Identificación de la amenaza por inundación ante escenarios de cambio climático en el corregimiento El Cerrito, El Banco, Magdalena-Colombia

Manuela Caicedo Garzón

Código del proyecto: 2401-011

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá

Identificación de la amenaza por inundación ante escenarios de cambio climático en el corregimiento El Cerrito, El Banco, Magdalena-Colombia

Manuela Caicedo Garzón

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director (a):
Darwin Mena Rentería

Codirector:
Miguel Ángel Cañón

Línea de Investigación:
Ingeniería para la sostenibilidad – Grupo de investigación Agua, Salud y Ambiente

Modalidad: Proyecto de investigación

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2024

Tabla de Contenido

Introducción **10**

Planteamiento del problema **11**

Pregunta de investigación **12**

Objetivo general y específicos **12**

General 12

Específicos 12

Justificación **13**

Marcos de Referencia **14**

Estado de arte 14

Marco Teórico-Conceptual 18

Marco Normativo 23

Marco Geográfico 25

Marco Institucional 27

Metodología **28**

Método 29

Enfoque de la investigación 29

Alcance de la investigación 30

Unidad de análisis de la investigación 30

Técnicas e instrumentos para recolectar información 31

Técnicas e instrumentos para sistematizar y organizar la información 31

Técnicas e instrumentos para interpretar los resultados 31

Fases metodológicas 32

Fase I: Insumos 32

Subfase I 32

Series de tiempo por estaciones climatológicas. 32
Conversión de series de tiempo diarias a mensuales. 33
Grupos estadísticos 33
Funciones de distribución de probabilidad 33
Distribución normal 33
Distribución Log-normal 34
Distribución de Gumbel 34
Distribución Gamma 35
Distribución Log-Gamma 35
Distribución generalizada de valores extremos (Genextreme) 36
Distribución de Weibull 36
Distribución Exponencial 36
Distribución Power Law (distribución de potencia) 37
Distribución de Nakagami 37
Prueba de bondad de ajuste. 37
Prueba de Kolmogórov-Smirnov 38
Error medio 38
Error máximo 38
Caudal máximo para periodo de retorno de 100 años 38
Subfase II 39
Modelo Digital de elevación 39
Tratamiento de información geográfica- Delimitación de la cuenca 39
Adecuación de secciones transversales 39
Modelo de circulación global (MCG) 40
Fase 2: Desarrollo del modelo hidrodinámico 40

Dominio computacional 40
Entradas al modelo hidrodinámico 41
Preparación del modelo hidrodinámico 41
Condiciones de contorno 41
Coeficiente de Manning 42
Capa de uso del suelo 43
Mallado 43
Incorporación del DEM 44
Asignación de tiempo 44
Fase 3: Caracterización de la amenaza 44
Metodología de caracterización de amenaza 44
Matriz metodológica 46
Aspectos éticos 48
Resultados y análisis de resultados 48
Fase 1: Insumos 48
Subfase I 48
Series de tiempo por estaciones climatológicas 48
Conversión de series de tiempo diarias a mensuales 49
Funciones de distribución de probabilidad 49
Caudal máximo para periodo de retorno de 100 años 51
Subfase II 51
Modelo digital de elevación 51
Tratamiento de información geográfica 52
Adecuación de secciones transversales 53
Modelación de circulación global (MCG) 53

Fase 2: Desarrollo del modelo hidrodinámico 54
Dominio computacional 54
Entradas al modelo hidrodinámico 55
Preparación del modelo hidrodinámico 55
Condiciones de contorno 56
Coeficiente de Manning. 57
Mallado 59
Incorporación del DEM 59
Asignación de tiempo 60
Fase 3: Caracterización de la amenaza 63
Caracterización de la amenaza 63
Conclusiones 72
Recomendaciones 73
Referencias 74

Listado de Tablas

Tabla 1. Bibliografía referente a la investigación a escala mundial, nacional, regional y local 14

Tabla 2. Marco Normativo 23

Tabla 3. Entidades relacionadas con la investigación 27

Tabla 4. Valores Manning por uso del suelo 43

Tabla 5. Matriz Metodológica 46

Tabla 6. Funciones de distribución de probabilidad seleccionada para cada mes 50

Tabla 7. Caudal máximo para un TR 100 51

Tabla 8. Variación porcentual del caudal del rio Magdalena con la incorporación del RCP 2.6 y 8.5 54

Tabla 9. Variación final de caudales para cada escenario 54

Tabla 10. Parámetros para el desarrollo del modelo hidrodinámico y sus parámetros 55

Tabla 11 . Datos numéricos de velocidad y profundidad para cada escenario 63

Tabla 12. Cálculo de áreas con amenaza en el corregimiento El Cerrito respecto al TR 100 64

Tabla 13. Cálculo de áreas con amenaza en el corregimiento El Cerrito respecto al escenario RCP 2.6 y 8.5 67

Listado de Figuras

Figura 1. Mapa de ubicación del corregimiento El Cerrito. 26

Figura 2. Fases metodológicas, sus actividades y la relación con los objetivos específicos. 29

Figura 3. *Figura representativa de la cercanía entre la estación climatología y el corregimiento El Cerrito*. 32

Figura 4. Matriz de caracterización por amenaza de inundación. 45

Figura 5. Grafica de variación del caudal medio diario entre los años 200-2024. 48

Figura 6. Serie de tiempo del caudal maximo mensual (2000-2024). 49

Figura 7. *Resultados de criterios de prueba de bondad para el mes de Enero.* 50

Figura 8. *Caudales máximos para periodo de retornos.* 51

Figura 9. Zonas de relevancia. 52

Figura 10. Batimetría y Modelo de elevación digital. 52

Figura 11. *TIN*. 53

Figura 12. Dominio computacional. 55

Figura 13. Incorporación del caudal máximo TR100 en las condiciones de contorno. 56

Figura 14. Entrada de caudal en el dominio computacional. 57

Figura 15. Salidas de caudal en el dominio computacional. 57

Figura 16. Mapa de clasificación del uso del suelo en el municipio El Banco, Magdalena-Colombia 58

Figura 17. Asignación valor Manning para el rio 58

Figura 18. Asignación valor Manning para vegetación inundable 59

Figura 19. Malla del modelo hidrodinámico. 59

Figura 20. Capa ráster de velocidad para el escenario de un TR 100 años. 60

Figura 21. Capa ráster de profundidad para el escenario de un TR 100 años. 61

Figura 22. Capa ráster de velocidad para el escenario RCP 2.6. 61

Figura 23. Capa ráster de profundidad para el escenario RCP 8.5. 62

Figura 24. Capa ráster de velocidad para el escenario RCP 8.5. 62

Figura 25. Capa ráster de profundidad para el escenario RCP 8.5. 63

Figura 26. Mapa de amenaza por inundación para un periodo de retorno de 100 años. 64

Figura 27. Mapa de amenaza por inundación en el escenario RCP 2.6. 66

Figura 28. Mapa de amenaza por inundación en el escenario RCP 8.5. 67

Resumen

En esta investigación se realizó una estimación de un cálculo de caudal máximo para un periodo de retorno de 100 años en el rio Magdalena para ver el comportamiento de la amenaza por inundación en el corregimiento El Cerrito, El Banco, Magdalena-Colombia. El cálculo del caudal máximo permitió desarrollar un **modelo hidrodinámico** que simulara el dinamismo del agua del cauce del rio agregando variaciones de caudal producto de la incorporación de los escenarios de cambio climático RCP 2.6 y 8.5. La variación del caudal se calculó con los resultados de los modelos de circulación global del documento “Análisis de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca”. Posteriormente, con base a los procedimientos anteriores, se llevó a cabo una caracterización de la amenaza de inundación en el área de estudio que permitiera evidenciar como los modelos hidrodinámicos son funcionales para guiar este procedimiento, creando así una influencia en la toma de decisiones de las autoridades en términos de adaptabilidad y mitigación al cambio climático.

Palabras clave: Modelo hidrodinámico, inundación, escenarios de cambio climático, amenaza, caracterización, adaptabilidad, mitigación

Abstract

This research involved estimating the maximum flow calculation for a 100-year return period in the Magdalena River to analyze the flood hazard behavior in the corregimiento of El Cerrito, El Banco, Magdalena-Colombia. The maximum flow calculation enabled the development of a hydrodynamic model that simulated the water dynamics of the river channel, incorporating flow variations based on the climate change scenarios RCP 2.6 and 8.5. The flow variation was calculated using the results from the global circulation models provided in the document "Análisis de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca." Subsequently, based on these procedures, a flood hazard characterization of the study area was carried out, demonstrating how hydrodynamic models are effective tools for guiding this process. This, in turn, provides critical insights for decision-making by authorities regarding climate change adaptation strategies.

Keywords: Hydrodynamic model, flooding, climate change scenarios, threat, characteritazion, adaptability, mitigation.

Introducción

La investigación sobre la identificación de la amenaza por inundación ante escenarios de cambio climático en el corregimiento El Cerrito, ubicado en el municipio de El Banco, Magdalena, Colombia, se enmarcó en un contexto de creciente preocupación por los efectos del cambio climático en el aumento de fenómenos hidrometeorológicos extremos que afecten a las comunidades vulnerables. Este corregimiento, que se sitúa sobre el río Magdalena, enfrenta una amenaza significativa de inundaciones, exacerbado por eventos climáticos extremos que se han intensificado en los últimos años (Alcaldía de El Banco, 2020). En particular, el evento de inundación ocurrido en 2022, que afectó gravemente a los residentes, subraya la urgencia de abordar esta problemática (ARNPER, 2022).

El Cambio climático (C.C), impulsado por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), ha conducido a un incremento en la frecuencia y gravedad de fenómenos hidrometeorológicos extremos, afectando tanto la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos como las condiciones socioeconómicas de las comunidades (Ministerio De Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

En este sentido, la investigación buscó simular escenarios de cambio climático para un periodo de retorno de 100 años por medio del desarrollo de un modelo hidrodinámico, el cual fue una herramienta indispensable en la evaluación y detección de la amenaza de inundación en El Cerrito, corregimiento del municipio El Banco. Mediante este enfoque, se quiso generar información valiosa que apoye a las autoridades competentes en la ejecución de estrategias de mitigación y adaptación para futuros eventos de inundación

La importancia de esta investigación radicó en su potencial para contribuir a la resiliencia del territorio, proporcionando a las autoridades y a la comunidad una divulgación de información necesaria y útil para enfrentar los desafíos que plantea el cambio climático. Al identificar y caracterizar la amenaza por inundación, se buscó no solo entender la magnitud del problema, sino también fomentar un diálogo sobre las medidas necesarias para proteger a la población y sus recursos frente a la amenaza por inundación.

La presente investigación se estructuró por capítulos, donde se derivan principalmente del planteamiento del problema y su justificación. Posteriormente se establecieron los objetivos generales y específicos. Para proporcionar un enfoque más integral, se han utilizado marcos de referencia que incluyen una contextualización del área de estudio, literatura relevante que respalde la investigación, normatividad aplicable, instituciones relacionadas, así como conceptos y teorías pertinentes al tema tratado.

Asimismo, se establecieron el enfoque, método, alcance, instrumentos y técnicas que fundamentan la metodología adoptada para alcanzar los objetivos planteados. Finalmente, se llevó a cabo un análisis de los resultados obtenidos, así como una respuesta a la pregunta de investigación formulada.

Planteamiento del problema

El municipio de El Banco está situado en la cuenca del complejo cenagoso de Zapatosa en el departamento del Magdalena. El municipio destaca por su notable riqueza en recursos hídricos, ya que aproximadamente el 60,45% de su territorio está ocupado por humedales, y el 61,54% corresponde a ecosistemas estratégicos (Sierra Flórez, 2024). Esta configuración geográfica expone al municipio a una amenaza del 41,77% debido a fenómenos hidrometeorológicos extremos, que conllevan a **inundaciones**, especialmente durante las temporadas de lluvia (Sierra Flórez, 2024)

Entre los 21 corregimientos que componen el municipio de El Banco se encuentra El Cerrito, situado sobre el rio Magdalena, lo que lo hace particularmente susceptible a inundaciones (Alcaldía de El Banco, 2020). Además, en 2022, El Cerrito experimentó una inundación significativa debido al desbordamiento del río Magdalena. Este evento afectó a la mayoría de los residentes, quienes se vieron imposibilitados de llevar a cabo sus actividades habituales debido a las graves consecuencias de la inundación (ARNPER, 2022). Este tipo de eventos se ve exacerbado por diversos factores, como la ubicación geográfica del corregimiento, el **cambio climático** y la deforestación, que contribuyen a la intensificación de los fenómenos hidrometeorológicos extremos (Sierra Flórez, 2024)

El **cambio climático** es una consecuencia inherente al modelo de desarrollo global, el cual se fundamenta en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Aunque Colombia representa únicamente el 0,37% de las emisiones globales de GEI, el país no está exento de padecer los efectos adversos del cambio climático (Pabón Caicedo, 2012). Además, de acuerdo con el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial del Magdalena 2040 (PIGCCTM), las repercusiones del cambio climático se manifiestan de manera significativa en un incremento en la frecuencia y severidad de eventos climáticos extremos. Estos fenómenos extremos conllevan a una serie de consecuencias, tales como la intensificación de sequías, alteraciones en los ecosistemas locales y una notable disminución tanto en la cantidad como en la calidad del recurso hídrico. El informe también proyecta que, hacia finales de este siglo, se espera un aumento en la temperatura media del departamento de aproximadamente 2,4 °C como resultado del cambio climático, lo que tendrá un impacto profundo y generalizado en las condiciones ambientales y socioeconómicas de la región (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Para abordar adecuadamente esta problemática, es necesario adoptar un cambio en el modelo actual, un proceso que resulta complejo y requiere el respaldo de políticas efectivas, la colaboración de la comunidad científica y el compromiso activo de la sociedad (Romero-Cuéllar et al., 2018) No obstante, el municipio enfrenta una significativa falta de acompañamiento estatal, lo cual agrava los impactos del cambio climático y la exposición a fenómenos hidrometeorológicos extremos, como las inundaciones. La ausencia de actualizaciones en los marcos de planificación y gestión del territorio ha impedido la adopción de medidas adaptativas frente a los nuevos desafíos climáticos (Beleño Orozco & Borrero Guzmán, 2024).

Pregunta de investigación

Teniendo en cuenta las futuras consecuencias del cambio climático en el departamento del Magdalena, las propensas inundaciones en el corregimiento El Cerrito por su ubicación geográfica y la falta de acompañamiento estatal para enfrentar efectos del cambio climático, se quiere responder a la pregunta

¿Como las herramientas de modelación matemática permiten determinar la amenaza por inundación con la incorporación de escenarios de cambio climático que afecten directamente la toma de decisiones de autoridades pertinentes?

Objetivo general y específicos

General

Identificar la amenaza por inundación ante escenarios de cambio climático por medio de un modelo hidrodinámico en el municipio El Banco, Magdalena – Colombia

Específicos

1. Estimar los caudales máximos para diferentes periodos de retorno en el río Magdalena
2. Desarrollar un modelo hidrodinámico con IBER en el rio Magdalena a la altura del corregimiento El Cerrito incorporando los escenarios de cambio climático
3. Caracterizar la amenaza por inundación utilizando la metodología IDIGER

Justificación

El presente proyecto tuvo como objetivo caracterizar la amenaza por inundación para un periodo de retorno (TR) de 100 años incorporando escenarios de cambio climático (RCP). Para ello, se ha desarrollado un modelo hidrodinámico destinado a simular las condiciones de dos escenarios de cambio climático (RCP) elaborados por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) para un periodo de retorno de 100 años y adaptados por el documento "Análisis de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca". Estos escenarios se fundamentan en trayectorias representativas de concentración que ilustran las diferentes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y su consecuencia en el sistema climático (IPCC, 2021).

Cada escenario presenta los efectos climáticos derivados de la variabilidad y el cambio climático inducido por las posibles emisiones de GEI. La simulación de estas consecuencias permitió proyectar el aumento o disminución de la inundación en el corregimiento El Cerrito teniendo en cuenta un periodo de retorno de 100 años. Esta información es crucial para que las autoridades puedan adoptar medidas efectivas de adaptación al cambio climático y fortalezcan la resiliencia del territorio ante futuros eventos de inundación. Además, como argumentación, según Tapasco et al. (2015) comprender la magnitud de estos impactos es fundamental para entender como el cambio climático influirá en la condición de los recursos hídricos, lo que permite generar insumos técnicos que faciliten la discusión y el análisis sobre cómo debemos prepararnos para afrontar esos cambios.

Asimismo, una adaptación optima al cambio climático es aquella que se puede planificar y no la que se genera a medida que aparecen los cambios. A pesar de ello, en muchos casos es imposible realizar la adaptación porque no existen escenarios creíbles a escala regional. (Natenzon et al., 2005). Basado en esto, se reiteró el objetivo del presente proyecto, que fue la identificación de la amenaza por inundación mediante la simulación de dos escenarios de cambio climático frente a un periodo de retorno de 100 años, lo que puede permitir impulsar a las autoridades a tomar decisiones para la adaptabilidad y mitigación del cambio climático. Además, la simulación de los escenarios fue una acción que puede contribuir a la mitigación de inundaciones.

La mitigación de inundaciones se clasifica en dos categorías principales: las medidas estructurales y las no estructurales. Las medidas estructurales están orientadas a reducir los daños por inundaciones mediante la implementación de obras físicas, mientras que las medidas no estructurales incluyen acciones indirectas e institucionales, tales como estudios hidrológicos e hidrodinámicos, que son esenciales para expandir el conocimiento y que entidades correspondientes utilicen los datos obtenidos para desarrollar estrategias de resiliencia (Roblero-Hidalgo et al., 2022). El presente proyecto puede ser considerado como una medida no estructural, ya que, mediante la divulgación de información sobre los efectos del cambio climático en el corregimiento El Cerrito, según los escenarios de cambio climático proyectados, busca instar a las autoridades a adoptar acciones de adaptación y mitigación frente a las consecuencias previstas.

De la misma forma, enfocar los modelos hidrodinámicos hacia simulaciones de los RCP es fundamental para generar más noción hacia las autoridades, ya que según Beleño Orozco & Borrero Guzmán (2024) las proyecciones de cambio climático se deben tener en cuenta como futuros escenarios posibles y así diseñar medidas que minimicen el impacto del cambio climático

Además, prever los cambios es la única forma de planificar un desarrollo que sea compatible con el clima futuro, y esto solo se puede lograr mediante el uso de herramientas científicas, tales como los escenarios de cambio climático (Granados, 2022).

Marcos de Referencia

Los marcos de referencia, compuestos por marco teórico-conceptual, estado del arte, marco normativo, marco institucional y marco geográfico son esenciales para contextualizar y estructurar el conocimiento en torno al tema central de esta investigación: inundaciones, cambio climático y simulaciones por medio de modelos hidrodinámicos.

La obtención de información se realizó por medio de bases de datos como ProQuest, SciELO, ScienceDirect, Google Scholar y el repositorio de la Universidad El Bosque. También se utilizaron tesauros para estandarizar palabras clave y así optimizar la búsqueda.

Estado de arte

Para llevar a cabo esta investigación, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica que incluyó fuentes internacionales, nacionales, regionales y locales. Esta revisión de literatura facilitó la exploración necesaria para reunir los parámetros y directrices requeridos para desarrollar un modelo de inundaciones en el área de estudio.

