓN MATEMÁTICA - MODELACIÓN EN HEC-RAS

El paquete de modelación HEC-RAS presenta dentro de sus fortalezas que permite realizar análisis de comportamiento hidráulico del flujo a superficie en condiciones de régimen permanente y no permanente, cálculos hidrodinámicos de lecho móvil y transporte de sedimentos.

La versatilidad del modelo HEC-RAS permiten realizar el estudio del funcionamiento hidráulico de un sistema a superficie considerando cualquier tipo de geometría en la sección, además de esto permite representar manchas de inundación y a su vez cotas causadas por el desbordamiento del río.

La inclusión de planes dentro del paquete de modelación permite evaluar diferentes escenarios basados en la geometría, caudales, y condiciones de frontera variables, lo que hace posible compararlos de manera tabular y gráfica, facilitando la interpretación y análisis de los resultados.

La versión utilizada del HEC-RAS que corresponde con la 5.0.6, permite dentro de su gran variabilidad construir modelos 1D, 2D o incluso esquemas híbridos que integran las fortalezas de cada uno de los componentes. El uso de modelos 1D o 2D, depende de la información base, las características de la zona de estudio y los requerimientos y necesidades del proyecto.

La modelación 2D permite simular de manera más precisa el comportamiento del flujo en zonas en las que este no se da estrictamente por el cauce sino por las planicies circundantes. En contraparte, el modelo 2D requiere de una mayor capacidad computacional asociada a mayores tiempos de simulación y de información más detallada en la superficie de trabajo.

Algunos de los casos en los cuales es recomendable utilizar la simulación 2D son: (<http://www.hidrojing.com/modelizacion-hidraulica-de-propagacion-de-avenidas-1d-o-2d/>, s.f.)

- Modelización de zonas detrás de diques en las que se van a ver desbordados o se producirá rotura con lo que el flujo puede adoptar diversas direcciones.
- Bahías y estuarios en los que el agua fluye continuamente en varias direcciones por fluctuaciones de mareas y en que las avenidas del río lleguen a la zona desde diversos lugares e instantes de tiempo.
- Cauces muy ramificados e interconexionados.
- Abanicos aluviales.
- Flujo en el ámbito de cauces muy curvados en los que se producirá una sobre elevación significativa de la lámina de agua.
- Llanuras de inundaciones muy anchas y planas, en las que el agua adoptará diferentes direcciones de flujo y presente diferentes cotas de lámina de agua y velocidades en diversas direcciones.

A continuación, se presenta el fundamento básico conceptual asociado al HEC-RAS en condición de flujo permanente y no permanente.

7.1.1. Flujo permanente

El procedimiento básico se fundamenta en las siguientes ecuaciones y supuestos (HEC-RAS, 2010)

$$y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad \text{Ecuación 4. Ecuación de energía}$$

Dónde:

y_1, y_2 = Profundidad del agua en la sección.

z_1, z_2 = Cota de fondo en la sección.

V_1, V_2 = Velocidad media.

α_1, α_2 = Coeficiente de Coriolis.

g = Aceleración de la gravedad.

h_e = Pérdida de energía.

$$h_e = LS_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad \text{Ecuación 5. Pérdida de energía}$$

Dónde:

L = Longitud equivalente de cada tramo.

S_f = Pendiente de fricción representativa entre dos secciones.

C = Coeficiente de pérdida por expansión o contracción.

$$L = \frac{L_{izq} Q_{izq} + L_{central} Q_{central} + L_{der} Q_{der}}{Q_{izq} + Q_{central} + Q_{der}} \quad \text{Ecuación 6. Longitud equivalente}$$

Donde:

L_{izq} , $L_{central}$, L_{der} = Longitud entre cada sección especificada para la ribera izquierda, cauce principal y ribera derecha.

Q_{izq} , $Q_{central}$, Q_{der} = Caudal medio aritmético entre los flujos a través de la ribera izquierda, cauce principal y ribera derecha.

Aplicando la **Ecuación 7** se determina el caudal del cauce con el coeficiente de Manning

$$Q = \frac{1}{n} A S^{1/2} R^{2/3} \quad \text{Ecuación 7. Manning}$$

Donde:

Q = Caudal del cauce.

n = Coeficiente de Manning (rugosidad del cauce).

S = Pendiente longitudinal del cauce.

A = Área hidráulica.

R = Radio Hidráulico.

