

SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE INUNDABILIDAD QUE AFECTA LA VEREDA LA
PLAYA EN UN TRAMO DEL RÍO ARIARI DEL MUNICIPIO DE GRANADA, META



CRISTIAN GUILLERMO REYES OVIEDO
JUAN CAMILO DÍAZ ARCILA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2022

SIMULACIÓN DEL FENÓMENO DE INUNDABILIDAD QUE AFECTA LA VEREDA LA
PLAYA EN UN TRAMO DEL RÍO ARIARI DEL MUNICIPIO DE GRANADA, META

CRISTIAN GUILLERMO REYES OVIEDO
JUAN CAMILO DÍAZ ARCILA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero ambiental

Director (a)
Mg.DIEGO ANDREY CORTES NARANJO
Ingeniero Ambiental, MSc Gestión Sostenible y Tecnologías del agua

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2022

Autoridades Académicas

Fray José Gabriel Mesa Angulo, O. P.

Rector General

Fray Eduardo González Gil, O. P.

Vicerrector Académico General

Fray José Antonio Balaguera Cepeda, O. P.

Rector Sede Villavicencio

Fray Rodrigo García Jara, O. P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Mg. WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE

Decano de la Facultad de ingeniería ambiental

Nota de aceptación

WILLIAM PEÑARANDA ZARATE

Decano De La Facultad de Ingeniería Ambiental

DIEGO ANDREY CORTES NARANJO

Director Trabajo De Grado

LEIDY JOHANNA ARBOLEDA MONTES

Jurado

JORGE ELIECER PARDO MAYORGA

Jurado

Villavicencio, junio de 2022.

Agradecimientos

Agradecerle a Dios, primeramente, por concedernos la sabiduría e inteligencia, por iluminar nuestros conocimientos y no dejarnos decaer ante las adversidades que se nos presentaron durante el desarrollo de la investigación.

Por otro lado, agradecemos a nuestras familias por el apoyo incondicional desde el inicio de nuestra carrera, también agradecemos a esos altos y bajos que nos hizo exigirnos al máximo; al acompañamiento de nuestro director de tesis que nos guío en todo el proceso para hacer de este un proyecto de investigación enriquecedor para nuestra vida profesional. Gracias a todos por aportar su granito de arena, y como no, gracias a nuestra perseverancia, dedicación y disciplina logramos culminar nuestro trabajo de grado.

Contenido

	Pág.
Resumen	13
Abstract.....	14
Introducción.....	15
1. Planteamiento del problema	17
1.1. Formulación en torno al problema	18
2. Objetivos	19
2.1. Objetivo general	19
2.2. Objetivos específicos.....	19
3. Justificación.....	20
4. Antecedentes	22
5. Marco de referencia.....	24
5.1. Marco teórico	24
5.1.1 Cambio climático y fenómenos naturales	24
5.1.2 Inundaciones	25
5.1.3 Mapas de amenaza por inundación	26
5.1.4 Software de modelación.....	26
5.2. Marco conceptual	28
5.3. Marco legal.....	29
6. Metodología.....	30
6.1. Diagnóstico de la cuenca del río Ariari y obtención de información del área de estudio	30
6.2. Elaboración de mapas de amenaza por inundación para los diferentes periodos de retorno	31
6.3. Estrategias de mitigación para las áreas de amenaza por inundación	31
7. Resultados y análisis de resultados	33
7.1. Resultados fase 1. Diagnóstico de la cuenca del río Ariari y obtención de información del área de estudio	33
7.1.1 Obtención de información para el diseño del modelo 1D de flujo estacionario	33

7.1.2	Obtención de información para el modelo 2D de flujo no estacionario	36
7.1.3	Diagnóstico morfométrico de la cuenca alta del río Ariari	43
7.2.	Resultados fase 2. Elaboración de mapas de amenaza por inundación para los diferentes periodos de retorno.....	46
7.2.1	Diseño del modelo 1D de flujo estacionario en HEC-RAS 5.07.....	46
7.2.2	Calibración por medio del coeficiente de rugosidad de Manning (n).....	50
7.2.3	Diseño del modelo 2D de flujo no estacionario en HEC-RAS 5.0.7	52
7.2.4	Generación de mapas de amenaza por inundación de los modelos 1D y 2D	55
7.2.5	Análisis de los resultados del modelo 1D para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.....	58
7.2.6	Análisis de los resultados del modelo 2D para el periodo de retorno de 5 años.....	61
7.3.	Resultados fase 3. Estrategias de mitigación para las áreas de amenaza por inundación identificadas	62
7.3.1	Medidas de mitigación integrales de tipo no estructural	63
7.3.2	Medidas de mitigación de tipo estructural.	64
8.	Impacto social y humanístico	67
9.	Conclusiones	68
10.	Recomendaciones	69
11.	Referencias bibliográficas.....	70
Anexos		76

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Marco normativo para el desarrollo de la investigación.....	29
Tabla 2. Valores para el caudal de diseño.....	34
Tabla 3. Cálculo de constante de variación de flujo.	34
Tabla 4. Rangos de caudal de diseño real	35
Tabla 5. Valor de caudal calculado para el área de estudio mediante la transposición de datos de caudal.	35
Tabla 6. Parámetros morfométricos de la cuenca alta del Río Ariari.	44
Tabla 7. Datos para el modelo 1D, flujo estacionario, periodo de retorno a 5 años, sección transversal 10 (aguas arriba).	48
Tabla 8. Datos para el modelo 1D, flujo estacionario, periodo de retorno a 5 años, sección transversal 01 (aguas abajo).....	48
Tabla 9. Datos para el modelo 1D, flujo estacionario, periodo de retorno a 100 años, sección transversal 10 (aguas arriba).	49
Tabla 10. Datos para el modelo 1D, flujo estacionario, periodo de retorno a 100 años, sección transversal 01 (aguas abajo).....	49
Tabla 11. Clasificación de los materiales sedimentarios.	50
Tabla 12. Cálculo de Manning según el método desarrollado por Cowan.	51
Tabla 13. Cálculo del área de inundación de la vereda La Playa (modelo 1D).	58
Tabla 14. Cálculo de áreas de inundación de los predios urbanos en la vereda La Playa (modelo 1D)	60
Tabla 15. Cálculo de áreas de amenaza de los predios de la vereda La Playa (modelo 2D)	61
Tabla 16. Constantes para ecuación de curvas IDF.	80
Tabla 17. Valores para estimar el coeficiente de Manning.....	86
Tabla 18. Series de tiempo estación Puerto Rico.....	89
Tabla 19. Coeficientes de rugosidad de Manning para cursos de agua natural.	91
Tabla 20. Datos sin calibrar del modelo 1D para el periodo de retorno de 10 años (Sección 10).	93

Tabla 21. Datos sin calibrar del modelo 1D para el periodo de retorno de 10 años (Sección 01).	93
Tabla 22. Datos sin calibrar del modelo 1D para el periodo de retorno de 25 años (Sección 10).	93
Tabla 23. Datos sin calibrar del modelo 1D para el periodo de retorno de 25 años (Sección 01)	94
Tabla 24. Datos sin calibrar del modelo 1D para el periodo de retorno de 50 años (Sección 10).	94
Tabla 25. Datos sin calibrar del modelo 1D para el periodo de retorno de 50 años (Sección 01).	94
Tabla 26. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 5 años (Sección 10).	96
Tabla 27. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 5 años (Sección 01).	96
Tabla 28. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 10 años (Sección 10).	96
Tabla 29. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 10 años (Sección 01).	97
Tabla 30. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 25 años (Sección 10).	97
Tabla 31. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 25 años (Sección 01).	97
Tabla 32. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 50 años (Sección 10).	98
Tabla 33. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 50 años (Sección 01).	98
Tabla 34. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 100 años (Sección 10).	98
Tabla 35. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 100 años (Sección 01).	99

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo metodológico.....	32
Figura 2. Secciones transversales en Ras Mapper	33
Figura 3. Delimitación de la zona alta de la cuenca del río Ariari	36
Figura 4. Identificación del grupo hidrológico	37
Figura 5. Función CN Grid de la extensión HecGeo-HMS.....	38
Figura 6. Subcuencas de la cuenca alta del río Ariari y su número de Curva (CN).	38
Figura 7. Curva IDF para el periodo de retorno de 5 años.	39
Figura 8. Hietograma de precipitación para el periodo de retorno de 5 años	40
Figura 9. Herramienta Map to HMS Units de la extensión HecGeo-HMS.	41
Figura 10. Mapa base de esquema HMS de la cuenca alta del río Ariari	42
Figura 11. Series de tiempo de precipitación.....	42
Figura 12. Hidrograma de crecida en HEC-HMS.....	43
Figura 13. Perfiles de las secciones transversales aguas arriba número 10(A) y aguas abajo 01(B)	46
Figura 14. Tipo de vegetación (matorrales esparcidos) identificados en el canal del río Ariari .	47
Figura 15. Herramienta Geometry Data para diseño de la malla computacional	52
Figura 16. Condiciones de borde de la malla computacional.	53
Figura 17. Resultado de simulación bidimensional.	55
Figura 18. Mapa de amenaza por inundación 1D del río Ariari en la vereda la Playa para el periodo de retorno (Tr) de 5 años.....	56
Figura 19. Mapa de amenaza por inundación 2D del río Ariari en la vereda la Playa para el periodo de retorno (Tr) de 5 años.....	57
Figura 20. Polígonos de inundación en la vereda La Playa para el periodo de retorno de 25 años.	59
Figura 21. Polígonos de área de inundación para el periodo de retorno de 5 años en la vereda La Playa (modelo 2D).	62
Figura 22. Fenómeno de socavación del río Ariari.....	65

Figura 23. Geomantas de refuerzo metálico.	65
Figura 24. Colchones reno.	66
Figura 25. Barra de herramientas.....	78
Figura 26. metodología del cálculo de polígonos de inundación.	87
Figura 27. Imágenes de puntos geográficos para la construcción de las secciones transversales	88
Figura 28. Secciones transversales levantadas en campo.	88
Figura 29. Distribución de Gumbel, valores Y_n y S_n	90
Figura 30. Mapa cartográfico del POMCA de la cuenca alta del río Ariari.	90
Figura 31. Herramienta Calculate Geometry de ArcGis.....	91
Figura 32. Estudio Granulometría Serviariari S.A.S.	95
Figura 33. Mapa de amenaza de inundación 1D para el periodo de retorno de 10 años.	100
Figura 34. Mapa de amenaza de inundación 1D para el periodo de retorno de 25 años.	101
Figura 35. Mapa de amenaza de inundación 1D para el periodo de retorno de 50 años.	102

Lista de Anexos

Pág.

Anexo 1. Descripción de los procesos metodológicos de las fases 1,2 y 3 de la investigación. ..	76
Anexo 2. Coordenadas geográficas del levantamiento batimétrico y sus secciones transversales.	88
Anexo 3. Series de tiempo anuales de la estación Puerto Rico	89
Anexo 4. Mapa de delimitación de la cuenca alta del río Ariari.....	90
Anexo 5. Parámetros morfométricos	91
Anexo 6. Tabla de coeficiente de rugosidad de Manning para cursos de agua natural.	91
Anexo 7. Tablas de datos sin calibrar para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años	93
Anexo 8. Informe de granulometría de Serviariari S.A.S.....	95
Anexo 9. Resultados del modelo 1D calibrado.....	96
Anexo 10. Mapas de amenaza por inundación para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años y 100 años.	100

Resumen

En la presente investigación se desarrolló una serie de procesos computacionales con el propósito de comprender el comportamiento del río Ariari en su paso por la vereda la Playa, ubicada en el municipio de Granada, Meta. Se estudió la frecuencia de las inundaciones que amenazan a las comunidades ubicadas en la ronda hídrica del río que además afectan su calidad de vida. Se ejecutó un modelo hidráulico unidimensional en el software HEC-RAS que permitió simular los periodos de retorno a 5,10,25,50 y 100 años; adicionalmente, se realizó una simulación hidráulica bidimensional para el periodo de retorno de 5 años.

Los caudales para la ejecución del modelo unidimensional, se hallaron a partir del método de transposición de datos de caudal que permitió obtener los valores máximos del flujo para los distintos periodos de retorno. Analógicamente, para la ejecución del modelo bidimensional fue necesario desarrollar un modelo de lluvia escorrentía a partir del software HEC-HMS. Con la intención de obtener datos más precisos se realizó la calibración de los modelos hidráulicos por medio del coeficiente de rugosidad de Manning; una vez terminada la calibración se procedió a exportar los resultados al software ArcGis y de este modo generar los mapas de amenaza por inundación y realizar su respectivo análisis.

Como resultados se obtuvieron porcentajes de área inundación del casco urbano de la vereda de 5.91%, 15.65%, 41.69%, 41.69% y 41.69% para los periodos de retorno de 5,10,25,50 y 100 años respectivamente en la simulación unidimensional. Para la simulación del modelo bidimensional se halló un porcentaje de inundación del casco urbano del 58.9%, valor que representa 6.29 hectáreas inundadas.

Finalmente, con base a los resultados obtenidos en ambos modelos se propusieron estrategias de mitigación de tipo no estructural como el sistema de alertas tempranas y la ampliación de la red hidrometeorológica de la cuenca y algunas medidas de tipo estructural como geomantas y colchones reno.

Palabras Clave: Procesos computacionales, modelo hidráulico, mapas de amenaza por inundación, periodos de retorno.

Abstract

In the present investigation, a series of computational processes were developed with the purpose of understanding the behavior of the Ariari River as it passes through the village of La Playa, located in the municipality of Granada, Meta. The frequency of floods that threaten the communities located in the hydric round of the river that also affect their quality of life was studied. A one-dimensional hydraulic model was executed in the HEC-RAS software, which allowed simulating the return periods at 5,10,25,50 and 100 years; additionally, a two-dimensional hydraulic simulation was carried out for the return period of 5 years.

The flows for the execution of the one-dimensional model were found from the flow data transposition method that allowed obtaining the maximum values of the flow for the different return periods. Analogously, for the execution of the two-dimensional model it was necessary to develop a rainfall runoff model from the HEC-HMS software. With the intention of obtaining more precise data, the calibration of the hydraulic models was carried out by means of the Manning roughness coefficient; Once the calibration was finished, the results were exported to the ArcGis software and in this way generate the flood hazard maps and carry out their respective analysis.

As results, percentages of flooding area of the urban area of the village of 5.91%, 15.65%, 41.69%, 41.69% and 41.69% were obtained for the return periods of 5,10,25,50 and 100 years respectively in the one-dimensional simulation. For the simulation of the two-dimensional model, a percentage of flooding of the urban area of 58.9% was found, a value that represents 6.29 flooded hectares.

Finally, based on the results obtained in both models, non-structural mitigation strategies were proposed, such as the early warning system and the expansion of the hydrometeorological network of the basin and some structural measures such as geomats and reno mattresses.

Key Word- Computational processes, hydraulic model, flood hazard maps, return periods.

Introducción

Los eventos de inundación son considerados a nivel global como los peligros naturales más representativos, al considerar su capacidad de afectación social y económica en relación a otro tipo de eventos y/o desastres asociados a la variación climática (Ntanganedzeni & Nobert, 2021). Durante el periodo de 1995-2015 se registraron diversos desastres naturales (incendios, avenidas torrenciales, movimientos de masa, inundaciones) que afectaron las actividades socioeconómicas a nivel mundial; el 47% de estos desastres correspondió a inundaciones, en donde se identificaron pérdidas económicas por 662 mil millones de dólares y alrededor de 2300 millones de personas afectadas (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR), 2015).

En Colombia los eventos de inundación se han propagado por la limitada aplicación de los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios (POT), los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas y las problemáticas socioeconómicas que abordan al (Rodríguez , González , Medina, Pardo, & Santos, 2007). De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua de Colombia, se han identificado 190,935 Km² de zonas potencialmente inundables, en donde la Orinoquía representa la mayor superficie de inundación con un 31% del área nacional.

En relación a lo anterior, solo en el departamento del meta existen alrededor de 37,367 km² de zonas potencialmente inundables, lo cual es acorde a sus condiciones topográficas y a sus coberturas vegetales (pastos y morichales), en donde transcurren los cuerpos hídricos con diferente estacionalidad (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2018). No obstante, estas zonas inundables se han incrementado con el transcurrir de los años, a raíz de la actividad antropogénica sobre las rondas hídricas de los cuerpos de agua, en donde se han desarrollado poblaciones (rurales y suburbanas) que aprovechan las funciones ecosistémicas que generan las zonas de inundación (suministro de agua dulce, alimentos, terrenos agrícolas) (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2018).

En el municipio de Granada, Meta, entre los años 2011 – 2014 se registraron 10 eventos de inundación sobre las zonas de amenaza y riesgo por inundación identificadas por la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena (CORMACARENA), dentro de las cuales se encuentra la vereda La Playa (Alcaldía Municipal de Granada Meta, 2016); al ser un asentamiento ribereño, la vereda La Playa es más susceptible a las

probabilidades de recurrencia de los eventos de inundación, lo cual, ocasiona afectaciones sobre la infraestructura vial, las redes de saneamiento básico y sus actividades económicas, considerando que dependen de la actividad agrícola de la zona. En ese contexto, se han desarrollado diferentes metodologías para identificar y prever las zonas de amenaza por inundación en el municipio y en el departamento como tal, dentro de las que se destaca la modelación hidrodinámica de los cuerpos de agua.

Los modelos hidrodinámicos se han utilizado como mecanismos de comprensión del flujo de los cauces de ríos y arroyos, en el diseño de obras hidráulicas (canales, diques, puentes) y para la identificación de zonas de amenaza y zonas de vulnerabilidad de inundación (Peña Guzmán, Alvarino, Mora, & Mesa, 2016). Dentro de estos modelos hidrodinámicos se ha destacado el software HEC- RAS del Centro de Ingeniería Hidrológica, comúnmente conocido por sus siglas en inglés (CEIWR-HEC), el cual permite a los usuarios diseñar modelos para diferentes periodos de retorno de tipo unidimensionales (1D) estacionarios, modelos bidimensionales (2D) no estacionarios y realizar cálculos de transporte de sedimentos y de calidad de agua (US Army Corps of Engineers, 2016). Para el diseño de modelos en el software HEC-RAS, es necesario realizar una previa recolección de información primaria y secundaria, en donde se destacan la información hidrológica del cauce en estudio (caudales, precipitaciones), el levantamiento topobatómico, y el tipo de canal y de coberturas para la cuantificación del número de Manning.

De acuerdo a lo anterior, la presente investigación optó por usar el software HEC-RAS para el diseño de un modelo unidimensional (1D) estacionario y simular el fenómeno de inundabilidad que afecta la vereda La Playa en un tramo del río Ariari del municipio de Granada, Meta, con la finalidad de identificar las zonas de amenaza por inundación para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Los resultados se representaron en mapas cartográficos elaborados a través del software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ArcGis, teniendo en cuenta la metodología de elaboración de mapas de amenaza por inundación elaborada por el IDEAM.

Adicionalmente, se realizó el diseño de un modelo bidimensional (2D) no estacionario para el periodo de retorno de cinco (5) años, con la finalidad de realizar una comparación de los resultados obtenidos en las respectivas simulaciones y de esta manera plantear estrategias de mitigación de las zonas de amenaza por inundación, aportándolas como recomendaciones para la planeación del municipio.

1. Planteamiento del problema

El río Ariari presenta varias crecientes en diferentes tiempos del año, provocadas por la alta pluviosidad que se registra en los meses de abril a junio y septiembre a noviembre; el incremento en el nivel del agua causa grandes afectaciones a la vereda La Playa, teniendo en cuenta que invade gran parte del centro poblado amenazando las actividades socioeconómicas de sus habitantes, quienes viven del uso del suelo para el desarrollo de actividades agrícolas tales como cultivos de mosaico de yuca, plátano y cultivos de arroz, entre otros (Alcaldía Municipal de Granada Meta, 2016).

Entre los años 2011 y 2014 se presentaron 10 eventos de inundación en el municipio de Granada, afectando alrededor de 17000 personas que se encontraban inmersas en las siete zonas de amenaza y riesgo por desastres naturales identificadas por CORMACARENA (Guayaquil, Los Maracos, El Guape, La Mariela, Puerto Caldas, Puente Alcaraván y La Playa), lo que ocasionó gran afectación económica y social por la pérdida de los cultivos que se encontraban en cosecha y las viviendas que se vieron directamente afectadas por los eventos naturales (Alcaldía Municipal de Granada Meta, 2016).

Durante los años 2016 y 2019, el desbordamiento por inundación alcanzó un porcentaje de afectación del 54,9% sobre las zonas críticas identificadas en el municipio (Guayaquil, Los Maracos, El Guape, La Mariela, Puerto Caldas, Puente Alcaraván y La Playa), siendo el valor de afectación más alto que se registra entre los eventos de emergencia y desastres; afectando directamente a la población, sus predios, cultivos y viviendas (Alcaldía Municipal de Granada Meta, 2020).

Los fenómenos de inundación no solo afectan las actividades agrícolas, la infraestructura física y equipamientos principales como los servicios de saneamiento básico, centros educativos y de interacción lúdica (parques centrales, canchas de fútbol) también se ven altamente amenazados. La estructura de saneamiento básico de la vereda la playa presenta un grado de amenaza alto de acuerdo a su nivel de exposición a los eventos de inundación, esto teniendo en cuenta que la estructura no soporta la presión del agua y el taponamiento por sedimentos que se desencadena de dichos fenómenos (Cormacarena, 2018).

De acuerdo con el capítulo 22 de riesgos del POMCA de la cuenca alta Ariari, la vereda la playa presenta niveles altos de amenaza por inundación en 3,08 Ha y niveles medios en 8,24

Ha, los cuales corresponden a 11,32 Ha de su centro poblado. Así mismo, estructuras físicas como el acueducto se encuentran bajo amenaza por eventos de avenidas torrenciales que generan como consecuencia arrastre de sedimentos e inundaciones súbitas (Cormacarena, 2018).

Las inundaciones se han agravado debido a las acciones antropogénicas que han incrementado su impacto; como las construcciones, los asentamientos ribereños y el desarrollo agrícola sobre la ronda hídrica del río. Además, la extracción de recursos naturales como el material de arrastre ha provocado que esta zona se vuelva más susceptible a eventos de inundación (Agencia Nacional de Minería , 2018).

1.1. Formulación en torno al problema

¿Cuáles son las áreas de amenaza por inundación por el aumento de caudales en periodos de retorno entre los 5, 10, 25, 50 y 100 años en la vereda La Playa del municipio de Granada (Meta)?

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Realizar la simulación de un fenómeno de inundabilidad en un tramo del río Ariari que afecta la vereda La Playa en el municipio de Granada, Meta, a partir de la delimitación de su ronda hídrica y zonas de amenaza; con el fin de generar un aporte a la prevención de desastres naturales y la planificación territorial del municipio.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar un diagnóstico morfométrico y batimétrico en el tramo de estudio del río Ariari con el fin de determinar las condiciones de inundabilidad
- Elaborar los mapas de amenaza de inundación para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años, del tramo de estudio en la vereda La Playa del municipio de Granada, Meta, a partir de un proceso de simulación y calibración del modelo hidráulico HEC-RAS 1D y el uso de Sistemas de Información Geográfica (ArcGis).
- Proponer estrategias de mitigación para las zonas de amenaza por inundación identificadas, a partir de los resultados obtenidos en los procesos de simulación en HEC-RAS 1D y la elaboración de los mapas de amenaza por inundación de los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

3. Justificación

En los últimos 30 años, según un informe de la Universidad Nacional, Colombia registró un promedio de 597,7 desastres por año, por lo cual se ha considerado como el país donde más afectaciones se presentan en América Latina por eventos de inundación (Cristo García & Cruz Rodríguez, 2019). El departamento del Meta presenta diferentes condiciones geológicas, geomorfológicas, climáticas y estructurales, haciendo que toda su área sea vulnerable de sufrir amenazas de origen natural, socio-natural y de origen antrópico; llegando a afectar de manera significativa la comunidad en temas sociales, ambientales, económicos e institucionales. Por esta razón es necesario generar estrategias a través de investigaciones o estudios que permitan mejorar la capacidad de respuesta ante una amenaza, logrando de esta forma minimizar la vulnerabilidad de las diferentes comunidades del departamento (Gobernación del Meta, 2018).

Según el Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Granada, la vereda La Playa es un centro poblado rural debido a que hace parte del suelo rural delimitado en la ciudad (Consejo Municipal de Granada Meta, 2015); de acuerdo a una investigación realizada por la corporación OSSO-EAFIT durante más de 40 años se logró concluir que las afectaciones ocasionadas por fenómenos de inundación se concentran en las entidades territoriales con poblaciones pequeñas, perjudicando a las comunidades ubicadas en las zonas rurales o veredales (Banco Mundial, 2012); teniendo en cuenta lo anterior y buscando mejorar las condiciones de calidad de vida y bienestar de la población ubicada en la vereda se hace necesario realizar estudios que permitan simular fenómenos causados por amenazas naturales como las inundaciones (Rodríguez Bermúdez, 2018).

El presente estudio ayudará a ampliar el conocimiento referente al comportamiento del recurso hídrico en la subcuenca hidrográfica del río Ariari, debido a que la ausencia de información secundaria del departamento fue una de las limitaciones más considerables en el desarrollo de la presente investigación, por lo tanto, el documento apoyará el desarrollo de futuros trabajos que se realicen en la zona al mostrar datos hallados por distintas metodologías para el cálculo de caudales y posibles áreas de amenaza por inundación.