Tabla 1. *Bibliografía referente a la investigación a escala mundial, nacional, regional y local*

Año	Autor	Titulo	Resumen	Contribución a la presente investigación	Escala
2020	Ignacio Fraga Luis Cea Jerónimo Puertas	MERLIN: a flood forecasting system for coastal river reaches	Este articulo desarrolla un sistema de alerta temprana llamado MERLIN, para la amenaza de inundación por medio de un modelo hidrodinámico creado con la herramienta IBER. El artículo se crea a partir del reconocimiento de desarrollar sistemas de pronóstico hidrológico para tomar mejores decisiones. El sistema MERLIN fue implementado en tres cuencas	Este artículo emplea una metodología que convierte valores de caudal en pronósticos de niveles de agua mediante el software IBER. Esta metodología es relevante para el estudio actual, ya que demuestra la versatilidad de IBER en la comprensión del comportamiento del recurso hídrico. Además, el software	Mundial

			costeras en Galicia, España con áreas de 5, 15 y 80 km2 con el propósito de evaluar la viabilidad del sistema en cuencas pequeñas para poder analizar el rendimiento del sistema de pronóstico (Ignacio et al., 2020)	también se utiliza para evaluar amenazas de inundación	
2022	Rodrigo Hidalgo Roblero Jesús Morales Chávez Laura Castillo Ibáñez Oscar Vélez Palacios	Peligro por inundación durante el huracán Stan en la cuenca del rio Vicente Guerrero, Siltepec, Chiapas, México	La investigación utilizo un modelo hidrológico y un modelo hidrodinámico (ejecutado con IBER) para reportar niveles máximos del caudal de la cuenca del rio Vicente, y así simular la inundación. Luego, se contrastó la simulación con una imagen satelital obtenida de Bing Maps del huracán, que ilustra la trayectoria de este fenómeno, y se elaboró un mapa de peligrosidad conforme a la norma ACA de IBER.. (Roblero-Hidalgo et al., 2022)	La investigación es de utilidad ya que clasifica la peligrosidad de inundación con herramientas de modelación hidrológica como IBER. Asimismo, permite ver un enfoque más amplio acerca de cómo establecer parámetros en IBER para simular el dinamismo del agua	Mundial

2019	Diana Paola López Ramírez Diego Fernando Gómez Rojas	Determinación de la cota de inundación del rio Arauca en la vereda Barrancones, Municipio de Arauca mediante un modelo hidrodinámico	En la investigación se utilizó un modelo hidrodinámico para modelar la batimetría del rio que transcurre por la vereda Barrancones y así determinar condiciones de flujo, velocidad, profundidad promedio del caudal, mayor anchura y el nivel del recurso hídrico. El modelo hidrodinámico fue utilizado como complemento de un modelo hidrológico y así poder determinar la mancha de inundación de la zona (López Ramírez & Gómez Rojas, 2019)	La investigación tiene relación con el presente proyecto en el uso de batimetría, ya que son útiles para tener datos más acertados de la simulación del movimiento del recurso hídrico. Además, algunas de las condiciones analizadas con el modelo hidrodinámico también se analizaron en la presente investigación	Nacional
	Daniela Romero Pérez Daniel Gómez Romero	Implementación del software IBER para realizar un modelo de calidad del agua y evaluar escenarios en el rio ranchería, Guajira	El proyecto utiliza los parámetros establecidos en la herramienta IBER y evaluar los posibles escenarios de desabastecimiento del recurso hídrico en el rio Ranchería y luego crear estrategias para prevenir dichos impactos	La investigación utiliza la herramienta IBER para simular posibles escenarios del estado del recurso hídrico de una zona en específico. Lo mencionado anteriormente tiene similitud	Regional

2021			(Romero Pérez & Gómez Romero, 2021)	con lo realizado en el presente proyecto; una simulación de escenarios que comprometen el recurso hídrico y tienen relación con estrategias de mitigación	
2012	José Daniel Pabón Caicedo	Cambio climático en Colombia: Tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el sigo XXI	En esta investigación se usó un análisis estadístico y modelos climáticos para simular escenarios de cambio climático en Colombia. Los escenarios creados fueron basados en la temperatura.	La investigación utiliza igual que el presente proyecto una utilización de modelos climáticos para simular escenarios de cambio climático elaborados por el IPCC.	Regional
			Con la comparación de un escenario de temperatura entre los años 1961-1990 y un escenario de cambio climático basado en los escenarios generados por el IPCC (A2 y B2) se obtuvieron resultados acerca de las tendencias de temperatura para finales del siglo XXI, los datos anuales específicamente para el caribe describen una temperatura más	La comparación de los modelos climáticos a utilizar dio un enfoque más guiado a cuales modelos climáticos son más detallados para Colombia	

			caliente (Pabón Caicedo, 2012)		
2018	Lina María Abella Cataño Gina Paola Vergara Barrero	Modelación numérica y de transporte de sedimentos caso de estudio El Banco, Magdalena	Esta investigación utilizo la herramienta DELFT 3D para generar un modelo hidrodinámico que simulara tres escenarios de variación del caudal del brazo de Mompox (bajo, medio y alto) y agregando a esto, con la calibración de datos que se obtuvieron en campo poder obtener un diagnóstico de la zona para identificar las causas del problema, el cual es la afectación del sector económico por la disminución del caudal del brazo de Mompox (Abella Castaño & Barrero Vergara, 2018)	La investigación utiliza como metodología la división de fases por objetivo específico y asimismo utiliza los mismos parámetros que la presente investigación ya que tiene la misma zona de estudio. La metodología desarrollada en el trabajo de Castaño y Barrero sirvió como guía de esta investigación.	Local

Fuente: Elaboración propia

Marco Teórico-Conceptual

A continuación, se exponen hipótesis y nociones vinculadas con la detección de amenazas de inundación en el marco del cambio climático, fundamentadas en el análisis de distintas fuentes informativas. Este segmento comienza con una disertación general sobre el C.C, luego se trata el asunto principal de los escenarios de cambio climático y, por último, se examina el aspecto específico de las inundaciones y los modelos hidrodinámicos

El cambio climático es la alteración en la temperatura promedio, la cantidad anual de precipitaciones, la humedad relativa y el flujo superficial. Esta alteración produce cambios en el ciclo hidrológico, impactando el complejo sistema del planeta. (Hincapie et al., 2019).

La alteración provocada por el cambio climático en el *ciclo hidrológico* se debe a la intrincada naturaleza de este ciclo, ya que describe el dinamismo del agua a través de diversas fases y etapas en un sistema cerrado. Comienza en la atmósfera, donde el agua se manifiesta como vapor, derivado de la evaporación de los océanos. Posteriormente, la humedad, transportada por los vientos, se desplaza hacia los continentes, donde se condensa y precipita en forma líquida, sólida o de condensación. Durante la precipitación, el agua puede regresar a la atmósfera mediante la evaporación mientras cae, o puede depositarse sobre la vegetación. El agua que se deposita sobre las plantas puede evaporarse nuevamente y volver a la atmósfera o escurrir hacia el suelo. Esta agua que alcanza el suelo puede ser absorbida por las superficies líquidas (ríos, lagos, lagunas) o contribuir a la escorrentía, eventualmente retornando al mar. Además, el agua que penetra en el suelo puede formar parte del flujo subsuperficial, infiltrándose y, por percolación, integrarse al manto de agua subterránea. Sin embargo, esta agua infiltrada también puede emerger a la superficie en forma de manantiales (Rasco & Román, 2005)

Aunque el *cambio climático* es originado por procesos naturales, se ve acelerado por actividades humanas que liberan gases de efecto invernadero (GEI). Los GEI son compuestos que se encuentran en la atmosfera a niveles específicos y contribuyen al aumento de la temperatura global. Esto sucede debido a su habilidad para captar y liberar radiación infrarroja que emana la tierra (IPCC, 2021) .Una vez liberados, estos gases pueden persistir en la atmósfera durante periodos que abarcan desde años hasta décadas e incluso siglos (IPCC, 2021). Entre los GEI primarios se encuentran: Hidrofluorocarbonos, [H2O] Vapor de agua, [N2O] Óxido nitroso, Perfluorocarbonos, [CH4] Metano, [O3] Ozono, Halocarbonos, [SF6] Hexafluoruro de azufre, [CO2] Dióxido de carbono y Sustancias que contengan cloro y bromo (IPCC, 2021)

A pesar de los GEI y sus respectivas emisiones agravando el C.C, existen entidades relacionadas a proponer soluciones o estudios acerca de este fenómeno. En 1988 surgió el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático o IPCC por sus siglas en inglés. Su misión es llevar a cabo evaluaciones basadas en conocimientos científicos, técnicos y sociales sobre el C.C, analizando causas efectos y posibles enfoques para su disipación (IPCC, 2024b).

Los documentos del IPCC se estructuran en tres grupos de trabajo, junto con un grupo especial dedicado a la asistencia técnica y de apoyo (IPCC, 2024a).

- El primer grupo de trabajo se enfoca en las bases físicas del cambio climático
- El segundo grupo de trabajo trata temas acerca de la adaptación, vulnerabilidad e impacto del cambio climático
- El tercer grupo de trabajo genera informes acerca de la mitigación del cambio climático

Puesto que no se puede precisar con certeza la escala del incremento de la temperatura y las fluctuaciones en la precipitación futura, las proyecciones climáticas se basan en conjeturas sobre las condiciones socioeconómicas y culturales de las sociedades venideras (Velázquez-Zapata et al., 2017). Estas proyecciones se realizan a partir de diferentes escenarios de emisión de gases de efecto invernadero elaborados por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) (Velázquez-Zapata et al., 2017).

Los informes del IPCC incluyen, entre otros elementos, *escenarios de cambio climático*, que son simulaciones de emisiones de gases de efecto invernadero para años futuros. En 1992, se publicaron los primeros escenarios de emisiones de GEI, los cuales sirvieron como base para desarrollar modelos de circulación global y proyecciones sobre el cambio climático (IPCC, 2021)

Las emisiones de GEI para años próximos resultan de sistemas dinámicos complejos, influenciados por fuerzas determinantes como el aumento de la población, la evolución tecnológica y el progreso en el ámbito social y económico. El futuro de las emisiones está rodeado de un considerable grado de incertidumbre. Por lo tanto, los escenarios elaborados ofrecen visiones alternativas de posibles desarrollos y son herramientas valiosas para investigar como estas fuerzas determinantes podrían influir en las emisiones venideras. Además, permiten evaluar el nivel de incertidumbre que acompaña a dicho análisis (IPCC, 2021).

En el quinto informe de evaluación del IPCC o también denominado AR5, los escenarios de cambio climático se designan como trayectorias de concentración representativas (RCP por sus siglas en inglés). Los escenarios RCP integran proyecciones a lo largo del tiempo sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, aerosoles y gases con propiedades químicas activas, junto con modificaciones en el uso del suelo y los patrones de cobertura terrestre (Alatorre & Fernández Sepúlveda, 2022). El término "representativa" sugiere que cada RCP refleja uno de los múltiples escenarios plausibles capaces de generar distintos niveles de forzamiento radiativo. Por otro lado, el término "trayectoria" subraya la importancia no solo de las concentraciones finales, sino también del proceso temporal que conduce a esos niveles en el largo plazo.(Alatorre & Fernández Sepúlveda, 2022). Asimismo, los RCPs miden el forzamiento radiativo, la cual es una medida de influencia que las emisiones tienen para alterar el equilibrio entre la energía entrante-saliente y la tierra-atmosfera. Esta medida está en unidades de vatios por metro cuadrado o (W/m2) (IPCC, 2013)

Las trayectorias de concentración representativa son (Alatorre & Fernández Sepúlveda, 2022):

- RCP 2.6 (Mitigación drástica): Las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen a la mitad hacia 2050, lo que limitaría el aumento de la temperatura global cerca de 2°C para 2100 (IPCC, 2013)
- RCP 4.5 (Mitigación moderada): Las emisiones se estabilizan en torno a la mitad de los niveles actuales para 2080, y prevé un incremento de temperatura de aproximadamente 2,4°C para finales del siglo (IPCC, 2013)
- RCP 6.5 (Mitigación limitada): Las emisiones continúan creciendo hasta 2080, momento en que comienzan a disminuir, con un aumento proyectado de la temperatura en torno a 3°C hacia 2100 (IPCC, 2013)
- RCP 8.5 (Crecimiento continuo de emisiones): Las emisiones siguen aumentando al ritmo actual o incluso más rápido, y se estima que la temperatura superara los 3,7°C para 2100 (IPCC, 2013)

Las proyecciones de cambio climático generadas mediante modelos climáticos requieren información sobre las próximas concentraciones de gases de efecto invernadero, aerosoles y sustancias que destruyen el ozono. Esta información es proporcionada por los escenarios del IPCC, que ofrecen proyecciones de emisiones basadas en cómo podrían evolucionar los sistemas ecológicos a lo largo del siglo XXI (IPCC 2021). Además, los escenarios del IPCC representan un método sistemático para examinar posibles futuros y analizar la cadena de causa y efecto: desde las emisiones antropogénicas hasta los cambios en las concentraciones atmosféricas, y luego evaluar los impactos

en el balance energético de la Tierra (forzamiento radiativo). También permite evaluar los efectos resultantes en el clima global, regional y en los factores que influyen en el clima. (IPCC, 2022).

Los escenarios resultan fundamentales en el estudio del C.C, especialmente para desarrollar modelos climáticos, evaluar sus posibles efectos y diseñar estrategias tanto de mitigación como de adaptación (IPCC, 2021).

Las condiciones de los escenarios del IPCC pueden ser entradas para la simulación del cambio climático en años futuros por medio de un *modelo hidrodinámico.* Este término se define según Tironi-Silva et al. (2014) como un recurso que facilita la simulación virtual de los procesos que se desarrollan en un ecosistema acuático.

El autor también señala que los modelos hidrodinámicos se basan en tres componentes principales: la batimetría, que proporciona un modelo tridimensional de la geometría de fondo; las ecuaciones de estado, que simulan el comportamiento del fluido; y, en el caso de ecosistemas afectados por el océano, la inclusión de una señal de marea (Tironi-Silva et al., 2014).

El éxito de los modelos hidrodinámicos surge a partir de la capacidad que tienen para predecir el comportamiento de los cuerpos de agua (Tironi-Silva et al., 2014). Entre las posibles predicciones se puede encontrar una *inundación*, la cual, desde la perspectiva de la disciplina de la hidrología, es un proceso físico que transforma la energía del recurso hídrico y en consecuencia se da el desborde de un rio. En este proceso intervienen procesos atmosféricos, tales como las lluvias, la evaporación, la radiación solar y la temperatura atmosférica. Por otro lado, desde una perspectiva hidrológica, las inundaciones son fenómenos naturales que, además, obedecen a principios físicos que conectan los procesos atmosféricos con el comportamiento de la hidrosfera (Palacio, 2021).

Para el desarrollo de los modelos hidrodinámicos se utilizan herramientas o softwares hidrológicos. En el presente proyecto se utilizó *IBER*, el cual es un modelo matemático en dos dimensiones para simular el flujo en ríos y estuarios (Bladé et al., 2014). Para la implementación de la normativa vigente en recursos hídricos, fue diseñada esta herramienta, la cual cumple con las exigencias técnicas específicas de las confederaciones hidrográficas. Entre sus áreas de aplicación incluyen, por un lado, la modelización del flujo en superficie libre en ríos naturales, la identificación de zonas propensas a inundaciones y el análisis hidráulico de sistemas de encauzamiento. También se utiliza para el diseño hidráulico de redes de canales en flujo libre, la estimación de corrientes de marea en estuarios, la evaluación de la estabilidad de los sedimentos en el lecho y la investigación de procesos de erosión y sedimentación provocados por el transporte de partículas granulares (Bladé et al., 2014) . IBER utiliza el método de volúmenes finitos que son idóneos para modelar aguas someras.

Con la herramienta IBER se pueden solucionar ecuaciones de aguas someras para inundación, estas ecuaciones son denominadas como 2D Shallow Water Equations o ecuación de Saint Venant.

IBER dispone de tres módulos de cálculo esenciales: hidrodinámico, turbulencia y transporte de sedimentos (Medina Torre, 2016). El presente proyecto se centró en el módulo hidrodinámico solucionando la ecuación Saint Venant, la cual asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativa uniforme de la velocidad en profundidad (Medina Torre, 2016). Hoy en día, los estudios que evalúan áreas susceptibles a inundaciones suelen utilizar principalmente modelos numéricos basados en la ecuación bidimensional de aguas someras.

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial(uh)}{\partial x}+\frac{\partial(vh)}{\partial y}=0$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(u^2h+\frac{gh^2}{2}\right)+\frac{\partial(uvh)}{\partial y}=ghS_{0x}-ghS_{fx}+\frac{\tau_{wx}}{\rho}+h\varsigma v \quad (1)$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t}+\frac{\partial(uvh)}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}\left(v^2h+\frac{gh^2}{2}\right)=ghS_{0x}-ghS_{fx}+\frac{\tau_{wx}}{\rho}+h\varsigma v$$

Según las ecuaciones de Saint Venant (1), los valores son:

h: profundidad del agua
u: velocidad promediada en profundidad en la dirección x
v: velocidad promediada en profundidad en la dirección y
ρ: Densidad del agua
τwx: esfuerzos cortantes superficiales por efectos del viento
τwy: esfuerzos cortantes superficiales por efectos del viento
ς: Parámetro de Coriolis
S0x: pendientes de fondo en la dirección x
S0y: pendientes de fondo en la dirección y
Sfx y Sf: pendientes de fricción

Las ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant se formulan como se muestra en la ecuación 2, siempre y cuando se excluya la influencia de la fuerza de Coriolis, generalmente insignificante en los cauces de los ríos. Asimismo, se omiten las tensiones efectivas, que son menos relevantes en comparación con otros términos, y las tensiones generadas por el viento en la superficie libre (Medina Torre, 2016):

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial(uh)}{\partial x}+\frac{\partial(vh)}{\partial y}=0$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(u^2h+\frac{gh^2}{2}\right)+\frac{\partial(uvh)}{\partial y}=gh(S_{0x}-S_{fx}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t}+\frac{\partial(uvh)}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}\left(v^2h+\frac{gh^2}{2}\right)=gh\left(S_{0y}-S_{fy}\right)$$

Por otra parte, el *periodo de retorno* (T) es un término utilizado comúnmente en hidrología para expresar la probabilidad de ocurrencia de un evento en un tiempo determinado. El periodo de retorno se define como el inverso de la probabilidad de ocurrencia, y expresa el tiempo en que un evento de cierta magnitud sea igualado o excedido (Tironi-Silva et al., 2014)

$$T=\frac{1}{P} \quad (3)$$

En la ecuación 3 se evidencia que T es el periodo de retorno, y P la probabilidad de ocurrencia del evento.

Marco Normativo

En este apartado se consideraron las diferentes políticas normativas que estén acorde a los principales temas de esta investigación, los cuales son la identificación de inundación, desarrollo de un modelo hidrodinámico y la prevención de afectaciones en la comunidad del corregimiento El Cerrito.

Tabla 2. *Marco Normativo*

Nombre	Descripción
Ley 99 de 1993	La presente ley facilito la fundación del Ministerio del Medio Ambiente, encargado de la administración del entorno natural y los recursos renovables. Además, esta entidad promueve una relación armoniosa entre los seres humanos y la naturaleza (Ley 99 de 1993, 2023).
Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso hídrico (PNGIRH)	Esta política establece las condiciones y lineamientos para la adecuada gestión de los recursos hídricos a nivel nacional. Incluye proyectos enfocados en la mitigación y detección de inundaciones, contribuyendo así al manejo efectivo de cuencas y microcuencas (Colombia. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial et al., 2010)
Decreto 1541 de 1978	El decretó reglamenta las normas relacionadas con el recurso hídrico. Quiere preservar la cantidad disponible del recurso hídrico por medio de diversas estrategias, entre ellas otorgar permisos de viabilidad de estudios ante inundaciones (Decreto 1807 de Septiembre 19 de 2014, 2024)
Ley 1921 de 2018	Ley que contiene las directrices necesarias para realizar la gestión de cambio climático (Alzate-Navarro & Castro-Díaz, 2024). La gestión del cambio climático consiste en diseñar, implementar y evaluar acciones que aborden los problemas relacionados con los GEI. El objetivo de este proceso es disminuir la afectación a comunidades y a los ecosistemas por efectos de cambio climático (Ramírez Pabón, 2022).

Decreto 298 de 2016	Este mecanismo institucional, define la estructura del Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA), también establece la operatividad necesaria para coordinar, articular, evaluar políticas, planes y diversos proyectos y su formulación enfocados en la adaptación al cambio climático y la reducción de emisiones de GEI (Alzate-Navarro & Castro-Díaz, 2024).
Política Nacional de Cambio Climático	El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible la elaboró con el objetivo de incorporar la gestión del cambio climático en las decisiones tanto del sector público como privado. De esta manera, se busca una integración completa de varias estrategias, entre las que destacan la gestión del recurso hídrico, la promoción de un desarrollo bajo en carbono en Colombia, la reducción de la deforestación y degradación de los bosques, y el financiamiento climático a nivel nacional. (Alzate-Navarro & Castro-Díaz, 2024)

Fuente: Elaboración propia

- Ley 99 de 1993

En el contexto de este proyecto, el Ministerio del Medio Ambiente proporciona el marco institucional y normativo que respalda la investigación y aplicación de modelos hidrodinámicos, así como el análisis de los efectos del cambio climático sobre el río Magdalena y las comunidades circundantes. Al promover una relación armoniosa entre las personas y el medio ambiente, esta ley también respalda los objetivos del proyecto en cuanto a la concienciación de la comunidad y la divulgación de conocimientos sobre las inundaciones. Además, establece las bases para coordinar esfuerzos entre distintas autoridades y actores sociales, asegurando que los resultados del proyecto puedan ser utilizados para influir en políticas y prácticas de conservación y prevención de amenazas.

- Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso hídrico (PNGIRH)

La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) se relaciona directamente con el presente proyecto, ya que ambos comparten el objetivo de promover una gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos. El proyecto, al identificar la amenaza de inundación para un periodo de retorno de 100 años e incorporar los escenarios de cambio climático RCP 2.6 y 8.5, contribuye al manejo integral de la cuenca del río Magdalena, alineándose con los lineamientos de la política. Además, su enfoque en la caracterización de las amenazas por inundación y la provisión de información para la toma de decisiones fortalece las estrategias de mitigación y adaptación impulsadas por la PNGIRH, respondiendo así a los retos que plantea el cambio climático en las regiones vulnerables del país.

- Decreto 1541 de 1978

El Decreto se relaciona con este proyecto, ya que establece normas para la conservación y gestión sostenible del recurso hídrico, incluyendo la regulación de estudios relacionados con inundaciones. El presente proyecto, al caracterizar la amenaza por inundación en el corregimiento El Cerrito considerando un periodo de retorno de 100 años y escenarios de cambio climático (RCP 2.6 y 8.5), se alinea con las disposiciones del decreto. Al generar información técnica detallada sobre el comportamiento de las inundaciones, el proyecto contribuye a respaldar estudios de viabilidad y a fortalecer la planificación para la preservación del recurso hídrico en la región.