7.1.2. Flujo no permanente

Sin la condición de modelación implica variación de caudal en el tiempo y el espacio, se debe recurrir a las ecuaciones de Saint-Venant, ecuaciones en las que se fundamenta el motor numérico de cálculo incluido en el HEC-RAS.

Los análisis de flujo no permanente traen consigo una dificultad adicional dado que con bastante frecuencia pueden presentar problemas de inestabilidad vinculados con las

distribución temporal y espacial de la información, condiciones que pueden llevar a obtener soluciones erróneas o procesos de no convergencia.

Los parámetros de modelación principales que controlan el funcionamiento del modelo y cuya apropiada definición es fundamental para realizar simulaciones confiables son: el espaciamiento entre las secciones transversales (Δx), el intervalo de tiempo de cálculo (Δt) que definen el número de Courant, el factor theta (θ) utilizado en la solución de ecuaciones de diferencias finitas y el tiempo de calentamiento del modelo. La combinación adecuada de dichas variables permite correr el modelo garantizando estabilidad numérica y por lo tanto permite tener mayor certeza de los resultados obtenidos.

7.2 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

Dados los lineamientos presentados en el capítulo 7.1. Relacionados con lo referente al uso de modelos 2D en función de las características de la geometría del sistema, se presenta a continuación la descripción de la zona de modelación establecidas en función de sus condiciones particulares.

El modelo corresponde a un segmento del río Arauca en el sector de Barrancones. El tramo de estudio del río se encuentra en un terreno muy plano lo que hace que al momento de desbordarse el agua fluya en varios sentidos.

Considerando lo anterior se ha adoptado un esquema de modelación 2D, condición que permite la adecuada representación de la zona de estudio.

7.2.1. Morfología del cauce

El cauce se encuentra clasificado como meandrónico irregular y el río se clasifica como perenne, la longitud del río en su área de estudio corresponde a una longitud de 5.41 km, se caracteriza por presentar una condición de flujo unidireccional, con un cauce bien definido y zonas de bancas bajas en su costado derechos en dirección de flujo lo cual lo hace propenso al desborde en momentos de crecientes.

7.2.2. Coeficientes de rugosidad

El coeficiente de rugosidad “n” de Manning se definió de manera particular, tomando como referente el estudio de diseño de la reconformación y la Tabla 5-6 del libro de hidráulica de canal abierto de Ven Te Chow, referencias que permitieron establecer a partir de un conjunto de características físicas del sistema el valor de rugosidad para el cauce.

El coeficiente de Manning escogido para la modelación de este río es de 0.06 obtenido del libro HIDRAULICA. DE CANALES ABIERTOS. VENTE CHOW, Ph. D. Professor of Hydraulic Engineering. University of Illinois. Traducción. JUAN G. SALDARRIAGA. El cual corresponde a un cauce natural, corriente en planicie, limpio, serpenteante, algunos pozos y bancos de arena con piedras, escogido para un valor máximo.

Los valores anteriormente especificados corresponden a condiciones teóricas que son validadas en los ejercicios de modelación, esto se desarrolla mediante la comparación entre la relación Caudal - Nivel identificada a partir de la información disponible en las estaciones de referencia y cotas de inundación dejados por la huella del agua en eventos pasados. Esta comparación permite validar o ajustar los coeficientes de rugosidad adoptados.

7.2.3. Condiciones de frontera

La condición de borde se constituye en una de las entradas principales del modelo, siendo uno de los elementos que define en buena medida el comportamiento del flujo en el sistema en representación, en lo que el modelo HEC-RAS ofrece gran versatilidad, permitiendo la definición de condiciones de borde, tanto aguas arriba como aguas abajo, asociadas con: nivel constante, curva caudal vs tiempo, curva elevación vs caudal y la profundidad normal calculada a partir de una pendiente establecida.

Para este modelo se definió dos condiciones de frontera, uno de ellos aguas arriba en el cual se introdujo un hidrograma con un pico máximo que corresponde al caudal calculado 2847 m³/s para un periodo de retorno de 100 años y para las condiciones de frontera aguas abajo se definió un valor medio de la pendiente del tramo de río a modelar de 0.02 %.

Para las condiciones de borde se adoptó la pendiente de la media del terreno del 0.02 %, para así poder simular la continuidad del flujo de una manera más precisa.