Las entidades públicas podrán tomar medidas principalmente para la gestión social en los planes de desarrollo del municipio, a través de las estrategias de mitigación planteadas en la investigación, logrando de esta manera reducir la vulnerabilidad de los habitantes ubicados en

la vereda; del mismo modo, el documento pretende complementar el plan de ordenamiento y manejo de la cuenca hidrográfica del río Ariari al realizar una aproximación del comportamiento real del curso de agua natural, razones por las cuales se resalta la importancia de realizar un modelo hidrológico e hidráulico para calcular el flujo volumétrico del río Ariari.

4. Antecedentes

Colombia al ser un país muy rico en fuentes hídricas y al tener unas condiciones orográficas muy diversas en toda la extensión de su terreno, lo hacen un país muy propenso a sufrir este tipo fenómenos; a pesar de esto existe una limitada información hidrométrica en las cuencas del territorio nacional. En el departamento del Huila para el año 2007 se presentó un caso de estudio en el río las Ceibas ubicado al suroccidente del país en el municipio de Neiva; para su desarrollo metodológico en la generación de mapas de inundación e identificación de zonas de amenaza se utilizaron herramientas como HEC-GeoHMS y HEC-HMS para la modelación hidrológica y HEC-GeoRAS y HEC-RAS para la modelación hidráulica, además, se empleó información de tormentas registradas y tormentas sintéticas para la creación de eventos torrenciales (Rodríguez , González , Medina, Pardo, & Santos, 2007).

En la Amazonía Boliviana también se presenta el fenómeno de inundación, específicamente en las llanuras de Moxos; en el año 2014 se llevó a cabo la ejecución de un estudio que empleó el software HEC-RAS versión 5.0 realizando una simulación numérica bidimensional 2D; obteniendo datos de gran importancia como lo es la profundidad del agua en las zonas de inundación por medio de estaciones limnimétricas, la velocidad del flujo y la variación de las inundaciones en el tiempo, de esta manera, la investigación permitió conocer los días que tardarán en inundarse los centros poblados más cercanos (Moya Quiroga, Kure, Udo, & Mano, 2016).

Para el año 2018 se realizó un estudio en el río Medjerda ubicado en Túnez al norte de África ya que en los últimos años (2003, 2006, 2009, 2011, 2012 y 2015) las inundaciones se presentaron con una mayor frecuencia e intensidad en este país. Para su desarrollo se utilizó la combinación de HEC RAS, HEC-GEORAS y GIS con el fin de estimar la extensión de las inundaciones en la llanura aluvial que se presenta en un tramo específico de la cuenca y para la cual se realizó una simulación en fechas diferentes; fue necesario el valor de profundidad normal y el valor de los caudales registrados durante el evento de inundación más reciente, ocurrido en 2015. Este estudio empleó un modelo TIN (Triangulated Irregular Network) para el análisis de la zona de estudio y para realizar la simulación en el río Medjerda (Khalfallah & Saidi, 2018).

En el municipio de Villavicencio, capital del departamento se desarrolló un estudio en el año 2018 dirigido a la población del barrio el Rubí, ubicado al margen de Caño Grande con

la finalidad de obtener las posibles áreas de riesgo, generar alertas tempranas y de este modo ayudar a prevenir futuros desastres para los habitantes de la zona; para su desarrollo se utilizaron levantamientos batimétricos, se obtuvieron las velocidades y las mediciones de caudales en campo, los registros de precipitaciones, el modelo de elevación digital (DEM) en la zona de estudio y la ayuda de softwares como ArcGIS, AutoCAD y HEC-RAS. Finalmente, se presentó la información simulada mediante la representación en mapas indicando las zonas más vulnerables a inundaciones, logrando vincular a las autoridades competentes del municipio para un correcto ordenamiento ambiental en la microcuenca (Chilito Rincón, 2018).

5. Marco de referencia

5.1. Marco teórico

En este apartado, se presentan algunos de los elementos teóricos que orientan la investigación (cambio climático, inundación, mapas de amenaza de inundación y softwares de modelación), relacionados principalmente con la comprensión de las problemáticas de inundación y su afectación al bienestar humano.

5.1.1 *Cambio climático y fenómenos naturales*

El cambio climático se atribuye a causas naturales y antropogénicas que han generado una alteración en la composición atmosférica global, sumado a la variación natural del clima (temperatura y precipitación) (Díaz Cordero, 2012). Las emisiones a la atmosfera de GEI y el aumento en el desnivel del mar son factores que han impulsado el cambio climático y que se asocian directa e indirectamente al hombre. Estos se manifiestan en el aumento de la temperatura, provocando fenómenos climáticos extremos de calor (sequias) y precipitaciones intensas (Díaz Cordero, 2012).

Los fenómenos extremos de precipitación son los causantes del aumento progresivo de los caudales de los cuerpos hídricos, provocando su desbordamiento y la anegación en áreas anormales. Esto ha generado una problemática ambiental y socioeconómica que afecta directamente a las poblaciones que se encuentran aledañas a las fuentes hídricas. En Colombia alrededor de 10.471.013 Ha, son zonas inundables periódicas que sufren pérdidas considerables de terreno, como es el caso de Villavicencio en el departamento del Meta que hacia el año 2011 perdió alrededor de 3450 Ha, a causa de la ola invernal inusual que se registró ese año (Gómez Urrego & Hernández Cantor, 2016).

De acuerdo con el plan nacional de adaptación al cambio climático (PNACC), en Colombia el 90% de las emergencias reportadas por la unidad de gestión del riesgo y de desastres (UNGRD) entre los periodos de 1998 y 2011, se atribuyeron a fenómenos hidroclimatológicos (Lluvia y sequia). El fenómeno de la niña aumento en un 16.1% el número de desastres por inundación reportados entre los años de 1950 y 2007.

El gobierno en conjunto con el MADS, la UNGRD, el IDEAM y el DNP se plantean mediante el PNACC mitigar la vulnerabilidad del país aumentando su capacidad de contingencia frente a las amenazas que resultan del cambio climático. En términos de adaptación a estos fenómenos proponen una adaptación planificada, es decir, aquella que establece medidas anticipadas al surgimiento de amenazas climáticas (Unidad Departamental de Gestión del Riesgo de Desastre (UNGRD); Departamento Nacional de Planeación (DNP), 2016).

5.1.2 Inundaciones

En Colombia, las amenazas se encuentran asociados generalmente a inundaciones, deslizamientos y avenidas torrenciales que han aumentado principalmente por la intervención antrópica, la cual se ha encargado de deteriorar las condiciones ambientales (Banco Mundial , 2012).

Las inundaciones son fenómenos naturales que han sido usados como recurso por algunas civilizaciones para aumentar la fertilización de sus terrenos y mejorar la producción agrícola. Son de gran beneficio para las zonas que se caracterizan por constantes sequías a causa de sus altas temperaturas (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2017).

A pesar de ser un fenómeno natural las inundaciones se han acelerado a causa de la actividad antrópica, especialmente por los asentamientos ribereños, como es el caso de la vereda La Playa que al desarrollar sus actividades socioeconómicas sobre las márgenes de los ríos han incrementado los efectos negativos que ocasionan las crecientes periódicas en los niveles de los cuerpos hídricos.

Las actividades agrícolas, mineras, industriales y la suburbanización han contribuido a procesos de deforestación y compactación del suelo, alterando los procesos de escorrentía e infiltración. El cambio climático y los fenómenos extremos de precipitación (fenómeno de La Niña) han alterado las condiciones del ciclo del agua en las cuencas (González Velandia, 2014).

Para una mayor comprensión de los fenómenos de inundación se han desarrollado guías metodológicas que orientan a los investigadores a establecer múltiples mapas que sirven como instrumentos bases para la gestión del riesgo de los municipios, distritos y centros poblados. Entre los mapas que más se destacan se encuentran los de amenaza por inundación, susceptibilidad a inundación, vulnerabilidad de inundación, zonificación de amenaza por inundación, riesgo por

inundación y los mapas de emergencia de inundación (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2017).

5.1.3 Mapas de amenaza por inundación

Los mapas de amenaza por inundación forman parte de las medidas no estructurales adoptadas por la UNGRD. Estos mapas son de gran importancia, ya que suministran información de tipo gráfico sobre las áreas de amenaza por inundación esperadas, así mismo, proveen información relacionada a la inundación, como: lámina de agua, profundidad, velocidad de la corriente, extensión y permanencia de la inundación (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2017). Cabe destacar que esta información se puede establecer para diferentes periodos de retorno, los cuales se logran establecer teniendo en cuenta información hidroclimatológica de la cuenca o subcuenca en estudio y del uso de softwares de modelación para interpretar los datos a través de simulaciones.

5.1.4 Software de modelación

Los softwares de modelación son un medio de apoyo para evaluar y estudiar temáticas que van más allá de nuestra comprensión analítica, con la finalidad de dar solución a problemáticas actuales que se asocian a los recursos naturales como el aire, el suelo y el agua. Los modelos relacionados al recurso hídrico establecen relaciones para tratar de comprender los comportamientos de fenómenos naturales como inundaciones y avenidas torrenciales, así mismo, son de gran ayuda para comprender temas de calidad hídrica y componentes hidráulicos e hidrológicos de una cuenca o zona en estudio (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2018).

Dentro del campo de la modelación se pueden realizar uniones de dos o más softwares que dan resultados físicos, como mapas que identifican cual es la zona de inundación, la profundidad, la extensión de la lámina y su permanencia. Existen diferentes métodos para su obtención, como puede ser la recopilación de información de entidades públicas para datos de precipitación y componentes hidráulicos e hidrológicos de la zona de estudio. El método numérico unidimensional utiliza elementos básicos del área de estudio como el caudal, las secciones

transversales, levantamientos topográficos, las curvas IDF para el estudio de las precipitaciones, entre otras variables (Chilito Rincón, 2018).

5.1.4.1. Software de modelación hidráulica 1D y 2D HEC-RAS 5.07. El software de modelación hidráulica HEC-RAS, es uno de los programas más reconocidos a nivel mundial para ejecutar modelaciones hidráulicas para establece las inundaciones de flujo estacionario, no estacionario y mixto; fue desarrollado por el cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos “U.S. Corp. Of Engineers, Hydrological Engineering Center, HEC”. El sistema contiene 4 componentes principales; entre ellos los cálculos de transporte de sedimentos de frontera móvil, análisis de la calidad del agua y simulaciones de flujo estacionario y no estacionario (Mora Mariño & Ochoa Guerrero, 2016).

Este programa presenta muchas ventajas al permitir relacionar los cuatro componentes con la información geométrica e hidráulica del área que se quiera modelar; la cual puede ser calculada de distintos métodos. La manera en que HEC-RAS analiza y simula el modelo hidráulico es a través del principio de Bernoulli o también conocido como el principio de la ecuación de energía, la cual se describe a continuación:

$$Z_1 + Y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + H_f \quad \text{Ecuación 1}$$

Por medio de esta ecuación el programa realiza los cálculos entre dos secciones transversales donde compara la energía total de agua en cada una; es decir, la altura total del agua en cada punto, generando una pendiente conocida como gradiente de energía. Teniendo en cuenta el principio de conservación de la energía se concluye que la energía entre un punto aguas arriba y aguas abajo es igual si a ese valor se suman las pérdidas de energía (H_f), causadas por factores como la fricción, cambios de dirección o forma en el canal o accesorios hidráulicos (Chow, 1959). Estas pérdidas de energía pueden ser añadidas a ambas soluciones de condición de flujo (estacionario y no estacionario); estas pérdidas de energía son convertidas a una fuerza equivalente e insertadas en la ecuación de momentum. En ambos casos, se interpreta que la pérdida de energía actúa como una fuerza en la dirección aguas arriba para disminuir la velocidad del flujo (US Army Corps of Engineers, 2016).

$$\left(\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t}\right) + \left(\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \frac{Q^2}{A}\right) + \left(g \frac{\partial y}{\partial x}\right) - (gS_0) + (gS_f) = 0 \quad \text{Ecuación 2}$$

5.1.4.2. Calibración del modelo. La calibración del modelo con datos acertados es un proceso fundamental para obtener una representación confiable de la cuenca. Para producir un mejor ajuste es necesario realizar modificaciones en parámetros físicos de la cuenca; como el caudal base, el tiempo de concentración o ajustar los coeficientes de infiltración (Yang & Knebl, 2005). Otros estudios presentan una calibración a mano con el fin de mejorar los valores de distintos factores, partiendo siempre de valores iniciales obtenidos; por ejemplo, se puede realizar una calibración y validación de un modelo con la evidencia de puntos de coordenadas GPS donde se registre un área inundada durante una tormenta histórica, de este modo las variables simuladas se logran ajustar con mayor exactitud a las observadas (Hunegnaw & Arega, 2020).

5.2. Marco conceptual

Una **amenaza** se denomina como la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos en un tiempo y espacio específico que se generan de manera natural o antrópica (Gómez Urrego & Hernández Cantor, 2016). Estos eventos provocan daños infraestructurales y afectación de los servicios aumentando la **vulnerabilidad** de la población, la cual corresponde al grado de susceptibilidad que tiene una comunidad o población de ser directamente afectada tanto de manera social, económica, ambiental o físicamente por un evento peligroso o desastre (González Velandia, 2014). Cabe destacar que un **desastre** se puede manifestar de manera natural o antropogénica y es el causante de los daños económicos, ambientales y lesiones personales que alteran la estructura de una comunidad (Cristo García & Cruz Rodríguez, 2019). Estas manifestaciones obligan al estado a buscar mecanismos de mitigación y emergencia como la unidad nacional para la gestión del riesgo que se encarga de identificar los riesgos de carácter ambiental de acuerdo con el grado de vulnerabilidad y amenaza que represente, para poder diseñar estrategias mediante políticas normativas que mitiguen o reduzcan el grado de amenaza (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2012).

Con la finalidad de representar los eventos de desastres y de apoyar a la **gestión del riesgo**, se ha hecho uso de la **modelación hidráulica e hidrológica** de los procesos de precipitación y

escurrimiento en cuencas, lo cual ha sido pertinente para el desarrollo de estudios de disponibilidad de agua, densidad de drenaje, impactos por intervenciones en cuencas, fenómenos de inundación, etc. Para la modelación hidráulica de inundaciones se han desarrollado softwares hidráulicos como HEC-RAS, capaz de realizar análisis unidimensionales y bidimensionales a través de cuatro componentes: simulación de flujos permanentes y no permanentes, cálculo de transporte de sedimentos, cambios en el lecho y calidad de agua (Gómez Urrego & Hernández Cantor, 2016).

5.3. Marco legal

Tabla 1.

Marco normativo para el desarrollo de la investigación

Norma	Descripción	Artículos aplicables
Ley 99 de 1993	Por la cual crea el Sistema Nacional Ambiental	Artículos 17, 31
Ley 1523 de 2012	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.	Artículos. 2,3,4,37,44.
Ley 1450 de 2011	Por el cual establece que les compete a las autoridades ambientales en su jurisdicción el acotamiento de la ronda hídrica que comprende.	Artículo 206
Ley 1931 de 2018	Por la cual se establecen directrices para la gestión del Cambio Climático.	Artículo. 1, 10,11,14, 24, 25.
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.	Artículos. 2,3,4,36.
Decreto 308 de 2016	A través del cual se adopta el Plan Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres	Artículos. 1, 2, 3.

Nota. Normativa asociada a la modelación de recurso hídrico. Adaptado de la Legislación Colombiana

6. Metodología

La investigación que se realizó se enfocó en un estudio descriptivo, exploratorio de tipo no experimental ya que se fundamentó en la observación y muestreo de datos hallados sin realizar una manipulación de las variables de estos. Para su ejecución se establecieron tres fases: la primera, permitió la recolección de la información de tipo cartográfica en formatos raster y shapefile para el diseño de los modelos 1D y 2D ,y, se realizó un diagnóstico de la subzona hidrográfica del río Ariari (parámetros morfométricos); la segunda consistió en el uso del modelo hidráulico (HEC- RAS 5.07) para la simulación de los eventos de inundación para los diferentes periodos de retorno (5, 10, 25, 50 y 100 años); por último, la fase tres se desarrolló con el objetivo de proponer estrategias de mitigación para las zonas de amenaza por inundación identificadas mediante la simulación del modelo hidráulico.

Por otro lado, la descripción metodológica de los procedimientos correspondientes para la ejecución de las fases 1,2 y 3 se encuentran en el Anexo 1. Sin embargo, estos procedimientos se podrán identificar en la Figura 1, la cual corresponde al diagrama de flujo en el que se sintetiza la información.

6.1. Diagnóstico de la cuenca del río Ariari y obtención de información del área de estudio

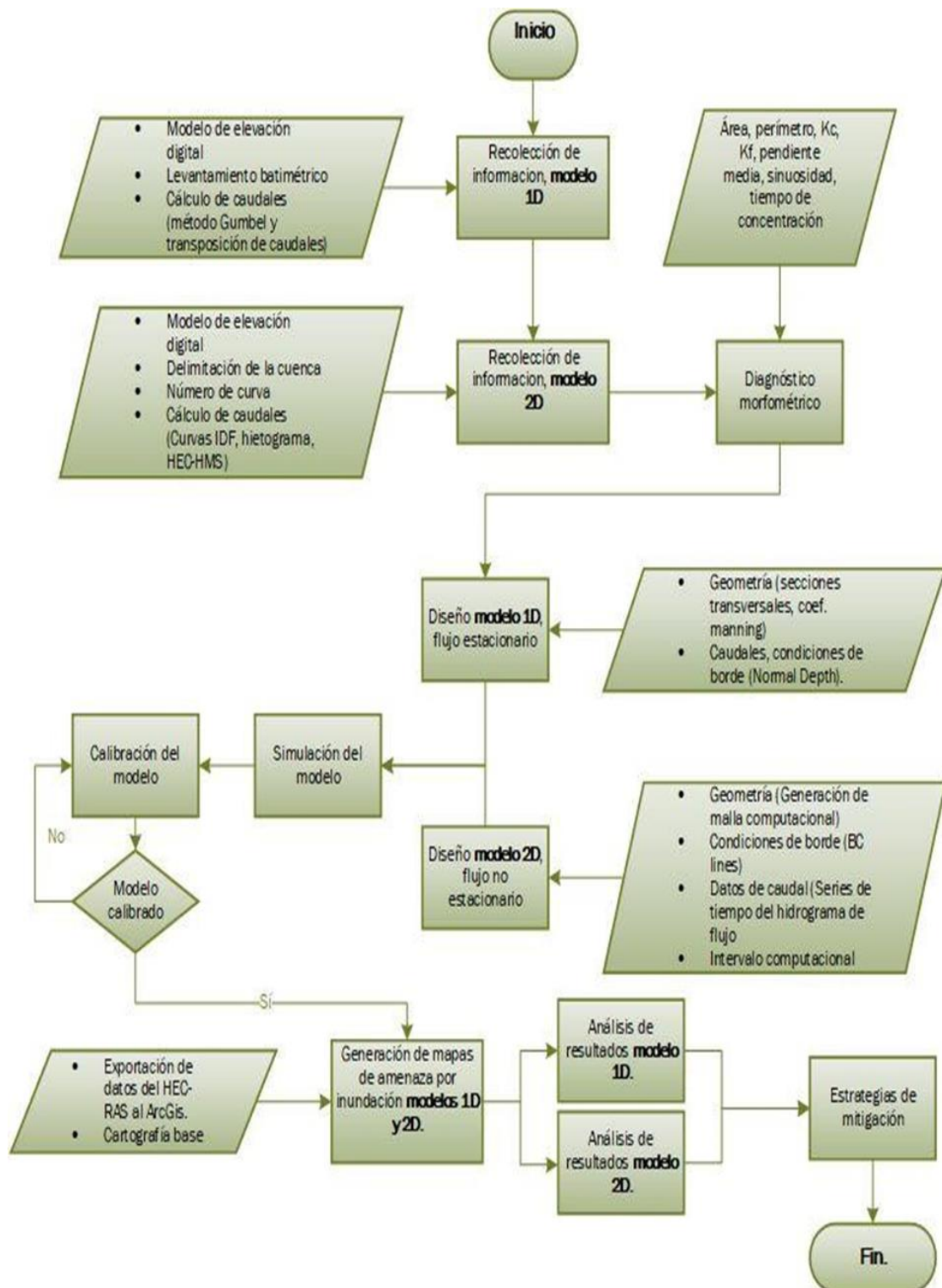
Durante esta fase se recolectó la información primaria y secundaria (cartografía, formatos raster y shapefile) del área de estudio para generar su delimitación, el diagnóstico morfométrico de la zona alta de la cuenca del río Ariari y el levantamiento batimétrico (10 secciones transversales separadas de manera equidistante cada 100 metros) que se ingresó a los modelos hidráulicos 1D y 2D para las simulaciones en los diferentes periodos de retorno. Además, se solicitó la información climatológica aledaña al área de estudio para el cálculo de caudales a través de la metodología de transposición de caudales y el software HEC-HMS 4.9.

6.2. Elaboración de mapas de amenaza por inundación para los diferentes periodos de retorno

La presente investigación optó por el modelo 1D HEC-RAS para el procesamiento y simulación de los resultados obtenidos, su elección radica en el método de cálculo desarrollado por este software, el cual se acopla totalmente a las necesidades de nuestro objetivo y a la naturaleza del problema (Khalfallah & Saidi, 2018). Sin embargo, dada la falta de información disponible durante el desarrollo de la investigación y los resultados simulados por el modelo 1D en el cual no se apreciaba una mancha de agua uniforme, se decidió realizar un modelo 2D para complementar los análisis de resultados obtenidos en el modelo 1D.

6.3. Estrategias de mitigación para las áreas de amenaza por inundación

Teniendo en cuenta los mapas elaborados y la información secundaria recopilada se procedió a buscar las estrategias de tipo estructural y no estructural para este tipo de fenómenos. Según la literatura orientada a los temas de hidrología en la ingeniería se hace necesario tener en cuenta muchos parámetros; entre ellos parámetros físicos, morfométricos, climatológicos, vegetaciones de áreas limítrofes al río, ambiente preexistente, micromamíferos y demás para la elección de una estructura hidráulica que se acople a las necesidades de la problemática.

Figura 1.*Diagrama de flujo metodológico*

Nota. Diagrama de flujo metodológico de la simulación del fenómeno de inundabilidad.

7. Resultados y análisis de resultados

7.1. Resultados fase 1. Diagnóstico de la cuenca del río Ariari y obtención de información del área de estudio

7.1.1 Obtención de información para el diseño del modelo 1D de flujo estacionario

7.1.1.1. Levantamiento batimétrico. El levantamiento batimétrico realizado en campo, se observa georreferenciado en la herramienta RAS Mapper del software Hec-Ras (Figura 2), en donde se identifican las 10 secciones transversales levantadas en campo; adicionalmente, se reflejan algunas secciones interpoladas para obtener una mayor precisión en el modelo; las secciones transversales se interpolaron cada 25 metros. Las coordenadas medidas con el GPS junto con los perfiles de cada sección transversal se encuentran en el Anexo 2.

Figura 2.

Secciones transversales en Ras Mapper



Nota. Secciones transversales tomadas en campo para el levantamiento batimétrico del área de estudio en la vereda La Playa del municipio de Granada, Meta.

7.1.1.2. Cálculo de caudales (Gumbel y transposición de caudales). Al contar con la información limnimétrica, se procedió a calcular el promedio de los caudales máximos para la

serie de tiempo de 20 años de la estación Puerto Rico, el cual fue de 1190.64 m³/s; este valor se introdujo en la ecuación 7 de la metodología para el cálculo de caudales de Gumbel (Anexo 1).

Tabla 2.

Valores para el caudal de diseño.

Desviación estándar muestral		191.10
Promedio(m3/s)		1190.64
Numero de datos		20
Yn		0.5236
N		1.0628
Q max (m3/s)	T	Valor
	5 años	1389.02
	10 años	1515.27
	25 años	1682.15
	50 años	1808.39
	100 años	1934.64

Nota. Caudales de los periodos de retorno (5, 10, 25, 50 y 100) estimados por el método de Gumbel; Las series de tiempo del año 2000 al 2019 de la estación puerto rico y las constantes de función de “n” se encuentran en el Anexo 3.

De acuerdo con la información de la Tabla 2, se procede a calcular los intervalos de confianza para cada periodo de retorno Tabla 3; los intervalos de confianza se calculan con base en las ecuaciones propuestas en la metodología para cálculo de caudales mediante el método de Gumbel (Anexo 1).

Tabla 3.

Cálculo de constante de variación de flujo.

Periodo de retorno		Ø	Calculo
T	5	0.8	91.26
	10	0.9	207.63
	25	0.96	
	50	0.98	
	100	0.99	

Nota. Cálculo de constante de variación de flujo de los periodos de retorno mediante el intervalo de confianza.

Al analizar los resultados de la Tabla 3, se determinó que para el periodo de retorno de 5 años se presenta una variación del flujo de 91.26m³/s, mientras que, los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 varían en 207.63m³/s.

Tabla 4.

Rangos de caudal de diseño real

Rango de Caudal de diseño real (m³/s)		
TR	+	-
5 años	1480.28	1297.76
10 años	1722.89	1307.64
25 años	1889.77	1474.52
50 años	2016.02	1600.76
100 años	2142.26	1727.00

Nota. Rango para el caudal de diseño real de los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Los valores del caudal de diseño real para el periodo de retorno de 5 años están dentro del rango de 1480.28 y 1297.76m³/s, mientras que, para el periodo de retorno de 100 años se encuentra dentro del rango de 2142.26 y 1727.01m³/s. Los rangos para los demás periodos de retorno (10, 25 y 50) se encuentran en la Tabla 4.