- Ley 1921 de 2018

Esta ley guarda una estrecha relación con el presente proyecto, ya que establece las directrices para la gestión del cambio climático, incluyendo el diseño e implementación de acciones que reduzcan los impactos de este fenómeno. El proyecto, al analizar la amenaza de inundación incorporando escenarios de cambio climático, aporta información clave para evaluar y mitigar los efectos asociados con los gases de efecto invernadero en las dinámicas hídricas del corregimiento El Cerrito. De este modo, contribuye a disminuir la afectación de las comunidades y los ecosistemas frente a los efectos climáticos, alineándose con los objetivos de la ley.

- Decreto 298 de 2016

El Decreto 298 de 2016, que define la estructura del Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA), está directamente relacionado con este proyecto de grado, ya que establece los mecanismos para coordinar y articular políticas y proyectos enfocados en la adaptación al cambio climático y la reducción de emisiones de GEI. Al analizar la amenaza de inundaciones bajo escenarios de cambio climático, el proyecto genera insumos clave para la planificación y evaluación de estrategias adaptativas. Esto contribuye a los objetivos del SISCLIMA al proporcionar información técnica esencial para la gestión integral del cambio climático en el ámbito territorial.

- Política Nacional de Cambio Climático

La Política Nacional de Cambio Climático se relaciona con el presente proyecto al fomentar la integración de la gestión climática en la toma de decisiones públicas y privadas. El proyecto, al evaluar la amenaza de inundaciones bajo escenarios de cambio climático, contribuye a la gestión sostenible del recurso hídrico y genera información clave para promover un desarrollo resiliente y bajo en carbono. Además, al proporcionar herramientas para la adaptación local, apoya los objetivos de la política, como la disminución de impactos asociados al cambio climático y la planificación estratégica en el territorio.

Marco Geográfico

Colombia es un país altamente conocido por su riqueza hidrográfica, según IDEAM (2023) esto es debido a su diversidad de relieve, ubicación geográfica y a los diferentes climas que posee. Asimismo, Colombia tiene un valor de escorrentía de 1963 km3 y es el único país de América del sur que limita con el océano pacífico y el mar caribe. Entre los flujos de agua más importantes que recorren el país, está la denominada arteria principal de Colombia, el cual es el rio Magdalena, este nace en el páramo de las papas y atraviesa todos los medios bilógicos del país hasta llegar al mar (Aristizábal-Quintero, 2024). Durante su trayecto, el río Magdalena tiene una confluencia con el rio Cesar y allí se encuentra El Banco, municipio del departamento del Magdalena. El municipio El Banco está ubicado en el extremo más meridional del departamento del Magdalena, tiene 56.112 habitantes en la zona urbana y 19.985 habitantes en la zona rural. Su economía se basa en la actividad

pesquera, la agricultura y la ganadería. Además, está conformado por corregimientos como: Mata de caña, Garzón, El Trébol y El Cerrito, área de estudio del presente trabajo (Alcaldía de El Banco, 2020)

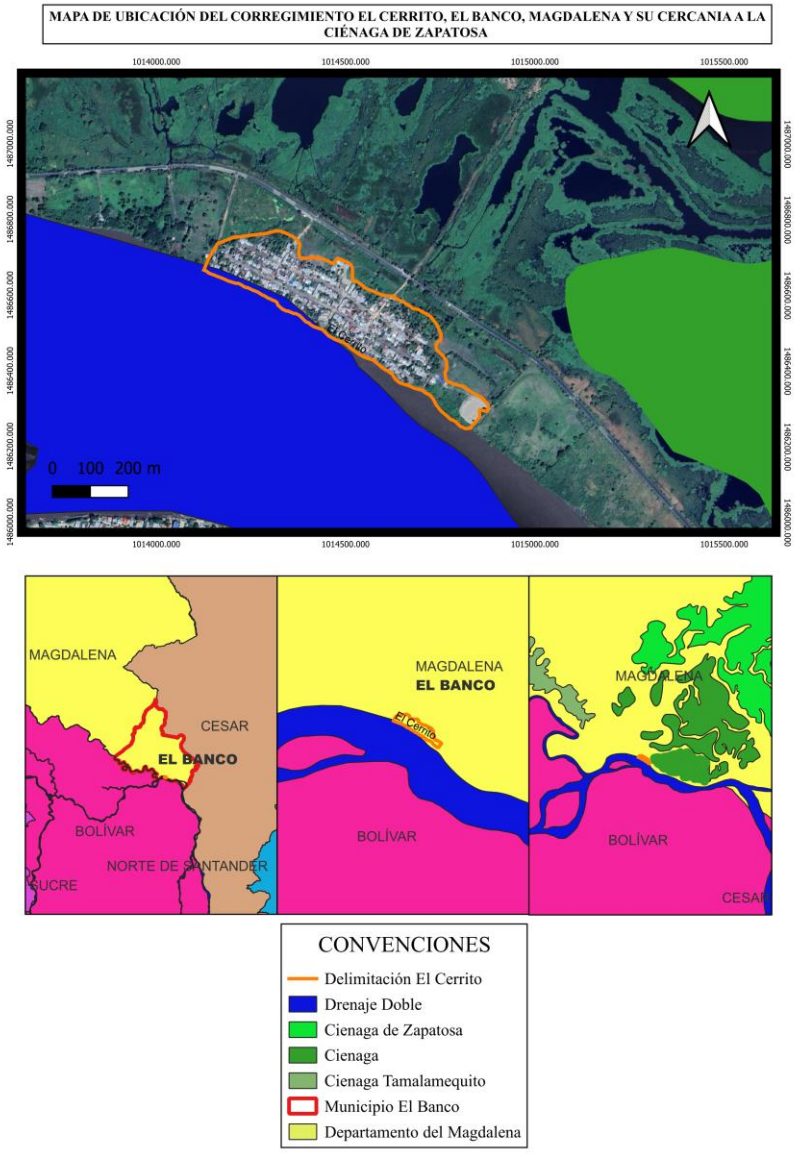

Figura 1. *Mapa de ubicación del corregimiento El Cerrito.* Fuente: Elaboración Propia

Según Beleño Orozco & Borrero Guzmán (2024) el corregimiento El Cerrito tiene coordenadas de latitud de 8.995887 y longitud -73.944278, y hace parte de las 27.909 hectáreas que se encuentran dentro de la cuenca de la Ciénaga de Zapatosa. Agregando a esto, Aguilera Díaz (2011) señala que la ciénaga de Zapatosa presenta una depresión con profundidades que varían entre 1 y 8 metros, dependiendo de si se encuentra en la temporada seca (febrero) o en la temporada de lluvias (mayo). También indica que la temperatura fluctúa entre 28°C y 32°C, y añade que el régimen de lluvias en el complejo cenagoso de Zapatosa, dentro de la cuenca del Magdalena, es bimodal. Sin embargo, es importante destacar que factores externos, como el cambio climático, influyen en el ciclo de precipitaciones a lo largo de toda la cuenca del rio Magdalena, lo cual intensifica los periodos de inundación y sequía en la ciénaga de Zapatosa y otros humedales de la depresión Momposina (Aguilera Díaz, 2011).

En 1996 se llevó a cabo un diagnóstico ambiental en la ciénaga de Zapatosa, donde se identificaron varios problemas, tales como la deforestación, el manejo del recurso hídrico, la obstrucción de los canales, la falta de viviendas apropiadas para los pescadores, la implementación de estanques piscícolas como alternativa para los pescadores y la necesidad de promover la educación ambiental dirigida a autoridades municipales, empresarios y a la comunidad en su conjunto (Aguilera Díaz, 2011). Esos problemas actualmente tienen vigencia en municipios olvidados estatalmente de la ciénaga de Zapatosa como el Banco, el mismo autor menciona como el municipio tiene coberturas de acueducto inferiores al 60% y es uno de los municipios que presentan mayor pobreza en el marco del país (Aguilera Díaz, 2011).

Marco Institucional

El corregimiento El Cerrito es la extensión del municipio El Banco, Magdalena que más sufre de inundaciones debido a su cercanía al rio magdalena, por ende, diversas entidades tienen como misión generar actividades en donde participen para la mitigación de la inundación. Algunas entidades son:

Tabla 3. *Entidades relacionadas con la investigación*

Entidad	Función
Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible (MADS)	En relación con el proyecto actual, el MADS ocupa un papel jerárquicamente importante como una de las principales entidades responsables de definir estrategias para mitigar los impactos de las inundaciones. Sus obligaciones se basan en ser la autoridad encargada de las leyes, políticas y regulaciones que aseguren la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables (Ley 99 de 1993, 2023)
Alcaldía municipal de El Banco- Magdalena	La Alcaldía municipal tiene como objetivo impulsar el desarrollo integral del municipio mediante acciones clave que busquen mejorar la calidad de vida de los habitantes. Entre las acciones que ha realizado la entidad, se evidencio el acompañamiento a los habitantes del corregimiento El Cerrito, ya que el área sufrió de inundación por el desbordamiento del rio magdalena (Alcaldía de El Banco Magdalena, n.d.)
Corporación Autónoma Regional Del Magdalena (CORPAMAG)	CORPAMAG compete el municipio El Banco, en donde está ubicado El Cerrito. Entre las acciones de la corporación esta la protección y conservación ambiental, el manejo de recursos hídricos y el desarrollo de proyectos ambientales. Como la corporación tiene un enfoque integral, puede incluir la implementación de proyectos hidrológicos que permitan un enfoque en

	inundaciones y la detección o mitigación de estas (Corporación autónoma regional del Magdalena, 2021)
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)	IDEAM, como organismo estatal, ofrece respaldo científico y técnico al Sistema Nacional Ambiental. Su tarea principal es recopilar y generar datos fiables, actuales y consistentes acerca del estado y comportamiento de los recursos naturales y el medio ambiente. Este conocimiento es esencial para orientar la creación y revisión de políticas ambientales, y permite que tanto el sector público como el privado, además de la sociedad, tomen decisiones basadas en información sólida (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, n.d.)

Fuente: Elaboración propia

Metodología

La metodología del presente estudio se organizó en fases con el propósito de facilitar una comprensión clara y estructurada del desarrollo del proyecto. Estas fases están alineadas con los objetivos específicos establecidos para la investigación. La estructura metodológica, que incluye las actividades diseñadas para alcanzar el objetivo general, se fundamenta en la definición detallada de enfoque, alcance, método, técnica e instrumentos. A continuación, se presentan las fases:

Fase 1: Insumos
Fase 2: Desarrollo del modelo hidrodinámico
Fase 3: Clasificación de la amenaza

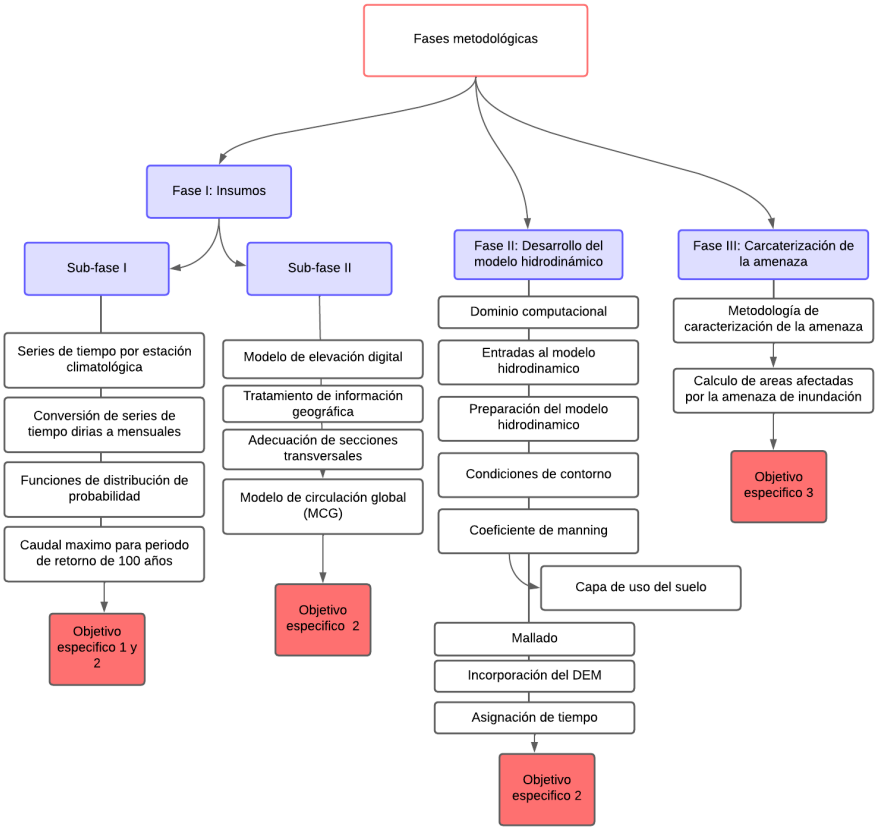

Figura 2. *Fases metodológicas, sus actividades y la relación con los objetivos específicos.* Fuente: Elaboración propia

La figura 2 muestra una relación entre las fases, las actividades de cada una y los objetivos específicos que están relacionados con cada una, siendo así una guía más dinámica para el entendimiento de la metodología

Método

Se utilizo el método analítico deductivo en toda la investigación ya que considera los componentes individuales de una situación de estudio para adquirir una perspectiva más amplia. Asimismo, la utilización del método analítico deductivo permite identificar los componentes de un fenómeno y analizarlos de manera sistemática y detallada. También se menciona como el método analítico deductivo parte de principios generales presentados en diferente literatura para así proporcionar nuevo conocimiento (Sampieri Hernández et al., 2014)

Enfoque de la investigación

La presente investigación tuvo un enfoque mixto, puesto que integro la recopilación y el análisis de parámetros cualitativos y cuantitativos de manera teórica y sistemática. En el marco de este estudio, la información se obtuvo a partir de fuentes primarias (información proveniente de información directa, como estudios o comunidades) y fuentes secundarias (referencia de la fuente original) (Sampieri Hernández et al., 2014). El enfoque cuantitativo fue empleado en el objetivo específico 1, 2 y 3. En el objetivo específico 1, se obtuvo datos numéricos de la variable caudal medio diario de la estación climatológica "PENONCITO" del IDEAM. En el objetivo específico 2, se hizo un tratamiento de datos del caudal máximo para ejecutar el modelo hidrodinámico. Por último,

para el objetivo específico 3, se utilizaron los datos de profundidad y velocidad de los resultados del modelo hidrodinámico para generar un mapa de amenaza de inundación.

El enfoque cualitativo fue empleado en el objetivo específico 3, ya que, por medio de la literatura y su análisis, se pudo caracterizar la amenaza por inundación. También se tuvo en cuenta la historia de afectación de inundación de la zona para un análisis más preciso

El énfasis de la importancia del enfoque está en que permite una comprensión más completa y matizada de los fenómenos investigados, integrando distintos tipos de datos para abordar de manera integral los objetivos del estudio. (Sampieri Hernández et al., 2014).

Alcance de la investigación

La presente investigación tiene un alcance descriptivo para el objetivo específico 1, 2 y 3, ya que se centra en la recopilación y análisis de datos para reportar información sobre diversas variables y conceptos relacionados con el fenómeno de las inundaciones. Se emplea un modelo hidrodinámico para recolectar datos, complementado por una revisión exhaustiva de bibliografía de múltiples fuentes, con el fin de analizar y describir el fenómeno de las inundaciones (Sampieri Hernández et al., 2014).

Para el objetivo específico 1, el alcance es tanto descriptivo como correlacional, pues utiliza la variable numérica de caudal medio diario para establecer caudales máximos en un periodo de retorno especifico. Para el objetivo específico 2, el alcance es descriptivo como correlacional, ya que a partir de datos de literatura y tratamiento de datos de caudal se ejecutó la elaboración del modelo hidrodinámico. Por último, para el objetivo específico 3, el alcance es descriptivo ya que utiliza el análisis de datos y conceptos relacionados para caracterizar la amenaza por inundación.

Los resultados del estudio consistieron en el análisis detallado de los datos obtenidos mediante el modelo hidrodinámico. A través de una metodología de caracterización de la amenaza por inundación, se evaluará si la frecuencia o intensidad de las inundaciones podría aumentar o disminuir en un periodo de retorno de 100 años incorporando los escenarios RCP 2.6 y 8.5.

Es importante señalar que esta investigación no se centró en el análisis de la vulnerabilidad asociada a las inundaciones en la zona de estudio. Su enfoque principal fue la elaboración de simulaciones de los escenarios de Concentración Representativa (RCP) con el fin de identificar la amenaza de inundaciones para un periodo de retorno de 100 años. En el apartado de resultados, análisis y discusión, se mencionaron estrategias potenciales de mitigación y adaptación ante los impactos del cambio climático que puedan complementar los datos de identificación de la amenaza de inundación presentados en este estudio. Sin embargo, este proyecto no profundizó en las acciones específicas de mitigación y adaptación que debían llevarse a cabo; se mencionaron con el propósito de proporcionar un contexto más amplio a la investigación. El objetivo principal fue evidenciar cómo los modelos matemáticos son herramientas efectivas para identificar fenómenos hidrometeorológicos extremos, lo que a su vez pudo fomentar la discusión de posibles estrategias que guiaran una adecuada toma de decisiones por parte de las autoridades competentes, respaldada por información técnica y de ingeniería.

Unidad de análisis de la investigación

Para determinar la unidad de análisis de la investigación se tuvo en cuenta la pregunta de investigación: ¿Como las herramientas de modelación matemática permiten determinar la amenaza

por inundación con la incorporación de escenarios de cambio climático que afecten directamente la toma de decisiones de autoridades pertinentes?

A partir de esto, la unidad de análisis se compone de:

- Análisis de la inundación en la zona de estudio a partir del cambio climático
- El grado de funcionamiento del modelo hidrodinámico para identificar una amenaza por inundación

Técnicas e instrumentos para recolectar información

Para el objetivo específico 1

Para el desarrollo del primer objetivo específico se utilizaron datos cuantitativos que posteriormente se convirtieron en información base para la realización de toda la investigación. Por ende, para obtener esta información se utilizó el instrumento de ***datos DHIME y Vertex Nasa*** para extraer variables de caudal otorgados por el IDEAM y la extracción de un modelo digital de elevación (DEM) de la zona de estudio respectivamente. Asimismo, la variable de caudal extraída fue utilizada para poder encontrar el caudal máximo para periodo de retorno de 100 años con el instrumento ***Python*** y a partir de las técnicas de ***análisis documental, revisión literaria y análisis de datos*** se calculó la variación del caudal máximo para un periodo de retorno de 100 años del rio magdalena incorporando los escenarios de cambio climático RCP 2.6 y RCP 8.5.

Para el objetivo específico 2

En el segundo objetivo específico se utilizaron los datos encontrados de caudales máximos por periodo de retorno y los datos de variación de caudal para recrear un modelo hidrodinámico de los posibles escenarios de comportamiento de la inundación, para ello se utilizó como instrumento el ***software IBER*** el cual permitió el tratamiento de la información geográfica, la adecuación de entradas al modelo, la preparación del mismo, la integración del dominio computacional, asignación de valores de Manning, condiciones de contorno y la agregación del mallado y el modelo de elevación digital (DEM) por medio de la técnica de ***Diseño computacional.***

Para el objetivo específico 3

En el tercer objetivo específico se utilizaron los datos de salida de profundidad y velocidad del modelo hidrodinámico y posteriormente con el instrumento ***QGIS*** se generó un mapa de amenazas con la técnica de ***Diseño computacional.*** Asimismo, con el mapa de amenazas se usó la técnica de ***Análisis documental*** con el instrumento de ***bases de datos, Google académico, documentos científicos para*** interpretar y caracterizar la amenaza.

Técnicas e instrumentos para sistematizar y organizar la información

La organización de la información fue necesaria para tener un mejor manejo del orden y de la estructuración de la investigación. Los datos cuantitativos obtenidos de la *Fase 1: Insumos* fueron sistematizados por medio del instrumento ***Excel*** para realizar los cálculos pertinentes con la técnica de ***Tablas de datos*** y posteriormente poder ser utilizados en la *Fase 2: Desarrollo de modelo hidrodinámico.*

Técnicas e instrumentos para interpretar los resultados

Los datos cualitativos y cuantitativos se organizaron mayoritariamente en el instrumento ***Excel***. Posteriormente, con apoyo de la técnica ***análisis documental***, se indago en diversas fuentes de datos y artículos científicos que permitiera realizar un ***análisis comparativo*** entre los diferentes escenarios de cambio climático modelados y generar un mapa de amenaza (figura) que estuviera apoyada con la explicación en prosa, de tal forma que se explique textualmente si existe o no existe una amenaza por inundación ante escenarios de cambio climático en la zona de estudio.

Fases metodológicas

A continuación, se explicarán las fases metodológicas y sus actividades correspondientes

Fase I: Insumos

La primera fase, se divide en 2 subfases: subfase I y subfase II. En la subfase I, se realizó una recopilación de información cualitativa y cuantitativa para la estimación de caudal máximo para un periodo de retorno de 100 años. Posteriormente, en la subfase II se hizo una recolección de información que sirvió para el desarrollo del modelo hidrodinámico 2D ejecutado.

Subfase I

Series de tiempo por estaciones climatológicas.

A través de las estaciones climatológicas gestionadas por el IDEAM por medio de la plataforma datos DHIME, se extrajeron los datos del caudal medio diario correspondientes al periodo de tiempo de 2000-2024. La estación seleccionada fue “PENONCITO”, con el código 25027330, ubicada en el departamento de Bolívar. No obstante, se encuentra en proximidad cercana al corregimiento de El Cerrito, Magdalena.