7.3 CALIBRACION DEL MODELO

Previo a la aplicación de un modelo de simulación computacional en la modelación del comportamiento hidrodinámico, éste debe ser ajustado a las condiciones meteorológicas, hidráulicas y morfológicos particulares de la zona de estudio. Ese proceso de ajuste, donde uno o más parámetros que caracterizan el comportamiento del sistema ven modificados sus valores iniciales, se conoce como calibración.

7.2.3. Calibración del modelo determinístico

Este proceso permite analizar detalladamente el comportamiento del modelo frente a una variación en sus parámetros. El parámetro de calibración es el valor de gamma (γ). La calibración de los parámetros del modelo se realiza utilizando datos históricos de la Estación Puente Internacional, datos correspondientes a caudales máximos del periodo histórico desde el año 1999 al 2006.

Para realizar una evaluación más detallada del funcionamiento del modelo y para desarrollar un proceso de calibración como tal se requiere analizar las cotas de inundación tomada en la salida de campo, en la cual se tomó la distancia de la cota del piso a la huella dejada por el agua. Con este dato y con la antigüedad de la vivienda se corrió un modelo que coincidiera con la antigüedad de las casas y se ajustara a las cotas medidas, para este caso dio como resultado un periodo de retorno de 25 años. Al correr el modelo para este periodo de retorno se compararon las cotas pronosticadas con las cotas dejadas por la huella del agua (cotas medidas) y modificando el número de Manning hasta obtener una buena concordancia entre los valores observados y los valores resultados de la simulación, para finalmente, seleccionar el parámetro que menor porcentaje de error produjo, a partir de la aplicación de la **Ecuación 8**.

$$\% P = \frac{h_{medido} - h_{pronosticado}}{h_{medido}} * 100 \quad \text{Ecuación 8.}$$

7.4 ANALISIS DE RESULTADOS DEL MODELO

El escenario de modelación constituye la condición proyectada para un evento de 100 años teniendo en cuenta una longitud de 5,41 km y un área de 6.94 km² de estudio para el río Arauca en la zona de Barrancones, el cual incluye el análisis de las cotas de inundación, el área de inundación y la zonificación por riesgo de inundación.

7.3.1. Manchas de inundación

Para la representación de los datos a través de HEC-RAS se implementó una malla con celdas de 15 x 15 m; esta característica debe ser bien definida debido a que la selección del tamaño de celda adecuado en los ejercicios de simulación debe garantizar la satisfacción simultánea de criterios opuestos que buscan garantizar la consistencia entre el esquema numérico y los fenómenos físicos en conjunto con una cantidad limitada de recursos computacionales. Generalmente se buscan tamaños de celda suficientemente pequeños para minimizar la influencia de errores que puede provocar discrepancias en los resultados.

Para obtener la *Figura 19* la cual fue representada por la herramienta RAS Mapper que hace parte del entorno visual del HE-RAS, en donde se representa las características geométricas del modelo como son malla, RASTER, condiciones de frontera y bancas del río.