De acuerdo con la información de la Tabla 4, se seleccionaron los valores de rango máximo con el objetivo de realizar todos los cálculos para posibles eventos de inundación por encima del promedio y obtener resultados más representativos. La transposición de datos de caudal se realizó aplicando la ecuación 11 de la metodología de transposición de caudales (Anexo 1).

Tabla 5.

Valor de caudal calculado para el área de estudio mediante la transposición de datos de caudal.

Transposición de datos de caudal		
Periodos de retorno (T)	Caudal máximo de la estación Puerto Rico	Caudal máximo del área de estudio
5 años	1480.28	1030.19
10 años	1722.89	1199.04
25 años	1889.77	1315.18
50 años	2016.021	1403.04
100 años	2142.264	1490.89

Nota. Transposición de datos de caudal de la estación puerto rico al tramo de estudio del río Ariari en la vereda La Playa.

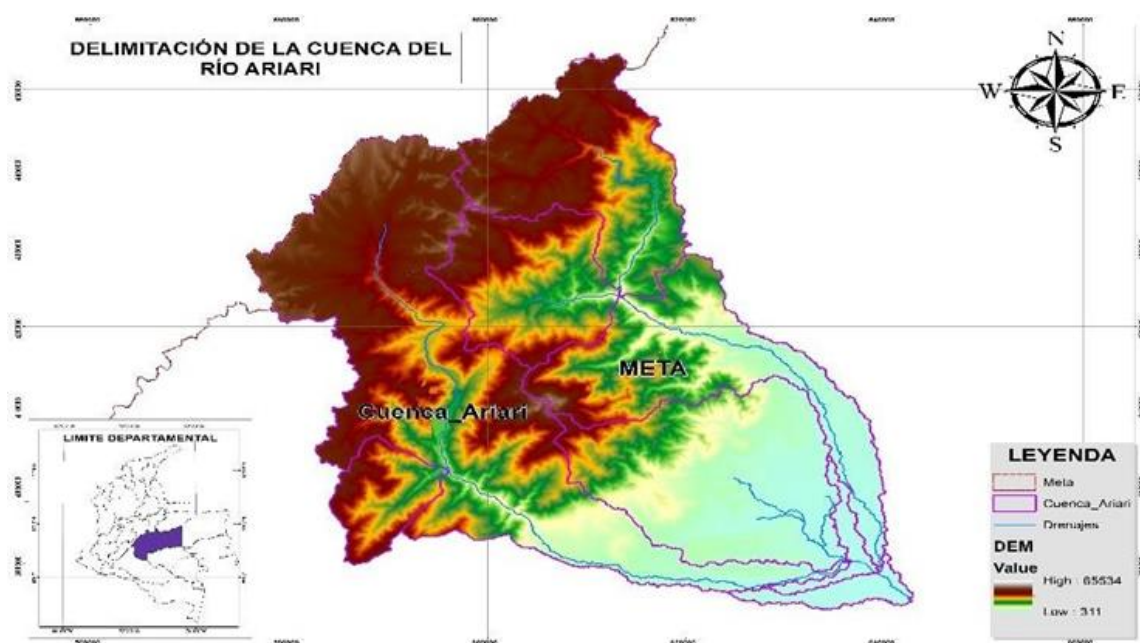
En la Tabla 5 se identificaron los caudales máximos de cada periodo de retorno para el tramo del río Ariari en la vereda La Playa. Estos caudales se usaron para el diseño del modelo 1D en Hec- Ras.

7.1.2 Obtención de información para el modelo 2D de flujo no estacionario

7.1.2.1. Delimitación de la zona alta de la cuenca alta del río Ariari. La delimitación de la cuenca alta del río Ariari, se llevó a cabo a través ArcGis, haciendo uso de la extensión HecGeo-HMS; se siguieron los pasos para la delimitación de cuencas hidrográficas que establece el manual de la extensión, con la finalidad de obtener un resultado acorde al de los datos cartográficos históricos de la cuenca (Anexo 4).

Figura 3.

Delimitación de la zona alta de la cuenca del río Ariari



Nota. Mapa de delimitación de la cuenca alta del río Ariari con sus drenajes principales y relieve.

Como resultado se obtuvo la delimitación de la cuenca alta del río Ariari en formato raster y shapefile, lo cual facilitó el cálculo de parámetros físicos como el área en km² y el perímetro en km.

7.1.2.2. Número de curva. El cálculo del número de curva se realizó mediante la extensión de HecGeo-HMS del software ArcGis, en donde a partir de los shapefiles de tipo de suelo y cobertura vegetal se realizó un traslape de la información para identificar los grupos hidrológicos que se encontraban al interior de la cuenca del río Ariari (A, B, C, D), y así, asignarle los valores numéricos establecidos por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS) para lograr estimar las pérdidas de precipitación de cada subcuenca. En la (Figura 4) se identifican las celdas de Landuse y SoilCode creadas para la identificación del grupo hidrológico de las subcuencas inmersas en la cuenca del río Ariari.

Figura 4.

Identificación del grupo hidrológico

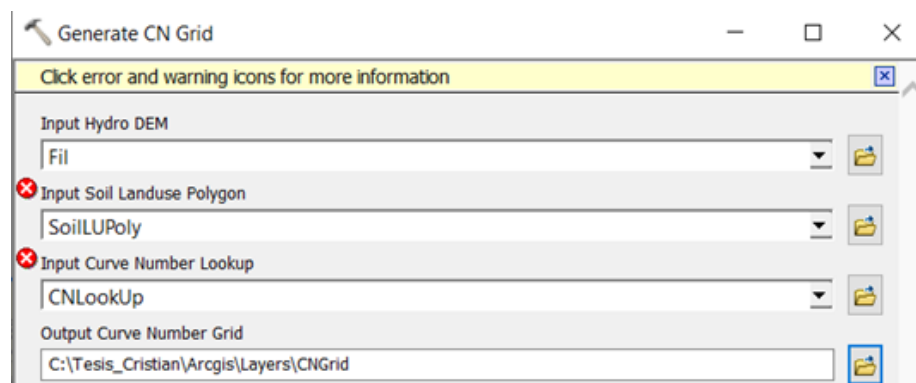
Table						
CN_Poly						
	FID	Shape	TipoSuelo	nivel_1	Landuse	SoilCode
▶	856	Polygon	C	1. Territorios artificializados	2	C
	1265	Polygon	A	1. Territorios artificializados	2	A
	4	Polygon	B	2. Territorios agrícolas	4	B
	196	Polygon	C	3. Bosques y áreas seminaturales	3	C
	515	Polygon	C	5. Superficies de agua	1	C

Nota. Tabla de clasificación de grupo hidrológico, de acuerdo al tipo de cobertura vegetal y el tipo de suelo de la cuenca alta del río Ariari.

Al establecer los diferentes grupos hidrológicos de las subcuencas, se procedió a crear el raster del número de curva, el cual se generó a partir de la herramienta “Utility”. Dentro de esta herramienta se empleó la función Generate CN Grid (Figura 5), en la cual se ingresaron los siguientes datos:

Figura 5.

Función CN Grid de la extensión HecGeo-HMS.



Nota. Función Generate CN Grid para la elaboración del raster número de curva de la cuenca alta del río Ariari.

- 1). Raster Fill (modelo de elevación ajustado)
- 2). Shapefile de clasificación del grupo hidrológico
- 3). Tabla de valores de número de curva de acuerdo al tipo de cobertura.

Como resultado se obtuvo el raster del número de curva de las subcuencas inmersas en la cuenca alta del río Ariari, el cual se transformó a polígono para completar la tabla de atributos del shapefile de la cuenca (Figura 6).

Figura 6.

Subcuencas de la cuenca alta del río Ariari y su número de Curva (CN).

Name	BasinCN
W140	58
W150	75
W160	58
W170	76
W180	58
W190	81
W250	58
W260	58

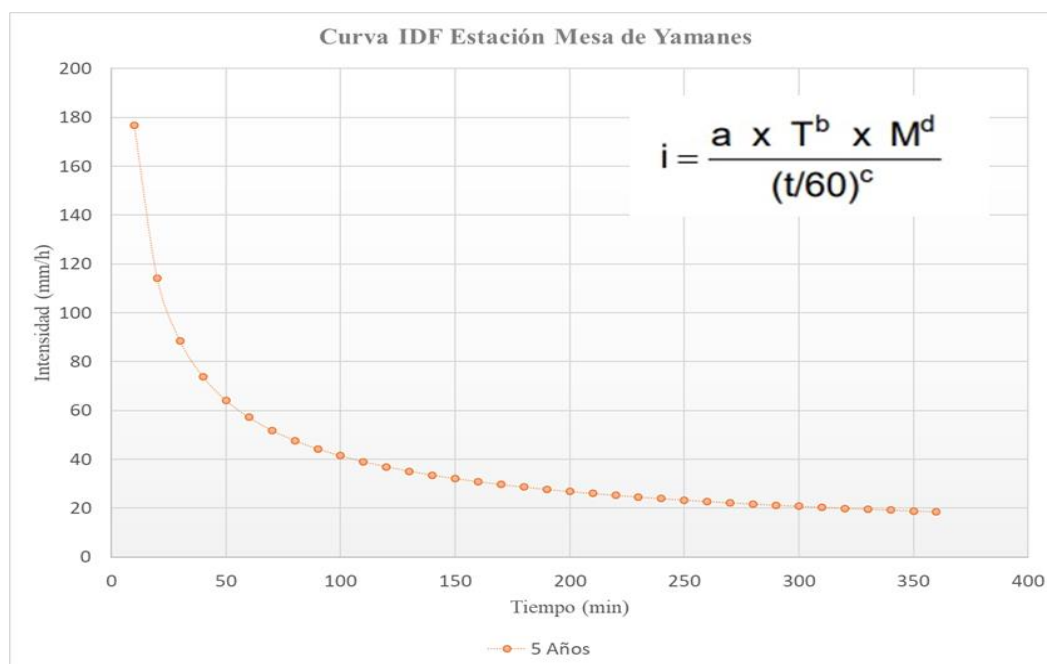
Nota. Subcuencas identificadas al interior de la cuenca alta del río Ariari mediante la extensión HecGeo-HMS del software Arcgis y su respectivo número de curva.

7.1.2.3. Cálculo de caudales (método lluvia escorrentía).

7.1.2.3.1. Curvas IDF estación de Mesa de Yamanes (método simplificado). Para el cálculo de las curvas IDF, se procedió a usar la metodología establecida por INVIAS (método simplificado) para la región de la Orinoquia, considerando que sus coeficientes son los que más se ajustan a la zona de estudio; los coeficientes se encuentran ilustrados en la sección de curvas IDF de la metodología (Anexo 1). Se obtuvieron las curvas de intensidad, duración y frecuencia para los periodos de retorno analizados en la investigación, con el fin de aplicar la metodología de bloques alternos.

Figura 7.

Curva IDF para el periodo de retorno de 5 años.



Nota. Curvas de IDF de la estación de Mesa de Yamanes de la cuenca alta del río Ariari para un tiempo de concentración de 360 min

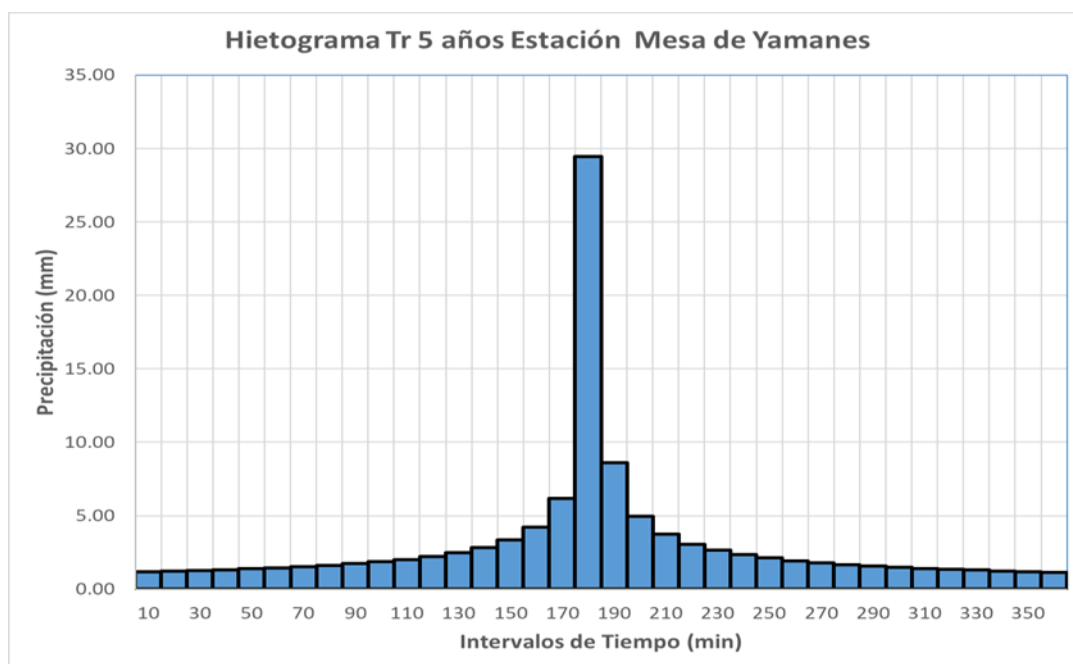
En la Figura 7 se identifican las intensidades máximas (mm/h) del periodo de retorno de cinco años para una duración de la tormenta 360 minutos (6 horas) y una intensidad máxima de precipitación de 176.81mm/h.

7.1.2.3.2. Hietograma de precipitación. Se realizó el método de los bloques alternos para determinar el hietograma de precipitación máxima para el periodo de retorno de cinco años, en donde se procedió a calcular la profundidad acumulada mediante el producto de las intensidades en mm/h halladas en las curvas IDF y un intervalo de tiempo de 10 minutos para un tiempo de concentración de 6 horas. Seguidamente se procedió a calcular la profundidad incremental a partir de la diferencia de los intervalos de tiempo.

Finalmente se procedió a graficar por medio de bloques alternos los valores obtenidos en la profundidad incremental, dejando el valor máximo hallado en el centro (29.47mm) e intercalando los demás datos de manera ascendente y descendente (Figura 8).

Figura 8.

Hietograma de precipitación para el periodo de retorno de 5 años



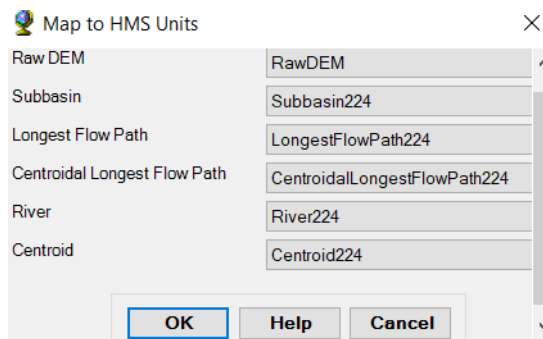
Nota. Hietograma de precipitación del periodo de retorno de cinco años de la estación Mesa de Yamanes para un tiempo de concentración de 360 minutos

7.1.2.3.3. Hidrograma de crecida en HEC-HMS. Se procedió a verificar los archivos faltantes para la esquematización del modelo hidrológico y los métodos de pérdida y transformación a utilizar. Para objetivos de este proyecto se seleccionó el Loss Method SCS y el Transfor Method SCS.

Al seleccionar los métodos de pérdida y transformación, se procedió a establecer el esquema del modelo hidrológico a través de la herramienta Map to HMS Units de la extensión HecGeo-HMS. Además, se establecieron las unidades del mapa como SI (Sistema Internacional de Unidades) (Figura 9).

Figura 9.

Herramienta Map to HMS Units de la extensión HecGeo-HMS.



Nota. Conversión de unidades a Sistema Internacional para elaboración del hidrograma de crecidas en el software HMS

Se generó el esquema HMS de la cuenca, en donde se definieron las subcuencas respectivas, los Reach, Junctions, Sink, Diversion y Reservoir. Este esquema se definió con base en los drenajes obtenidos anteriormente en la delimitación de la cuenca (Figura 3). Se definieron las coordenadas del mapa considerando la información geográfica del DEM, y, posteriormente se realizó la exportación al software HMS de la información contenida en los shapfiles de la cuenca y drenajes principales.

Se creó el componente meteorológico para el modelo HMS para el método de Specified Hyetograph, considerando que se contaba con la información de precipitación de la cuenca en el hietograma para el periodo de retorno de cinco años. Finalmente, se creó el esquema HMS que se usó para la simulación del modelo hidrológico en HMS, y, así, obtener el hidrograma de crecida para la creación del modelo hidráulico bidimensional (Figura 10).

Figura 10.

Mapa base de esquema HMS de la cuenca alta del río Ariari

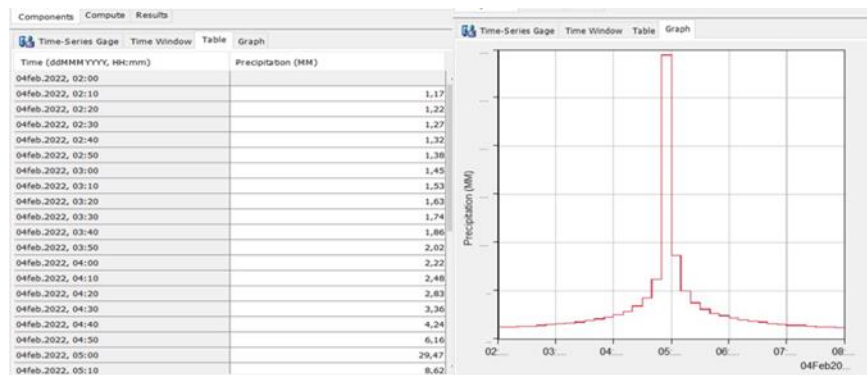


Nota. Esquema HMS de la cuenca del río alto Ariari con sus respectivas subcuencas para el diseño del hidrograma de crecidas en HMS,

7.1.2.3.4. Simulación del modelo HEC-HMS. Se completaron las series de tiempo para las subcuencas mediante el hietograma del periodo de retorno de cinco años obtenido en las curvas IDF de la estación climatológica Mesa de Yamanes, teniendo en cuenta que esta era la estación que mayor porcentaje de peso tenía sobre la cuenca delimitada.

Figura 11.

Series de tiempo de precipitación

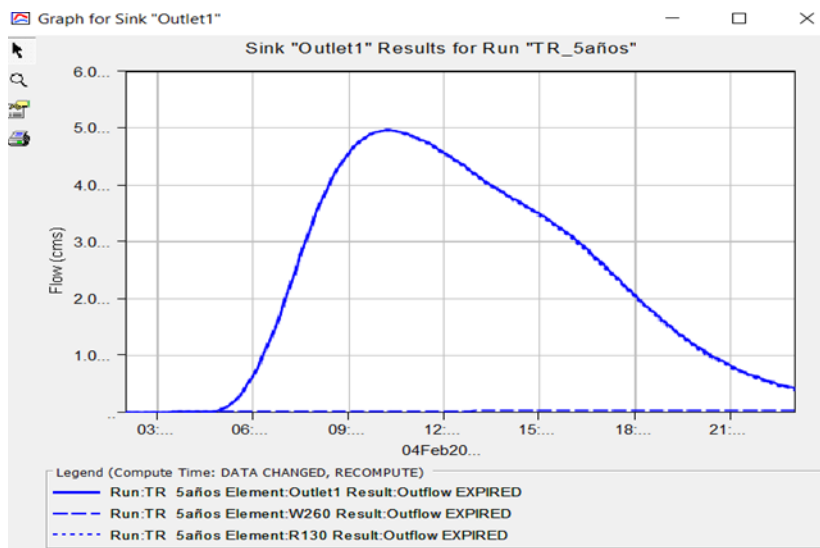


Nota. Series de tiempo de precipitación a partir del hietograma de la estación de Mesa de Yamanes para el periodo de retorno (T_r) de cinco años

Al completar la información de series de tiempo se procedió a realizar la simulación del modelo hidrológico, en donde se obtuvieron resultados como caudal pico de diseño para el periodo de retorno de cinco años y el hidrograma de crecida, el cual era necesario para continuar con la construcción del modelo hidráulico bidimensional (Figura 12).

Figura 12.

Hidrograma de crecida en HEC-HMS



Nota. Resultado de la simulación del modelo hidrológico de la cuenca alta del río Ariari para el periodo de retorno (Tr) de cinco años.

El caudal pico para el periodo de retorno de cinco años con la estación de Mesa de Yamanes fue de 4961.5 m³/s. El histograma de crecida se obtuvo para un tiempo de computación de 24 horas.

7.1.3 Diagnóstico morfométrico de la cuenca alta del río Ariari

Los parámetros morfométricos de la cuenca alta del río Ariari se hallaron a través del uso del software ArcGis, en donde se usó la delimitación de la cuenca realizada previamente para calcular los parámetros físicos de la cuenca, como: área, perímetro, longitud del cauce principal, longitud del valle y longitud axial; los parámetros de forma como el índice de Gravelius y el Factor

de Forma de Horton (Kf) se calcularon mediante la herramienta Field Calculator, en donde se aplicaron las ecuaciones propuestas en la metodología de cada parámetro (Anexo 5).

Tabla 6.

Parámetros morfométricos de la cuenca alta del Río Ariari.

Parámetros morfométricos de la cuenca del río Ariari		
Área	2667.41	km ²
Perímetro	399.05	km
Kc	2.16	
Kf	0.50	
Sinuosidad	1.45	
Longitud cauce principal	93.00	km
Pendiente media	0.02	m/m
Tc	12.90	horas

Nota. Tabla de datos morfométricos de la cuenca alta del río Ariari hallados en ArcGis.

El área de la cuenca corresponde a la proyección horizontal de drenaje de la esorrentía que se dirige de manera directa o indirecta a un cauce principal. De acuerdo con la Tabla 6, la cuenca del río Ariari tiene un área de 2667.41 km², lo cual la clasifica como una cuenca grande (Consortio Río Garagoa, 2017). El área de la cuenca es un factor de suma importancia, teniendo en cuenta que tiene una relación directa con el caudal de descarga.

El perímetro se conoce como la longitud de la línea que limita la cuenca hidrográfica a lo largo de la divisoria de aguas, es decir que corresponde a la distancia en línea recta de todos los filos que envuelven la hoya (Corponor, 2009). El valor de perímetro obtenido mediante el software ArcGIS versión 10.4.1 para la cuenca del río Ariari fue de 399.05 km (Tabla 6). A pesar que este parámetro por sí solo no indica alguna característica específica de la cuenca, su medida permitió el cálculo de factores de forma.

El Índice de Gravelius permite determinar el grado de peligrosidad a las crecidas. Cuando una cuenca tiene un (Kc) cercano a uno, quiere decir que es de forma redonda, lo que indica un grado más alto de peligrosidad por crecientes; las cuencas con (Kc) mayor a 1.75 indican que son alargadas y menos propensas a peligrosidad por crecidas (Camino, y otros, 2018). De acuerdo con

la (Tabla 6) el valor de K_c en la cuenca del río Ariari de 2.16, corresponde a una cuenca de tipo alargada y menos propensa a la peligrosidad por crecidas.

El factor de forma es la relación entre el área de la cuenca y la longitud axial del cauce principal; esta relación nos indica la forma de la cuenca y nos da una idea de su susceptibilidad a crecidas rápidas muy intensas o lentas y sostenidas. Un valor de (K_f) menor a uno (1) corresponde a cuencas alargadas, a medida que este valor aumenta se vuelve más achatada, haciéndola más susceptible a las crecidas intensas (Monsalve Saenz, 1999). A través del cálculo del valor de K_f para la cuenca del río Ariari, se obtuvo un valor de 0.5, el cual la relaciona como una cuenca alargada y menos propensa a las crecidas intensas.

La sinuosidad del cauce es un parámetro que relaciona la longitud del cauce principal y la longitud del valle del mismo, esto con la finalidad de determinar la velocidad de la escorrentía a lo largo del flujo de la cuenca. Las cuencas con valores de sinuosidad por debajo de 1.25 definen los ríos con alineamiento recto (Ospina Garcia & Mancipe Gironza, 2016). De acuerdo a lo anterior, la cuenca del río Ariari no presenta un alineamiento vertical debido a que su sinuosidad del cauce fue de 1.45, esto se respalda al tener en cuenta la variación de las pendientes altitudinales del terreno, en donde se encuentran pendientes desde muy escarpadas hasta terrenos de planicie de inundación.