Figura 3. *Figura representativa de la cercanía entre la estación climatología y el corregimiento El Cerrito*. Fuente: Elaboración propia

En la figura 3 se evidencia un polígono rojo representando el corregimiento El cerrito y un punto verde representando la ubicación de la estación climatológica “PENONCITO” y su cercanía

Conversión de series de tiempo diarias a mensuales.

La serie de tiempo del caudal medio diario proporcionada por la plataforma DHIME se convirtió en una serie de tiempo mensual para fines óptimos en la organización de datos, y asimismo es útil en la facilitación de manejo de datos para cálculo de caudales máximos. También se calcularon los caudales máximos promediados a partir de la serie de tiempo mensual, estos valores fueron utilizados para la creación de la matriz de grupos estadísticos

Grupos estadísticos

La conversión de datos diarios a datos mensuales de los valores del caudal y su debido ordenamiento se utilizaron como grupos estadísticos para determinar el periodo de retorno mes a mes por medio de la herramienta Python. Esta herramienta evaluó 12 funciones de distribución de probabilidad y su ajuste de bondad para escoger la que mejor se ajustara a los datos reales, y así poder simular el comportamiento del caudal para el periodo de retorno de 100 años.

Funciones de distribución de probabilidad

Las funciones de probabilidad sirven para relacionar sucesos o eventos de un espacio muestral con valores reales y posteriormente cuantificar una probabilidad de los eventos de un experimento aleatorio, representa el modelo matemático que sirve para expresar el comportamiento de los fenómenos aleatorios (Calandra & Costa, 2016)

Existen múltiples funciones de distribución de probabilidad, por ende, se debe escoger las funciones más acordes a cada estudio. Asimismo, algunas distribuciones no pueden resolverse analíticamente por ende se recurre a métodos numéricos que sirven para calcularla, las cuales son variables estandarizadas (Garcia Garavito & Malaver Gomez, 2016)

En la presente investigación se escogieron 12 funciones de probabilidad (Distribución normal, Log-normal, Gumbel Left, Gumbel Right, Gamma, Log-Gamma, Weibull mínimo, Weibull máximo, Power Law, Exponencial, Nakagami, y de valores extremos debido a que son las más comunes en la disciplina de la hidrología:

Distribución normal

$$f(x) \int_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \, dx \tag{4}$$

En la ecuación 4 se evidencia la fórmula de distribución normal.

Donde:
μ= media
σ= desviación estándar

En la ecuación 5 se evidencia la variable estandarizada requerida para resolver la integral de la ecuación de distribución normal.

$$Z = \frac{x-\mu}{\sigma} \tag{5}$$

Donde:

x= Intensidades
μ= media
σ= desviación estándar

$$f(x) = f(z) = \int_{\infty}^{z} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \tag{6}$$

En la ecuación 6 se muestra cómo se integra la variable estandarizada (4) y la ecuación de la distribución normal (5).

Distribución Log-normal

Los logaritmos naturales de la variable aleatoria se distribuyen con más normalidad dependiendo del valor de los datos (Garcia Garavito & Malaver Gomez, 2016).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{ln-\alpha}{\beta}\right)^2} \tag{7}$$

En la ecuación 7 se evidencia la fórmula de la distribución Log-normal.

Donde:
α= media de los logaritmos de la variable
β =Desviación estándar de los logaritmos de la variable
x = Intensidades

La ecuación 8 muestra la variable estandarizada necesaria para obtener valores más exactos de la distribución de probabilidad Log-normal

$$z = \frac{lnx-\alpha}{\beta} \tag{8}$$

Por ende, integrando la variable estandarizada y la ecuación de la función de distribución de probabilidad, la formula se escribe como:

$$f(x) = f(z) = \int_{-\infty}^{z} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \tag{9}$$

Distribución de Gumbel

El método de Gumbel es una ecuación utilizada para calcular caudales máximos que permitan modelar y predecir eventos hidrológicos extremos. Se basa en la distribución de Gumbel, la cual es una distribución de probabilidad principalmente diseñada para evaluar la frecuencia y magnitud de eventos (Romo & Ortiz Pérez, 2001).

$$Q_{máx} = \left[Q - \left(\frac{SQ}{6N}\right)\right]\left[Y_n + Log.e \times Log.e\left(\frac{Tr}{Tr-1}\right)\right] \tag{10}$$

Donde:
$Q_{máx}$: Caudal máximo para un periodo de retorno (m^3)

Q: Caudal medio (m^3/s)
SQ: Desviación estándar de los caudales (m^3/s)
N: Parámetro de Gumbel
Y_n: Parámetro de Gumbel
TR: Periodo de retorno

La distribución Gumbel puede derivar en dos distribuciones para hacer más preciso la probabilidad: Gumbel left y Gumbel right, estas distribuciones modelan diferentes tipos extremos, es decir valores máximos o mínimos. Gumbel left se utiliza para modelar los valores mínimos, mayoritariamente utilizado para analizar los mínimos extremos, como mínimas temperaturas o bajas precipitaciones. En cambio, Gumbel right modela los valores máximos, y es común en el análisis de máximas temperaturas, inundaciones u otros fenómenos de picos muy altos (Romo & Ortiz Pérez, 2001)

Distribución Gamma

Las distribuciones Gamma se emplean comúnmente para modelar las frecuencias de precipitación, debido a su capacidad para abarcar una amplia variedad de distribuciones con solo dos parámetros: el parámetro de forma (α) y el parámetro de escala (β) (Oruezabal et al., 2023)

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx \tag{11}$$

Donde:
α : Parámetro de forma
β: Parámetro de escala

Distribución Log-Gamma

La distribución Log-Gamma deriva de la distribución Gamma. Se crea esta nueva distribución de probabilidad logarítmica a través de la modificación de los parámetros, dando como resultado un nuevo modelo para la familia gamma. La distribución log-gamma tiene la capacidad de describir observaciones agrupadas que se relacionan con tiempo de vida, supervivencia y falla. Por ende, el modelo probabilístico es flexible en las aplicaciones de distribuciones en diferentes áreas de ciencia y tecnología. (Aguilar Manríquez, 2017)

$$U = \frac{Y-u}{\sigma} \tag{12}$$

En la ecuación 12 se evidencia la variable estandarizada de la distribución Log-Gamma, la cual permite que se estructure la fórmula de la distribución Log-Gamma

$$F_v(\mathrm{u},\lambda, \sigma, \mu) = F_x(u) \tag{13}$$

$$F_y(\mathrm{y},\lambda, \sigma, \mu) = f_o(y) = \frac{1}{\sigma} f_o(x) = \left(\frac{y-u}{\sigma}\right) \tag{14}$$

Donde:
θ = (λ, σ, μ)
μ = log(α) + τ−1 log(λ−2)
σ =$(\tau\sqrt{k})^{-1}$
λ =$(\sqrt{k})^{-1}$

La ecuación 13 y 14 representan la distribución de Log-Gamma integrando la variable estandarizada.

Distribución generalizada de valores extremos (Genextreme)

Esta distribución es una combinación de las distribuciones de Gumbel, Frechet y Weibull. Es de gran utilidad porque combina tres distribuciones, generando que no se deba hacer una comparación de selección entre los tres modelos de distribución ya que es una integración. (Gelmi & Seoane, 2013)

$$F(x) = Exp\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-\left(\frac{1}{\xi}\right)} \quad (15)$$

Donde:

x: Variable aleatoria
ξ: Parámetro de forma
μ = Parámetro de localización
σ =Parámetro de escala

Para que la ecuación se pueda resolver, primero se debe verificar la siguiente condición

$$1 + \left(\frac{x+\mu}{\sigma}\right)\xi > 0 \quad (16)$$

Donde:

x: Variable aleatoria
ξ: Parametro de forma, $-\infty < \xi < \infty$
μ = Parametro de localización, $-\infty < \mu < \infty$
σ =Parametro de escala, σ> 0

Distribución de Weibull

Es una función de distribución utilizada para modelar la distribución de los componentes de un sistema hasta su tiempo de falla (o deterioro) (Robledo, 2000).Se define como:

$$f(t)=\alpha\beta t^{\alpha-\beta}e^{-a^{t^{\beta}}} para\ T > 0$$

$$f(t)= 0 \text{ en cualquier otro caso} \quad (17)$$

$$\text{con } \alpha > 0\ y > 0$$

Donde:
β: parámetro de forma
T: Variable aleatoria
α: parámetro de escala que refleja el tamaño de las unidades en el que se mide la variable aleatoria T

La distribución de Weibull mínimo modela el tiempo hasta que ocurra un evento mínimo, es decir, calcula la probabilidad de que ocurra un evento pequeño o con valores mínimos. En cambio, la distribución Weibull máximo modela valores máximos o el comportamiento extremo de un fenómeno (Robledo, 2000).

Distribución Exponencial

Esta distribución depende de un único parámetro: λ (Alonso Cadavieco, 2023). Si la variable aleatoria es X, entonces la función de distribución es:

$$P(X \leq x) = 1 - e^{-\lambda x} \tag{18}$$

Además, el momento de orden n está determinado por:

$$E(X^n) = \frac{n!}{X^n} \tag{19}$$

Distribución Power Law (distribución de potencia)

Esta distribución resulta adecuada para representar situaciones en las que los valores elevados de la variable aleatoria ocurren con baja frecuencia, mientras que los valores medios y bajos son más frecuentes. (Aljure Jiménez & Gallego, 2010)

$$Px = Cx^{-\alpha} \tag{20}$$

Donde:
P(x): Probabilidad (Frecuencia) de que la variable tome valor de X
a : Exponente de la distribución, tiene que se mayor a 1 o no converge
X: Variable a analizar
C: Constante que depende del tipo de evento

Distribución de Nakagami

La presente distribución proviene de la distribución gaussiana y extiende la distribución de Rayleigh. Se considera como la distribución de la longitud de un vector, que es la suma de un vector fijo y otro con una distribución Rayleigh (Paredes Cerón & Sánchez Dorado, 2013)

Si los parámetros son la longitud del vector fijo (a) y la longitud más probable del vector de Rayleigh σ, entonces la distribución se definirá como:

$$p(x) = \frac{x}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+a^2}{2\sigma^2}\right) 1_0\left(\frac{ax}{\sigma^2}\right) \tag{21}$$

Donde:
1o: Función de Bessek modificada de primera especie y de orden cero
a : Parametro de longitud del vector
σ: longitud más probable del vector de Rayleigh

Prueba de bondad de ajuste.

Para seleccionar la función de distribución de probabilidad más apropiada para los datos de caudales máximos, se utilizó un ajuste con base a tres criterios

Prueba de Kolmogórov-Smirnov

La prueba de Kolmogórov-Smirnov es una prueba estadística que se usa para medir la normalidad de una distribución teórica (Luzuriaga Jaramillo et al., 2023). Esta prueba es útil en procesos físicos no lineales e interactivos, ya que permite un mejor entendimiento de la distribución de las variables seleccionadas. También, en comparación a otras pruebas estadísticas, la prueba de Kolmogórov-Smirnov no requiere de un supuesto de normalidad, es decir, de un prerrequisito que limite la medición de la normalidad

$$D_n^+ = \max(F_n(x) - F(x)) \tag{22}$$

$$D_n^- = \max(F(x) - F_n(x)) \tag{23}$$

Donde:

F(x): La función teórica (población normal especificada en la hipótesis nula o distribución teórica)
F_n(x): La función de distribución muestral

La prueba de Kolmogórov-Smirnov contrasta la función de distribución acumulada empírica obtenida de los datos de la muestra con la distribución teórica que se esperaría si los datos siguieran una distribución normal. Si existe una gran discrepancia entre ambas distribuciones, la prueba refuta la hipótesis nula, que postula que las muestras provienen de la misma distribución (Carlos Ernesto Flores Tapia & Lissette Flores Cevallos, 2021). La comparación entre distribuciones puede analizarse utilizando el valor p resultante de la prueba. Un valor p inferior a 0.05 indica que se debe rechazar la hipótesis nula, mientras que un valor p cercano a 1 sugiere que no hay evidencia suficiente para rechazar dicha hipótesis, lo que implica que la función de distribución de probabilidad es adecuada (Carlos Ernesto Flores Tapia & Lissette Flores Cevallos, 2021)

Error medio

El valor de error medio también es funcional para determinar que función de distribución de probabilidad se ajusta más a los datos muestrales. Un valor menor del error medio significa más cercanía entre la distribución teórica y la distribución empírica

Error máximo

El valor de error medio se considera un criterio fundamental en la metodología propuesta para identificar la función de distribución de probabilidad más adecuada. Su aplicación es opcional y depende de los resultados obtenidos mediante la prueba de Kolmogórov-Smirnov y el valor del error medio. En situaciones donde la selección de la función de distribución resulta compleja debido a que tanto la prueba de Kolmogórov-Smirnov como el error medio de una función de distribución muestran similitudes con otras funciones de distribución, se recurre a la consideración del valor de error máximo. Este último debe ser considerablemente bajo, ya que una menor discrepancia en el error máximo refuerza la idoneidad de la función de distribución seleccionada. De este modo, se establece un marco riguroso para la evaluación y selección de modelos estadísticos.

Caudal máximo para periodo de retorno de 100 años

Una vez que se ha establecido cuál es la función de distribución de probabilidad más adecuada para simular los valores correspondientes, se procedió a utilizar dicha función para determinar los caudales máximos del río en un periodo de retorno de 100 años. Este análisis se llevó a cabo mediante

el uso de la herramienta Python, que ofrece un entorno versátil y eficiente para realizar cálculos estadísticos complejos.

Subfase II

Modelo Digital de elevación

El modelo digital de elevación (DEM por sus siglas en inglés) es oportuno para establecer un dominio computacional, el cual es la delimitación de la zona de estudio para así, poder desarrollar los modelos hidrodinámicos, entre sus cualidades se puede especificar las entradas y salidas del modelo, los cuales hacen referencia a las entradas y salidas del caudal (Torres González, 2019). Para la obtención del DEM, se acudió a la plataforma Vertex Nasa, la cual permite extraer imágenes satelitales y modelos de elevación por medio de la adición de las coordenadas del sitio que se quiere estudiar. En el caso del presente proyecto, las coordenadas utilizadas obtenidas mediante Google Earth, las cuales fueron: 8°59´33.75´´ N; 73°58´02.05´´ O.

Tratamiento de información geográfica- Delimitación de la cuenca

Mediante el uso del Modelo Digital de Elevación (DEM) en formato ráster, se extrajo la información geográfica correspondiente al corregimiento de El Cerrito. En este proceso, se identificaron y asignaron dos zonas de relevancia dentro del área de estudio por medio de la herramienta Qgis: la primera zona de relevancia está situada agua arriba, y la segunda, aguas abajo. La unión de las zonas de relevancia indica la entrada del caudal y sus dos salidas correspondientes. La asignación de zonas de relevancia también es funcional como delimitación de la cuenca, que posteriormente será usada como dominio computacional en la fase 2.

Asimismo, se agregó al DEM la batimetría, ya que, para desarrollar un modelo hidráulico bidimensional, es crucial contar con una batimetría, dado que la ausencia de esta información puede provocar variaciones significativas en los resultados obtenidos (Gil et al., 2006). Las batimetrías son altamente valiosas para obtener las coordenadas y profundidades de un gran número de puntos en una zona de estudio, lo cual es fundamental para la creación de un modelo de superficie (Rivera & Salazar B, 2017)

La obtención de batimetrías se adquirió por medio de la Corporación autónoma regional del Magdalena.

Adecuación de secciones transversales

Se emplea el Modelo Digital de Elevación (DEM) para extraer datos de elevación mediante una malla de puntos con intervalos de 12 metros, con el fin de preservar la resolución del ráster original y mantener los detalles. Posteriormente, se crea una malla adicional para incorporar las profundidades de las secciones transversales, utilizando la delimitación de la cuenca. Ambas mallas se combinan para generar un Triangulated Irregular Network (TIN), que integra las elevaciones del DEM.

Un TIN es un conjunto de datos geográficos digitales de tipo vectorial que se genera a través de la triangulación de puntos o vértices. Además, este modelo se emplea frecuentemente para digitalizar la morfología de un territorio, ya que ofrece alta resolución en áreas con gran variabilidad en la superficie y menor resolución en regiones más planas. La utilización del DEM para generar el

TIN es útil para conservar los datos de entrada al momento de modelar y mejorar la morfología de la superficie. (Marulanda & Tafur, 2017).

El ráster resultante se convertirá al formato ASCII (.txt) y se importará al software IBER.

Modelo de circulación global (MCG)

Los modelos de circulación global son una representación matemática del complejo climático por medio de programas informáticos que simulan los procesos físicos de la atmosfera, permitiendo evaluar los efectos de las múltiples concentraciones de GEI. Los MCGs tienen aproximaciones variadas de los procesos físicos de la atmosfera, por ende, dan estimaciones que difieren de un modelo a otro. Aun así, los MCGs predicen el comportamiento del clima con base al aumento de GEI (Velázquez-Zapata et al., 2017).

Los MCG tienen información en escalas espaciales mayores a las que un modelo hidrodinámico o hidrológico puede procesar, lo cual crea errores en la evaluación de un efecto local por consecuencia del cambio climático. Para resolver la inadecuación de escalas grandes se realizan procesos de reducción de escala (downscaling) permitiendo que se puedan proyectar los resultados de los modelos climáticos (Mena Rentería et al., 2018).

Tapasco et al. (2015) indica que, para simular escenarios de cambio climático en modelo hidrológicos, se pueden ajustar los datos de entrada utilizando proyecciones climáticas generadas por modelos de circulación global (MG) y adaptadas a una escala local mediante técnicas de downscaling

Los modelos de circulación son fundamentales para el desarrollo de un modelo hidrodinámico que simule fenómenos hidrometeorológicos extremos. En la presente investigación, se utilizaron como referencia los valores de estimaciones de variaciones climáticas de los modelos de circulación global seleccionados en el documento *"Análisis de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca"* elaborado por (Useche et al., 2019). Este documento emplea los modelos de circulación global (MCG) procesados con el método de reducción de escala (downscaling) para extraer información y tener una mayor precisión en la regionalización sobre variabilidad climática. Entre los MCG utilizados se encuentran el CCM3 (Community Climate Model), adecuado para simular el clima de América Latina y generar escenarios de cambio climático, así como el GISS-E2-R, MPI-ESM-MR y MRI-CGCM3.

Los datos obtenidos de estos MCG sirvieron como base para la presente investigación en el cálculo de la variación del caudal del rio Magdalena en los escenarios de cambio climático (emisiones de GEI) RCP 2.6 y RCP 8.5

Fase 2: Desarrollo del modelo hidrodinámico

En la segunda fase, se utilizaron los datos de la fase 1 (Insumos) para el desarrollo del modelo hidrodinámico para tres escenarios: periodo de retorno de 100 años de la inundación, el escenario RCP 2.6 y el escenario RCP 8.5

Dominio computacional

La delimitación de la cuenca realizada en QGIS guiándose con el DEM, se agregó en la herramienta IBER para dividir la geometría del cauce y las llanuras de inundación, y así generar el dominio computacional.

Entradas al modelo hidrodinámico

Para las entradas del modelo se utilizó el caudal máximo estimado para un TR100 y las condiciones de variabilidad de caudal integrando escenarios de cambio climático RCP 2.6 y RCP 8.5 obtenidos a partir del documento "*Análisis de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca*" elaborado por (Useche et al., 2019)

Preparación del modelo hidrodinámico

Con la generación de los pasos anteriores, se ingresó al programa IBER la información necesaria para la corrida de los tres escenarios. Esta información fueron las condiciones de contorno, el número de Manning, la asignación de valor de malla, el tiempo de modelación, y la agregación del DEM.

Condiciones de contorno

El software IBER requiere de asignación de condiciones de contorno, las cuales se refieren al valor del caudal que se quiere simular. La presente investigación utilizo un modelo hidrodinámico integrando tres caudales diferentes: caudal máximo para un periodo de retorno de 100 años, caudal máximo para un periodo de 100 años integrando las variaciones producto del RCP 2.6 y el caudal máximo para un periodo de 100 años integrando las variaciones producto del RCP 8.5.

La asignación de caudales, también se basa de un criterio denominado número de Froude, la cual es una clasificación que define el tipo de flujo dependiendo de la proporción de fuerzas de gravedad e inercia. (TYC GIS, 2017). Entre las clasificaciones del flujo están:

- Flujo Supercrítico (F>1): También denominado flujo rápido, se trata del agua que se desplaza con una velocidad mayor a la onda de gravedad. Como se trata de un flujo rápido cualquier perturbación sobre la superficie produce una ola incapaz de propagarse aguas arriba, por ende, el comportamiento del flujo depende únicamente de lo que ocurre aguas arriba (entrada de flujo).

- Flujo Subcrítico (F<1): Denominado como flujo lento, ya que la velocidad es menor que la celeridad. Cualquier perturbación en el flujo puede desplazarse aguas arriba y cambiar las condiciones del comportamiento del flujo aguas abajo (salida).

- Flujo critico (F=1): En el flujo critico la velocidad del flujo es igual a la velocidad de la onda de gravedad. También el flujo critico es determinado por el cambio de régimen de la pendiente.