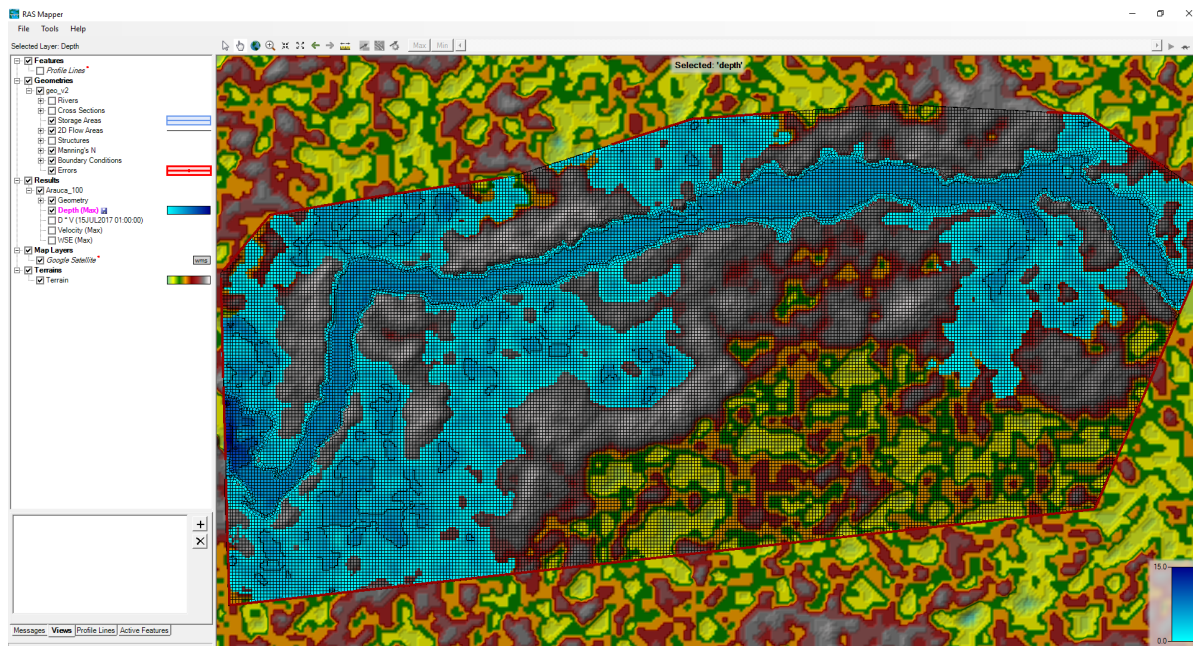


Figura 19. Dominio de computo con HEC- RAS 5.0.6. Fuente: propia

En la *Figura 20* se presentan la distribución espacial de la magnitud vertical de velocidades horizontales para un período de retorno de 100 años en condiciones normales, lo cual corresponde a condiciones hidrológicas con caudal máximo instantáneos de 2847 m³/s respectivamente. De esto se observa que la concentración de velocidades máximas se producen a lo largo del cauce principal en el círculo rojo resaltado en la *Figura 20* donde alcanzan valores de hasta 10 m/s y 8 m/s siendo esta los valores máximos, este sector es característico de un comportamiento dinámico del afluente que frecuentemente se viene ocasionando erosión e inestabilidad del talud natural.

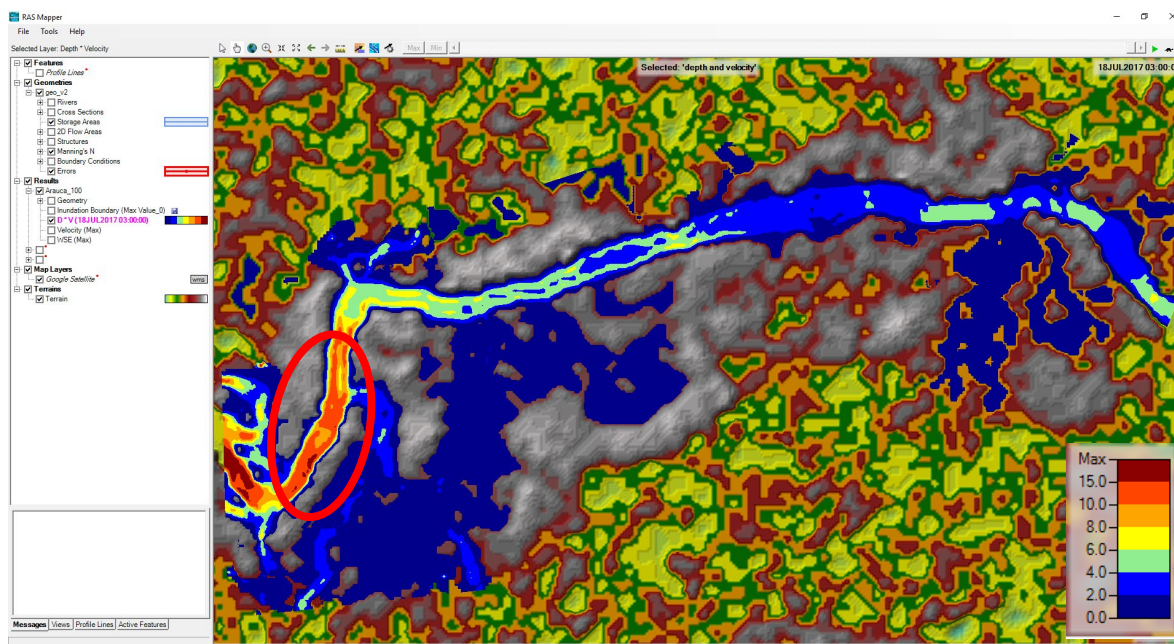


Figura 20. Distribución espacial de velocidades (m/s) en HEC-RAS – TR: 100 Años, río Arauca.
Fuente: propia

Posteriormente de hacer la simulación se hallan las cotas de inundación provocadas por el desborde del río Arauca en el sector de Barrancones, donde la cota mínima de inundación es de 0,18 m y la máxima de 7 m para un periodo de retorno de 100 años, ver el **Anexo 6**.