La pendiente media de la cuenca se halló mediante la ecuación 3, la cual tiene en cuenta las diferencias altitudinales máximas y mínimas del cauce principal, sobre su longitud.

$$Pm = \frac{\Delta h}{L} * 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

$$Pm = \frac{(2563m - 342m)}{93000m} \quad (3)$$

$$Pm = 0.023 * 100 \quad ((3))$$

$$Pm = 2.3\% \quad ((3))$$

Para el cálculo del tiempo de concentración se usó la ecuación de Ven Te Chow, el cual define:

$$Tc = 0.213 * \left(\frac{93km}{\sqrt{0.023}} \right)^{0.64} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$T_c = 12.9 \text{ horas} \quad (4)$$

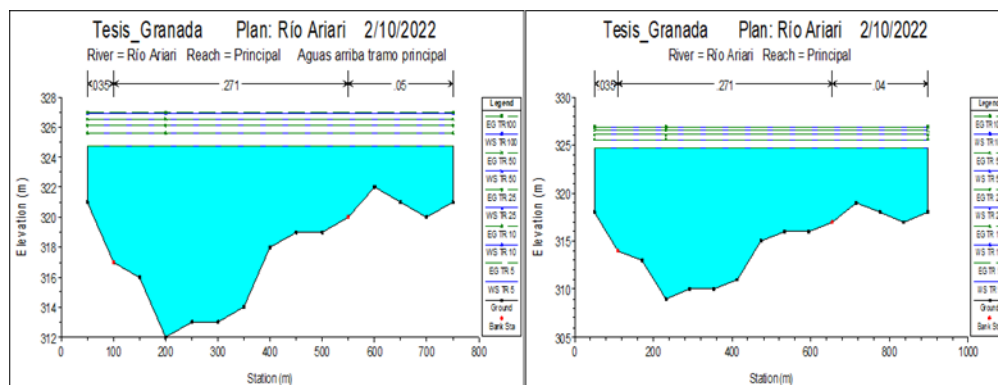
7.2. Resultados fase 2. Elaboración de mapas de amenaza por inundación para los diferentes periodos de retorno

7.2.1 Diseño del modelo 1D de flujo estacionario en HEC-RAS 5.07.

Para el proceso de diseño del modelo 1D fueron ingresadas las elevaciones de cada sección transversal mediante los datos registrados en las batimetrías (Anexo 2); estos registros fueron el resultado de una jornada ingenieril de 7 días debido al ancho del río Ariari donde se llegaron a medir secciones transversales aproximadamente de 1 kilómetro de ancho. Una vez ingresados estos valores se crea una geometría específica para el modelo, en la (Figura 13) se observan los perfiles de las secciones transversales aguas arriba y aguas abajo.

Figura 13.

Perfiles de las secciones transversales aguas arriba número 10(A) y aguas abajo 01(B)



Nota. Secciones transversales aguas arriba y aguas abajo tomadas en campo para la simulación del fenómeno de inundabilidad.

Seguidamente se procedió a ingresar el coeficiente de Manning para la banca derecha del río, el canal principal y la banca izquierda; estos datos se iban ajustando para cada sección transversal según lo observado en campo y teniendo como fuente bibliográfica los coeficientes de rugosidad para cursos de agua natural (Chow, 1959). Los valores que más coincidían según la descripción de esta tabla para la banca izquierda son los asignados para las planicies de inundación

con pasto alto con un valor de n entre 0.035 y 0.040; para el canal del río Ariari se logró identificar un crecimiento de matorrales medios a densos en los islotes generados por la sedimentación y variación del caudal como se observa en la Figura 14, por esta razón se le asignó un valor n de 0.10 y para la banca derecha se identificaron aguas arriba zonas con cultivos en hileras maduros hasta matorrales esparcidos con mucha maleza por consiguiente se le asignó un valor de n que varía entre 0.03 a 0.05. Los datos de coeficiente de rugosidad de Manning se encuentran en el Anexo 6.

Figura 14.

Tipo de vegetación (matorrales esparcidos) identificados en el canal del río Ariari



Nota. Vegetación característica de los islotes de la cuenca alta del río Ariari.

Con el objetivo de ejecutar la simulación, se ingresaron los caudales calculados en la Tabla 5; los datos de caudal calculados mediante la metodología descrita en la fase 1 para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años son 1030.19, 1199.04, 1315.18, 1403.04, y 1490.89 m³/s respectivamente. Luego se ingresó la condición de borde (Normal Depth) en la última sección transversal ubicada aguas abajo del río, el valor de la pendiente para la línea de energía se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$ND = \frac{E_{max} - E_{min}}{L} \quad \text{Ecuación 5}$$

E_{max}: Elevación máxima en la sección transversal aguas arriba

E_{min}: Elevación mínima en la sección transversal aguas abajo

L: Longitud del río medida.

$$ND = \frac{322 - 310}{1000} = 0.012 \text{ m/m} \quad (5)$$

Tabla 7.

Datos para el modelo 1D, flujo estacionario, periodo de retorno a 5 años, sección transversal 10 (aguas arriba).

Plan: Sin Calibrar	Río Ariari	Principal ST (Aguas arriba): 10	Profile: TR 5		
E.G. Elev (m)	322.43	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.01	Wt. n-Val.	0.035	0.1	0.05
W.S. Elev (m)	322.43	Reach Len. (m)	25	25	25
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	171.42	2967.76	310.66
E.G. Slope (m/m)	0.00358	Area (m2)	171.42	2967.76	310.66
Q Total (m3/s)	1030.19	Flow (m3/s)	92.29	882.75	70.17
Top Width (m)	700	Top Width (m)	50	450	200
Vel Total (m/s)	0.3	Avg. Vel. (m/s)	0.54	0.3	0.23
Max Chl Dpth (m)	10.43	Hydr. Depth (m)	3.43	6.6	1.55

Nota. Datos de variables hidráulicas sin calibrar para el periodo de retorno de 5 años (sección transversal 10).

Tabla 8. *Datos para el modelo 1D, flujo estacionario, periodo de retorno a 5 años, sección transversal 01 (aguas abajo).*

Plan: Sin Calibrar	Río Ariari	Principal ST (Aguas abajo): 01	Profile: TR 5		
E.G. Elev (m)	322.21	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0	Wt. n-Val.	0.035	0.1	0.04
W.S. Elev (m)	322.21	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	311.37	Flow Area (m2)	375.64	5105.08	1048.84
E.G. Slope (m/m)	0.012	Area (m2)	375.64	5105.08	1048.84
Q Total (m3/s)	1030.19	Flow (m3/s)	109.51	717.76	217.93
Top Width (m)	847	Top Width (m)	60.5	544.5	242
Vel Total (m/s)	0.16	Avg. Vel. (m/s)	0.29	0.14	0.21
Max Chl Dpth (m)	13.21	Hydr. Depth (m)	6.21	9.38	4.33

Nota. Datos de variables hidráulicas sin calibrar para el periodo de retorno de 5 años (sección transversal 01).

Tabla 9.

Datos para el modelo 1D, flujo estacionario, periodo de retorno a 100 años, sección transversal 10 (aguas arriba).

Plan: Sin Calibrar	Río Ariari	Principal ST (Aguas arriba): 10	Profile: TR100		
E.G. Elev (m)	324.09	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.01	Wt. n-Val.	0.035	0.1	0.05
W.S. Elev (m)	324.08	Reach Len. (m)	25	25	25
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	253.92	3710.32	640.69
E.G. Slope (m/m)	0.00358	Area (m2)	253.92	3710.32	640.69
Q Total (m3/s)	1490.89	Flow (m3/s)	157.5	1159.56	211.13
Top Width (m)	700	Top Width (m)	50	450	200
Vel Total (m/s)	0.33	Avg. Vel. (m/s)	0.62	0.31	0.33
Max Chl Dpth (m)	12.08	Hydr. Depth (m)	5.08	8.25	3.2

Nota. Datos de variables hidráulicas sin calibrar para el periodo de retorno de 100 años (sección transversal 10).

Tabla 10.

Datos para el modelo 1D, flujo estacionario, periodo de retorno a 100 años, sección transversal 01 (aguas abajo).

Plan: Sin Calibrar	Río Ariari	Principal ST (Aguas abajo): 01	Profile: TR100		
E.G. Elev (m)	324.06	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0	Wt. n-Val.	0.035	0.1	0.04
W.S. Elev (m)	324.06	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	311.76	Flow Area (m2)	487.58	6112.49	1496.58
E.G. Slope (m/m)	0.012	Area (m2)	487.58	6112.49	1496.58
Q Total (m3/s)	1490.89	Flow (m3/s)	166.1	969.66	392.42
Top Width (m)	847	Top Width (m)	60.5	544.5	242
Vel Total (m/s)	0.19	Avg. Vel. (m/s)	0.34	0.16	0.26
Max Chl Dpth (m)	15.06	Hydr. Depth (m)	8.06	11.23	6.18

Nota. Datos de variables hidráulicas sin calibrar para el periodo de retorno de 100 años (sección transversal 01).

Los resultados ilustrados en las Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10 presentan la diferencia entre las variables medidas aguas arriba y aguas abajo del tramo evaluado en el modelo para los periodos de retorno de 5 a 100 años, escogiéndose los mismos debido a tener las variaciones más considerables entre los demás periodos de retorno ejecutados (10, 25 y 50 años); las tablas con los valores calculados para los periodos de retorno restantes se encuentran en el Anexo 7.

7.2.2 Calibración por medio del coeficiente de rugosidad de Manning (n)

La calibración se realizó mediante el coeficiente de rugosidad superficial debido a que se logró contar con los informes de la empresa extractora de material de arrastre “Serviariari Ingeniería S.A.S.”, que opera sobre la banca derecha del tramo en estudio. Estos informes sirvieron como base para corroborar el peso retenido en gramos del material sedimentario del cauce, el cual corresponde en su mayoría a gravas, con diámetros que oscilan entre los 4.75 y 9.50 mm (Anexo 8).

De acuerdo con la clasificación de los materiales sedimentarios, se logró establecer que las dimensiones que se encuentran entre el rango de 4 a 16 mm que son extraídos en el cauce corresponden a las clases de gravas finas y medianas. Al determinar estas clases de grava, se logró calibrar el coeficiente de rugosidad superficial “ n_0 ” mediante el método planteado por Cowan; de ahí que, cálculo del coeficiente de Manning se presenta a detalle en la Tabla 12.

Tabla 11.

Clasificación de los materiales sedimentarios.

Grupo	Clase	Dimensiones(mm)	
Guijarros	Muy grandes	2.050	4.100
	Grandes	1.020	2.050
	Medianos	510	1.020
	Pequeños	260	510
Cantos Rodados	Grandes	130	55
	Pequeños	65	130
Grava	Muy gruesa	30	65
	Gruesa	15	30
	Mediana	8	16
	Fina	4	8
	Muy fina	2	4
Arena	Muy gruesa	1	2
	Gruesa	0.5	1
	Mediana	0.25	0.5
	Fina	0.125	0.25
	Muy fina	0.0625	0.125

Nota. Datos de dimensiones en milímetros (mm) de las diferentes clases de los grupos sedimentarios.

Tabla 12.*Cálculo de Manning según el método desarrollado por Cowan.*

Condiciones del curso de agua natural	Coeficientes	Valor
Características del Río Ariari: En gravas finas y medias .	n0	0.025
Grado de irregularidad: Severo . Salientes o entrantes continuas del mismo orden de magnitud que el tirante. Erosiones irregulares en las márgenes	n1	0.02
Variación de la sección transversal en forma y tamaño: Secciones grandes y pequeñas alternadas frecuentemente o cambios que causan desviación desde el cauce principal a ambos lados	n2	0.013
Obstrucciones del área hidráulica debidas a grandes rocas troncos, depósitos de desperdicios o de rocas: Apreciables	n3	0.025
Cantidad y tipo de vegetación: Alta (arbustos)	n4	0.04
Condiciones del cauce o canal: Grado de sinuosidad S = 1.44; James (1994).	m5	2.22
Resultado Coeficiente de Rugosidad de Manning	n	0.27306

Nota. Valores de coeficiente de Manning de acuerdo a las condiciones del curso de agua natural.

Los resultados de calibración del modelo por coeficiente de rugosidad de Manning, se encuentran en el Anexo 9.

Al analizar los resultados de la calibración se destacan los cambios en la velocidad total, la cual para el periodo de retorno a 5 años de la sección transversal aguas arriba varía con respecto a las demás secciones analizadas, puesto que esta sección (10) presenta un valor de 0.20m/s y en la sección aguas abajo un valor de 0.12 m/s, del mismo modo, en los demás periodos de retorno se evidencia el mismo comportamiento para la velocidad total del cauce, de manera que en el periodo de retorno a 100 años la velocidad total cambia en un rango de 0.23 a 0.14m/s entre las secciones transversales aguas arriba y aguas abajo respectivamente. Se infiere que este comportamiento del flujo puede asociarse a las obstrucciones que se encuentran en el agua mientras circula desde aguas arriba hacia aguas abajo como, por ejemplo: troncos, barras de vegetación y también islotes de arena generados por la sedimentación del río. Además, cabe resaltar que las secciones transversales aguas abajo son las de mayor longitud, por esta razón el canal del río se hace más ancho; este fenómeno analizado desde un punto de vista matemático se entiende debido a que la velocidad depende directamente del flujo volumétrico o caudal que pasa por un área de sección transversal específico, esta última al tener dimensiones más grandes en las batimetrías realizadas aguas abajo, tiende a reducir la velocidad del flujo modelado (Ochoa, 2011).

Por otra parte, los datos de profundidad del canal principal son mayores en comparación a las profundidades calculadas en las bancas para todos los periodos de retorno. El periodo calculado

a 5 años registró datos de profundidad de 8.85 metros y 11. 83 metros aguas arriba y aguas abajo respectivamente, del mismo modo para el periodo de retorno de 100 años, se obtuvieron ponderaciones de profundidad mayores en el canal principal que en las orillas, con valores de 10.98 metros en la sección 10 y 13.97 metros en la sección 01 aguas abajo del tramo analizado.

En relación a lo anterior, se establece que los valores de profundidad son directamente proporcionales a cada periodo de retorno, es decir, entre mayor sea el periodo de retorno modelado, mayor serán las profundidades calculadas en el canal y en las bancas.

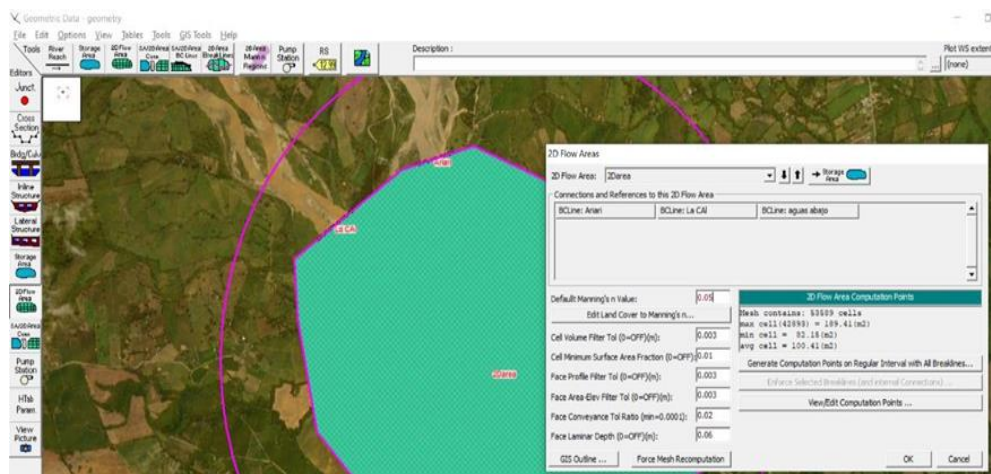
7.2.3 Diseño del modelo 2D de flujo no estacionario en HEC-RAS 5.0.7

La construcción del modelo 2D se inició mediante la herramienta Ras Mapper, creando el nuevo terreno a partir del modelo de elevación digital descargado del satélite ALOS PALSAR. Este modelo se transformó a formato TIN para establecer la geometría del terreno. Para obtener un mayor acercamiento en cuanto a la zona de delimitación, se usó una imagen satelital (Arcgis Imagery), la cual se encontraba dentro de las mismas funciones del Ras Mapper.

La construcción de la geometría se llevó a cabo mediante la función Geometry Data, en donde se usó como guía el terreno en formato TIN creado recientemente de la cuenca del río Ariari; la modelación 2D establece la creación de una malla computacional como parte de la geometría del modelo a construir, por lo tanto, se estableció una malla computacional con un tamaño de celda de 10 por 10, en la que se obtuvo un total de 53589 celdas (Figura 15).

Figura 15.

Herramienta Geometry Data para diseño de la malla computacional



Nota. Conformación de la malla computacional del área de estudio para la simulación del modelo de amenaza por inundación bidimensional.

De acuerdo con la información de la Figura 15, se generaron celdas de 100.2 m², lo cual es acorde con el tamaño (10 por 10) de celda establecido al inicio de la computación de la malla; el coeficiente de Manning se expresó como 0.27 de acuerdo a la calibración realizada previamente para el modelo 1D.

Al delimitar el área de estudio, se identificaron tres condiciones de borde mediante la función SA/2Darea BC Lines (río Ariari, río La Cal y aguas abajo) (Figura 16). A pesar de que la delimitación del área era solo para el río Ariari, se optó por tomar el río La Cal como tributario al tener una confluencia directa en la zona de estudio del proyecto.

Figura 16.

Condiciones de borde de la malla computacional.



Nota. Condiciones de borde o de frontera de la malla computacional; se identificaron tres condiciones de borde (aguas arriba, río tributario, aguas abajo).

Para las condiciones de flujo no estacionario de las tres condiciones de borde definidas en la geometría, se usó la herramienta Unsteady Flow Data, en donde se seleccionó el parámetro de Flow hydrograph para el río Ariari y el río tributario de La Cal; el hidrograma se especificó de acuerdo a los resultados obtenidos en la fase 1 en la simulación del modelo HEC-HMS, en donde se obtuvo un caudal máximo de 4961.5 m³/s para un periodo de retorno de cinco años.

La condición de borde aguas abajo se definió mediante el parámetro de Normal Depth, el cual corresponde a la pendiente de la línea de energía del curso de agua (0.012). Este parámetro fue calculada a través del software ArcGis, teniendo en cuenta las pendientes del cauce principal del río Ariari para un régimen de flujo subcrítico.

Al definir las condiciones de borde se procedió a calcular el Computation Interval mediante el número de Courant, teniendo en cuenta los parámetros de distancia entre secciones Δx , la velocidad media del tramo y el factor de computación de canales naturales según lo descrito en la fase 2 de la metodología.

$$\Delta t = \frac{100m}{(4.8 \text{ m/s} * 1.5)} \quad \text{Ecuación 6}$$
$$\Delta t = 13.8 \text{ s} \quad (6)$$

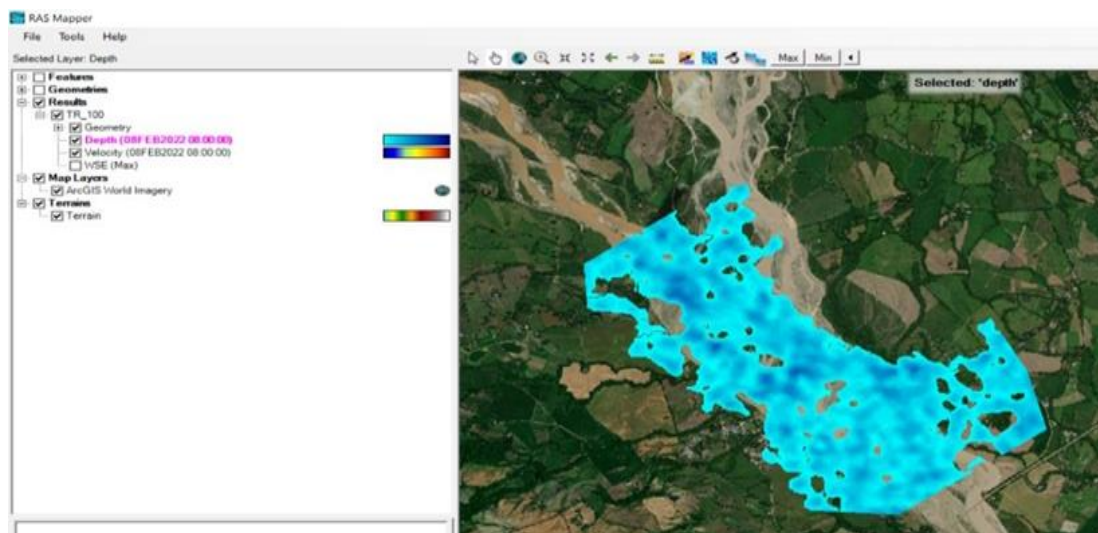
De acuerdo con la ecuación anterior, el Computation Interval (tiempo de computación) para la simulación del modelo planteado fue de 13.8 segundos, por lo tanto, se decidió emplear un tiempo de computación de 10 segundos para la simulación. Este tiempo se definió, teniendo en cuenta que el Computation Interval corresponde al tiempo en el que el modelo realiza los cálculos en las celdas de la malla computacional (US Army Corps of Engineers, 2016), razón por la cual, se optó por un tiempo menor al hallado para una mayor confiabilidad de los resultados de la simulación.

El Mapping Output Interval, Hydrograph Output Interval y el Detailed Output Interval se definieron de acuerdo a los intervalos de tiempo del hidrograma (10 minutos); la simulación del modelo se llevó a cabo mediante las ecuaciones diferenciales de Saint-Venant (ecuación 2) para realizar los cálculos, teniendo en cuenta que las ecuaciones de onda difusa no tienen en cuenta la aceleración local (Amaris Castro, Guerrero Barbosa, & Sanchez Ortíz, 2014).

Al definir los parámetros de computación, se procedió a correr el modelo mediante la función Compute. Los resultados de la simulación se observaron en el Ras Mapper, en donde se identificaron las profundidades y velocidades obtenidas en un flujo no estacionario para un periodo de retorno de cinco años (Figura 17).

Figura 17.

Resultado de simulación bidimensional.



Nota. Resultados de profundidad, velocidad y coeficiente de Manning de la simulación bidimensional para las zonas de amenaza por inundación de la vereda La Playa. Adaptado a través de. Software RAS Mapper

7.2.4 Generación de mapas de amenaza por inundación de los modelos 1D y 2D

La generación de los mapas de inundación se llevó a cabo a partir de los datos obtenidos en las simulaciones de los modelos hidráulicos unidimensional y bidimensional, en donde se exportaron los datos correspondientes a Depth (profundidad). Estos mapas se diseñaron a partir del software ArcGis, en donde se usó información cartográfica referente a la zona de estudio como: limite departamental (Meta), limite municipal (Granada), limite predial, casco urbano y las vías presentes en el área de estudio (Vereda La Playa).

Para la conformación de la cuadrícula se utilizó la Measured Grid, teniendo en cuenta que la proyección del Layer (capa de información raster y shapefile) se encontraba en coordenadas WGS84 UTM Zona 18 Norte; a partir de la función Insert se creó el norte magnético y la leyenda del mapa.

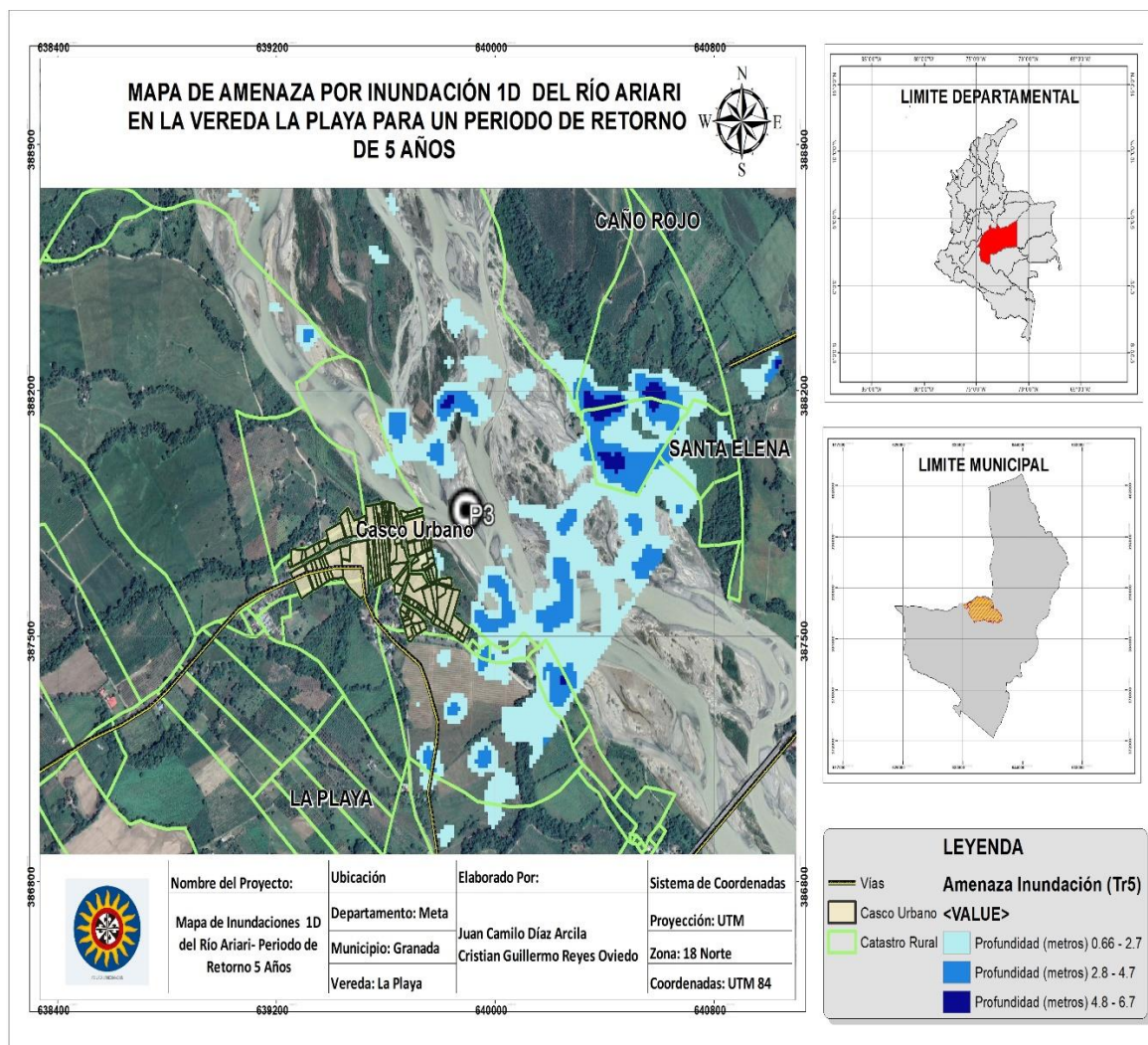
Para un mayor detalle de la zona de inundación, se procedió a descargar una imagen satelital a través del software Google Earth Pro, la cual se georreferenció de acuerdo a las coordenadas geográficas de la zona de estudio y el Layer.