Para calcular el número de Froude se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$F = \frac{v}{c} \tag{24}$$

$$c = \sqrt{g y_h} \tag{25}$$

$$Y_h = \frac{A}{B}(\tag{26}$$

$$F = \frac{v}{\sqrt{g y_h}} \tag{27}$$

Donde:
V: Velocidad media (m/s)
g: Aceleración de la gravedad (m/s^2)
c: Velocidad de la onda de gravedad (celeridad)
A: Área de la sección (m^2)
B: Ancho de la sección mojada (m)
Y_h: Profundidad del flujo

La definición del tipo de flujo es un aspecto fundamental para la correcta asignación de las condiciones de contorno, las cuales son esenciales para el desarrollo del modelo hidrodinámico. Sin embargo, cabe destacar que la herramienta IBER, por defecto, resuelve las ecuaciones pertinentes para la asignación del parámetro de Froude. Este enfoque contribuye a minimizar el sesgo de error en los resultados obtenidos, lo que permite que las simulaciones sean más precisas y adecuadas para cada caso particular.

Además, es importante señalar que la eficacia de las simulaciones depende de otros parámetros que el software requiere, tales como el coeficiente de Manning, la discretización de la malla y el intervalo temporal de simulación. La adecuada configuración de estos valores es crucial para garantizar la validez y la relevancia de los resultados generados, facilitando así un análisis más robusto y fiable en el contexto de la modelación hidrodinámica.

Coeficiente de Manning

El método de Manning se utiliza ampliamente para calcular el volumen que fluye a través de un cauce o el caudal por unidad de tiempo, lo que refleja la resistencia dinámica del flujo. Esta ecuación depende de parámetros que son fáciles de determinar, tales como el radio hidráulico, la superficie o el perímetro sumergido (Fernández de Córdova et al., 2018) No obstante, el valor n de Manning debe ser determinado adecuadamente para obtener resultados exitosos, ya que un error del 10% en la n puede generar un error en la velocidad (León y Martínez 2013 como se citó en Fernández de Córdova et al., 2018)

La herramienta IBER utiliza el método de Cowan para establecer el valor n Manning, descrita en la siguiente ecuación:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5 \tag{28}$$

Donde:

n_0: Valor básico para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados
n_1: Valor por efecto de las rugosidades superficiales
n_2: Valor que considera las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal
n_3: Valor el cual considera las obstrucciones
n_4: Valor para considerar la vegetación y condiciones de flujo
m_5: Valor básico relacionado con la mandricidad para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados.

A partir del método Cowan, la herramienta IBER tiene valores n Manning predeterminados para el uso del suelo

Tabla 4. *Valores Manning por uso del suelo*

Uso del suelo	Manning (n)
Rio	0.025
Suelo desnudo	0.023
Pradera	0.05
Bosque	0.12
Arena/Arcilla	0.023
Arbustos	0.05
Arboles	0.12
Vegetación urbana	0.032
Vegetación dispersa	0.08
Vegetación densa	0.18
Hormigon	0.018
Sin clasificar	0.032
Infraestructura	0.020
Edificios aislados	0.0
Industrial	0.1
Residencial	0.15

Fuente: (TYG GIS, 2017b)

Con los coeficientes de Manning se asignó la rugosidad a las geometrías generadas con el dominio computacional. Cada geómetra individual tendrá un valor n Manning correspondiente dependiendo del uso del suelo.

Capa de uso del suelo

Con el fin de garantizar una asignación más precisa del coeficiente de valores Manning en función del uso del suelo, se generó una capa específica de uso del suelo que reflejara la cobertura vegetal, del suelo y con ello seleccionar los valores más adecuados para que la simulación sea muy semejante con la realidad. Para lograr esto, se extrajeron los datos correspondientes al uso del suelo a partir de Sentinel-2, un proyecto del programa Copernicus de la unión europea que proporciona imágenes de alta resolución de la superficie terrestre. Posteriormente, se llevó a cabo un proceso de caracterización utilizando el software QGIS, lo que permitió realizar un análisis detallado del uso del suelo en la zona de estudio.

Mallado

IBER resuelve una ecuación diferencial mediante el método de volúmenes finitos, lo que requiere la discretización espacial del dominio de estudio. Esta discretización se logra dividiendo el área de estudio en celdas relativamente pequeñas, proceso conocido como la creación de una malla de cálculo. La adecuada definición de la malla de cálculo es fundamental para obtener resultados que reflejen con precisión la realidad. Existen tres tipos de mallas: estructuradas, no estructuradas y mixtas (TYG GIS, 2017a)

- Las mallas no estructuradas se adaptan fácilmente a cualquier geometría, sin necesidad de seguir una organización o estructura interna específica.

- Las mallas estructuradas están formadas por celdas de cuatro lados distribuidos de manera ordenada.
- Las mallas mixtas combinan características de las mallas estructuradas y no estructuradas.

Para el presente proyecto se utilizó una malla no estructurada, ya que es adecuada para cualquier tipo de geometría y se emplea frecuentemente en llanuras de inundación (TYG GIS, 2017a)

Incorporación del DEM

Se incorporo el DEM que ya integra las batimetrías, para ser más enfáticos en la medición de profundidades del caudal. Esta integración permite no solo una representación más precisa de las variaciones del fondo cauce, sino que también mejora la resolución espacial de los datos obtenidos. Además, la integración del DEM logra una representación dimensional más detallada

Asignación de tiempo

Para que el modelo hidrodinámico represente adecuadamente el dinamismo del flujo de agua, es fundamental asignar la variable tiempo, que se define en segundos dentro del programa IBER. La elección de un intervalo de tiempo mayor para la simulación implica que el modelo requerirá un periodo más extenso para completarse, pero a su vez proporciona una mayor cantidad de datos, lo que permite un análisis más detallado de las variaciones en el comportamiento del flujo y otros fenómenos hidrodinámicos.

Sin embargo, es importante señalar que una asignación de tiempo menor no necesariamente implica que la cantidad de datos obtenidos sea insuficiente para llevar a cabo un análisis efectivo de los resultados. Un periodo de simulación reducido puede ser suficiente para captar las dinámicas esenciales del sistema, especialmente en situaciones donde los cambios en el flujo no son extremadamente complejos. Por lo tanto, la elección del intervalo de tiempo debe ser considerada cuidadosamente, teniendo en cuenta tanto la necesidad de precisión en los datos como la eficiencia computacional del modelo.

Fase 3: Caracterización de la amenaza

En la tercera fase, se caracteriza la amenaza por inundación a partir de los datos arrojados por el modelo hidrodinámico.

Metodología de caracterización de amenaza

La combinación de la profundidad del agua y la velocidad de su flujo constituye una representación crítica de una amenaza potencial por inundación. Para evaluar esta amenaza en el área de estudio, se utilizó una matriz desarrollada según la metodología suiza para la elaboración de mapas de amenaza, la cual adapta rangos establecidos por la metodología IDIGER (IDIGER, 2021).

Esta matriz se fundamenta en la definición de profundidades máximas, teniendo en cuenta datos característicos de la población colombiana, particularmente en relación con la estatura de niños y adultos. Esta consideración es esencial, ya que la altura de las personas se emplea como un indicador clave para determinar su capacidad de supervivencia en situaciones de inundación. Es bien conocido que, en escenarios de inundación, las personas con menor estatura, como los niños, enfrentan una mayor amenaza, debido a su limitada capacidad para mantenerse a flote en aguas profundas.

Además, la velocidad del agua también juega un papel crucial en la evaluación de la amenaza, ya que flujos más rápidos pueden incrementar la severidad de la inundación y, por ende, la probabilidad de daño a la vida humana. Al integrar estos factores en la matriz, se logra una aproximación más precisa y contextualizada de la amenaza por inundación, permitiendo así una mejor planificación y respuesta ante eventos climáticos extremos

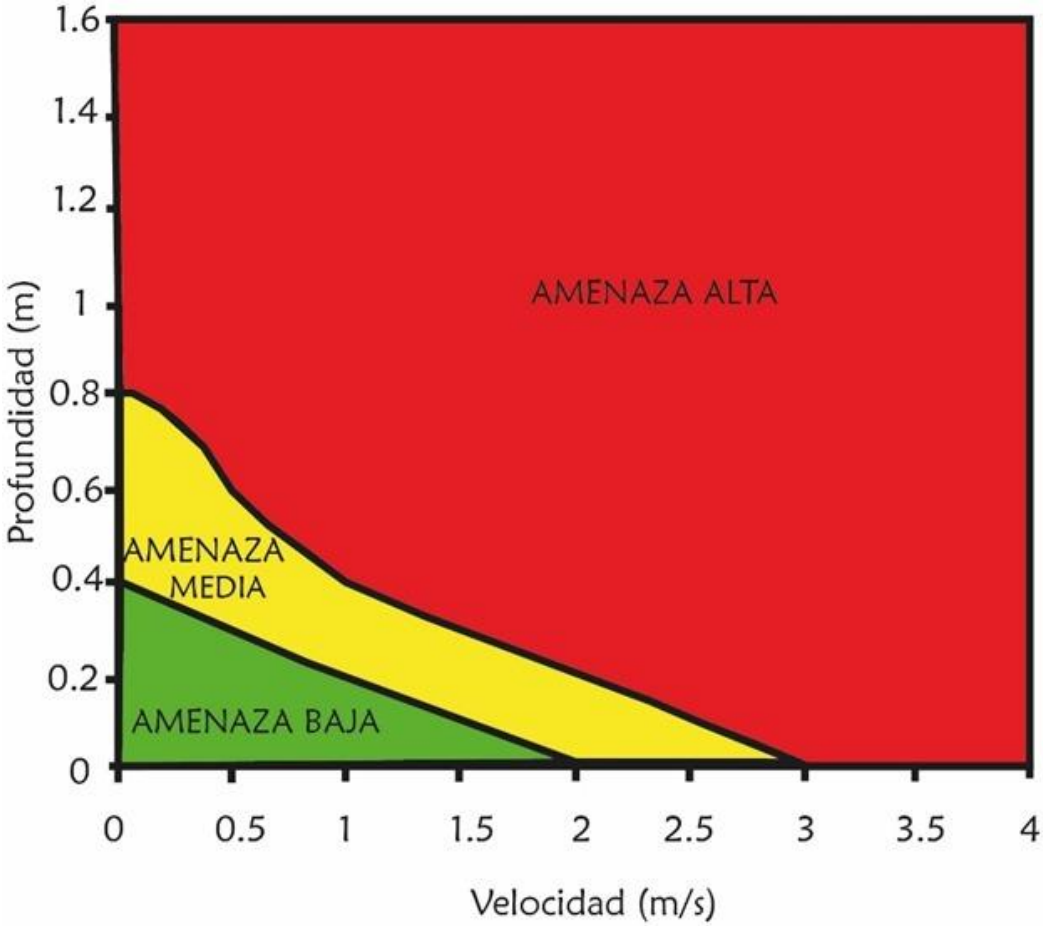

Figura 4. *Matriz de caracterización por amenaza de inundación.* Fuente: (IDIGER, 2021)

Como se mencionó anteriormente, la caracterización de la inundación se fundamenta en la relación entre la profundidad y la velocidad del caudal, por ende, en esta investigación, se empleó la matriz mostrada en la figura 4. Según esta matriz, las áreas se categorizan por niveles de amenaza: el rojo indica una amenaza alta, el amarillo representa una amenaza media y el verde señala una amenaza baja (IDIGER, 2021). La utilidad de esta matriz radica en su capacidad para evaluar la intensidad, considerando la profundidad y la velocidad (IDIGER, 2021).

A partir de los datos extraídos sobre la velocidad y la profundidad de los escenarios de cambio climático simulados con el modelo hidrodinámico, se categorizó el área de estudio en función al periodo de retorno de 100 años.

El proceso de categorización se realizó mediante una serie de actividades:

Primero, se extrajeron los ráster de velocidad y profundidad del postproceso del modelo hidrodinámico correspondiente a los tres escenarios analizados. Posteriormente, se utilizó la herramienta Ráster Calculator para asignar valores categóricos de 1, 2 y 3 a las distintas

clasificaciones de amenaza, que corresponden a amenaza baja, media y alta, respectivamente, según la matriz de caracterización de la amenaza.

En el caso de la profundidad, se definieron los siguientes rangos: los valores comprendidos entre 0 y 0.4 se clasificaron como 1; aquellos entre 0.4 y 0.6 se clasificaron como 2; y, finalmente, los valores superiores a 0.6 se clasificaron como 3. De manera similar, para la velocidad, los valores de 0 a 2 se reconocieron como 1, los valores de 2 a 3 se reconocieron como 2, y los valores superiores a 3 se asignaron a la categoría 3.

Esta asignación de valores fue fundamental para permitir la combinación de los ráster, asegurando que todos los valores estuvieran en las mismas unidades de medida. Tras completar este primer paso, se procedió a realizar la unión de los ráster utilizando nuevamente la herramienta Ráster Calculator, lo que facilitó la integración de los datos categorizados en un solo conjunto ráster.

Matriz metodológica

La matriz metodológica se creó con el fin de definir la metodología a partir de la definición del enfoque, alcance, el método, actividades, técnicas e instrumentos.

Tabla 5. *Matriz Metodológica*

Enfoque	Mixto			
Alcance	Descriptivo, analítico			
Método	Descriptivo			
Objetivo General	Identificar la amenaza por inundación ante escenarios de cambio climático por medio de un modelo hidrodinámico en el municipio El Banco, Magdalena – Colombia.			
Número	Objetivo especifico	Actividades	Técnicas	Instrumentos
1	Estimar los caudales máximos para diferentes periodos de retorno en el rio Magdalena	Seleccionar estación hidrometeorológica Descargar caudal medio diario (series de tiempo) Convertir de series de tiempo a matriz estadística Escoger la función de distribución de probabilidad más apropiada Obtener un caudal máximo para un periodo de retorno de 100 años	Revisión documental Recuperación de información Análisis de datos	Bases de datos Software Qgis Datos DHIME Excel

2	Desarrollar un modelo hidrodinámico con IBER en el rio Magdalena a la altura del corregimiento El Cerrito incorporando los escenarios de cambio climático	Obtener modelo digital de elevación (DEM) Realizar tratamiento de información geográfica Adecuar las secciones transversales Ingresar las entradas al modelo hidrodinámico Preparar el modelo Generar el dominio computacional Crear capa de uso del suelo para valores Manning Asignar valores (Manning y MCG) Adecuar las condiciones de contorno Ingresar mallado y asignación de elevaciones	Diseño Computacional Recuperación de información	Software IBER Literatura TyG IBER Datos obtenidos por CorpaMag
3	Caracterizar la amenaza por inundación utilizando la metodología IDIGER	Identificar zonas de amenaza Caracterizar la amenaza por inundación	Diseño computacional Recuperación de información	Software IBER Software Qgis Metodología IDIGER

Fuente: Elaboración propia

Aspectos éticos

En el presente proyecto de grado, se consideraron diversos aspectos éticos en la recolección y manejo de datos. Se utilizaron datos hidrometeorológicos provenientes del DHIME, los cuales fueron accesibles como datos abiertos para el público, asegurando así la transparencia y accesibilidad de la información. Además, se contó con una batimetría del rio Magdalena proporcionado por la Corporación Autónoma Regional del Magdalena; aunque este elemento no fue de acceso público, se obtuvo con el debido consentimiento, garantizando el cumplimiento de las normativas establecidas por la entidad. Dado que no se involucraron participantes en la investigación, no fue necesario obtener consentimiento informado, lo que eliminó preocupaciones relacionadas con la confidencialidad y el anonimato. Asimismo, no existieron riesgos directos para las comunidades, lo que permitió un enfoque ético en la investigación. El impacto social se centró en el corregimiento El Cerrito, ya que este trabajo buscó identificar la amenaza de inundaciones bajo diferentes escenarios de cambio climático. Esto proporcionó información valiosa que permitió a la comunidad adoptar medidas adecuadas de prevención y adaptación. Finalmente, el proyecto fue revisado por el comité de trabajo de grado, lo que aseguró que se cumplieran los estándares éticos y de calidad en la investigación, promoviendo así el uso de los resultados en beneficio de la comunidad.

Resultados y análisis de resultados

En este apartado se mostrarán los resultados de acuerdo con las fases establecidas en la metodología

Fase 1: Insumos

Subfase I

Series de tiempo por estaciones climatológicas

Como se mencionó en la metodología, las series de tiempo fueron del periodo 2000-2024 extraídas de la estación “PENONCITO” y fueron correspondientes a la variable caudal medio diario del rio magdalena

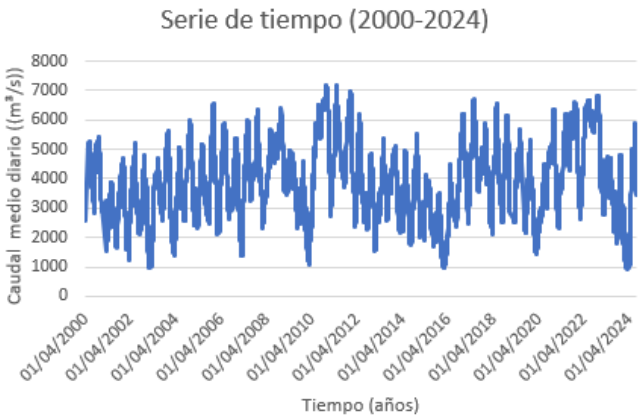

Figura 5. *Grafica de variación del caudal medio diario entre los años 200-2024.* Fuente: Elaboración propia

En la figura 5 se presenta un gráfico elaborado a partir de 8,590 valores del caudal del río Magdalena correspondientes al periodo de 2000 a 2024. Asimismo, a partir de estos datos se

calcularon los valores estándar del caudal, los cuales son importantes para estimar el comportamiento habitual del río Magdalena. No obstante, estos valores son la base del cálculo principal de la presente investigación: el caudal máximo por periodo de retorno. Asimismo, también se calculó el valor medio del caudal, el cual fue de 3920 m^3/s

Conversión de series de tiempo diarias a mensuales

	MESES											
Year	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
2000				2582		5258	4997	3957	4869	5282	5419	4344
2001			3271	2704	3655	3856	3010	2881	3444	4036	4610	4681
2002	4272	1977	2842	4192	4366	5219	4187	2746	3006	3913	4798	3693
2003	2885	1896	2391	4138	4054	4718	4335	3528	3336	4817	5518	5647
2004	4187	2205	2377	3869	4935	5079	3482	3361	4089	5302	5967	5802
2005	3440	3685	2994	3719	5185	5141	4058	3117	3271	5155	6559	6559
2006	4480	3398	3935	5016	5906	5612	4746	3540	3663	4420	5350	5360
2007	4375	2468	3243	4704	5802	6003	4493	4331	4484	5662	6331	5189
2008	4313	3386	3574	4205	5228	5678	5156	5131	5508	5698	6401	6158
2009	4353	3748	4522	4949	4925	4559	4429	3646	3578	3565	4596	3706
2010	2830	1841	2821	4104	5609	5890	6515	6485	6645	6722	7173	7090
2011	5984	3460	4660	6760	7178	6375	5132	4715	4546	6046	6650	6958
2012	6325	3912	3606	5791	6220	5012	3528	3528	3132	4787	4858	4374
2013	2853	3001	3496	3703	5333	5386	3948	3841	4119	4814	4985	5121
2014	3831	2943	3734	3810	4946	4540	3078	2695	3739	4578	5513	5018
2015	2956	3190	3046	4124	3856	3922	3213	2434	2812	2902	3487	3262
2016	1549.67	1838.85	1916	3130.38	4485.07	3815.84	3187.75	3002.12	3758.46	5118.47	6086.3	6186.88
2017	4877.25	3436.38	4364.41	5151.67	6726.31	6639.5	5791.2	4137.17	4428.72	5082.13	5838	5880.25
2018	4382.79	3257.5	3118	4774.81	6579.38	6573.75	4526.11	3766.75	4148.81	6001.8	6170	5867.25
2019			3713.2	4849.06	5248.4	5670.95		2825.5	3312.62	4784.44	5309.35	4587.96
2020	3595.41	2021.5	2628.63	2882.31	2989.19	3834.96	4485.69	4372.99	4926.06	5075.94	6215	6368.13
2021	4488.14	2666.31	4135.34	4099.2	5600.19	6212.5	6144.78	5679.35	6229.38	6179.97	6603.75	6379.38
2022	4243.75	3213.63	4747.31	6241.25	6522.5	6678.19	6638.75	6318.75	6023.9	6676.87	6841.13	6556.25
2023	4631.13	3818.39	4636.63	4644.19	4740.44	4695.06	3909.55	3560.2	3432.44	3649.97	4820.19	3650.69
2024	3100.56	2006	1603.35	2976.25	5014.75	5344.46	5879.6					

Figura 6. *Serie de tiempo del caudal maximo mensual (2000-2024).* Fuente: Elaboración propia

En la figura 6 se ilustra la conversión de datos diarios a datos mensuales de la serie de tiempo empleada en la investigación. Esta conversión se realizó mediante el cálculo del promedio del caudal diario máximo para cada mes desde el año 2000 hasta 2024. Posteriormente, los datos se organizaron en una matriz de grupos estadísticos, lo cual facilita el procesamiento del cálculo del caudal máximo para un periodo de retorno de 100 años y mejora la sistematización de la información. En la figura 6 también se evidencia como hay casillas sin datos, esto se debe a la falta de registro de caudal medio diario por parte de la estación, aun así, la falta de registro no repercute en los resultados.