Como se mencionó anteriormente, el área de estudio corresponde a 6.94 km², el área de inundación en el sector de Barrancones abarca un área de 2.05 km² del área de estudio, lo que nos indica que el 29.5 % del área total se encuentra en riesgo de inundación, la gran mayoría del área inundada se encuentra bajo una cota de 1 a 3 m de profundidad, como se observa en la *Figura 21*.

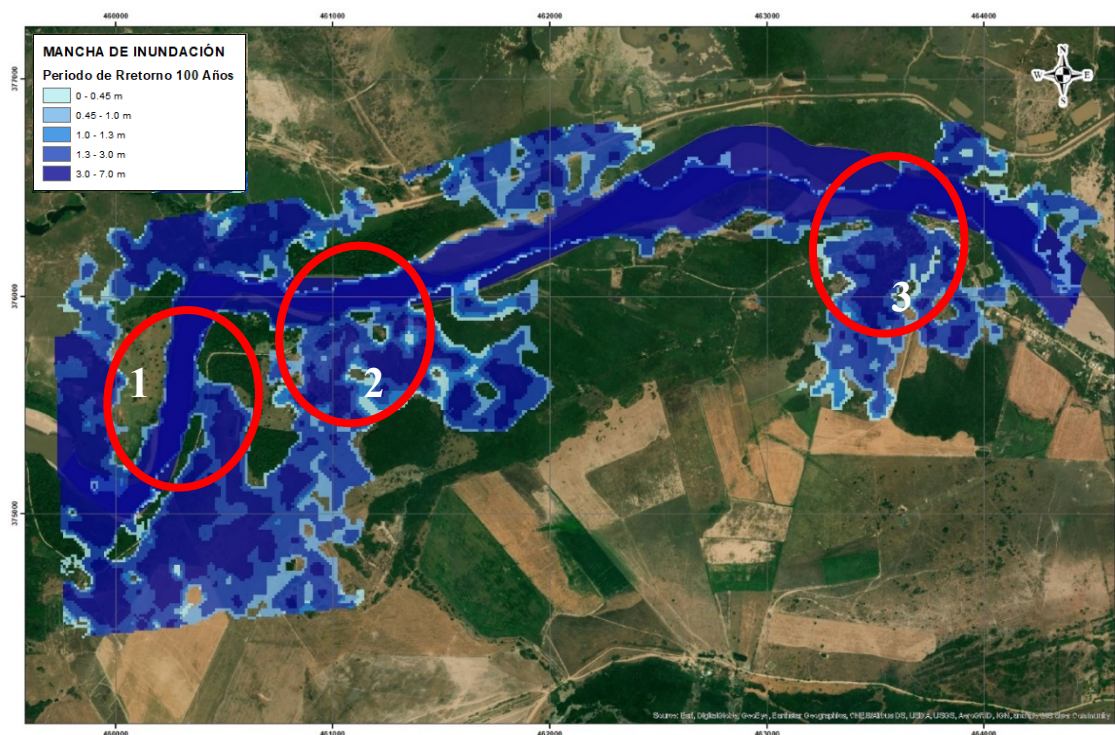


Figura 21. Mapa de profundidades de lámina de agua (m) para un período de retorno de 100 años del río Arauca. Fuente: propia

7.3.1. Riesgo por inundación

Para determinar el nivel del riesgo por inundación en la vereda Barrancones se definieron unos rangos de cota de inundación que decretan el nivel del riesgo de acuerdo con los datos recopilados en campo e históricos del cauce y el modelo hidrodinámico, para este análisis fue indispensable la relación del nivel de amenaza y vulnerabilidad existente del sector. En

la **Tabla 6** se describen los niveles de riesgo que se puede encontrar para eventos de inundación para el río Arauca puntualmente en el sector de Barrancones.