Seguidamente se creó un shapefile de formato punto para identificar el área estudio y de esta manera poder relacionarla con las manchas de inundación que se obtuvieron para los

diferentes periodos de retorno (5, 10, 25, 50 y 100) del modelo unidimensional y el periodo de retorno de cinco años del modelo bidimensional. Finalmente se adjuntó toda la información para la creación de los mapas de amenaza por inundación para los diferentes periodos de retorno (Figura 18).

Figura 18.

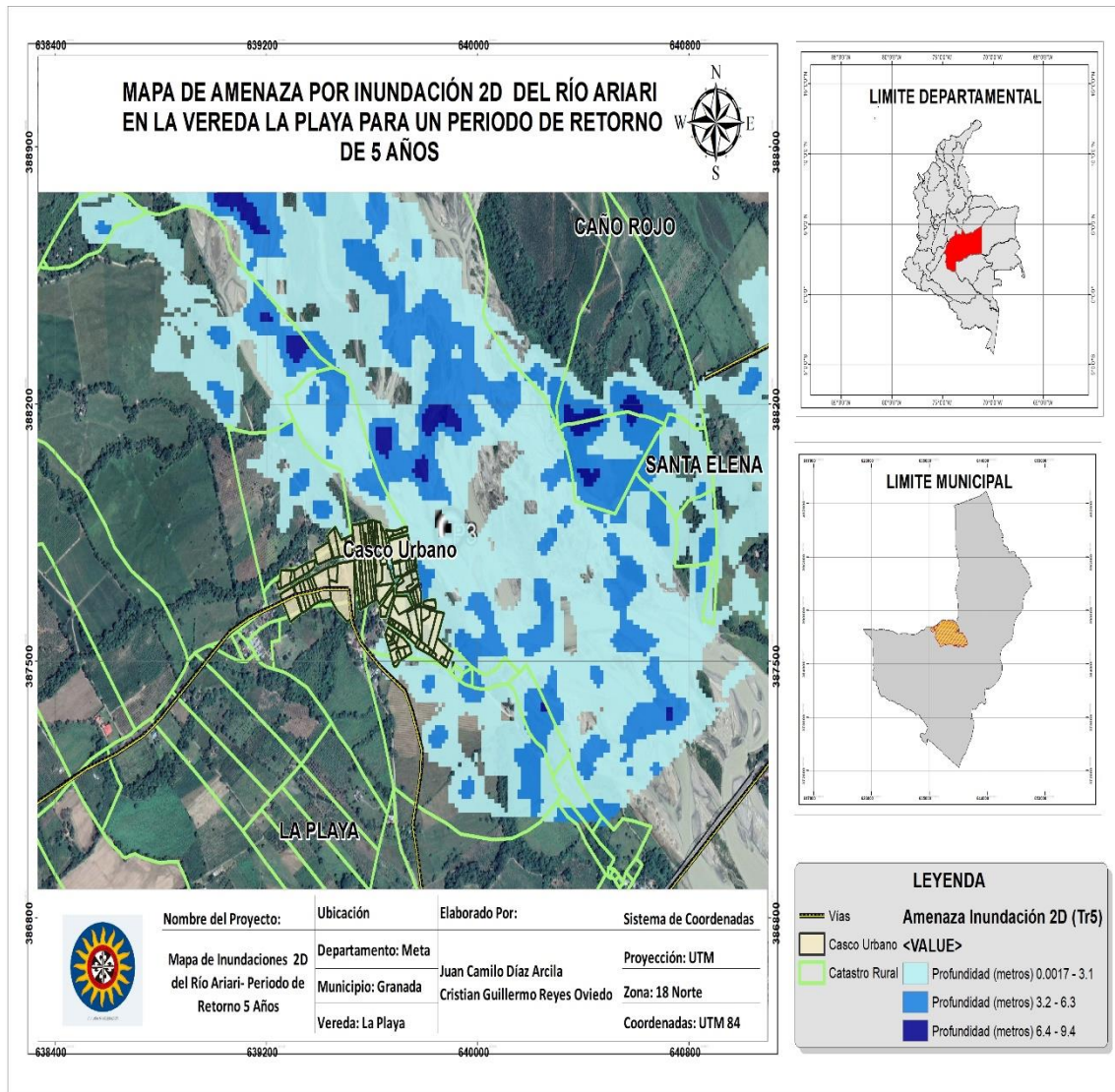
Mapa de amenaza por inundación 1D del río Ariari en la vereda la Playa para el periodo de retorno (Tr) de 5 años.



Nota. En la leyenda se identifica la amenaza de inundación en profundidad (metros), las vías principales y las capas de catastro urbano y rural de la vereda.

Figura 19.

Mapa de amenaza por inundación 2D del río Ariari en la vereda la Playa para el periodo de retorno (Tr) de 5 años.



Nota. En la leyenda se identifica la amenaza de inundación en profundidad (metros), las vías principales y las capas de catastro urbano y rural de la vereda.

Los mapas de amenaza por inundación para los demás periodos de retorno se encuentran en el Anexo 10.

7.2.5 *Análisis de los resultados del modelo 1D para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años*

Al realizar el procesamiento de la información de los mapas de amenaza por inundación en ArcGis, se logra establecer el área total de los predios de la zona de estudio de la vereda la playa, la cual correspondió a un área de 370. 377 hectáreas (ha). De acuerdo a lo anterior y relacionando los raster de profundidad de los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años, se calcularon las áreas de inundación de cada periodo en cantidad de áreas inundadas y porcentaje de área inundado (Tabla 13).

Tabla 13.

Cálculo del área de inundación de la vereda La Playa (modelo 1D).

Área de amenaza por inundación del tramo del río Ariari en la vereda La Playa, modelo 1D		
Área total de la zona de estudio en hectáreas (ha)		370.377
Periodos de retorno (Tr)	Área de inundación (ha)	% Área de inundación
5 años	12.36	3.34
10 años	21.12	5.70
25 años	33.58	9.07
50 años	33.58	9.07
100 años	33.58	9.07

Nota. Áreas de amenaza por inundación en la vereda La Playa para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

Para los periodos de retorno de 5 y 10 años, se presentaron áreas de inundación de 12.36ha (3.34%) y 21.12ha (5.7%), mientras que, para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, se mantuvo un área de inundación de 33.58ha (9.07%). A pesar de que el área de inundación para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años se mantiene en 33.58ha (9.07%), la variable de profundidad varió significativamente; las profundidades para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años van de 0.018 a 8, 0.41 a 8.4 y 0.8 a 8.8 metros respectivamente.

Al presentarse un mayor caudal, se genera un potencial de socavación mayor que incrementa los valores de profundidad de las bancas y el centro del cauce (Ochoa, 2011), razón por la cual, la profundidad tiende a ser mayor, considerando que los caudales de diseño de los

periodos de retorno de 25, 50 y 100 años fueron de 1315.18 m³/s, 1403.04 y 1490.89 m³/s respectivamente.

En los periodos de retorno de 5 a 25 años, se evidencia un incremento abrupto del área de inundación, al registrar porcentajes de inundación del 3.34% al 9.07%, es decir, un aumento 2,7 veces mayor. Esto se corrobora a través de la relación directa de la descarga de inundación y el área inundada, en donde, al presentarse una mayor magnitud de descarga (caudal) se abarca mayor área (Ntanganedzeni & Nobert, 2021); los caudales de los periodos de retorno de 5 y 25 años hallados para el modelo 1D fueron 1030.19 m³/s y 1315.18 m³/s respectivamente.

Figura 20.

Polígonos de inundación en la vereda La Playa para el periodo de retorno de 25 años.



Nota. Imagen de Google Earth Pro para identificar la amenaza de inundación en mosaicos de cultivos, infraestructura y viviendas de la vereda La Playa para el periodo de retorno de 25 años.

De acuerdo con la Figura 20, en la simulación del modelo 1D del periodo de retorno de 25 años, la descarga de inundación registró amenaza de inundación sobre predios destinados a la agricultura como cultivos de mosaico. Además, en caso de que ocurra el evento de inundación, este ocasionara daños infraestructurales, ya que se extendería hacia algunas viviendas y la conexión vial de la vereda La Playa.

En relación a lo anterior, se destaca que para los periodos de retorno de 50 y 100 años, la extensión del área de inundación se presentó sobre los mismos predios, no obstante, se registró una variación en cuanto a la profundidad de las áreas de inundación; Los predios de mosaico de cultivos presentaron variaciones de profundidad en los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años de 0.018 a 5.4, 0.41 a 5.7 y 0.8 a 6.1 metros respectivamente, lo cual evidencia un aumento en las profundidades del área de inundación de aproximadamente 40cm entre periodos de retorno (25, 50 y 100 años).

A través de las capas de catastro urbano del IGAC, se logró establecer la amenaza de inundación de los predios urbanos de la vereda. En relación a lo anterior, en los periodos de retorno de 5 y 10 años se registró una amenaza de inundación de 0.63ha (5.91%) y 1.67ha (15.65%) respectivamente; los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años registraron amenaza de inundación para un área de 4.45ha correspondientes al 41.69% del área total urbana de la vereda La Playa (Tabla 14).

Tabla 14.

Cálculo de áreas de inundación de los predios urbanos en la vereda La Playa (modelo 1D)

Área de amenaza por inundación del tramo del río Ariari en el casco urbano de la vereda La Playa, modelo 1D		
Área total del casco urbano en hectáreas (ha)		10.68
Periodos de retorno (Tr)	Área de inundación (Ha)	% área de inundación
5 años	0.63	5.91
10 años	1.67	15.65
25 años	4.45	41.69
50 años	4.45	41.69
100 años	4.45	41.69

Nota. Nota. Áreas de amenaza por inundación de predios urbanos en la vereda La Playa para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años.

7.2.6 *Análisis de los resultados del modelo 2D para el periodo de retorno de 5 años*

El realizar la simulación del modelo 2D para el periodo de retorno de 5 años, se evidenció un área de inundación de 60.87ha (16.44%) (Tabla 15). Esto se debe principalmente al caudal de diseño hallado para el modelo 2D, el cual corresponde a 4961. 5 m³/s, razón por la cual, se excedió la capacidad de retención de descarga (caudal) del cauce (tramo río Ariari) y se provocó el desbordamiento del mismo. Cabe destacar que la magnitud de este caudal se asocia a la confluencia entre el río Ariari y la Cal, en donde el afluente La Cal vierte sus aguas al río Ariari, generando un incremento en el caudal proveniente aguas arriba del Ariari.

Tabla 15.

Cálculo de áreas de amenaza de los predios de la vereda La Playa (modelo 2D)

Área de amenaza por inundación de la vereda La Playa modelo 2D				
Área total en hectáreas (ha)			370.377	
Área Urbana en (ha)			10.68	
Periodo de retorno (tr)	Área de inundación total (ha)	% Área de inundación total	Área de inundación urbana (ha)	% Área de inundación urbana
5 años	60.87	16.44	6.29	58.90

Nota. Áreas de amenaza por inundación de los predios en la vereda La Playa para el periodo de retorno de 5 años del modelo 2D.

De acuerdo a la Tabla 15, se generó un área de inundación de 6.29ha del casco urbano de la vereda La Playa, lo cual representa una gran amenaza para el componente social de la población, teniendo en cuenta que el 58,9% del casco urbano está bajo amenaza de inundación. Esta información se aprecia de mejor manera en la Figura 23, en donde se evidencia la extensión de la inundación para el periodo de retorno de 5 años del modelo 2D.

Figura 21.

Polígonos de área de inundación para el periodo de retorno de 5 años en la vereda La Playa (modelo 2D).



Nota. Imagen de Google Earth Pro para identificar la amenaza de inundación en mosaicos de cultivos, cultivos de pancoger y el casco urbano de la vereda La Playa para el periodo de retorno de 5 años.

7.3. Resultados fase 3. Estrategias de mitigación para las áreas de amenaza por inundación identificadas

Según los mapas de amenaza por inundación generados por los diferentes periodos de retorno analizados, las zonas que presentan una mayor afectación se encuentran ubicadas en ambas orillas del río Ariari. Las áreas colindantes a la vereda La Playa presentan áreas de inundación para todos los periodos de retorno analizados en el estudio, específicamente para la zona aguas abajo de la sección transversal seis.

De acuerdo a lo anterior, se decide proponer estrategias de mitigación de tipo no estructural y de tipo estructural, con la finalidad de apoyar al sistema de gestión del riesgo del municipio y los planes de desarrollo municipal. Estas estrategias solamente se plantean, teniendo en cuenta que el proceso de diseño e implementación abarca otro tipo de investigación, no obstante, se proponen de acuerdo a la información resultante en el proceso de simulación del fenómeno de inundabilidad en la vereda La Playa.

7.3.1 Medidas de mitigación integrales de tipo no estructural

7.3.1.1. Ampliación de la red hidrometeorológica e hidrométrica al interior de la cuenca alta del río Ariari. Al realizar los procesos de construcción de los modelos hidráulicos 1D y 2D, y del modelo hidrológico de la cuenca alta del río Ariari, fue evidente la falta de información hidrometeorológica e hidrométrica en el área de estudio para diseñar, manejar, controlar e investigar las dinámicas fluviales de los cauces. Esto se plantea al considerar que al interior de la cuenca alta del río Ariari se encuentran solo nueve estaciones, las cuales son de clase pluviométrica (5), climatológica ordinaria (1), limnigráfica (2) y limnimétrica (1), no obstante, tres de estas estaciones se encuentran suspendidas (2 pluviométricas, 1 limnigráfica).

De acuerdo a lo anterior, se propone complementar la red hidrometeorológica de la cuenca mediante la implementación de estaciones pluviométricas que ajusten la cantidad de precipitación real que se registra al interior de la cuenca, lo cual, permitirá realizar procesos de interpolación entre la totalidad de estaciones vigentes y reducirá el margen de error del mismo (Duran Torres & Echeverría Vivas, 2018). Se propone implementar una red hidrométrica de tipo limnigráfica, en donde se registren los datos de manera automática y teleméricamente, considerando que muchas de las causas de la falta de información se deben al tipo de estaciones convencionales, la cuales requieren de un observador (personal técnico) para registrar sus datos y emitirlos a técnicos de procesamiento de información.

La implementación de la red hidrometeorológica e hidrométrica al interior de la cuenca se diseñaría de acuerdo a la Guía Metodológica para el Emplazamiento de las Estaciones Meteorológicas del IDEAM, el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua del IDEAM y las directrices para el Emplazamiento de Redes Hidrometeorológicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2021).

7.3.1.2. Sistema de alerta temprana comunitario en la vereda La Playa. Al contar con una red hidrometeorológica al interior de la cuenca, se propone implementar el Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SAT comunitario) para la vereda La Playa de acuerdo a lo estipulado en la Guía para la Implementación de Sistemas de Alerta Temprana de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). El SAT, es una herramienta que

permite comunicar a una población y/o comunidad de manera oportuna una amenaza latente que afecte su integridad física, daños a los bienes (infraestructura) y al medio ambiente (López, 2005).

En relación a lo anterior y a los resultados obtenidos en los procesos de simulación del fenómeno de inundabilidad, se propone que el sistema de alerta temprana se enfoque en el monitoreo de la precipitación, razón por la cual, se propuso la complementación de la red hidrometeorológica con pluviómetros al interior de la cuenca alta del río Ariari. Esto se debe principalmente a que algunas subcuencas cuentan con un tiempo de concentración muy corto que no permiten alertar la amenaza por crecientes por medio de otras variables como caudales y niveles de agua (Corpoguajira, 2011).

Dentro del SAT se propone implementar los procesos de modelación hidráulica e hidrológica a través de softwares computacionales como HEC-RAS y HEC-HMS respectivamente, los cuales permiten simular eventos de inundación e identificar las zonas de amenaza para diferentes periodos de retorno, lo cual apoyaría de manera eficiente el SAT, identificando las rutas de evacuación dado el caso que el nivel de alerta lo amerite.

7.3.2 Medidas de mitigación de tipo estructural.

7.3.2.1. Geomantas reforzadas (bioingeniería). En la banca derecha del río Ariari se viene presentando un fenómeno de socavación generalizada hace algunos años como se puede observar en la Figura 22. Este tipo de socavación se atribuye a los cambios en el uso del suelo de la cuenca en estudio, debido a que cualquier cambio natural o antrópico dentro de un cuerpo de agua interviene en la morfología del mismo, en las características hidráulicas, y en general en el tipo y cantidad de sedimentos generados; por consiguiente, se les atribuye a las actividades antrópicas realizadas en la zona de estudio como la extracción de material de arrastre, específicamente de grava y arena el desequilibrio del transporte de sedimentos.

Figura 22.

Fenómeno de socavación del río Ariari.



Nota. Fenómeno de socavación en la banca derecha del río Ariari a causa de los cambios de la dinámica fluvial del cauce y los fenómenos de inundación. Adaptado de (El Tiempo, 2020).

Este fenómeno de inundación según los mapas obtenidos se presenta en general sobre áreas de cultivos en mosaicos de maíz, yuca y plátano en su mayoría; de acuerdo a lo mencionado anteriormente, la literatura recomienda una estrategia más sencilla de implementar, dentro de las que se destacan las geomantas reforzadas que permiten mitigar los efectos erosivos ocasionados por este tipo de eventos, al reducir las velocidades del flujo y de proteger la superficie del suelo que revisten del impacto de lluvia (Fracassi, 2019). En los proyectos realizados a largo plazo mejora las condiciones ambientales de la zona en estudio debido a que permite el crecimiento de la vegetación que se entrelaza en los filamentos de la geomanta y le permite tener mayor resistencia a la fuerza de la corriente que tiende a arrancarlas del suelo, como se observa en la Figura 23 (Fracassi, 2019).

Figura 23.

Geomantas de refuerzo metálico.



Nota. Vista en corte de protección con geomanta metálica de tipo MasMat R1. Adaptado de Fracassi (2019).

7.3.2.2. Colchones Reno (bioingeniería). Existen otro tipo de estructuras que garantizarían una mitigación mayor contra el fenómeno de socavación que se presenta sobre la banca derecha del río Ariari; por ejemplo, los colchones Reno también son usados como plataformas contra la socavación ya que permiten la adición de obras como la siembra de vegetación endémica (cañas o arbustos) en su interior. La vegetación al crecer, disminuirá la velocidad del cauce y, por consiguiente, su fuerza de arrastre y la cantidad de material transportado como se ilustra en la Figura 24.

Figura 24.

Colchones reno.



Nota. (A) Vegetación plantada en un colchón Reno en Bolivia y (B) su detalle. Adaptado de Por Fracassi (2019).

8. Impacto social y humanístico

La generación de los mapas de amenaza por inundación trae consigo un beneficio para los habitantes de la vereda La Playa, dejando como resultado en el área de estudio la identificación de zonas bajo amenaza a este tipo de fenómenos, los cuales al pasar los años se vuelven más frecuentes y generan cada vez un mayor impacto negativo en las actividades socioeconómicas de la población.

Del mismo modo, con la ejecución de estos modelos también se logra beneficiar a las entidades públicas encargadas de brindar control y asistencia a la comunidad, como: la alcaldía del municipio de Granada (planes de desarrollo del municipio), la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres y la Corporación para el Desarrollo Sostenible del área de Manejo Especial La Macarena. Esto al considerar que el buen uso de la información presentada permitirá tomar acciones y realizar estrategias de mitigación con base en las posibles consecuencias ocasionadas por las inundaciones en sus diferentes periodos de retorno.

En esa misma línea, la presente investigación está a favor del cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible que buscan proporcionar bienestar, salud y reducción de la desigualdad, debido a que han quedado registrados numerosos eventos de avenidas torrenciales que además de generar pérdidas económicas en predios de uso agrícola, en viviendas ubicadas dentro de la ronda hídrica de los cuerpos de agua, también se han visto afectados los servicios de saneamiento básico; por consiguiente, con la ejecución de las estrategias de mitigación planteadas en el estudio se podría dar solución a los impactos que se están generando en la actualidad y lograr prever situaciones adversas que se puedan presentar en los próximos años.

La ejecución del software HEC-RAS en su aproximación a la realidad, puede servir como referencia para investigaciones posteriores que se deseen implementar simulaciones de otro tipo, como de calidad de agua o transporte de sedimentos sobre la zona de estudio o en cuerpos de agua con características hidráulicas similares, y de este modo hacer más interactivo y visual el comportamiento de los fluidos, generando a su vez un mayor interés en la producción investigativa del recurso hídrico del país.

9. Conclusiones

- Dentro de las limitaciones que intervinieron en la ejecución del modelo se destacó la conformación del río Ariari, pues al ser un cauce trenzado o entrelazado, no permite establecer un canal principal del río.
- La selección de la condición de borde es una de las variables que más influye en los resultados del modelo; para la presente investigación el cálculo de la pendiente se realizó por medio de las elevaciones medidas en campo con el GPS y las registradas en el DEM utilizado, ya que no se contaba con información como el nivel del cauce, una curva de calificación o un hidrograma de escenarios.
- Las obras hidráulicas como medidas de mitigación en ríos donde se realiza extracción de material de arrastre y los caudales superan los 2000m³/s no son efectivas, por esta razón, se proponen medidas de tipo no estructural como la ampliación de la red hidrometeorológica y el sistema de alerta temprana comunitario.
- Los datos de la velocidad media del flujo obtenidos en el modelo 1D se encuentran aproximados a la realidad encontrada en la literatura, es importante destacar que los cursos de agua naturales con pendiente suave, caudal medio y conformados por arenas y grava suelen presentar valores de velocidades inferiores a 1 m/s.
- El área de estudio modelada se encuentra justamente en la desembocadura de la cuenca alta el río Ariari donde se encuentran las pendientes más pronunciadas de toda la hoya hidrográfica conformadas por las zonas de piedemonte, por esta razón todos los afluentes ubicados en la cuenca alta del río Ariari convergen sus aguas en este punto, haciendo que el cálculo del caudal máximo para cada periodo fluctuara considerablemente, en especial mediante el método de lluvia escorrentía del modelo bidimensional.

10. Recomendaciones

- A pesar de que el resultado de porcentaje de amenaza por inundación para el periodo de retorno de cinco años es acorde a la realidad, se recomienda ampliar la distancia del levantamiento batimétrico de acuerdo a lo establecido en la Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de Rondas Hídricas en Colombia del MADS, en donde se propone levantar secciones en una longitud como mínimo 10 veces mayor al ancho medio del flujo para estimar con precisión el nivel de trenzamiento del cauce (Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).
- La presente investigación detalla información que permite realizar a futuro otro tipo de estudios que pueden abarcar temas de modelación de sedimentos, gestión del riesgo en el municipio de granada o la implementación de estrategias de tipo estructural (Bioingeniería) y no estructural para la zona de estudio.
- En la identificación de áreas de inundación de los modelos 1D y 2D, se evidenciaron afectaciones sobre predios que desarrollan actividades agrícolas como sustento económico de los habitantes de la vereda, especialmente en la sección aguas abajo, razón por la cual, se recomienda evitar en la medida el desarrollo agrícola sobre la ribera del cauce, o implementar cultivos transitorios típicos de la región (maíz, sorgo, arroz) para mitigar las pérdidas económicas por inundaciones.
- Mediante el método lluvia escorrentía desarrollado en el modelo HEC-HMS, se determinó el hidrograma de crecida de la cuenca alta Ariari con un caudal pico de 4961.5 m³/s. Sin embargo, se recomienda ajustar el modelo a partir de parámetros como el coeficiente de impermeabilidad de las subcuencas y el método de transito de avenidas de Muskingum para obtener un caudal más acorde a la realidad.
- Se recomienda realizar jornadas de comunicación y capacitación a la comunidad de la vereda La Playa en relación al uso de suelo. Esto teniendo en cuenta que la mayoría de las actividades socioeconómicas de la comunidad dependen de la agricultura, la cual se está realizando sobre la ronda hídrica del cauce y genera desestabilización de los mismos.