Funciones de distribución de probabilidad

Se utilizaron 12 funciones de probabilidad que permitiera estimar el comportamiento del caudal para un periodo de retorno de 100 años con la utilización del grupo estadístico que contiene el caudal máximo de cada mes de los años seleccionados. Por medio de la herramienta Python se generó la comparación entre las funciones de distribución escogidas y se les realizo el ajuste de bondad de los tres criterios seleccionados (Prueba de Kolmogórov-Smirnov, error medio, error máximo). Como resultado, el programa mostro el comportamiento de las funciones de distribución en cada mes.

La figura 7 representa el comportamiento correspondiente al mes de enero de la distribución muestral o empírica (datos reales) y lo compara con la distribución teórica (simulación de la normalidad de los datos), con base a eso se calculó también el valor de los tres criterios los cuales se pueden observar en la parte superior de cada grafica. Los datos de la distribución muestral están representados por puntos y los datos de la distribución teórica se representa por líneas.

Las figuras correspondientes a los meses de febrero a Diciembre se pueden encontrar en el apartado de anexos

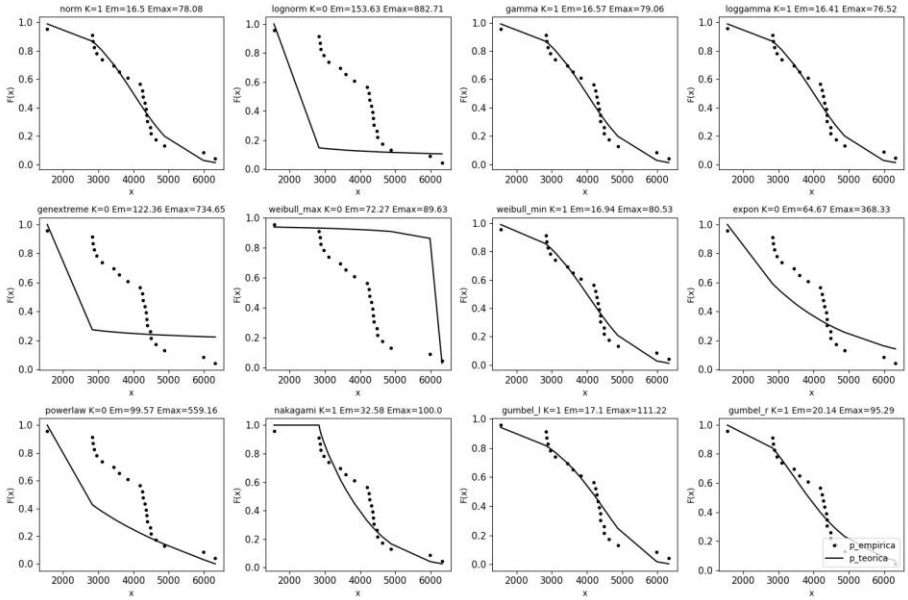

Figura 7. *Resultados de criterios de prueba de bondad para el mes de enero.* Fuente: Elaboración propia

En la tabla 6, se observan la selección de la función de distribución de probabilidad adecuada para cada mes. Es necesario mencionar que los meses representados, tienen la tabulación de los datos de los meses de los 24 años seleccionados. Es decir, para la gráfica del mes de enero, se utilizaron todos los datos de los meses de enero de los años 2000 hasta el 2024 para seleccionar la función correcta, y así sucesivamente con todos los meses.

Tabla 6. *Funciones de distribución de probabilidad seleccionada para cada mes*

Mes	**Función de distribución de probabilidad seleccionada**
Enero	Loggamma
Febrero	Genextreme
Marzo	Loggamma
Abril	Loggamma
Mayo	Loggamma
Junio	Loggamma
Julio	Gumbel right
Agosto	Gumbel right
Septiembre	Gamma
Octubre	Gumbel Left
Noviembre	Gumbel Left
Diciembre	Genextreme

Fuente: Elaboración propia

Como se muestra en la figura correspondiente al mes de marzo (ver anexo), las distribuciones Gamma y Log-Gamma presentan un comportamiento similar en términos de su forma. Sin embargo, se optó por la distribución Log-Gamma debido a sus menores valores en los criterios de error medio y error máximo, lo que resalta la importancia de emplear múltiples criterios para la selección de una función de distribución. Este enfoque multidimensional proporciona mayor seguridad en la elección final.

Por otro lado, la selección de las funciones también se basó en la exclusión de aquellas distribuciones que presentaban valores de cero en la prueba de Kolmogórov-Smirnov. Tal como se indicó en la metodología de esta sección, un valor p inferior a 0.05 en esta prueba es indicativo de rechazo de la hipótesis nula, la cual postula que las distribuciones empírica y teórica provienen de la misma población.

Caudal máximo para periodo de retorno de 100 años

Con los cálculos previos, se estimó el caudal máximo para un periodo de retorno de 100 años. Este valor es fundamental para calcular la variación del caudal al incorporar los escenarios RCP 8.5 y 2.6. En la tabla 7, se observa el valor para el caudal máximo para un TR 100

Tabla 7. *Caudal máximo para un TR 100*

Valores de caudal máximo para un TR 100 (m^3/s)
6744.64

Fuente: Elaboración propia

Subfase II

Modelo digital de elevación

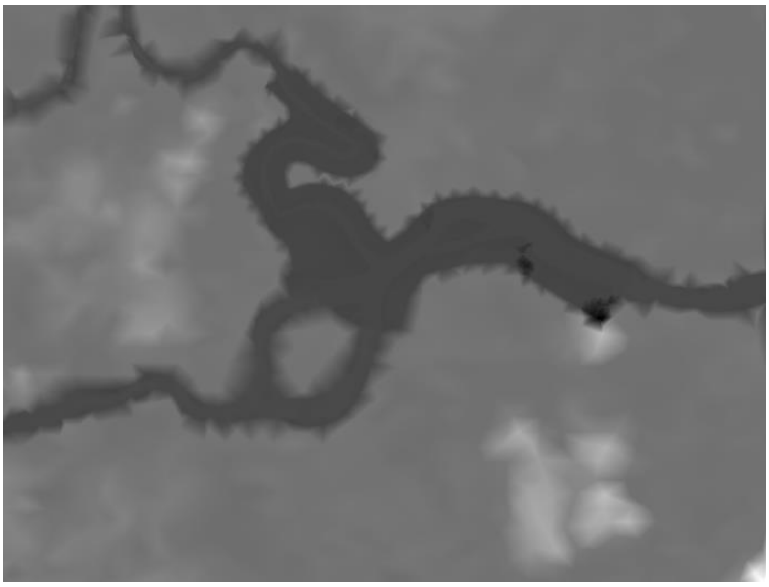

Figura 8. *Caudales máximos para periodo de retornos.* Fuente: Elaboración propia

Tratamiento de información geográfica

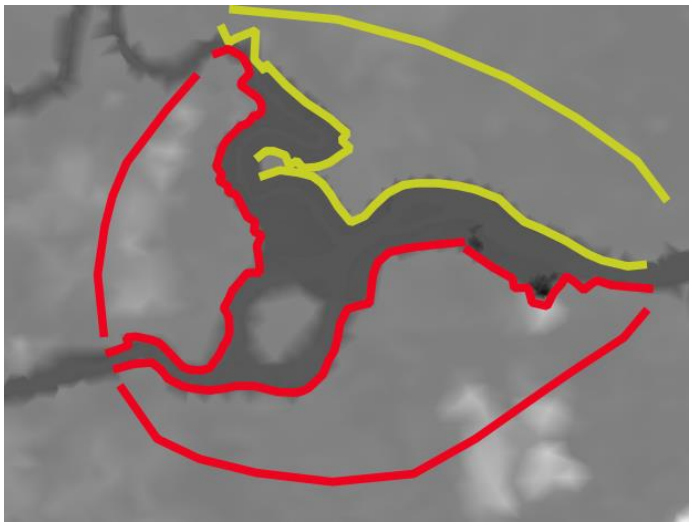

Figura 9. *Zonas de relevancia*. Fuente: Elaboración propia

En la figura 9, se evidencia en color verde la primera zona de relevancia aguas arriba y en color rojo la segunda zona de relevancia, aguas abajo. La delimitación posteriormente fue asignada en el software IBER en donde se unirán las zonas de relevancia y se asignaron la entrada y salidas del dominio computacional.

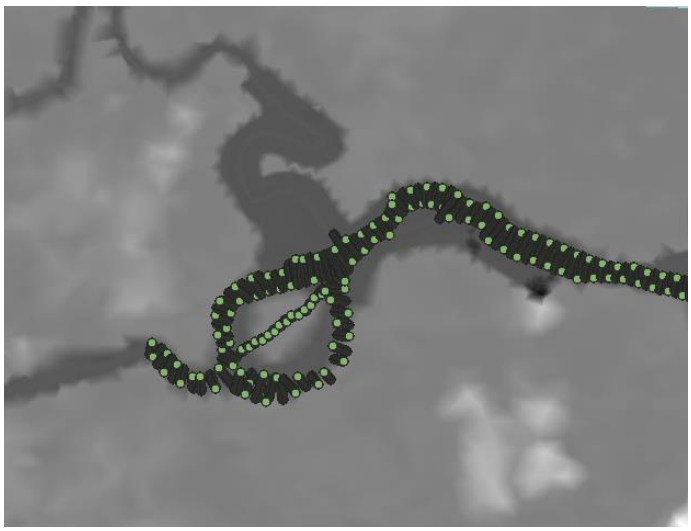

Figura 10. *Batimetría y Modelo de elevación digital*. Fuente: Elaboración propia

En la figura 10, se presenta el Modelo de Elevación Digital (DEM) superpuesto con los datos de batimetría correspondientes a la zona de estudio. Este modelo combina información detallada sobre la topografía del terreno y las características del fondo del rio, proporcionando una representación precisa y continua del relieve, tanto en tierra firme como en las áreas del caudal.

La batimetría, que ha sido ajustada al cauce del río, se incorpora de manera coherente con el DEM para asegurar una integración fluida entre ambas fuentes de datos. Este ajuste es crucial, ya que permite una alineación precisa de las elevaciones del lecho con el curso natural del cauce, reduciendo errores de distorsiones geométricas que afecten la calidad del modelo en las zonas donde la profundidad del agua es relevante. Además, el ajuste de la batimetría al cauce proporciona un nivel

adicional de precisión en las estimaciones de profundidad, lo que es fundamental para los resultados del modelo hidrodinámico

Adecuación de secciones transversales

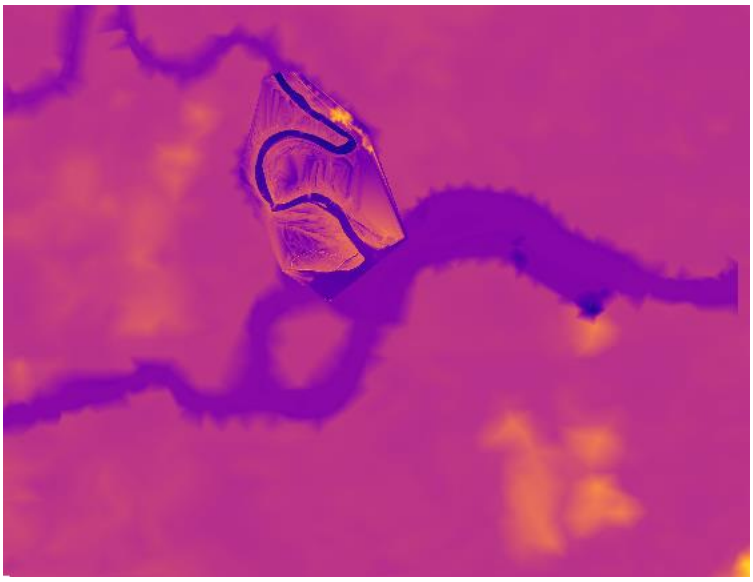

Figura 11. *TIN*. Fuente: Elaboración propia

En la figura 11 se observa el proceso de generación de un Modelo de Red Irregular Triangulada (TIN) a partir de un DEM. El TIN es ampliamente empleado para el modelado de superficies con alta precisión, especialmente en áreas de tamaño reducido, lo que lo convierte en una herramienta indispensable en el campo de la ingeniería. Su capacidad para representar con detalle superficies irregulares lo hace ideal para proyectos que requieren exactitud topográfica y geométrica.(Marulanda & Tafur, 2017)

Además, el TIN permite realizar cálculos complejos, como la determinación de área planimétrica, área superficial y volumen. Gracias a su estructura basada en la triangulación de puntos, el TIN preserva con fidelidad las características críticas de la superficie, incluyendo los puntos de profundidad, lo que garantiza un modelado preciso de la morfología. La utilización de este tipo de modelo en el análisis y en la ingeniería asegura que se mantenga un alto grado de exactitud en la representación del relieve y otros elementos importantes del terreno. (Marulanda & Tafur, 2017)

Modelación de circulación global (MCG)

A partir del documento titulado “Análisis de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca”, se utilizaron los Modelos Climáticos Globales (MCG) aplicados con la metodología de downscaling para llevar a cabo la regionalización del departamento, así como el análisis de los datos correspondientes. Con base en esta información, se pudo calcular la variación del caudal del río Magdalena bajo los escenarios de cambio climático proyectados en los RCP 2.6 y 8.5.

El cálculo de la variación de caudal se realizó empleando datos de caudal medio multianual correspondientes a cada mes bajo escenarios de RCP 2.6 y 8.5. Estos datos proporcionados por el documento “Análisis de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca”, provienen de la cuenca Magdalena aguas arriba del punto de interés de la modelación.

Posteriormente, estos valores fueron transformados en porcentajes, obteniendo así la variación de caudal en términos porcentuales. En la tabla 8, se puede observar el resultado de variación con base al resultado del caudal medio multianual presentado por el documento en el que se basa esta investigación.

Tabla 8. *Variación porcentual del caudal del rio Magdalena con la incorporación del RCP 2.6 y 8.5*

RCP	Variación porcentual del caudal
2.6	1%
8.5	6.40%

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, en la tabla 9 se puede evidenciar cual es el caudal final para cada escenario incorporando la variación porcentual del caudal

Tabla 9. *Variación final de caudales para cada escenario*

Escenario	Variación porcentual	Variación final del caudal (m^3/s)
TR 100	-	6744.639
RCP 2.6	1%	6812.09
RCP 8.5	6%	7176.30

Fuente: Elaboración propia

Los RCP están definidos por las emisiones de GEI y las consecuencias en el sistema climático que generaran estas emisiones. Cada RCP va a estar sujeto a unas emisiones mayores a las actuales, a excepción del escenario 2.6. Según el informe de bases físicas del primer grupo de trabajo del IPCC, es *probable* que el escenario 8.5 para finales de siglo tenga una temperatura superior en 2°C y es *muy probable* que su temperatura sea mayor a 1.5°C. Aun así, es improbable que el escenario 2.6 sea mayor a 2°C (IPCC, 2013)

Con base a la tabla 8, en donde se muestra la variación del caudal porcentual para cada escenario, se puede inferir que el aumento de la temperatura es un factor para el aumento de caudal, y por ende la agravación de fenómenos hidrometeorológicos extremos como las inundaciones

En el transcurso de los últimos años, se ha evidenciado como América latina muestra elevados niveles de vulnerabilidad por los efectos del cambio climático, ya que un aumento de temperatura se traduce en alteración de patrones de precipitaciones, nivel del mar, flujo de agua e intensidad y frecuencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos (García Montero, 2023) Asimismo, con los años si la temperatura sigue aumentando las poblaciones deberán enfrentar, adaptarse y coexistir en los nuevos escenarios (García Montero, 2023).

Fase 2: Desarrollo del modelo hidrodinámico

Dominio computacional

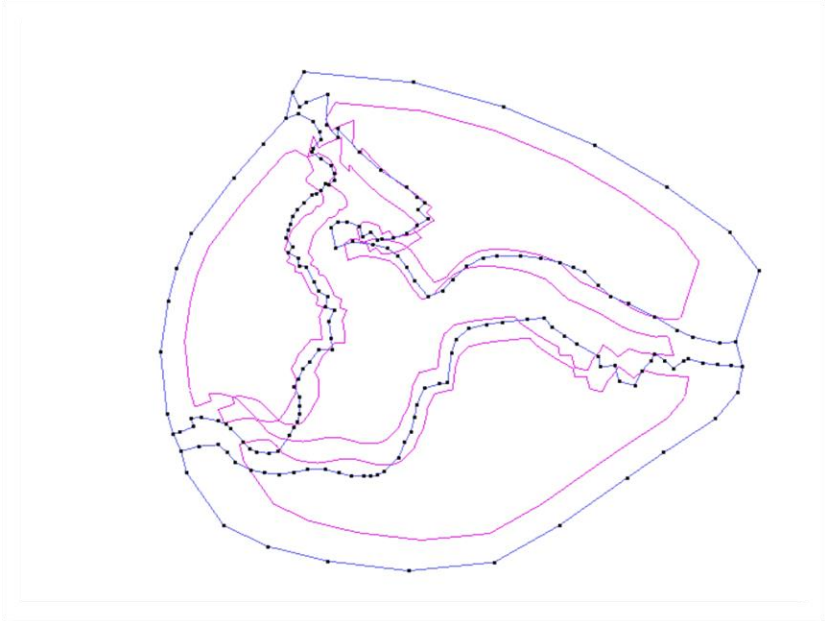

Figura 12. *Dominio computacional*. Fuente: Elaboración propia

En la figura 12, se observa cómo la ubicación de las zonas de relevancia ha sido clave para definir el dominio computacional, constituyendo la base fundamental para el desarrollo del modelo hidrodinámico. Esto también permitió una representación precisa de las características espaciales y facilitó la implementación adecuada del modelo, asegurando que el análisis hidrodinámico reflejara de manera óptima las condiciones reales de la zona de estudio.

En color azul se observa el dominio computacional, y en color rosa se observa las superficies asignadas. Estas superficies se crean cuando se agrega el dominio computacional por medio de la herramienta NurbSurface search, que las busca automáticamente. La integración de superficies es fundamental para agregar las entradas del modelo y los parámetros correspondientes

Entradas al modelo hidrodinámico

El modelo hidrodinámico simuló tres escenarios: un escenario para un periodo de retorno (TR) de 100 años, el escenario correspondiente al RCP 2.6 y el escenario correspondiente al RCP 8.5. Como se mencionó previamente, las entradas principales del modelo hidrodinámico son las variaciones de caudal.

Los valores porcentuales de variación de caudal, presentados en la tabla 8, se utilizaron para calcular la variación del caudal en cada uno de los escenarios. Este cálculo se realizó multiplicando el porcentaje de variación con el caudal máximo estimado para un periodo de retorno de 100 años (ver tabla 9), que fue determinado en la fase 1.

Preparación del modelo hidrodinámico

A continuación, se menciona cuales parámetros con sus unidades son requeridos para una exitosa modelación de la amenaza por inundación en los tres escenarios.

Tabla 10. *Parámetros para el desarrollo del modelo hidrodinámico y sus parámetros*

Parámetro	Unidad de medición (SI)
Condiciones de contorno	(m^3/s)

N Manning	Adimensional
Mallado	Número de elementos
DEM	Metros
Tiempo	Segundos

Fuente: Elaboración propia

Condiciones de contorno

El proceso descrito a continuación es la ejemplificación de lo realizado para cada uno de los escenarios que fueron modelados. Los procesos generados a partir de este punto son iguales en cada simulación de cada escenario, con la diferencia de los valores de entrada.

Las condiciones de contorno requieren la asignación de los valores de caudal tanto en la entrada como en las salidas del dominio computacional. En la figura 13 se muestra la incorporación del caudal correspondiente a un periodo de retorno de 100 años (TR 100), que fue utilizado en el primer escenario simulado. Además, al ingresar este valor, es necesario definir la ubicación de la entrada, la cual está destacada en la figura 14 en color rojo.

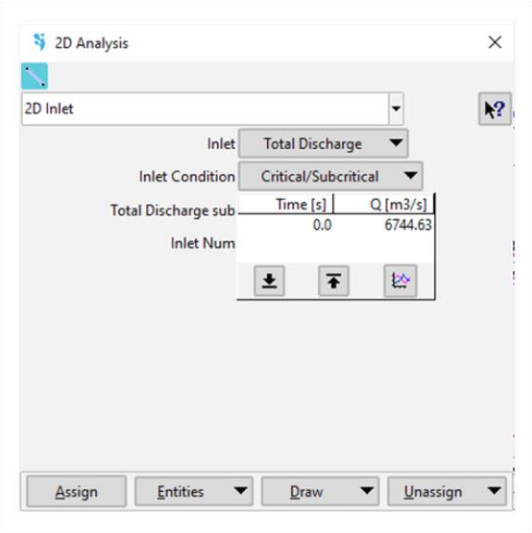

Figura 13. *Incorporación del caudal máximo TR100 en las condiciones de contorno*. Fuente: Elaboración propia

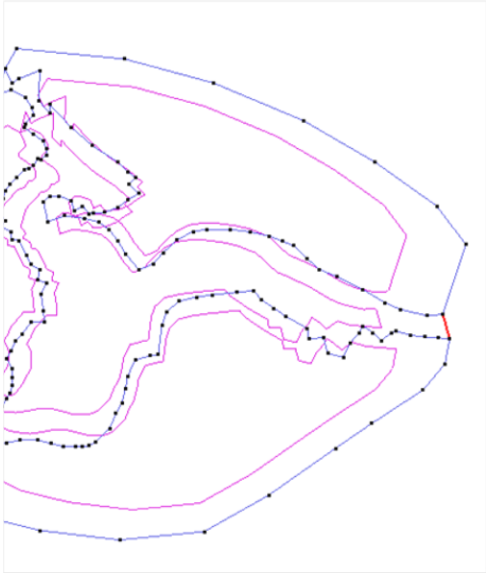

Figura 14. *Entrada de caudal en el dominio computacional.* Fuente: Elaboración propia

En la figura 15, se evidencia la selección de las dos salidas del dominio. Se escogieron dos salidas debido a la estructura del cauce.