Tabla 6. *Estratificación del riesgo.*

Nivel del riesgo	Descripción	Rango de cota
Alto	Zonas de amenaza alta de inundación, en zona de influencia directa del río Arauca, tributaria y lagos. En algunas ocasiones no es mitigable debido a que corresponde a las rondas de protección de los cauces y cuerpos de agua. Esta zona se encuentra dentro de amenaza alta y media de inundación, con presencia de elementos expuestos. Estas zonas presentan eventos de inundación en épocas de máxima precipitación, la geometría cóncava, suelos mal drenados y litología preferencial de limos y arcillas facilitan el encharcamiento y la inundación por acumulación de grandes volúmenes de agua y asenso de la las láminas de agua afectando las estructuras y actividades que se desarrollan en estas áreas.	> 0,9 m
Medio	zonas de amenaza media y baja con escasos eventos de inundación y presencia de obras de protección. Zonas más estables con obras eficientes de drenajes y protección de desborde, el cambio de coberturas de naturales a concretos y rellenos arcillosos facilita el encharcamiento temporal pero no presenta mayor riesgo para la estructuras, actividades y habitantes de estas zonas.	(0,45 - 0,9) m
Bajo	zonas de amenaza baja por inundación con ausencia de eventos de inundación	(0-0,45) m

En la **Figura 22** se representa el mapa con los niveles de riesgo por inundación el cual integra los datos de amenaza y de vulnerabilidad, en el cual se expresa el daño por unidad de área. Este mapa de zonificación es una representación conveniente para sectorizar la vereda Barrancones y mejorar la toma de decisiones que permitan la mitigación de afectación de la población del sector, considerando que el 83% de la zona se encuentra en riesgo alto, el 7% se encuentra en riesgo medio y el 10% se encuentra en riesgo bajo. Indicando una gran probabilidad de ocurrencia de eventos de inundación, ver el **Anexo 7** donde se encuentra el mapa de zonificación del riesgo a escala 1:12000.

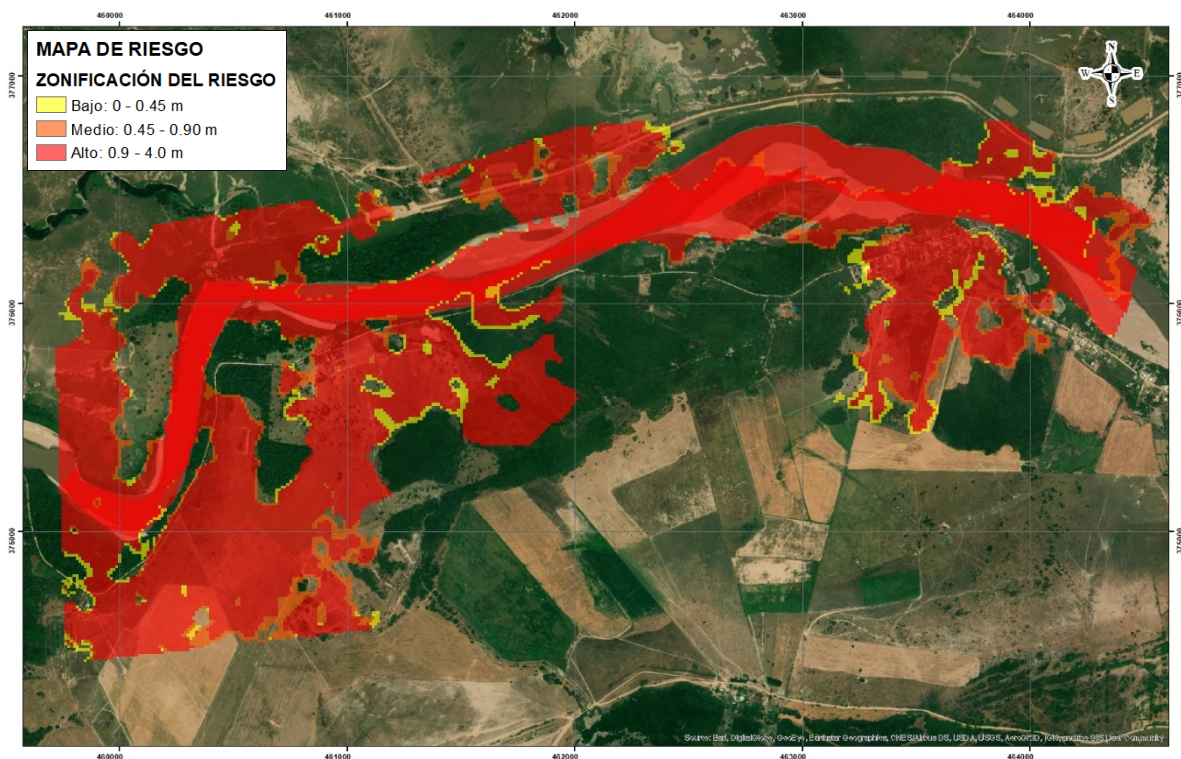


Figura 22. Zonificación del riesgo representada mediante el ArcGIS 10.3. Fuente: propia