11. Referencias bibliográficas

- Agencia Nacional de Minería . (2018). *Informe de Gestión* .
https://www.anm.gov.co/sites/default/files/informe_de_gestion_segundo_trimestre_2018.pdf
- Alcaldía Municipal de Granada Meta. (2016). *Plan de Desarrollo Municipal "Granada Cultivando desarrollo"*.
<https://economiaregional.co/wp-content/uploads/2020/05/Plan-de-Desarrollo-Granada.pdf>
- Alcaldía Municipal de Granada Meta. (2020). *Plan de Desarrollo Municipal "Por una Granada unida y próspera"*.
<https://www.granada-meta.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionControl/PDT%202020-2023%20Por%20una%20Granada%20Unida%20y%20Pr%C3%B3spera.pdf>
- Amaris Castro, G., Guerrero Barbosa, T. E., & Sanchez Ortiz, E. A. (2014). Performance of the Saint Venant equations in 1D and approaches to different conditions in steady and variable state. *Tecnura*, 19(45), 75-87. <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v19n45/v19n45a06.pdf>
- Banco Mundial . (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia* .
<https://documents1.worldbank.org/curated/en/671321468026993367/pdf/701030ESW0P1290ESTION0DELORIESGOweb.pdf>
- Camino, M., Bó, M. J., Cionchi, J., Armentia, A., Río, J., & Marco, S. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1).
- Chilito Rincón, E. A. (2018). Definición de zonas de inundación mediante el uso del modelo de simulación hec-ras en un tramo de caño grande, barrio el Rubí – Villavicencio. [*Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás*]. Repositorio.
<https://repository.usta.edu.co/handle/11634/12080>
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- Consejo Municipal de Granada Meta. (30 de julio de 2015). Acuerdo No. 020 de 2015. *Por medio del cual se modifican excepcionalmente las normas urbanísticas del plan básico de ordenamiento territorial del municipio de Granada - Meta adoptado mediante acuerdo No 014 del 2011*.
<https://www.granada->

- meta.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionyControl/Acuerdo%20N%C2%B0%20020%20de%202015.pdf
- Consorcio Río Garagoa. (2017). *Actualización POMCA Río Garagoa*.
<https://www.car.gov.co/uploads/files/5c1a9fcf99956.pdf>
- Cormacarena. (2018). *Caracterización de las condiciones del riesgo*. POMCA cuenca alta del río Ariari:
<file:///C:/Users/Andres/Downloads/CAPITULO%2022.%20CARACTERIZACION%20DE%20LAS%20CONDICIONES%20DEL%20RIESGO%20AA%20VERSION%203.pdf>
- Corpoguaajira. (2011). *Diseño de un sistema de alerta temprana por inundación y deslizamiento en el flanco nororiental de la sierra nevada de Santa Marta – Departamento de la Guajira*.
http://www.corpoguaajira.gov.co/web/attachments_Joom/category/105/SAT.pdf
- Corponor. (2009). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Zulía*.
https://corponor.gov.co/publica_recursos/pomca/zulia/POMCH_COMPLETO-RIO_ZULIA.pdf
- Cristo García, J. P., & Cruz Rodríguez, O. (2019). Evaluación de la vulnerabilidad frente a la amenaza por inundación en los predios ubicados en la margen del Río Ariari en la vereda La Camachera del municipio de San Martín - Meta. *[Trabajo de grado, Universidad Católica de Manizales]*. Repositorio. <https://repositorio.ucm.edu.co/handle/10839/2493>
- Díaz Cordero, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, 37(2), 227-240.
<https://www.redalyc.org/pdf/870/87024179004.pdf>
- Duran Torres, L. A., & Echeverría Vivas, E. H. (2018). Instrumentación hidrometeorológica de la ciudad de Tunja, cuencas ríos Jordán, la Vega y Chulo. *[Trabajo de Investigación, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC)]*. Repositorio. https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2566/1/TGT_1162.pdf
- Fracassi, G. (2019). *Defensas ribereñas con gaviones y geosintéticos*. Ediciones de la U.
- Gobernación del Meta. (2018). Plan departamental para la gestión del riesgo de desastres departamento del Meta. Unidad Departamental de Gestión del Riesgo de Desastre (UNGRD). <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/28951>
- Gómez Urrego, K. M., & Hernández Cantor, N. A. (2016). Análisis espacial de la vulnerabilidad física y social a las inundaciones en la cuenca media del río Guayuriba, departamento del

- Meta. [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/2612>
- González Velandia, J. C. (2014). La gestión del riesgo de desastres en las inundaciones de Colombia: una mirada crítica. [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio. https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2128/1/Gesti%C3%B3n_riesgo_desastres_inundaciones_%20Colombia_mirada-cr%C3%ADtica.pdf
- Hunegnaw, D., & Arega, M. (2020). Flood vulnerability assessment using GIS at Fetam watershed, upper Abbay basin, Ethiopia. *Heliyon*, 7(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05865>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2017). *Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación*. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA_METODOLOGICA_MAPAS_INUNDACION_MARZO_2018.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2018). *Estudio Nacional del Agua*. <http://www.ideam.gov.co/documents/24277/76321271/Cartilla+ENA+2018+WEB+actualizada.pdf/ba353c39-b15d-4a76-8ed4-3814c4c35239>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2018). *Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica*. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.pdf
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2021). *Guía para el emplazamiento de las estaciones meteorológicas convencionales*. <http://sgi.ideam.gov.co/documents/412030/561097/M-GDI-M-G006+Gu%C3%ADa+para+el+emplazamiento+de+las+estaciones+V1/db5a31c3-79a2-4fce-884a-905751fbd8b2?version=1.0>
- Khalfallah, C., & Saidi, S. (2018). Spatiotemporal floodplain mapping and prediction using HEC-RAS - GIS tools: Case of the Mejerda river, Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 142, 44-51. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1464343X18300566>

- López, J. L. (2005). Estrategias de mitigación y control de inundaciones y aludes torrenciales en el Estado Vargas y en el Valle de Caracas: situación actual y perspectivas futuras. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 20(4), 61-73. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652005000400006&lng=es&tlng=es.
- Mamani Gómez, J. A. (2021). Determinación de caudales máximos de diseño mediante métodos convencionales probabilísticos en la subcuenca Ayaviri, Puno – 2020. [Trabajo de grado, Universidad César Vallejo]. Repositorio. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/59788/Mamani_GJA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia*. http://www.andi.com.co/Uploads/GuiaRondasHid_criteriosdeacotamiento.pdf
- Monsalve Saenz, G. (1999). *Hidrología en la Ingeniería*. Alfaomega.
- Mora Mariño, W., & Ochoa Guerrero, R. G. (2016). Modelamiento de zonas de inundación por medio de las herramientas HEC-RAS, GEO-RAS y ARCGIS, para el sector comprendido entre los municipios de Corrales - Paz del Rio a lo largo del Río Chicamocha, en el departamento de Boyacá. [Trabajo de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. Repositorio. <http://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1677>
- Moya Quiroga, V., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (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 - Revista Iberoamericana del agua*, 3(1), 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.12.001>
- Ntanganedzeni, B., & Nobert, J. (2021). Flood risk assessment in Luvuvhu river, Limpopo province, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 124(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102959>
- Ochoa, T. R. (2011). *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos*. Ecoe Ediciones.
- Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR). (2015). *The Human Cost Of Weather Related Disasters*. https://www.unisdr.org/files/46796_cop21weatherdisastersreport2015.pdf

- Ospina Garcia, M. J., & Mancipe Gironza, J. S. (2016). Estudio Morfométrico y estimación de caudal por medio del método racional para la creciente de la quebrada Canauchita hasta la desembocadura en el río Chirche del municipio de Otanche en el departamento de Boyacá. *[Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]*. Repositorio. <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/2562/3/MancipeGironzaJuanSebastian2%20016.pdf>
- Peña Guzmán, C., Alvarino, N., Mora, C., & Mesa, D. (2016). Determinación De Áreas De Inundación En El Municipio De Chia- Colombia Mediante Hec-Ras En La Cuenca Baja Del Río Frio. *European Scientific Journal*, 12(5), 386-392. <https://ejournal.org/index.php/esj/article/view/7037/6760>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2012). Conceptos Generales sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Contexto del País. *Experiencias y Herramientas de aplicación a nivel regional y local*. https://www.preventionweb.net/files/38050_38050conceptosbsicos.pdf
- Rodríguez , E. A., González , R. A., Medina, M. P., Pardo, Y. A., & Santos, A. C. (10 de Octubre de 2007). Propuesta metodológica para la generación de mapas de inundación y clasificación de zonas de amenaza. Caso de estudio en la parte baja del río Las Ceibas (Neiva-Huila). *Avances en Recursos Hidráulicos*(16), 65-78. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/23883/9314-15860-1-PB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez Bermúdez , P. A. (2018). Evaluación de la vulnerabilidad social y riesgo ambiental de los habitantes del barrio las Gaviotas del municipio de Villavicencio, frente a la amenaza natural que representa la cercanía al río Ocoa. *[Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]*. Repositorio. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/13648>
- Unidad Departamental de Gestión del Riesgo de Desastre (UNGRD); Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2016). *Plan nacional de adaptación al cambio climático*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Ambiente/PNACC%202016%20linea%20accion%20prioritarias.pdf>
- US Army Corps of Engineers. (Febrero de 2016). *HEC-RAS River Analysis System*. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>

Yang, Z., & Knebl, M. R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75(4), 325-336.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.024>

Anexos

Anexo 1. Descripción de los procesos metodológicos de las fases 1,2 y 3 de la investigación.

Fase 1. Diagnóstico de la cuenca alta del río Ariari y obtención de información del área de estudio.

Recolección de información para el modelo 1D

Levantamiento batimétrico. El levantamiento batimétrico de la zona de estudio se llevó a cabo con los equipos solicitados ante la USTA Villavicencio, entre estos se utilizaron decámetros, jalones, una mira topográfica, una cuerda con divisiones cada 50 metros, un GPS, y un molinete hidráulico. Además, se procedió a contratar el servicio de un guía de la vereda La Playa, considerando que era necesario el uso de una embarcación para realizar el levantamiento batimétrico y una persona con mayor conocimiento de la dinámica fluvial del cauce.

La batimetría se realizó dividiendo la longitud del cauce cada 100 metros hasta medir un (1) kilómetro de distancia para un total de diez (10) secciones transversales; las secciones transversales se segmentaron cada 50 metros con ayuda de la cuerda hasta el borde de ambas orillas del río, también se registraron los datos de velocidad del flujo en los puntos donde había lámina de agua y su respectiva profundidad. Finalmente, se georreferenciaron los puntos mientras se medía la altura del terreno con ayuda de la mira topográfica en cada división de la sección trasversal, permitiendo obtener la altura máxima de la sección transversal aguas arriba y la altura mínima de la sección transversal aguas abajo.

Cálculo de caudales método de Gumbel y transposición de caudales

Método Gumbel. Para la aplicación de la distribución de Gumbel en la presente investigación se descargaron los datos de la estación limnimétrica “Puerto Rico” ubicada en el municipio de Puerto Rico, Meta; la cual nos permitió obtener una muestra de 20 años (n), con los registros de caudales máximos anuales para una serie de tiempo desde el año 2000 al año 2019.

Una vez recolectada la información, se procedió a calcular el promedio de los caudales máximos de la serie de tiempo de 20 años de la estación limnimétrica; el caudal hallado se procede a ingresar en la ecuación (7), la cual permitió hallar el caudal de diseño de cada periodo de retorno.

$$Q_{max} = Q_m - \frac{\sigma Q}{\sigma N} (\hat{Y}_n - LnT) \text{ Ecuación (7)}$$

$Q_{máx}$ = Caudal máximo para el periodo de retorno establecido (m³/s)

Q_m = Promedio de caudales (m³/s)

σQ = Desviación estándar de los caudales

σN = Constante en función de n.

$\hat{Y}_n$ = Constante en función de n. T= Periodo de retorno(años).

Una vez obtenidos estos valores de caudal, se procedió a calcular el intervalo de confianza para cada periodo de retorno de la presente investigación a partir de las siguientes ecuaciones.

$$\emptyset = 1 - \frac{1}{T} \text{ Ecuación 8}$$

Para los datos de $\emptyset$ mayores a 0.9, se calculó la variación de caudal mediante la siguiente formula:

$$\Delta Q = \pm 1.14 * \frac{\sigma Q}{\sigma N} \text{ Ecuación 9}$$

De lo contrario para datos de $\emptyset$ menores a 0.9 (5 años) se calcularon con la siguiente formula:

$$\Delta Q = \pm \sqrt{N\alpha\sigma_m} \frac{\sigma Q}{\sigma_N \sqrt{N}} \text{ Ecuación 10}$$

Estos intervalos de confianza se calculan con la finalidad de establecer los rangos superiores e inferiores del caudal de diseño real de cada periodo de retorno (Mamani Gómez, 2021).

Transposición de caudales. Para la transposición de datos de caudal, se tomaron los datos hallados mediante los rangos superiores e inferiores de los caudales de diseño real de la metodología de Gumbel. Estos datos se aplicaron para la relación de áreas de drenaje de la siguiente manera:

$$Qsp = Qeh * \left(\frac{Asp}{Aeh} \right)^x \quad \text{Ecuación 11}$$

Qsp: Caudal en el sitio de proyecto, en metros cúbicos por segundo (m³/s).

Qeh: Caudal en la estación limnimétrica (m³/s).

Asp: Área de la cuenca hidrográfica hasta el sitio de proyecto (Km²).

Aeh: Área de la cuenca hidrográfica hasta la estación Puerto Rico (Km²).

X: Es un exponente que normalmente varía en un rango de 0.5 a 0.75, por falta de datos en la investigación se procedió a tomar el valor más común de 0.5.

Recolección de información para el modelo 2D

Modelo de elevación digital. A través de la página Earth Explorer se realizó la descarga del modelo de elevación digital de la cuenca del río Ariari haciendo uso del satélite Alos Palsar, debido a que la información raster que suministraba permitía una mayor resolución (12.5 metros) del terreno. El modelo de elevación digital se descargó con la finalidad de realizar la delimitación de la Subzona hidrográfica del río Ariari, especialmente de la zona alta de la cuenca, considerando que el área de estudio se estableció al interior de esta.

Delimitación de la zona alta de la cuenca del río Ariari. Para la delimitación de la zona alta de la cuenca del río Ariari se hizo uso de la extensión HecGeo- HMS del software Arcgis, considerando que a través de esta extensión se estableció el modelo hidrológico a correr en el software HEC-HMS 4.9. La delimitación se realizó mediante las siguientes herramientas:

Preprocessing: Se ingresó el modelo de elevación digital (DEM) descargado de Earth Data a través del satélite ALOS PALSAR al Arcmap 10.4.1 para iniciar su preprocesamiento mediante la herramienta Preprocessing de la extensión HecGeo-HMS (Figura 25). Esta herramienta permitió derivar la red de drenaje mediante los siguientes pasos:

Figura 25. Barra de herramientas.



Nota. Barra de herramientas de la extensión HecGeo-HMS. Por Díaz y Reyes (2022).

- 1) Fill sinks
- 2) Flow Direction

- 3) Flow accumulation
- 4) Stream definition
- 5) Stream segmentation
- 6) Catchment grid delineation
- 7) Catchment polygon processing
- 8) Drainage line processing

Project setup: Una vez terminados los procesos en la herramienta Preprocessing, se creó mediante la herramienta Project Setup (Star New Project) un nuevo proyecto para establecer el punto de control de la salida aguas abajo de la cuenca, el cual se definió como el punto de delimitación de la zona alta de la cuenca del río Ariari. La herramienta Project Setup extrae la data creada en la herramienta preprocessing para delimitar el área de drenaje aguas arriba de la cuenca.

Seguidamente en la herramienta Project Setup se dio click sobre Generate Project para dar inicio a la delimitación de la zona alta de la cuenca. Esta función permitió visualizar nuevamente la data creada para confirmar las capas que se usaron para delimitar el área de la cuenca.

Número de curva (mapas de cobertura y uso del suelo). Se realizó la búsqueda de los archivos shapefile de cobertura vegetal (Nacional) en el IDEAM y de tipo y uso de suelo del departamento del Meta en el IGAC para extraer mediante el software Arcgis 10.4.1 la información de la subzona hidrográfica del río Ariari. Esta data se descargó con la finalidad de desarrollar la metodología del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS) para estimar las pérdidas de los modelos lluvia escorrentía como HEC-HMS mediante el número de curva.

Cálculo de caudales método lluvia escorrentía (modelo 2D)

Curvas IDF (método simplificado). El procedimiento realizado en la presente investigación para el cálculo de las curvas de intensidad, duración y frecuencia se realizó bajo el método simplificado, ya que no se logró disponer de datos pluviográficos históricos de corta duración. Previo a solicitar los datos ante el IDEAM se procedió a verificar en el software Arcgis 10.4.1 (ArcMap) la influencia de las estaciones más cercanas al punto de control en la zona de estudio, por ende, se hizo la solicitud de los datos de precipitación de la estación “Mesa de Yamanes” ubicada en el municipio de El Castillo, Meta. Esta estación pluviométrica se seleccionó

puesto que tenía los registros más representativos de lluvia al tener las series de tiempo diarias completas desde el año 2005 al año 2020.

Se decidió calcular los datos de intensidad con los registros de precipitación máxima promedio anual en 24 horas, dado que es la que se propone para los estudios y es la más sencilla de emplear. La ecuación empleada está dada por:

$$i = \frac{a * T^b * M^d}{(t/60)^c} \quad \text{Ecuación 12}$$

i: Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).

T: Periodo de retorno, en años.

M: Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual.

a,b,c,d: Parámetros de ajuste de la regresión. Los valores de estos coeficientes son seleccionados para la región Orinoquía según la Tabla 16.

Tabla 16.

Constantes para ecuación de curvas IDF.

Región	a	b	c	d
Andira (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe(R2)	24.85	0.22	0.5	0.1
Pacífico(R3)	13.92	0.19	0.58	0.2
Orinoquía(R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

Nota. Constantes para ecuación de curvas IDF de la región Orinoquia. Adaptado de INVIAS (2009).

Hietograma de precipitación. Al obtener los datos de precipitación máxima a través de las curvas IDF para el periodo de retorno de cinco (5) años, se procedió a graficar el hietograma correspondiente mediante el método de bloques alternos, el cual se basó en los siguientes pasos:

- 1). se calculó la profundidad acumulada (mm) para cada intervalo de tiempo (10 minutos).
- 2). la profundidad incremental (mm).
- 3). se realizó el grafico del hietograma, el cual se estableció mediante los datos obtenidos en la profundidad incremental, dejando el valor máximo en el centro y alternando los demás datos de abajo hacia arriba.

Hidrograma de Crecida en HEC-HMS. Se realizó la esquematización del modelo hidrológico de la cuenca del río Ariari a través de la extensión HecGeo – HMS, el cual posteriormente se exportó al software HEC-HMS 4.9 para realizar la respectiva simulación de los datos obtenidos en la extensión, se procedió a importar dicha información desde la casilla Open File del software HMS. Se completó la información de las series de tiempo de acuerdo al hietograma de precipitación calculado para el periodo de retorno de cinco años y se dio inicio a la simulación del modelo.

Para la obtención del hidrograma de crecida en HEC-HMS, fue necesario importar los datos obtenidos en el proceso anterior mediante el software ArcGis, de esta manera se continuó con la construcción del modelo hidrológico a simular para hallar el hidrograma de crecida del periodo de retorno de cinco años.

Una vez importados los datos, se inició a completar la información correspondiente a las series de tiempo las subcuencas, en donde se ingresaba el hietograma de precipitación obtenido mediante las curvas IDF. Finalmente, se dio inicio a la simulación del modelo mediante la función Simulation Run y se obtuvo el hietograma de precipitación para el periodo de retorno de cinco años.

Diagnóstico morfométrico de la cuenca alta del río Ariari.

Área y perímetro de la cuenca. Para calcular el área y el perímetro de la zona alta de la cuenca se utilizó la delimitación realizada a través de la extensión HecGeo – HMS. Estos parámetros se calcularon mediante el software Arcgis, específicamente mediante la función Calculate Geometry, la cual permitió hallar el área y el perímetro en unidades de km² y km respectivamente.

Índice de Gravelius (Kc). El índice de Gravelius se calculó mediante la relación entre el perímetro y la longitud de una circunferencia de área semejante a la de la cuenca. Este parámetro se estimó con la siguiente ecuación:

$$Kc = 0.28 \frac{P}{A^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Ecuación 13}$$

En donde,

A = área de la cuenca en km²

P = perímetro de la cuenca en km.

La forma de la cuenca permitió determinar el grado de peligrosidad a las crecidas. Cuando una cuenca tiene un (Kc) cercano a uno, quiere decir que es de forma redonda, lo que indica un grado más alto de peligrosidad por crecientes y las cuencas con (Kc) mayor a 1,75 indican que son alargadas y menos propensas a peligrosidad por crecidas.

Factor de forma (Kf). Para el cálculo de factor de forma de Horton se relacionaron los parámetros del área y la longitud axial de la cuenca mediante la siguiente ecuación:

$$kf = \frac{A}{L^2} \quad 14$$

En donde,

A = área en km²

L = Longitud axial de la cuenca en km

El factor de forma de Horton se calculó para estimar que tan propensa era la cuenca a las crecientes de acuerdo a su geología y fisiografía, considerando que estos son de suma importancia para definir la forma de las cuencas hidrográficas.

Sinuosidad del cauce. La sinuosidad del cauce se estimó con la finalidad de conocer la medida de la velocidad de la esorrentía a lo largo del curso de agua. Este parámetro se calculó mediante la relación de los parámetros de longitud del cauce principal de la cuenca y su longitud del valle, teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$S = \frac{L}{Lt} \text{ (adimensional)} \quad 15$$

En donde,

L = Longitud del cauce principal km

Lt = Longitud del valle del cauce principal km

Pendiente media. Se identificó que la elevación máxima del curso de agua fue de 2563 m.s.n.m. y la elevación más baja fue de 342 m.s.n.m. Para el cálculo de la pendiente media se empleó el método de valores extremos, el cual consistió en calcular la diferencia entre la cota más alta y la más baja, sobre la longitud del cauce principal.

Tiempo de concentración (T_c). El tiempo de concentración de la cuenca se calculó a partir de la fórmula de Vente Chow, en la que se relaciona la pendiente media del cauce principal y su longitud.

Fase 2. Elaboración de mapas de amenaza por inundación

Se procedió hacer uso de la herramienta RAS Mapper la cual nos permite ingresar shapefiles u otro tipo de archivos que nos ayudaron a definir la ubicación de la zona de estudio; entre ellos se ingresó un shapefile de tipo puntos con las coordenadas obtenidas en campo a través del GPS, también se ingresó un shapefile con la información de cuerpos de agua delimitadas para la cuenca del río Ariari y el modelo de elevación digital (DEM) descargado de la página web ALOS PALSAR, con tamaño de celda de 12.5 por 12.5. Al introducir este terreno en la proyección del RAS Mapper, automáticamente por defecto el programa adoptó los sistemas de proyecciones y datos de georreferenciación que tenga este archivo de tipo raster.

Diseño de modelo 1D de flujo estacionario. Se procedió a través de la barra de herramientas del RAS Mapper a crear un nuevo terreno de formato TIN (Triangulated irregular network) que nos permitió simular todos los datos previamente medidos y calculados sobre un terreno reconocido por el software, permitiendo que la simulación fuera más precisa al ejecutar los procesos con información de elevaciones más detallada.

Después de georreferenciar en HEC-RAS la ubicación de nuestra zona de interés, se procede a definir la geometría del proyecto ingresando los datos obtenidos mediante las batimetrías tomadas en campo; los parámetros más importantes a tener en cuenta dentro de las secciones transversales son las elevaciones de cada estación, los coeficientes de Manning en ambos bordes (LOB, ROB) como del canal principal del río Ariari y no menos importante definir cuales serán las bancas del cauce principal.

Una vez definida la geometría del área de estudio se procedió a ingresar los datos de caudales para los distintos periodos de retorno a calcular (5, 10, 25, 50 y 100 años) mediante un flujo estacionario. Este módulo de HEC-RAS está programado para calcular los distintos perfiles de superficie de agua para un caudal constante gradualmente variado (Khalfallah & Saidi, 2018).

Se procedió a ingresar los caudales calculados mediante el método de Gumbel para valores máximos en los distintos periodos de retorno obtenidos de la estación limnimétrica de Puerto Rico, consecuentemente se hizo un ajuste de estos datos mediante el método de transposición de datos de caudal, el cual nos permitió ajustar con mayor precisión la cantidad de agua que circula a través del punto de control.

Por último, se configuró las condiciones de borde del tramo de estudio. Para este estudio únicamente fue necesario ingresar esta condición aguas abajo del río Ariari teniendo en cuenta que el tipo de flujo de este río es subcrítico; por esta razón los cuatro tipos de condiciones de borde que el software permitió ingresar son:

- 1). Conocer la elevación de la superficie de agua
- 2). Profundidad crítica
- 3). Profundidad normal
- 4). Curva de calificación (US Army Corps of Engineers, 2016).

Diseño de modelo 2D flujo no estacionario. Se procedió a través de la barra de herramientas del RAS Mapper a crear un nuevo terreno de formato TIN (Triangulated irregular network), tal cual se especificó en el proceso de modelación 1D. No obstante, una vez finalizada la creación del terreno, se diseñó la geometría del área de estudio, la cual, se estableció a través de la función 2D Flow Área; la secuencia para la elaboración de mapas del modelo 2D se realizó de la siguiente manera:

1). 2D Flow Área: Delimitación del área de estudio mediante la creación de la malla computacional. Tamaño de celda 10 por 10.

2). SA/2Darea BC Lines: se procedió a definir las condiciones de borde del área, en donde se especificaron los tramos del río Ariari como cauce principal, el río La Cal como tributario y una tercera condición de borde denominada Aguas Abajo.

3). Unsteady Flow Data: se especificaron los parámetros de Flow Hydrograph para el tramo del río Ariari como cauce principal y el tramo del río la cal como tributario; para la condición de borde aguas abajo se definió el parámetro de Normal Depth.; el hidrograma usado el flujo estacionario fue el obtenido a través del software HEC-HMS 4.9 para un periodo de retorno de cinco años.

4). Run Unsteady Flow Analysis: en donde se creó el plan y se especificaron los datos a correr y de salida en la simulación.