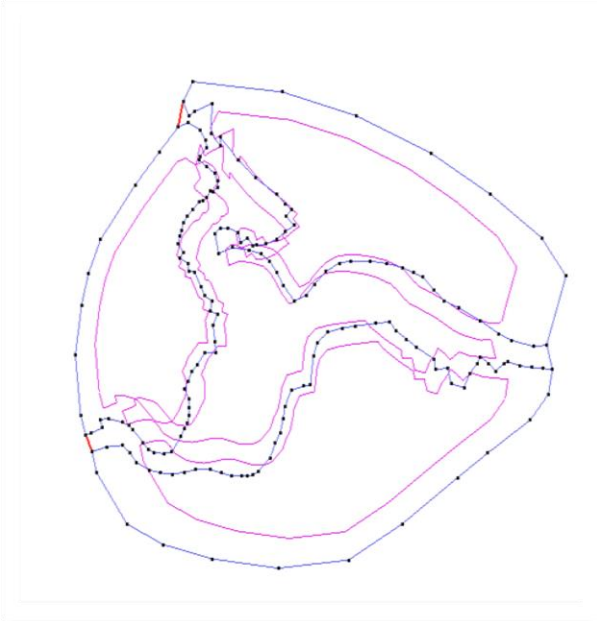

Figura 15. *Salidas de caudal en el dominio computacional*. Fuente: Elaboración propia

Coeficiente de Manning.

En la metodología se mencionó como el valor de Manning se escoge a partir del uso del suelo. Para ello se realizó una capa de uso del suelo para la zona de estudio. En la figura 16, se observa el mapa de clasificación del suelo según su uso. A partir de esta información cartográfica se pudo definir que el valor Manning debe ser correspondiente a dense vegetation, la cual está relacionada con la vegetación inundable, vegetación presente en la mayor parte del territorio. Según la tabla 4, donde se

muestran los valores de Manning según el uso del suelo, la selección del valor fue de 0.18 para las zonas terrestres (Figura 17) y de 0.025 para el cauce del rio (Figura 18).

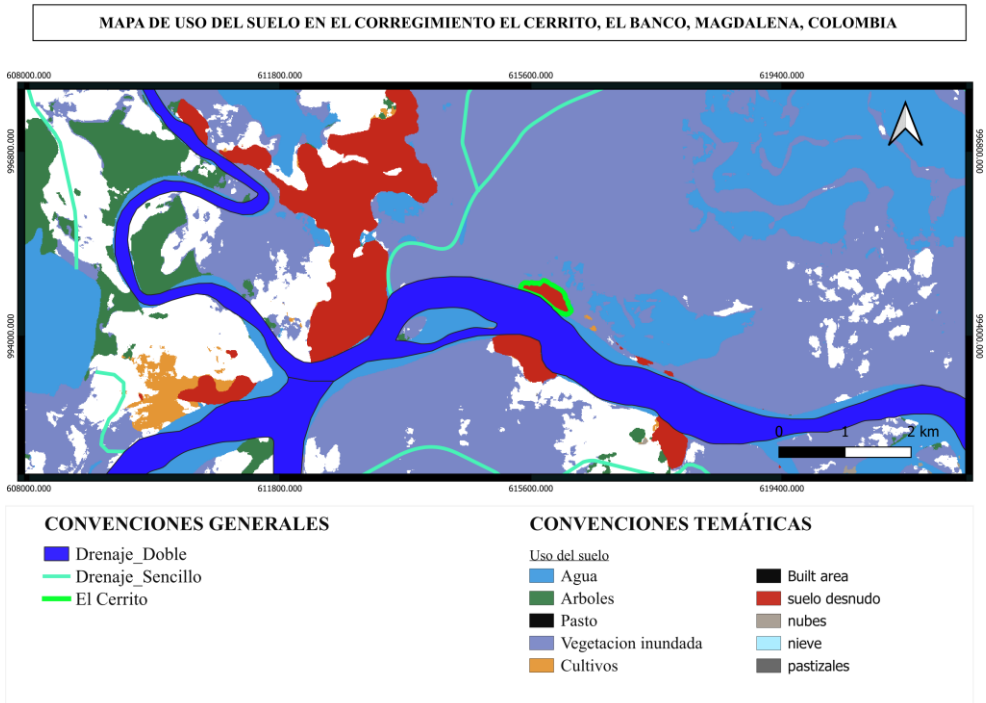

Figura 16. *Mapa de clasificación del uso del suelo en el municipio El Banco, Magdalena-Colombia.* Fuente: Elaboración propia

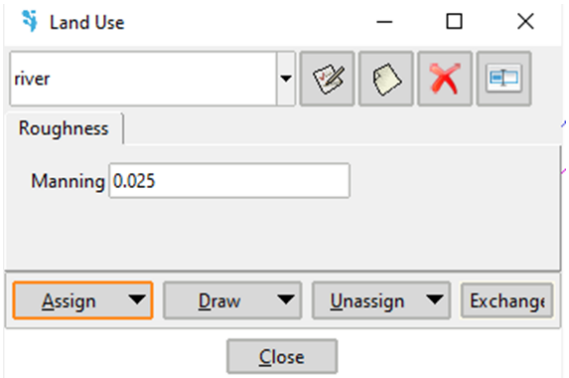

Figura 17. *Asignación valor Manning para el rio*. Fuente: Elaboración propia

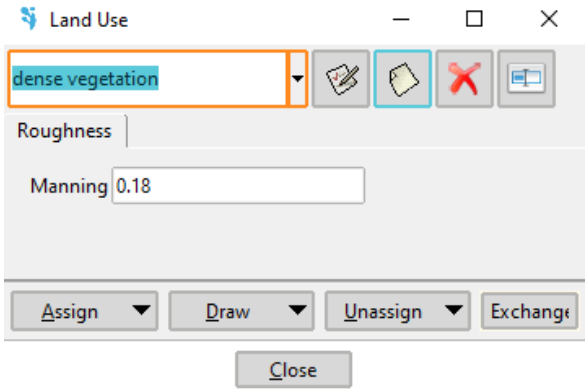

Figura 18. *Asignación valor Manning para vegetación inundable*. Fuente: Elaboración propia

Mallado

La asignación del valor de la malla es fundamental para obtener resultados más precisos en el modelo que se simuló. Para los propósitos de esta investigación, se utilizaron valores de malla de 50 para el río y 75 para las zonas terrestres. Esta elección busca garantizar resultados satisfactorios sin incurrir en tiempos de espera excesivos, ya que un valor de malla más alto mejora la visibilidad, pero también requiere un mayor tiempo de cálculo. Como resultado, en la figura 19 se puede observar el nivel de detalle alcanzado en los resultados, basado en los puntos que representan la precisión del modelo.

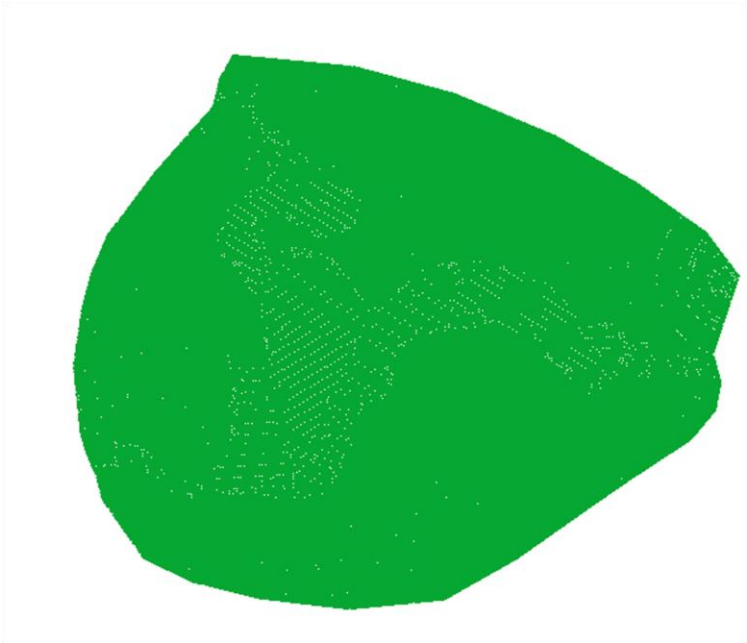

Figura 19. *Malla del modelo hidrodinámico*. Fuente: Elaboración propia

Incorporación del DEM

Para fines de una mejor resolución, a todos los escenarios simulados se les asigno el DEM que tiene incorporada la batimetría y las adecuaciones transversales

Asignación de tiempo

El tiempo asignado para la simulación de los escenarios fue de 84,600 segundos, lo que equivale a 24 horas. El programa IBER solo acepta la selección de tiempo en unidades de segundos. Esta duración fue elegida en función de la cantidad de resultados que se deseaba obtener, considerando el comportamiento potencial de la amenaza de inundación en un lapso de 24 horas. Asimismo, también fue escogido el tiempo teniendo en cuenta la capacidad de la herramienta computacional con la que se elaboró el desarrollo del modelo hidrodinámico.

Como resultado para fines de elaboración de la fase 3, se extrajeron las capas ráster de velocidad y profundidad del escenario TR 100, RCPP 2.6 y RCP 8.5 del postproceso del modelo hidrodinámico (Ver anexos). Los resultados de los rasters fueron:

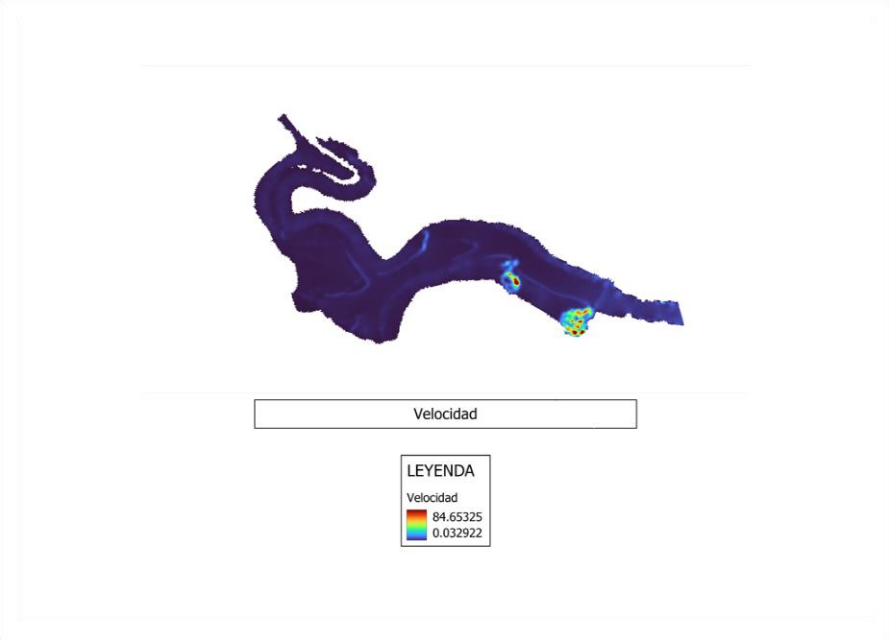

Figura 20. *Capa ráster de velocidad para el escenario de un TR 100 años.* Fuente: Elaboración propia

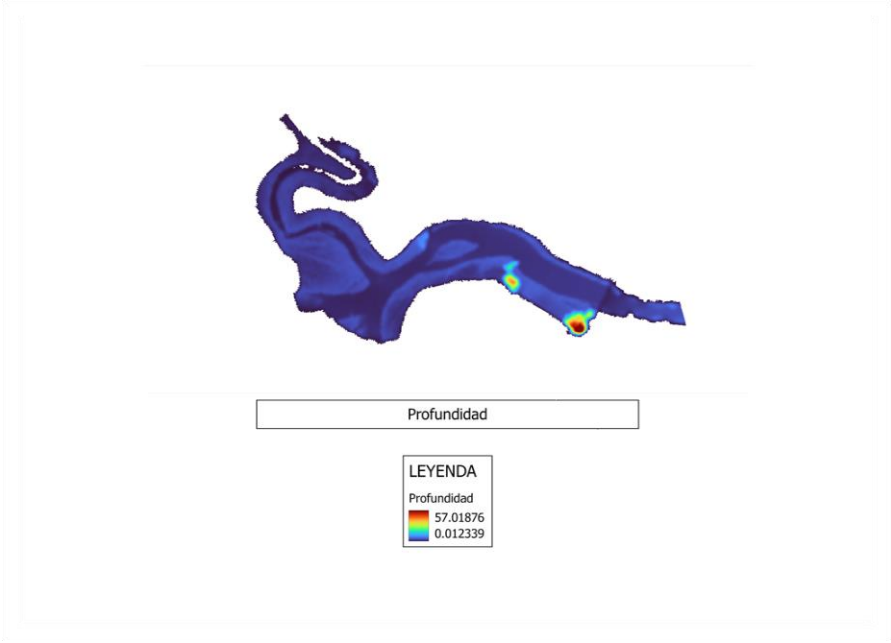

Figura 21. *Capa ráster de profundidad para el escenario de un TR 100 años*. Fuente: Elaboración propia

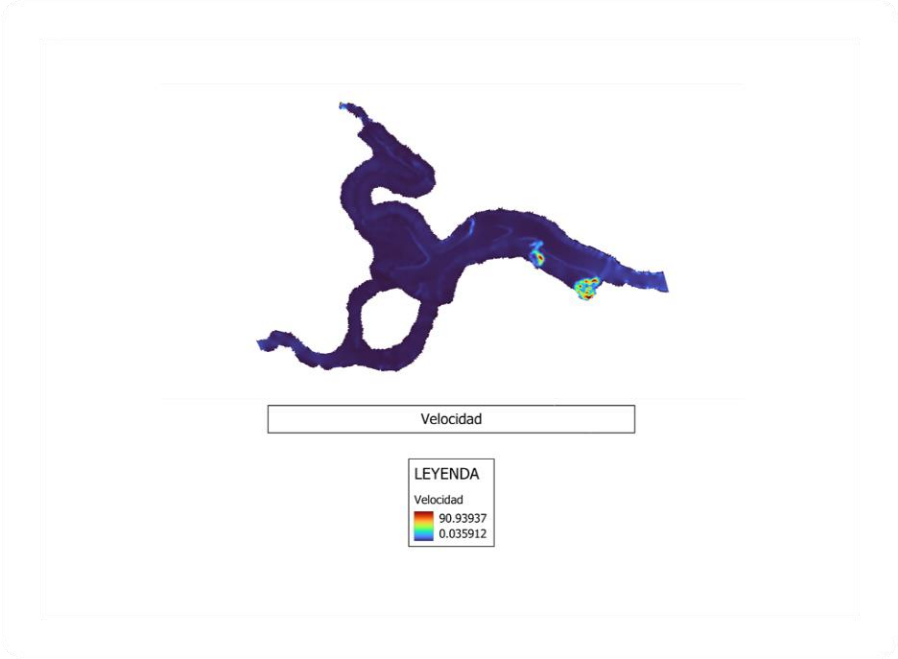

Figura 22. *Capa ráster de velocidad para el escenario RCP 2.6*. Fuente: Elaboración propia

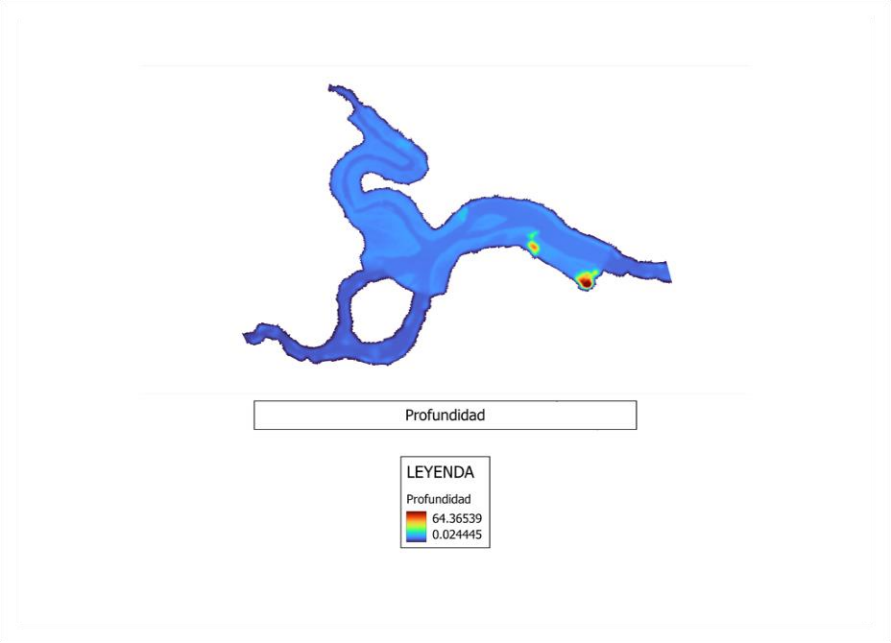

Figura 23. *Capa ráster de profundidad para el escenario RCP 8.5.* Fuente: Elaboración propia

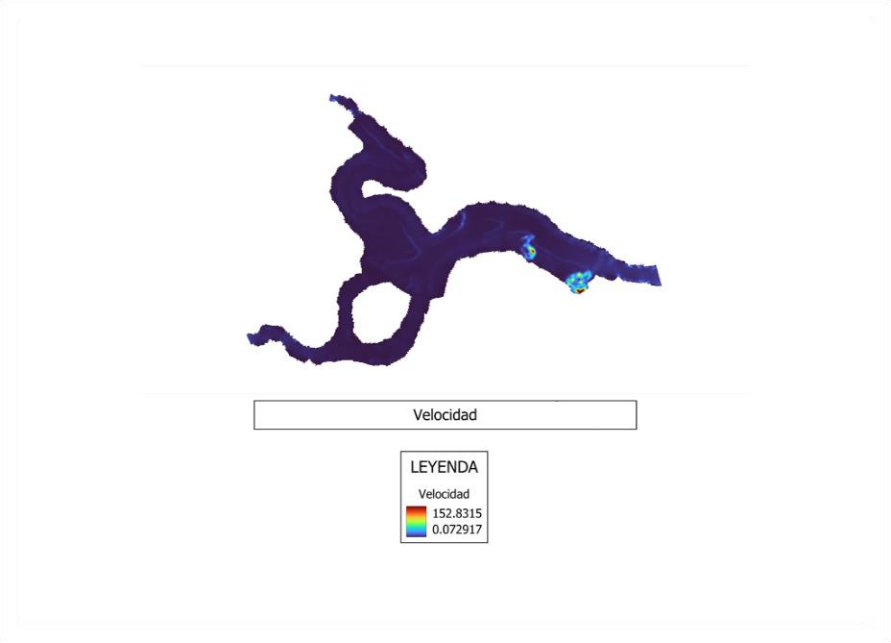

Figura 24. *Capa ráster de velocidad para el escenario RCP 8.5.* Fuente: Elaboración propia

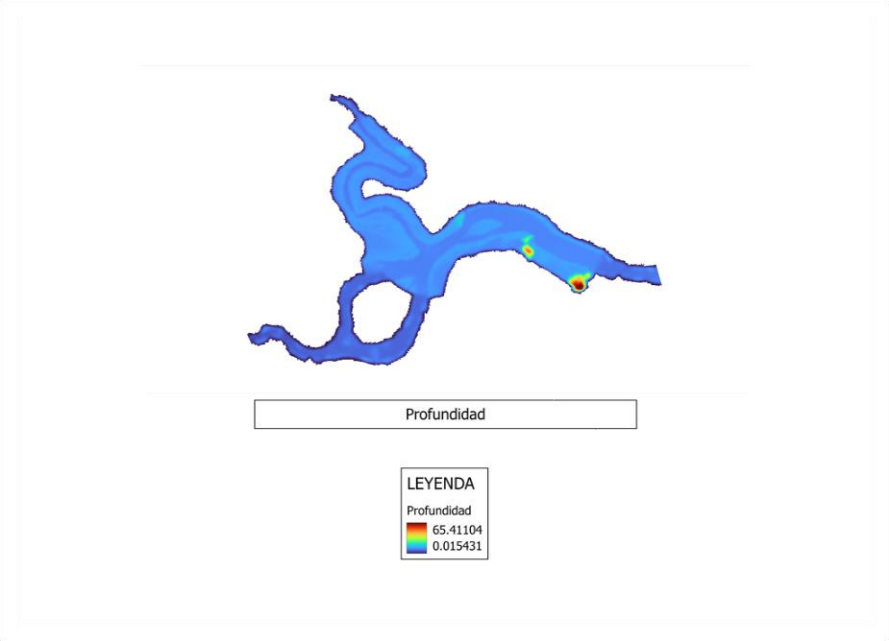

Figura 25. *Capa ráster de profundidad para el escenario RCP 8.5*. Fuente: Elaboración propia

Tabla 11 . *Datos numéricos de velocidad y profundidad para cada escenario*

Escenario	Velocidad Máxima ($\frac{m}{s}$)	Velocidad Mínima ($\frac{m}{s}$)	Profundidad Máxima (metros)	Profundidad Mínima (metros)
TR100	84,65325	0,0322922	57,01876	0,012339
RCP 2.6	90,93937	0,035912	64,36539	0,024445
RCP 8.5	152,8315	0,072917	65,41104	0,015431

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 11 se evidencia una correlación entre los datos de velocidad y profundidad del agua, donde un incremento en la velocidad suele coincidir con un aumento en la profundidad. No obstante, esto no implica que un incremento en la velocidad provoque necesariamente un aumento en la profundidad de forma directa. Sin embargo, se reconoce que las variaciones climáticas y los efectos asociados al cambio climático pueden influir en la dinámica de la velocidad del agua, principalmente a través del aumento en la lámina de agua (es decir, la profundidad). De igual manera, la profundidad puede verse afectada por los impactos del cambio climático, dado que alteraciones en las características del suelo, como la reducción de la capacidad de infiltración, pueden conducir a un incremento en la acumulación superficial de agua. Esto, a su vez, eleva la amenaza de inundaciones en las comunidades adyacentes (Zamora & Chamorro, 2024)

Fase 3: Caracterización de la amenaza

Caracterización de la amenaza

A partir de la matriz de la figura 5, se asignador los valores a las capas ráster de velocidad y profundidad extraídas de los resultados del modelo hidrodinámico para posteriormente realizar el mapa de amenaza para cada escenario.