7.3.1.1. Gestión del riesgo

Para el control del riesgo por inundación se debe desarrollar una buena gestión donde los principales actores sean las entidades del estado y a su vez los pobladores que se enfrentan a este, para ello se planteó una respuesta previamente al riesgo lo cual es apropiado para realizar el debido monitoreo del nivel del mismo; esta se encuentra basada en una intervención correctiva la cual indica las acciones de mitigación de las condiciones del riesgo existente, por otro lado, se debe hacer una intervención prospectiva que expresa las acciones de prevención que eviten la generación de nuevas condiciones de riesgo.

Tabla 7. Acciones para mitigación del riesgo

Acciones para reducción del riesgo	
Intervención Correctiva	Intervención prospectiva
Garantizar mejores condiciones de habitabilidad y adaptación de las viviendas de aquellos hogares que se encuentran en las riberas del río principalmente donde se debería plantearse la reubicación de gran parte de la población asentándolas en una zona segura. Aunque es una opción costosa a aquellos hogares que se encuentran en las riberas del río podría mejorar las condiciones de planeación municipal.	Promover la participación comunitaria, la existencia de sistemas de información sobre el riesgo, el establecimiento de sistemas de alerta temprana y generar espacios de educación.
Delimitación y recuperación de retiros y rondas hídricas del cauce.	Implementar sistemas de difusión sobre el respeto y la importancia de la ronda hídrica.
Debido a que en el sector de Barrancones presenta una lámina de agua de inundación tan alta lo que limita subir las viviendas por encima de la cota de inundación en términos económicos, así que se puede optar por garantizar la disponibilidad de albergues por fuera de la mancha de inundación de 100 años para brindar protección a lo población.	Consolidar procesos de participación ciudadana y control social y Mantener actualizada y con información veraz la base de datos del SISBEN.
Implementar un sistema de protección en los puntos críticos de desborde y socavación	Realizar capacitaciones, talleres basado en el plan de gestión del riesgo para instruir a la población

Fuente: propia

8 CONCLUSIONES

La modelación se realizó bajo un régimen no permanente lo que se considera una posición conservadora, se conduce a la obtención de niveles de inundación altos ya que el almacenamiento temporal en las llanuras va disminuyendo el caudal pico hacia aguas abajo. Se trabajó en un modelo 2D ya que este permite el análisis del flujo en las planicies de inundación y la discretización del caudal que realmente fluye por el cauce principal. Lo anterior no puede modelar de forma precisa en un modelo 1D.

El mapa en el cual se representan las cotas de inundación donde se expresa como la cota mínima de inundación de 0,18 m y la máxima de 7 m proporcionan información básica para desarrollar la orientación técnica sobre varios problemas de manejo de llanuras de inundación y ayudan a las diferentes partes interesadas, incluyendo los gobiernos locales a tomar decisiones en la gestión de inundaciones. Por tanto, son importantes para la evaluación del riesgo de inundación, el desarrollo de planes de mitigación de inundaciones, la preparación de esquemas de manejo integral del riesgo de inundación y en particular para la planificación urbana local.

Existe un 83% de la población del sector de Barrancones para el municipio de Arauca con riesgo alto por inundación donde la lámina de agua puede llegar entre 0,9 a 4 m. En consecuencia, se requiere de una adecuada proyección de desarrollo físico y social donde se mejoren las condiciones de viviendas y socioeconómicas del sector para generar una mejor respuesta al riesgo.

9 RECOMENDACIONES

Como resultado de la modelación y los análisis realizados, se recomienda hacer un replanteo en la planeación del ordenamiento territorial, considerando que la zona de estudio en su gran mayoría se encuentra en riesgo alto, lo cual es recomendable desarrollar plan de prevención del riesgo por inundación. Plantear mecanismos financieros para implementar estrategias en reducción de riesgo de desastres.