5). Computation Interval: se definió mediante el cálculo del número de Courant.

$$Cr = Vw \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1.0 \quad \text{Ecuación 16}$$

En donde, Cr = Courant, el cual se define como uno (1) de manera opcional para hallar el Δt (computation Interval), Vw = Velocidad de las olas de inundación, generalmente mayor a la velocidad media del flujo y Δx = Distancia entre secciones

Una vez se definieron los parámetros de computación, se procedió a correr el modelo mediante la función Compute. Los resultados de la simulación se observaron en el Ras Mapper, en donde se identificaron las profundidades y velocidades obtenidas en un flujo no estacionario para un periodo de retorno de cinco años.

Calibración por medio del coeficiente de rugosidad de Manning (n). Existen distintos procesos para la estimación del coeficiente de rugosidad superficial, en la presente investigación se decidió realizar la calibración del modelo a partir de la ecuación desarrollada por Cowan, la cual reconoce varios factores principales que inciden en el aumento o disminución de la rugosidad; la solución de esta ecuación depende de factores como: el material en suspensión (rugosidad en la superficie), la irregularidad en el canal, la vegetación, el alineamiento del canal, las obstrucciones, el tamaño y la forma del canal (Chow, 1959).

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5 \quad \text{Ecuación 17.}$$

La calibración se realizó específicamente por medio de la variable observada n_0 , variable que representa el material involucrado en el cauce, el cual se determinó gracias los estudios de granulometría desarrollados por la empresa “Serviriari ingeniería SAS” encargada de explotar el material de arrastre del área de estudio; permitiendo de esta manera clasificar el material sedimentado con mayor porcentaje y peso retenido en los tamizajes realizados por la empresa en mención. La condición de cada variable perteneciente a la ecuación 17 se encuentra detalladamente en la Tabla 17.

Tabla 17.*Valores para estimar el coeficiente de Manning.*

Condiciones del canal		Valores	
Material involucrado	Tierra	n_0	0,020
	Corte de roca		0,025
	Grava fina		0,024
	Grava gruesa		0,028
Grado de irregularidad	Suave	n_1	0,000
	Menor		0,005
	Moderado		0,010
	Severo		0,020
Variaciones de la sección transversal del canal	Gradual	n_2	0,000
	Alternando ocasionalmente		0,005
	Alternando frecuentemente		0,010-0,015
	Despreciable		0,000
Efecto relativo de las obstrucciones	Menor	n_3	0,010-0,015
	Apreciable		0,020-0,030
	Severa		0,040-0,060
	Baja		0,005-0,010
Vegetación	Media	n_4	0,010-0,025
	Alta		0,025-0,050
	Muy alta		0,050-0,100
	Menor		1,000
Grado de meandro	Apreciable	m_5	1,150
	Severa		1,300

Nota. Valores para estimar el coeficiente de Manning mediante el método de Cowan. Adaptado de Chow (1959).

Para la estimación del coeficiente de rugosidad en el río Ariari, el valor de las variables restantes de la ecuación 17 fueron seleccionadas a criterio de los modeladores por medio del reconocimiento del área de estudio durante la jornada de campo realizada. Realmente, el valor de “n” es altamente variable y puede depender de otros factores aparte de los ya mencionados; como el cambio de temporada (lluvia, sequía), la sedimentación y la socavación.

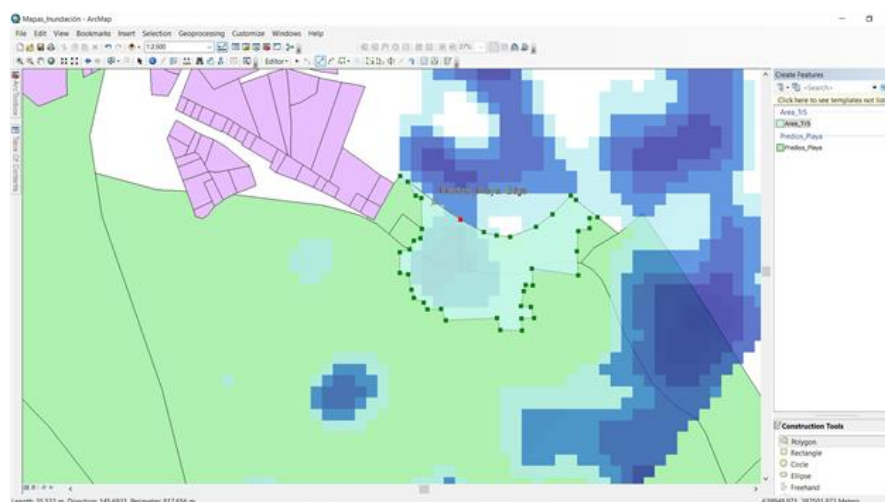
Generación de mapas de amenaza por inundación de las simulaciones 1D y 2D. Al realizar las simulaciones respectivas de los modelos 1D y 2D para los diferentes periodos de retorno, se continuo con la generación de los mapas de amenaza por inundación del tramo del río Ariari estudiado en la vereda La Playa.

Para la generación de los mapas se realizó la exportación de los datos del HEC-RAS 5.07 al Arcgis, en donde a partir de los resultados de Depht (profundidad de la mancha de inundación) se diseñó la cartografía correspondiente a la metodología de mapas de amenaza por inundación según el IDEAM.

Análisis de los resultados del modelo 1D y 2D para los diferentes periodos de retorno. Al generar los mapas de amenaza por inundación, se logró identificar los predios en los que se presentan inundaciones para los periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años del modelo 1D y para el periodo de 5 años del modelo 2D; de esta manera, se estimaron los porcentajes de inundación de cada uno, a través del software ArcGis. Esta estimación se realizó mediante el cálculo del área de la zona de estudio comprendida entre el tramo del río Ariari y el casco urbano de la vereda La Playa.

Figura 26.

Metodología del cálculo de polígonos de inundación.



Nota. Creación de polígonos en ArcGis para identificar la extensión del área de inundación. Por Díaz y Reyes (2022).

Anexo 2. Coordenadas geográficas del levantamiento batimétrico y sus secciones transversales

Figura 27.

Imágenes de puntos geográficos para la construcción de las secciones transversales



Nota. Datos recopilados en campo para el diseño de las secciones transversales. Por Díaz y Reyes (2022).

Figura 28.

Secciones transversales levantadas en campo.

CARTERA - COTAS DE ELEVACIÓN (MSNM - SUBDIVISIONES DE CADA SECCIÓN TRANSVERSAL)																
Sección transversal	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
ST10	321	316	313	313	318	319	320	322	321	320	321					
ST09	320.5	317	316	312	313	318	319.5	321	320.5	321						
ST08	320	317.5	315	311	314	317	318	320	319.5	320.5						
ST07	319.7	315.5	312	316	317.3	318.5	320	320.5	318.6	319.5						
ST06	319.3	314	310.4	311.5	315	316.5	317.7	318.3	320.3	321	318.3	318	319.3			
ST05	318.8	313.6	310	310.7	314	315.7	316	317	318							
ST04	318.5	314	310.2	311	313.3	315	316.6	317	317.7	319.5						
ST03	318.3	313.7	311	312	315	314.3	315.2	316	315.8	319						
ST02	318.7	312.8	310.7	311.5	314	316	316.7	315.4	316	317.3	318	319.3	319	318	319	320.3
ST01	318	314	313	310	311	310.7	311.4	315	316	316	317.5	319	318	317	318	

Nota. Cartera de levantamiento batimétrico realizado en campo de las secciones transversales. Por Díaz y Reyes (2022).

Anexo 3. Series de tiempo anuales de la estación Puerto Rico**Tabla 18.***Series de tiempo estación Puerto Rico.*

Fecha	Valor	n
1/1/2000	945.8	1
1/1/2001	955	2
1/1/2002	1374	3
1/1/2003	937.8	4
1/1/2004	1362	5
1/1/2005	1250	6
1/1/2006	1151	7
1/1/2007	1464	8
1/1/2008	1189	9
1/1/2009	1178	10
1/1/2010	1215	11
1/1/2011	1243	12
1/1/2012	806.4	13
1/1/2013	1200	14
1/1/2014	1231	15
1/1/2015	1196	16
1/1/2016	1165	17
1/1/2017	982.2	18
1/1/2018	1521.4	19
1/1/2019	1446.3	20

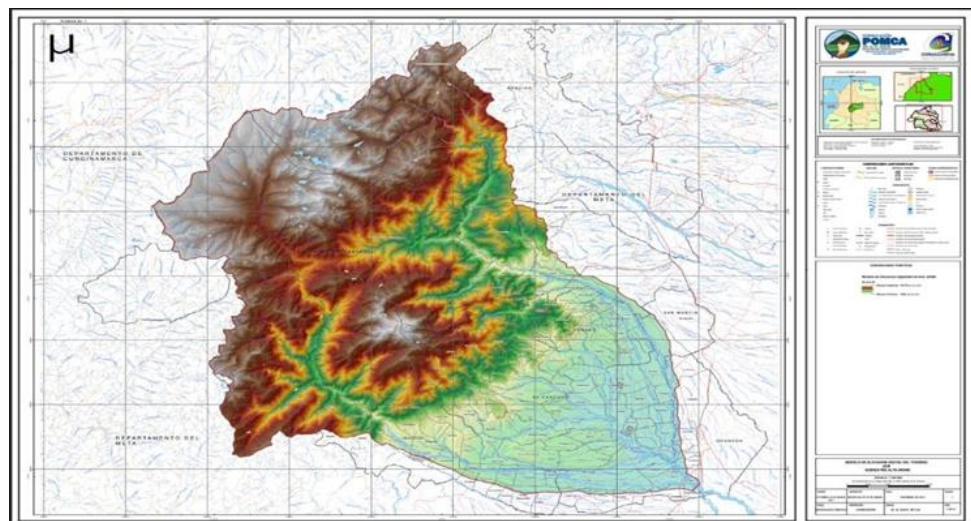
Nota. Series de tiempo anuales descargadas del IDEAM para la estación limnimétrica de Puerto Rico. Por Díaz y Reyes (2022).

Figura 29.*Distribución de Gumbel, valores Y_n y S_n .*

n	Y_n	S_n	n	Y_n	S_n	n	Y_n	S_n
2	0.4043	0.4984	37	0.5418	1.1339	84	0.5576	1.1967
3	0.4286	0.6435	38	0.5424	1.1363	86	0.5580	1.1980
4	0.4458	0.7315	39	0.5430	1.1388	88	0.5583	1.1994
5	0.4588	0.7928	40	0.5436	1.1413	90	0.5586	1.2007
6	0.4690	0.8388	41	0.5442	1.1436	92	0.5589	1.2020
7	0.4774	0.8749	42	0.5448	1.1458	94	0.5592	1.2032
8	0.4843	0.9043	43	0.5453	1.1480	96	0.5595	1.2044
9	0.4902	0.9288	44	0.5458	1.1499	98	0.5598	1.2055
10	0.4952	0.9497	45	0.5463	1.1519	100	0.5600	1.2065
11	0.4996	0.9676	46	0.5468	1.1538	150	0.5646	1.2253
12	0.5035	0.9833	47	0.5473	1.1557	200	0.5672	1.2360
13	0.5070	0.9972	48	0.5477	1.1574	250	0.5688	1.2429
14	0.5100	1.0095	49	0.5481	1.1590	300	0.5699	1.2479
15	0.5128	1.0206	50	0.5485	1.1607	400	0.5714	1.2545
16	0.5157	1.0316	51	0.5489	1.1623	500	0.5724	1.2588
17	0.5181	1.0411	52	0.5493	1.1638	750	0.5738	1.2651
18	0.5202	1.0493	53	0.5497	1.1653	1000	0.5745	1.2685
19	0.5220	1.0566	54	0.5501	1.1667			
20	0.5236	1.0628	55	0.5504	1.1681			
21	0.5252	1.0696	56	0.5508	1.1696			
22	0.5368	1.0754	57	0.5511	1.1708			
23	0.5283	1.0811	58	0.5515	1.1721			
24	0.5296	1.0864	59	0.5518	1.1734			
25	0.5309	1.0915	60	0.5521	1.1747			
26	0.5320	1.0961	62	0.5527	1.1770			
27	0.5332	1.1004	64	0.5533	1.1793			
28	0.5343	1.1047	66	0.5538	1.1814			
29	0.5353	1.1086	68	0.5543	1.1834			
30	0.5362	1.1124	70	0.5548	1.1854			
31	0.5371	1.1159	72	0.5552	1.1873			
32	0.5380	1.1193	74	0.5557	1.1890			
33	0.5388	1.1226	76	0.5561	1.1906			
34	0.5396	1.1255	78	0.5565	1.1923			
35	0.5403	1.1285	80	0.5569	1.1938			
36	0.5410	1.1313	82	0.5572	1.1953	∞	0.5772	1.2826

Nota. Constantes de Y_n y S_n para cada número de muestra establecido por la distribución de Gumbel. Por INVIAS (2009).

Anexo 4. Mapa de delimitación de la cuenca alta del río Ariari.

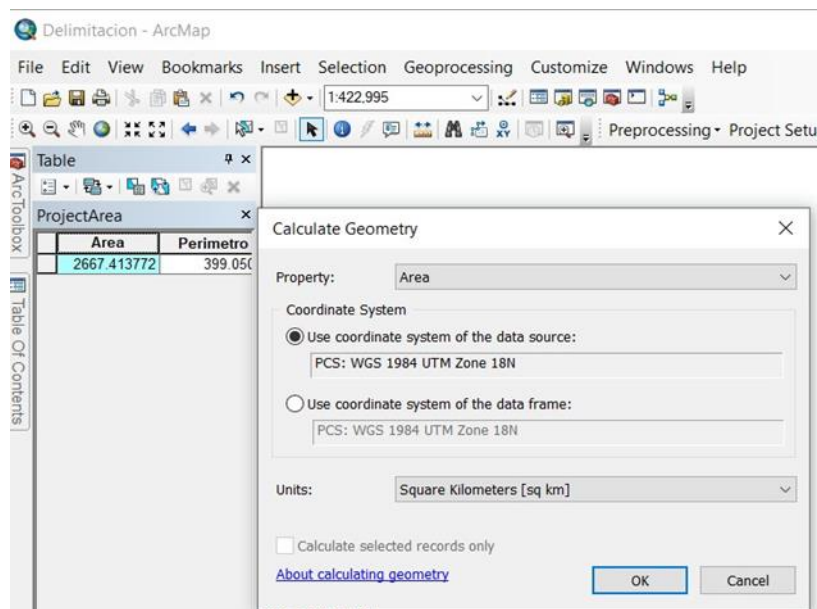
Figura 30.*Mapa cartográfico del POMCA de la cuenca alta del río Ariari.*

Nota. Mapa base para realizar la delimitación de la cuenca. Por CORMACARENA (2018).

Anexo 5. Parámetros morfométricos

Figura 31.

Herramienta Calculate Geometry de ArcGis.



Nota. Herramienta usada para calcular los parámetros morfométricos de la cuenca. Por Díaz & Reyes (2022).

Anexo 6. Tabla de coeficiente de rugosidad de Manning para cursos de agua natural.

Tabla 19. *Coeficientes de rugosidad de Manning para cursos de agua natural.*

Tipo de canal y descripción	n mínimo	n normal	n máximo
Cursos de agua menores (ancho de la superficie libre de crecida < 30 m)			
Cursos de agua en planicie			
1. Limpio, recto, con el caudal máximo y sin montículos ni pozas profundas	0.025	0.03	0.033
2. Igual al anterior, pero con mayor presencia de piedras y maleza	0.03	0.035	0.04
3. Limpio, serpenteante, con algunas pozas y bancos de arena	0.033	0.04	0.045
4. Igual al anterior, pero con algunos matorrales y piedras	0.035	0.045	0.05
5. Igual al anterior, pero con niveles bajos, pendientes y secciones más ineficientes	0.04	0.048	0.055
6. Igual al 4, pero con más piedras	0.04	0.05	0.06
7. Tramos lentos con malezas y pozas profundas	0.045	0.07	0.08

8. Tramos con muchas malezas, pozas profundas y canales de crecientes con muchos árboles y arbustos bajos.	0.075	0.1	0.15
Torrentes de montaña sin vegetación en el cauce, orillas generalmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las orillas sumergidas en niveles altos			
9. Fondo: grava, guijarros y algunas rocas	0.03	0.04	0.05
10. Fondo: guijarros y rocas grandes	0.04	0.05	0.07
Planicies de inundación			
Pastizales sin matorrales			
11. Con pasto corto	0.025	0.03	0.035
12. Con pasto alto	0.03	0.035	0.05
Áreas cultivadas			
13. Sin cultivo	0.02	0.03	0.04
14. Cultivos en hileras maduros	0.025	0.035	0.045
15. Campos de cultivos maduros	0.03	0.04	0.05
Matorrales			
16. Matorrales esparcidos, mucha maleza	0.035	0.05	0.07
17. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.05	0.06
18. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.04	0.06	0.08
19. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.07	0.11
20. Matorrales medios a densos, en verano	0.07	0.1	0.16
Árboles			
21. Sauces densos, rectos y en verano	0.11	0.15	0.2
22. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.03	0.04	0.05
23. Igual al anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.05	0.06	0.08
24. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, poco crecimiento de matorrales y nivel del agua por encima de las ramas	0.8	0.1	0.12
25. Igual al anterior, pero con nivel del agua por encima de las ramas	0.1	0.12	0.16
Cursos de agua mayores (ancho de la superficie del agua en crecida > 30 m) - el valor n es inferior al de los cursos de agua pequeños con características similares debido a que las orillas ofrecen una resistencia menos efectiva			
26. Sección regular sin cantos rodados ni matorrales	0.025	-	0.6
27. Sección irregular y rugosa	0.035	-	0.1

Nota. Coeficientes de Manning para cursos de agua natural utilizada para los modelos 1D y 2D. Por Fracassi (2019).

Anexo 7. Tablas de datos sin calibrar para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años**Tabla 20.** Datos sin calibrar del modelo 1D para el periodo de retorno de 10 años (Sección 10).

Plan: Sin Calibrar	Río Ariari	Principal ST (Aguas arriba): 10	Profile: TR10		
E.G. Elev (m)	322.86	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.01	Wt. n-Val.	0.035	0.1	0.05
W.S. Elev (m)	322.86	Reach Len. (m)	25	25	25
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	192.79	3160.11	396.15
E.G. Slope (m/m)	0.00358	Area (m2)	192.79	3160.11	396.15
Q Total (m3/s)	1199.04	Flow (m3/s)	111.84	981.93	105.27
Top Width (m)	700	Top Width (m)	50	450	200
Vel Total (m/s)	0.32	Avg. Vel. (m/s)	0.58	0.31	0.27
Max Chl Dpth (m)	10.86	Hydr. Depth (m)	3.86	7.02	1.98

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Tabla 21. Datos sin calibrar del modelo 1D para el periodo de retorno de 10 años (Sección 01).

Plan: Sin Calibrar	Río Ariari	Principal ST (Aguas abajo): 01	Profile: TR10		
E.G. Elev (m)	322.83	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)		Wt. n-Val.	0.035	0.1	0.04
W.S. Elev (m)	322.83	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	311.5	Flow Area (m2)	413.4	5444.84	1199.85
E.G. Slope (m/m)	0.012	Area (m2)	413.4	5444.84	1199.85
Q Total (m3/s)	1199.04	Flow (m3/s)	127.65	799.15	272.24
Top Width (m)	847	Top Width (m)	60.5	544.5	242
Vel Total (m/s)	0.17	Avg. Vel. (m/s)	0.31	0.15	0.23
Max Chl Dpth (m)	13.83	Hydr. Depth (m)	6.83	10	4.96

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Tabla 22. Datos sin calibrar del modelo 1D para el periodo de retorno de 25 años (Sección 10).

Plan: Sin Calibrar	Río Ariari	Principal ST (Aguas arriba): 10	Profile: TR25		
E.G. Elev (m)	323.31	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.01	Wt. n-Val.	0.035	0.1	0.05
W.S. Elev (m)	323.3	Reach Len. (m)	25	25	25
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	215.16	3361.41	485.62
E.G. Slope (m/m)	0.00358	Area (m2)	215.16	3361.41	485.62
Q Total (m3/s)	1315.18	Flow (m3/s)	128.23	1045.22	141.73
Top Width (m)	700	Top Width (m)	50	450	200
Vel Total (m/s)	0.32	Avg. Vel. (m/s)	0.6	0.31	0.29
Max Chl Dpth (m)	11.3	Hydr. Depth (m)	4.3	7.47	2.43

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Tabla 23. Datos sin calibrar del modelo 1D para el periodo de retorno de 25 años (Sección 01)

Plan: Sin Calibrar	Río Ariari	Principal ST (Aguas abajo):01	Profile: TR25		
E.G. Elev (m)	323.28	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0	Wt. n-Val.	0.035	0.1	0.04
W.S. Elev (m)	323.28	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	311.59	Flow Area (m2)	440.54	5689.17	1308.44
E.G. Slope (m/m)	0.012	Area (m2)	440.54	5689.17	1308.44
Q Total (m3/s)	1315.18	Flow (m3/s)	141.27	859.77	314.14
Top Width (m)	847	Top Width (m)	60.5	544.5	242
Vel Total (m/s)	0.18	Avg. Vel. (m/s)	0.32	0.15	0.24
Max Chl Dpth (m)	14.28	Hydr. Depth (m)	7.28	10.45	5.41

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Tabla 24. Datos sin calibrar del modelo 1D para el periodo de retorno de 50 años (Sección 10).

Plan: Sin Calibrar	Río Ariari	Principal ST (Aguas arriba): 10	Profile: TR50		
E.G. Elev (m)	323.64	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.01	Wt. n-Val.	0.035	0.1	0.05
W.S. Elev (m)	323.63	Reach Len. (m)	25	25	25
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	231.52	3508.72	551.09
E.G. Slope (m/m)	0.00358	Area (m2)	231.52	3508.72	551.09
Q Total (m3/s)	1403.04	Flow (m3/s)	140.42	1092.51	170.11
Top Width (m)	700	Top Width (m)	50	450	200
Vel Total (m/s)	0.33	Avg. Vel. (m/s)	0.61	0.31	0.31
Max Chl Dpth (m)	11.63	Hydr. Depth (m)	4.63	7.8	2.76

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

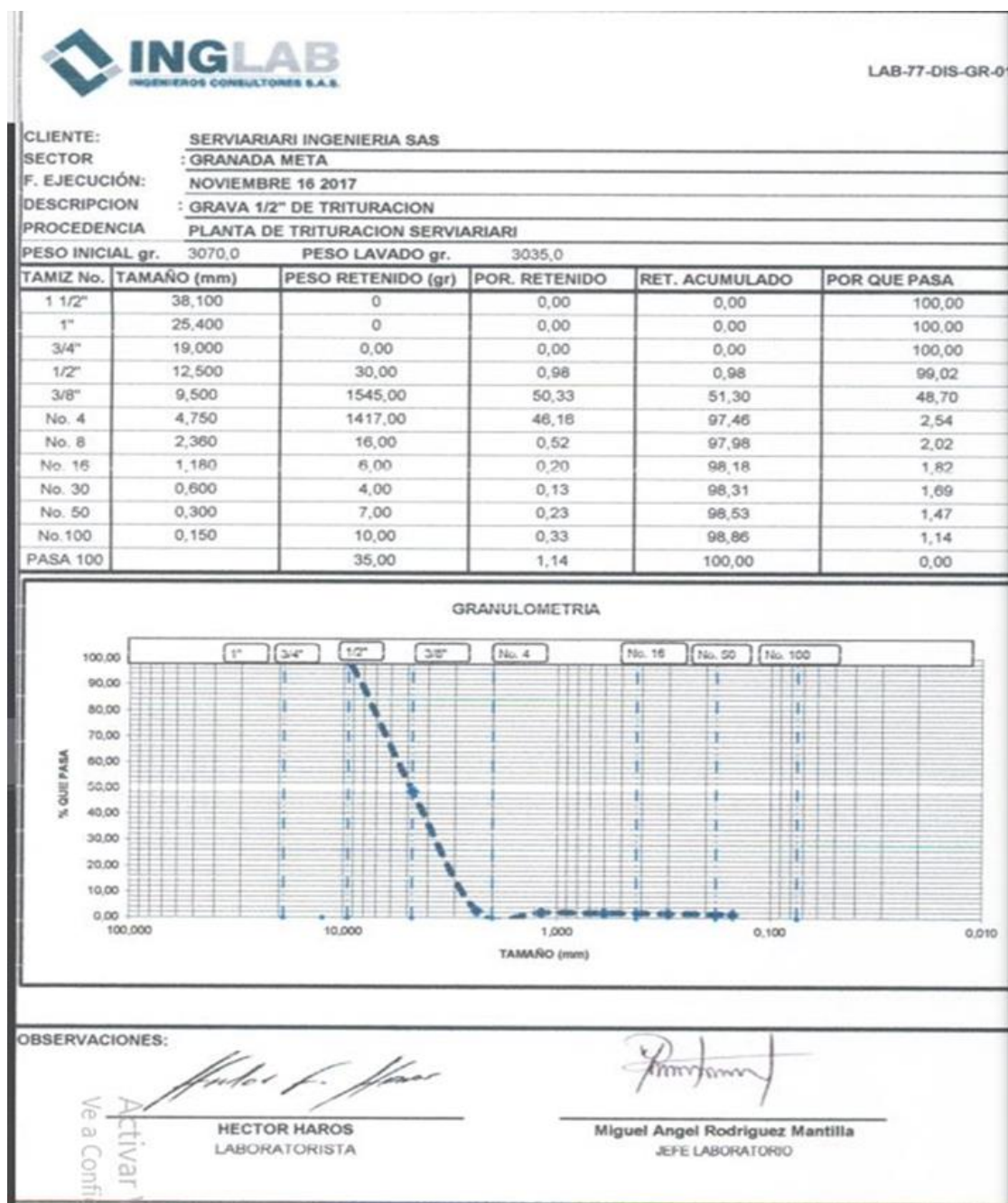
Tabla 25. Datos sin calibrar del modelo 1D para el periodo de retorno de 50 años (Sección 01).