Identificados tres sectores de desborde a lo largo de la zona estudiada y la magnitud de la inundación, lo más recomendable sería reubicar a la población que allí habita y prevenir futuros asentamientos para así evitar una catástrofe mayor a las que se han presentado, considerando que implementar estructuras de mitigación eleva los costos y es una opción que puede ser analizada para otros puntos menos críticos donde se logren mitigar los eventos de inundación.

Finalmente, debido a la escasa información hidroclimática de la zona objeto de este trabajo, se considera pertinente que el IDEAM evalué el control de registros de cada una de sus estaciones y suministré datos confiables, debido a que la ausencia de datos dificulta el desarrollo de estudios más detallados que son base fundamental para el diseño de obras civiles.

10 BIBLIOGRAFÍA

Kheradmanda. S, Seidou. O, Konte.D, Barmou. M. (2018). Evaluation of adaptation options to flood risk in a probabilistic. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 16.

Barros, J. (8 de junio de 2018). Arauca: los estragos de un invierno histórico. *Semana*.

Chow, V. (s.f.). *Hidrología Aplicada*.

Corporinoquía. (01 de febrero de 2016).
<http://www.corporinoquia.gov.co/index.php/home/corporinoquia/91-funciones.html>.

Correa, H. D, Ruiz, S. L. y Arévalo, L. M. (2005-2015). *Plan de acción de biodiversidad de la cuenca el Orinoco*. Corporinoquia, Cormacarena, I.A.v.H, Unitrópico, Fundación Omacha..., Bogotá D.C. .

Dirección general de apoyo fiscal, M. d. (diciembre 2016). *Municipio de Arauca*,. Obtenido de
http://www.minhacienda.gov.co/HomeMinhacienda/ShowProperty;jsessionid=TZFjChsdYDJwfiLkGxv-7vdsT3IqPqlGDmzsE0P9vio7ydgZmGP0!529010900?nodeId=%2FOCS%2FP_MHCP_WCC-090060%2F%2FidcPrimaryFile&revision=latestreleased

FUPAD. (2013). *Documento diagnostico del departamento de Arauca*. Bogotá.

HEC-RAS. (2010). *River Analyss System Hydraulic Reference Manual*.

<http://www.hidrojing.com/modelizacion-hidraulica-de-propagacion-de-avenidas-1d-o-2d/>.
(s.f.).

IDEAM. (2018). *PROTOCOLO DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA*.
Bogotá D.C.

IDEAM. (2018). *REPORTE DE AVANCE DEL ESTUDIO NACIONAL DEL AGUA ENA 2018*. Bogotá D.C, Colombia.

IDEAM. (s.f.). http://www.ideam.gov.co/web/pronosticos-y-alertas/boletin-hidrologico-diario/-/document_library_display/. Obtenido de IDEAM.

Judith Rosales, Cesar F Suárez y Carlos A. Lasso. (noviembre de 2010). *ResearchGate*.
Obtenido de ResearchGate:
https://www.researchgate.net/publication/266142542_Descripcion_del_Medio_Natural_de_la_Cuenca_del_Orinoco

M., S. E. (2010). *El río y la forma*. RIL editores.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (2010).
Política Nacional para la Gestión integral del recurso Hídrico. Bogotá D.C.
Colombia.

Mook, W. G. (2002-01-01). *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico*. España: Instituto Geológico y Minero de España.

OJEDA., P. (Mayo,2015). *Oficina del servicio de pronóstico y alertas*.

Radio, C. (11 de octubre de 2018). Emergencia por rompimiento de dique del río Arauca. Colombia.

V. Moya Quiroga, S.Kure,K. Udo,A. Mano. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the february 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC- RAS version 5. *RIBAGUA*, 25-33.

11 ANEXOS

**Anexo 1. Formato No. 001(hoja 1) de encuestas realizadas (registro
fotográfico)**

Anexo 2. Formato No. 001(hoja 2) de encuestas realizadas

Anexo 3. Tabulado de los resultados de encuestas

Anexo 4. Datos históricos de precipitación por el IDEAM

Anexo 5. Datos históricos de niveles y caudales por el IDEAM

Anexo 6. Mapa de manchas de inundación

Anexo 7. Mapa de riesgo por inundación

Anexo 8. Presupuesto del proyecto

Anexo 9. Cronograma del proyecto