Plan: Sin Calibrar	Río Ariari	Principal ST (Aguas abajo): 01	Profile: TR50		
E.G. Elev (m)	323.61	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0	Wt. n-Val.	0.035	0.1	0.04
W.S. Elev (m)	323.61	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	311.66	Flow Area (m2)	460.41	5867.96	1387.9
E.G. Slope (m/m)	0.012	Area (m2)	460.41	5867.96	1387.9
Q Total (m3/s)	1403.04	Flow (m3/s)	151.54	905.24	346.26
Top Width (m)	847	Top Width (m)	60.5	544.5	242
Vel Total (m/s)	0.18	Avg. Vel. (m/s)	0.33	0.15	0.25
Max Chl Dpth (m)	14.61	Hydr. Depth (m)	7.61	10.78	5.74

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Anexo 8. Informe de granulometría de Serviariari S.A.S.

Figura 32. Estudio Granulometría Serviariari S.A.S.



Nota. Por Serviariari S.A.S (s,f)

Anexo 9. Resultados del modelo 1D calibrado.**Tabla 26.** Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 5 años (Sección 10).

Plan: Calibrado	Río Ariari	Principal ST (Aguas arriba): 10	Profile: TR 5		
E.G. Elev (m)	324.69	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.01	Wt. n-Val.	0.035	0.273	0.05
W.S. Elev (m)	324.68	Reach Len. (m)	25	25	25
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	284.21	3982.92	761.84
E.G. Slope (m/m)	0.00358	Area (m2)	284.21	3982.92	761.84
Q Total (m3/s)	1030.2	Flow (m3/s)	204.99	519.55	305.65
Top Width (m)	700	Top Width (m)	50	450	200
Vel Total (m/s)	0.20	Avg. Vel. (m/s)	0.72	0.13	0.4
Max Chl Dpth (m)	12.68	Hydr. Depth (m)	5.68	8.85	3.81

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Tabla 27. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 5 años (Sección 01).

Plan: Calibrado	Río Ariari	Principal ST (Aguas abajo)01	Profile: TR 5		
E.G. Elev (m)	324.66	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0	Wt. n-Val.	0.035	0.273	0.04
W.S. Elev (m)	324.66	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	311.35	Flow Area (m2)	523.96	6439.9	1642.09
E.G. Slope (m/m)	0.012	Area (m2)	523.96	6439.9	1642.09
Q Total (m3/s)	1030.2	Flow (m3/s)	186.02	387.18	456.99
Top Width (m)	847	Top Width (m)	60.5	544.5	242
Vel Total (m/s)	0.12	Avg. Vel. (m/s)	0.36	0.06	0.28
Max Chl Dpth (m)	15.66	Hydr. Depth (m)	8.66	11.83	6.79

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Tabla 28. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 10 años (Sección 10).

Plan: Calibrado	Río Ariari	Principal ST (Aguas arriba): 10	Profile: TR10		
E.G. Elev (m)	325.51	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.01	Wt. n-Val.	0.035	0.273	0.050
W.S. Elev (m)	325.5	Reach Len. (m)	25.00	25.00	25.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	325.16	4351.42	925.62
E.G. Slope (m/m)	0.00358	Area (m2)	325.16	4351.42	925.62
Q Total (m3/s)	1199.04	Flow (m3/s)	238.32	565.00	395.72
Top Width (m)	700	Top Width (m)	50.00	450.00	200.00
Vel Total (m/s)	0.21	Avg. Vel. (m/s)	0.73	0.13	0.43
Max Chl Dpth (m)	13.5	Hydr. Depth (m)	6.50	9.67	4.63

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Tabla 29. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 10 años (Sección 01).

Plan: Calibrado	Río Ariari	Principal ST (Aguas abajo): 01	Profile: TR10		
E.G. Elev (m)	325.49	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0	Wt. n-Val.	0.035	0.273	0.040
W.S. Elev (m)	325.48	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	311.5	Flow Area (m2)	573.65	6887.10	1840.85
E.G. Slope (m/m)	0.012	Area (m2)	573.65	6887.10	1840.85
Q Total (m3/s)	1199.04	Flow (m3/s)	214.56	432.95	551.54
Top Width (m)	847	Top Width (m)	60.50	544.50	242.00
Vel Total (m/s)	0.13	Avg. Vel. (m/s)	0.37	0.06	0.30
Max Chl Dpth (m)	16.48	Hydr. Depth (m)	9.48	12.65	7.61

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Tabla 30. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 25 años (Sección 10).

Plan: Calibrado	Río Ariari	Principal ST (Aguas arriba): 10	Profile: TR25		
E.G. Elev (m)	326.05	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.01	Wt. n-Val.	0.035	0.273	0.050
W.S. Elev (m)	326.04	Reach Len. (m)	25.00	25.00	25.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	351.79	4591.14	1032.17
E.G. Slope (m/m)	0.00358	Area (m2)	351.79	4591.14	1032.17
Q Total (m3/s)	1315.18	Flow (m3/s)	260.80	596.80	457.58
Top Width (m)	700	Top Width (m)	50.00	450.00	200.00
Vel Total (m/s)	0.22	Avg. Vel. (m/s)	0.74	0.13	0.44
Max Chl Dpth (m)	14.04	Hydr. Depth (m)	7.04	10.20	5.16

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Tabla 31. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 25 años (Sección 01).

Plan: Calibrado	Río Ariari	Principal ST (Aguas abajo): 01	Profile: TR25		
E.G. Elev (m)	326	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0	Wt. n-Val.	0.035	0.273	0.04
W.S. Elev (m)	326.02	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	311.59	Flow Area (m2)	605.95	7177.84	1970.07
E.G. Slope (m/m)	0.012	Area (m2)	605.95	7177.84	1970.07
Q Total (m3/s)	1315.18	Flow (m3/s)	234	464.12	617.06
Top Width (m)	847	Top Width (m)	60.5	544.5	242
Vel Total (m/s)	0.13	Avg. Vel. (m/s)	0.39	0.06	0.31
Max Chl Dpth (m)	17.02	Hydr. Depth (m)	10.02	13.18	8.14

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Tabla 32. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 50 años (Sección 10).

Plan: Calibrado	Río Ariari	Principal ST (Aguas arriba): 10	Profile: TR50		
E.G. Elev (m)	326.44	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.01	Wt. n-Val.	0.035	0.273	0.050
W.S. Elev (m)	326.43	Reach Len. (m)	25.00	25.00	25.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	371.60	4769.43	1111.40
E.G. Slope (m/m)	0.00358	Area (m2)	371.60	4769.43	1111.40
Q Total (m3/s)	1403.04	Flow (m3/s)	277.61	620.79	504.64
Top Width (m)	700	Top Width (m)	50.00	450.00	200.00
Vel Total (m/s)	0.22	Avg. Vel. (m/s)	0.75	0.13	0.45
Max Chl Dpth (m)	14.43	Hydr. Depth (m)	7.43	10.60	5.56

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Tabla 33. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 50 años (Sección 01).

Plan: Calibrado	Río Ariari	Principal ST (Aguas abajo): 01	Profile: TR50		
E.G. Elev (m)	326.42	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0	Wt. n-Val.	0.035	0.273	0.040
W.S. Elev (m)	326.41	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	311.66	Flow Area (m2)	629.96	7393.90	2066.10
E.G. Slope (m/m)	0.012	Area (m2)	629.96	7393.90	2066.10
Q Total (m3/s)	1403.04	Flow (m3/s)	248.59	487.43	667.02
Top Width (m)	847	Top Width (m)	60.50	544.50	242.00
Vel Total (m/s)	0.14	Avg. Vel. (m/s)	0.39	0.07	0.32
Max Chl Dpth (m)	17.41	Hydr. Depth (m)	10.41	13.58	8.54

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Tabla 34. Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 100 años (Sección 10).

Plan: Calibrado	Río Ariari	Principal ST (Aguas arriba): 10	Profile: TR100		
E.G. Elev (m)	326.83	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0.01	Wt. n-Val.	0.035	0.273	0.050
W.S. Elev (m)	326.82	Reach Len. (m)	25.00	25.00	25.00
Crit W.S. (m)		Flow Area (m2)	390.86	4942.78	1188.45
E.G. Slope (m/m)	0.00358	Area (m2)	390.86	4942.78	1188.45
Q Total (m3/s)	1490.89	Flow (m3/s)	294.27	644.94	551.68
Top Width (m)	700	Top Width (m)	50.00	450.00	200.00
Vel Total (m/s)	0.23	Avg. Vel. (m/s)	0.75	0.13	0.46
Max Chl Dpth (m)	14.82	Hydr. Depth (m)	7.82	10.98	5.94

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

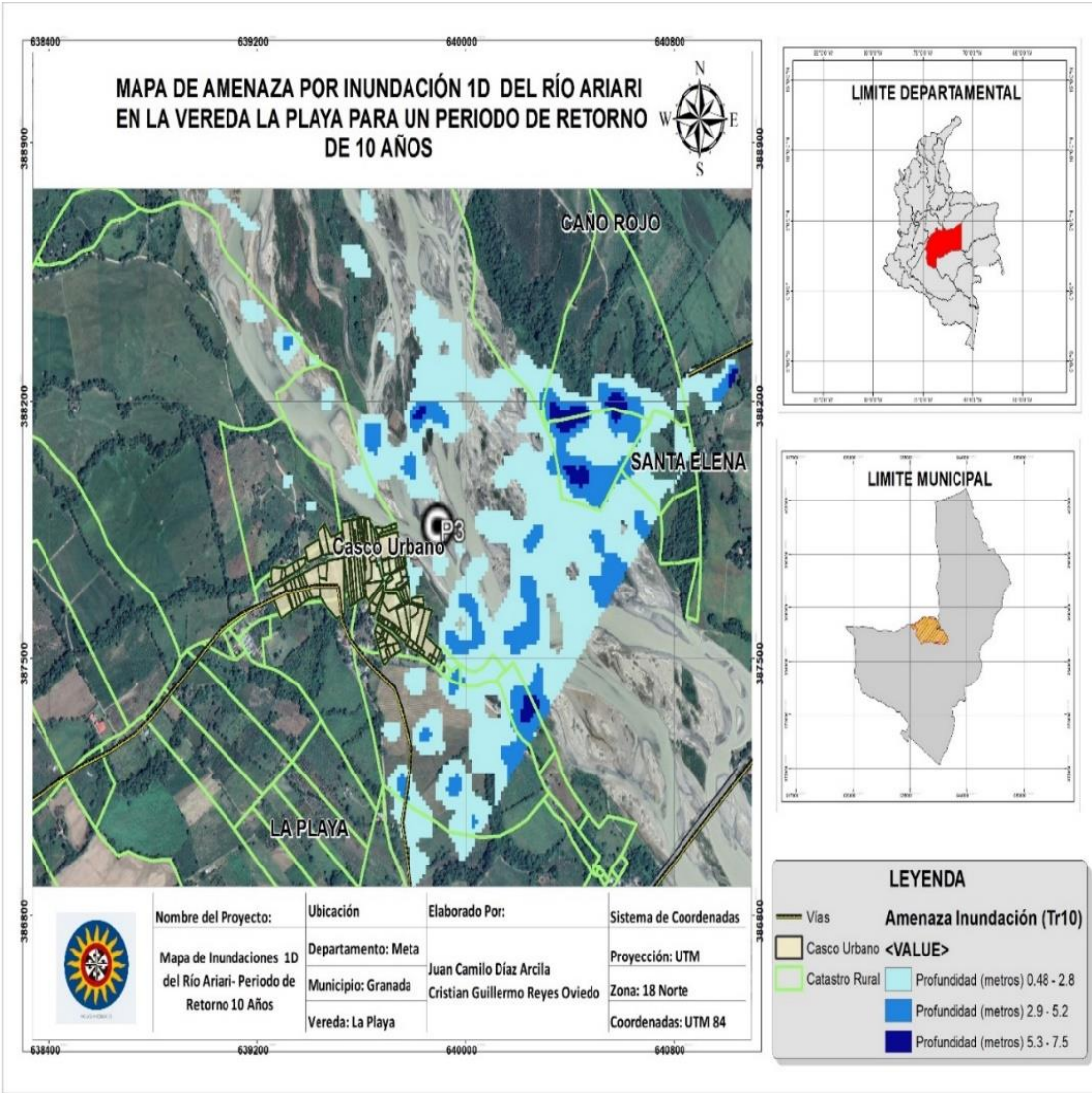
Tabla 35. *Datos Calibrados del modelo 1D periodo de retorno 100 años (Sección 01).*

Plan: Calibrado	Río Ariari	Principal ST (Aguas abajo): 01	Profile: TR100		
E.G. Elev (m)	326.8	Element	Left OB	Channel	Right OB
Vel Head (m)	0	Wt. n-Val.	0.035	0.273	0.040
W.S. Elev (m)	326.8	Reach Len. (m)			
Crit W.S. (m)	311.73	Flow Area (m2)	653.32	7604.13	2159.53
E.G. Slope (m/m)	0.012	Area (m2)	653.32	7604.13	2159.53
Q Total (m3/s)	1490.89	Flow (m3/s)	263.10	510.64	717.15
Top Width (m)	847	Top Width (m)	60.50	544.50	242.00
Vel Total (m/s)	0.14	Avg. Vel. (m/s)	0.40	0.07	0.33
Max Chl Dpth (m)	17.80	Hydr. Depth (m)	10.80	13.97	8.92

Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

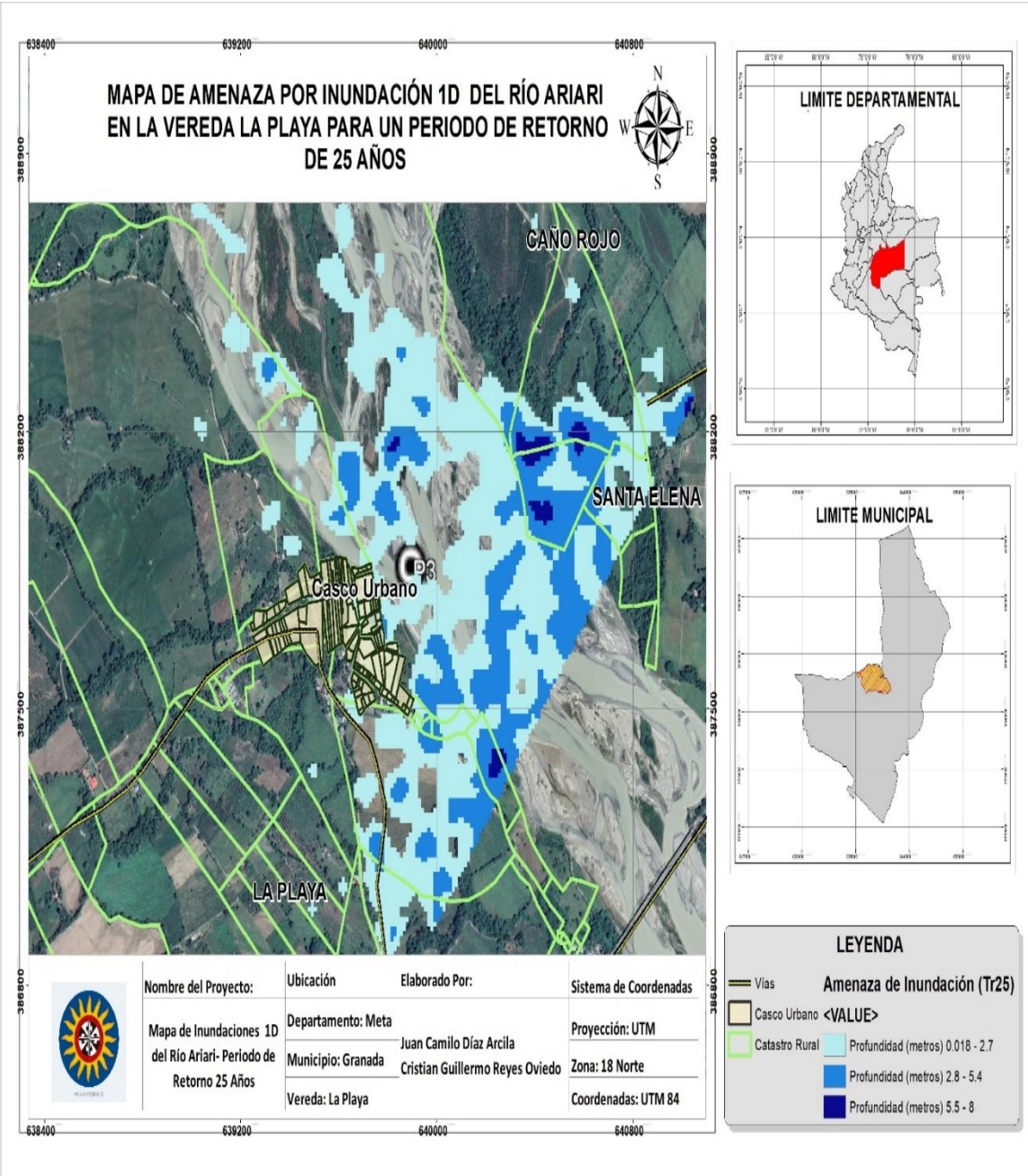
Anexo 10. Mapas de amenaza por inundación para los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

Figura 33. Mapa de amenaza de inundación 1D para el periodo de retorno de 10 años.



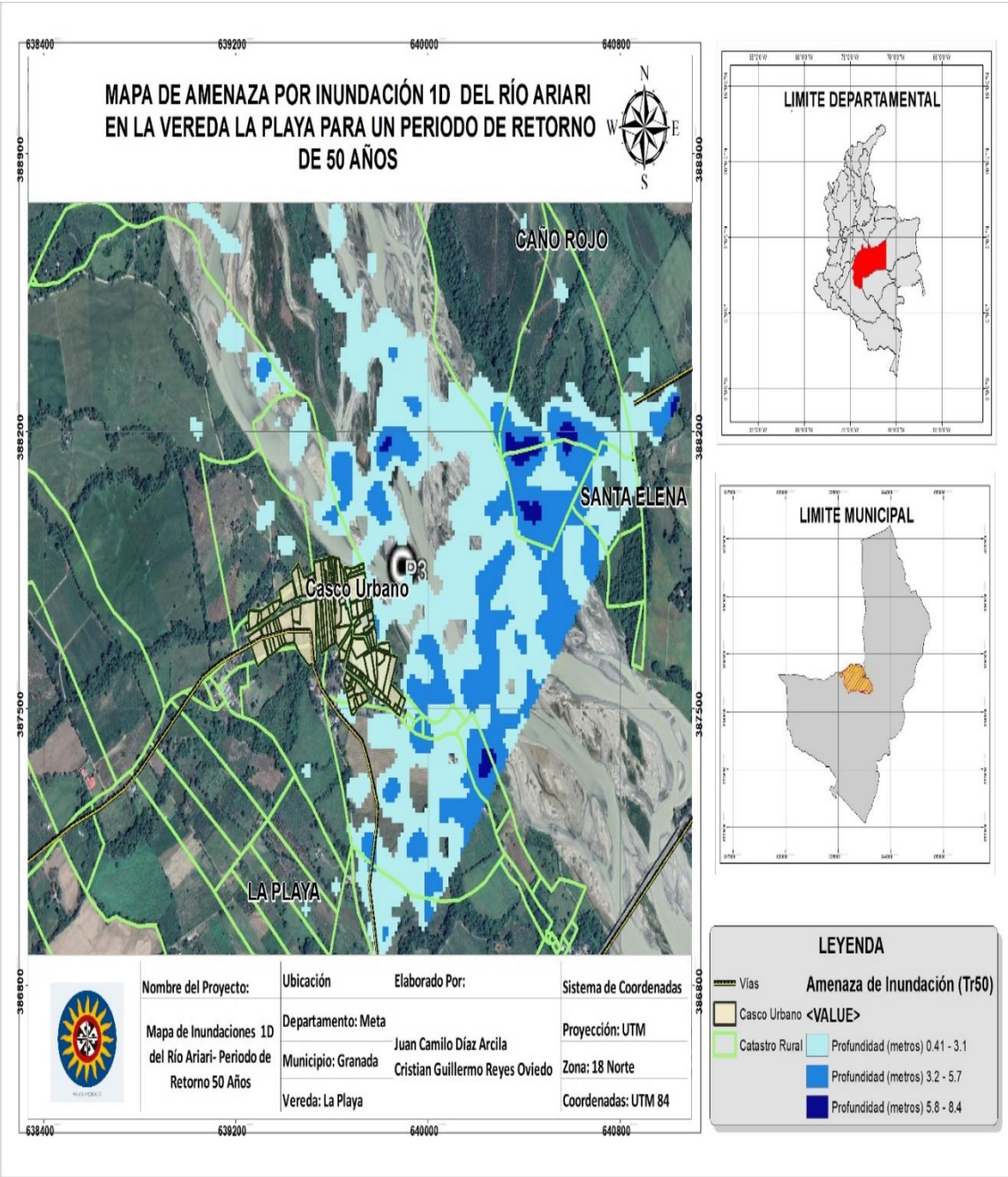
Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Figura 34. Mapa de amenaza de inundación 1D para el periodo de retorno de 25 años.



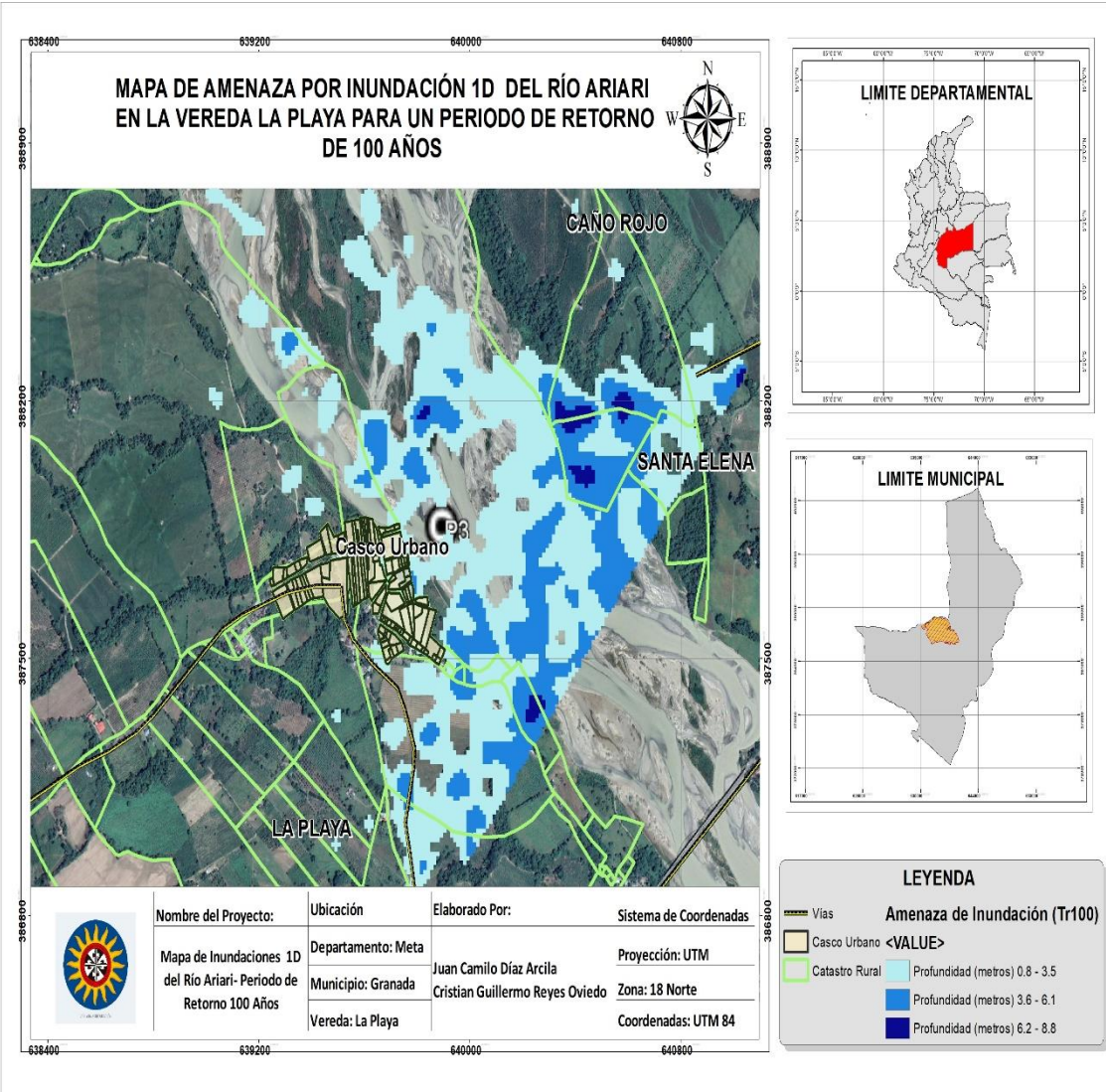
Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Figura 35. Mapa de amenaza de inundación 1D para el periodo de retorno de 50 años.



Nota. Por Díaz y Reyes (2022).

Figura 36. Mapa de amenaza de inundación 1D para el periodo de retorno de 100 años.



Nota. Por Díaz y Reyes (2022).