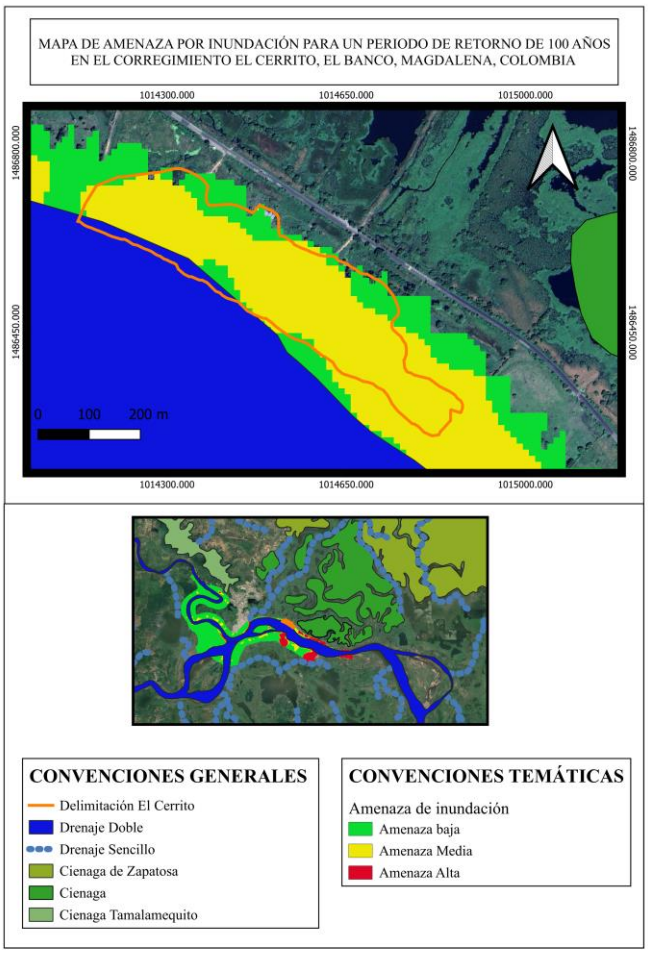

Figura 26. *Mapa de amenaza por inundación para un periodo de retorno de 100 años.*
Fuente: Elaboración propia

A partir del análisis de los mapas de amenaza generado mediante el uso de la herramienta QGIS, se realizó el cálculo de las hectáreas del corregimiento El Cerrito que presentan una amenaza por inundación. El corregimiento abarca un área total de 20.172 hectáreas, de las cuales, en un periodo de retorno de 100 años para la inundación, el 77% se encuentra clasificadas bajo algún nivel de amenaza de inundación. De este porcentaje, el 25,62% corresponde a áreas con amenaza baja, mientras que el 51,89% restante está asociado con una amenaza media.

Tabla 12. *Cálculo de áreas con amenaza en el corregimiento El Cerrito respecto al TR 100*

Área afectada (%)	TR 100
Total de área con amenaza por inundación respecto al área total del corregimiento El Cerrito	77%
Porcentaje de amenaza baja respecto al total de área afectada por la amenaza	25,62%

Porcentaje de amenaza media respecto al total de área afectada por la amenaza	51,89%

También, se contemplaron los datos del caudal máximo correspondiente a un período de retorno de 100 años, estimado en 6,744.64 m³/s (ver resultados tabla 9). Con esto, se puede inferir que las inundaciones reportadas en los últimos años por los habitantes del corregimiento, junto con sus afectaciones, podrían repetirse en el futuro. El hecho de que el caudal estimado para eventos de retorno de 100 años (6,744.64 m³/s) sea mayor en comparación con el caudal medio de la serie de tiempo utilizada durante el horizonte de 2000-2024 (3920.4 m³/s), sugiere que este tipo de fenómenos podría continuar ocurriendo en los próximos años, especialmente en las áreas clasificadas con amenaza media para el escenario de TR 100, que cubren una porción considerable del territorio. No obstante, es importante enfatizar en la teoría del periodo de retorno, pues aplicando la ecuación 3 correspondiente al TR, se estima que para 100 años existe la probabilidad del 1% cada año que la inundación de tal magnitud pueda retornar.

Considerando la baja probabilidad de retorno de inundación con un caudal de esa magnitud, igual se debe hacer énfasis en las consecuencias de cambio climático, las cuales agravan y generan más frecuencia e intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos extremos. A partir de esta premisa, se analiza a continuación los escenarios de RCP 2.6 Y 8.5, los cuales se generaron con base al caudal máximo para un TR 100.

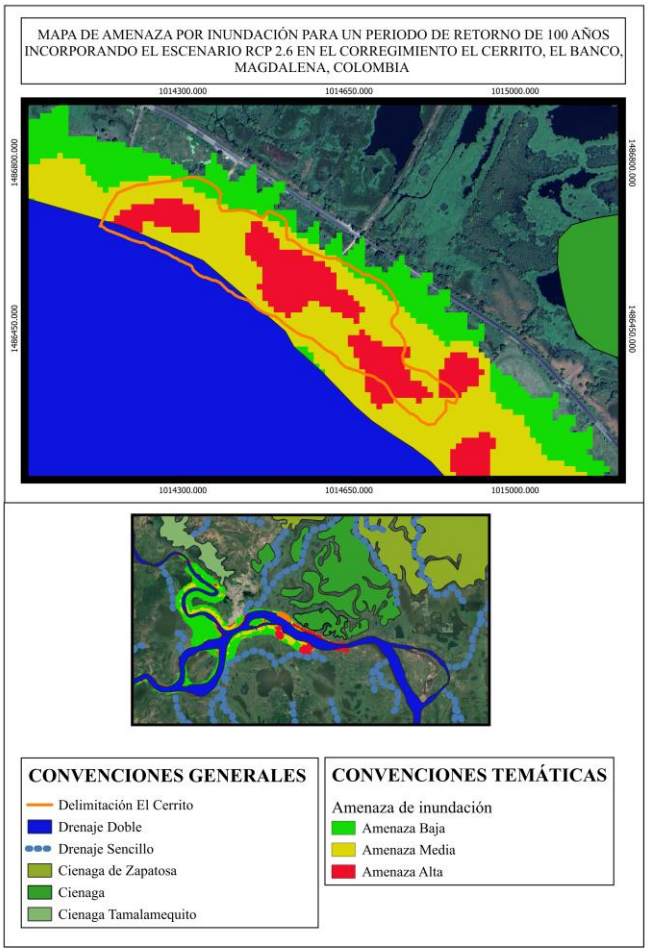

Figura 27. *Mapa de amenaza por inundación en el escenario RCP 2.6*. Fuente: Elaboración propia

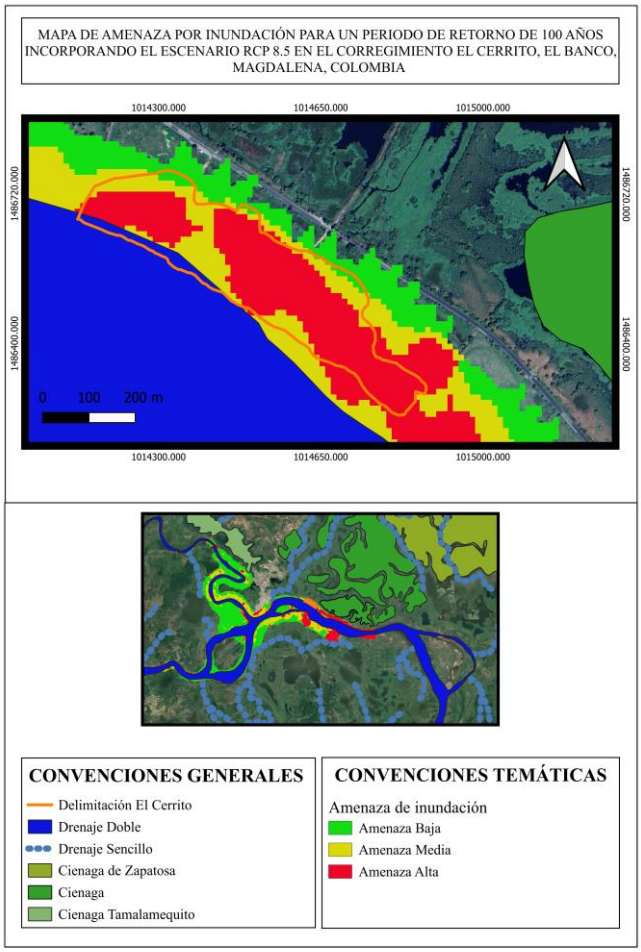

Figura 28. *Mapa de amenaza por inundación en el escenario RCP 8.5.* Fuente: Elaboración propia

Para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 también se generó un cálculo de áreas de amenaza por inundación, la cual se describe en la siguiente tabla

Tabla 13. *Cálculo de áreas con amenaza en el corregimiento El Cerrito respecto al escenario RCP 2.6 y 8.5*

Área afectada (%)	RCP 2.6	RCP 8.5
Total de área con amenaza por inundación respecto al área total del corregimiento El Cerrito	86%	88%
Porcentaje de amenaza baja respecto al total de área afectada por la amenaza	21.4%	19.63%
Porcentaje de amenaza media respecto al total de área afectada por la amenaza	42.04%	27.98%

Porcentaje de amenaza alta respecto al área total afectada por la amenaza	23.41%	40.54%

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que la variación del caudal máximo de los RCPs 2.6 y 8.5 en comparación al caudal máximo de un TR 100 fue de 1% y 6,40% respectivamente (ver tabla 8), se observa que la clasificación de la amenaza ente estos dos escenarios no difiere significativamente entre sí, ya que el porcentaje de variación de áreas afectadas por la amenaza de inundación es de un 2% entre el RCP 2.6 y el 8.6. Sin embargo, a pesar de esta pequeña variación es importante destacar que pequeños cambios en la clasificación de amenaza pueden desencadenar problemáticas muy diferentes

Como se muestra en la tabla 13, un aumento del 2% entre el área de amenaza por inundación de los RCP 2.6 y 8.5 (del 86 al 88%) puede generar un incremento superior al 16% en las zonas clasificadas con amenaza alta. Este comportamiento refleja que incluso variaciones pequeñas en los caudales pueden tener un impacto considerable en la distribución de las áreas bajo diferentes niveles de amenaza por inundación. Esto es especialmente relevante para la planificación futura, donde un leve aumento en el área afectada podría traducirse en un incremento considerable de áreas clasificadas con mayor nivel de amenaza.

Es particular señalar que el escenario RCP 2.6 es el más optimista en comparación a los otros escenarios elaborados por el IPCC, esto es porque infiere que el forzamiento radiativo será de 2.6 W/m2 antes del 2100 con una posterior estabilización (IPCC, 2013). A pesar de que la figura 27 y la tabla 13 muestran que igualmente la amenaza por inundación se presentará en este escenario, es imprescindible mencionar que las consecuencias del cambio climático prevalecerán debido a que los GEI permanecen un tiempo largo en la atmósfera y también por el lento ajuste térmico del sistema climático (Natenzon et al., 2005). Por otra parte, el aumento de un 16% en la amenaza alta muestra como el escenario RCP 8.5 puede resultar demasiado catastrófico ya que las emisiones de GEI generan un aumento muy probable de temperatura mayor a 2°C afectando el nivel del mar y desajustando todo el ciclo hidrológico, especialmente en zonas costeras (IPCC, 2013)

Igualmente, la simulación de una posible inundación para un periodo de retorno de 100 años incorporando los escenarios de cambio climático como los RCP 2.6 y 8.5 son funcionales para permitir generar en las autoridades una alerta en la toma de acción en estrategias de adaptabilidad y mitigación ante el cambio climático. Asimismo, la adaptación al cambio y variabilidad climática es una oportunidad de corto, mediano y largo plazo que garantiza una protección en las inversiones sociales y económicas en el territorio colombiano (Gutierrez et al., 2016). Por otro lado, como menciona García Montero (2023), los efectos del cambio climático no solo impactarán los sistemas naturales, sino que también reducirán el crecimiento económico, dificultarán la reducción de la pobreza y afectarán la seguridad alimentaria. Agregando a esto, es importante resaltar que la zona de estudio es conocida por ser una zona de producción bananera, la cual está sujeta a un riesgo de afectación agrícola por el incremento en la frecuencia y la severidad de los eventos hidrometeorológicos extremos, que en consecuencia retrasa el desarrollo local. También, se registra como en los últimos 40 años se han generado pérdidas económicas a nivel mundial de US$80 mil millones por daños de fenómenos hidrometeorológicos extremos (García Montero, 2023). La premisa anterior sugiere que, si no se toman decisiones adecuadas a tiempo, los países en desarrollo, como Colombia, tendrán retos más significativos en términos de resiliencia en el futuro.

Estos impactos subrayan la necesidad de desarrollar estrategias de adaptabilidad a nivel local, regional y nacional. La implementación de medidas adaptativas no solo es una respuesta inmediata,

sino también una inversión en la resiliencia a largo plazo. Por ende, proyectos de investigación como el presente adquieren un papel fundamental, ya que proporcionan tanto datos cualitativos como cuantitativos sobre la afectación del territorio colombiano por el cambio climático. Estos estudios son esenciales para impulsar en la toma de decisiones y apoyar el desarrollo de políticas públicas más robustas, orientadas a mitigar los efectos adversos del cambio climático y asegurar la estabilidad social y económica del país. Así, el énfasis en la adaptabilidad no es solo una necesidad urgente, sino también una vía estratégica para enfrentar los desafíos del futuro.

Además, diversas entidades como el IPCC generan apartados que permiten guiar las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático. La mitigación se refiere a una acción humana diseñada para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Para desarrollar estrategias de mitigación, es esencial restringir los impactos del cambio climático, lo que permitirá alcanzar el desarrollo sostenible y la equidad, además de contribuir a la erradicación de la pobreza. (IPCC, 2014). Por otra parte, la mitigación no podrá ser efectiva si diversos agentes actúan por sus propios intereses, ya que las acciones a tomar en cuenta deben elaborarse en una acción colectiva mundial. (IPCC, 2014)

La adaptación es el proceso de ajuste a los efectos actuales o futuros del cambio climático. Entre las respuestas de adaptación más comunes están las opciones adaptativas basadas en la ingeniería y la tecnología (Field & Barros, 2020), como la simulación de la inundación integrando los RCPs. No obstante, la integración de opciones de adaptabilidad ingenieriles y de opciones institucionales y sociales que permitan generar una red de seguridad vinculada al clima (Es decir, brindar un apoyo o sistemas de ayuda relacionados con afectaciones por el cambio climático) agilizan la planificación y toma de decisiones, además incorpora un pensamiento de sensibilidad relacionado con el clima en diferentes organizaciones e instituciones (Field & Barros, 2020)

El trabajo conjunto en mitigación y adaptación está alineado con el objetivo 2 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Este objetivo busca limitar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de manera que no interfieran con el sistema climático de forma antropogénica. Además, se propone una reducción de las emisiones en un plazo adecuado para que los ecosistemas puedan adaptarse, asegurando así que la producción de alimentos no se vea amenazada y promoviendo un desarrollo económico sostenible. (IPCC, 2014)

Igualmente, entre las acciones de adaptabilidad se pueden recurrir a acciones de mala adaptación, las cuales son de preocupación para los planificadores de adaptación ya que la mala intervención en una zona puede crear o incrementar la afectación por cambio climático en otro lugar(Field & Barros, 2020). La mala adaptación se refiere no solo a acciones mal planificadas e inadvertidas, sino que también a decisiones tomadas deliberadamente priorizando resultados inmediatos sin considerar las consecuencias futuras del cambio climático (Field & Barros, 2020). A partir de lo expuesto, la identificación del comportamiento de una futura inundación incorporando las posibles consecuencias del cambio climático de los escenarios RCP 2.6 y 8.5 puede servir como un respaldo ingenieril y científico permitiendo la formulación de decisiones adaptativas más informadas, ya que tiene en cuenta las repercusiones futuras del cambio climático.

Al analizar los mapas de amenaza por inundación, se observa una progresión coherente entre ellos, siendo el escenario TR 100 el que presenta una amenaza más baja en comparación con los escenarios de emisiones 2.6 y 8.5. Esta diferencia de amenaza se debe principalmente a la dinámica de las emisiones de gases de efecto invernadero y su influencia directa sobre los recursos hídricos (Field & Barros, 2020). El escenario TR 100, aunque caracterizado por tener una amenaza baja y media, alerta que, el corregimiento no está exento a la amenaza. La variación entre el escenario 2.6 y

el TR 100 es del 1%, lo que refleja un impacto casi imperceptible en términos numéricos de aumento de la amenaza. Sin embargo, esta leve variación es suficiente para evidenciar la presencia de un aumento de amenaza, que sigue siendo significativa incluso en un escenario de bajas emisiones.

El escenario RCP 2.6, considerado como el más optimista dentro de las proyecciones climáticas, se basa en la premisa de que las emisiones de GEI serían controladas de manera drástica y sostenida a lo largo del tiempo (IPCC, 2013). No obstante, a pesar de ser el escenario más favorable en cuanto a emisiones, sigue habiendo una probabilidad considerable de inundación. Este dato es especialmente relevante cuando se tiene en cuenta la ubicación geográfica del corregimiento, ya que, según la literatura expuesta en el apartado del planteamiento del problema, la zona de estudio es propensa a las inundaciones debido a que esta sobre el rio Magdalena. Esta ubicación en sí representa una amenaza determinante, lo que sugiere que, incluso bajo un escenario de bajas emisiones, las condiciones geográficas seguirían exponiendo amenazas significativas en el área. La interacción entre las condiciones geográficas y los efectos del cambio climático refuerza la idea de que el control de las emisiones es solo una parte del problema, y que se debe considerar la planificación de medidas adaptativas.

Por otro lado, el escenario más extremo, el RCP 8.5, refleja un panorama mucho más preocupante. Este escenario representa un futuro en el que las emisiones de GEI continúan aumentando sin control, y la capacidad de mitigación de los países y regiones es limitada o inexistente (IPCC, 2013). En este caso, la variación con respecto al escenario TR 100 es del 6%, lo que puede parecer una diferencia modesta en términos numéricos, pero en términos de impacto y consecuencias reales, esta variación es considerablemente alarmante. Una variación del 6% puede significar un aumento drástico en la frecuencia e intensidad de las inundaciones, así como en el área geográfica afectada y en la severidad de los daños causados. Además, este aumento porcentual no solo implica una mayor probabilidad de inundación, sino que también puede traducirse en la exacerbación de otros fenómenos asociados, como la erosión del suelo, la pérdida de ecosistemas, la afectación de la infraestructura y el desplazamiento de comunidades. En el contexto del escenario 8.5, la amenaza de inundación es categorizada mayoritariamente como alta, lo que coloca a este escenario en un nivel catastrófico en comparación con los escenarios anteriores. La posibilidad de eventos de inundación masiva y recurrente es significativamente mayor, lo que tendría implicaciones devastadoras para los locales.

Teniendo en cuenta los RCP y su amenaza por inundación en el corregimiento El Cerrito para un TR de 100 años, se mencionan las soluciones basadas en la naturaleza (SbN), las cuales son un enfoque de planificación y gestión que se fundamenta en la diversidad biológica y los servicios que ofrecen los ecosistemas. Este método busca crear estrategias de acción colaborativa y apoyo específico dirigidas a ayudar a personas u organizaciones a adaptarse a los efectos del cambio climático (Winograd et al., 2021).

En las ciudades las SbN se definen como acciones estructurales (infraestructuras) o no estructurales (conocimiento, normas y políticas) que optimizan el uso y la conservación de los servicios ecosistémicos en zonas urbanas, periurbanas y rurales de las ciudades con el fin de la adaptación a los impactos del cambio climático (Winograd et al., 2021). El presente proyecto es considerado una medida no estructural, pues como se ha mencionado, aporta una divulgación de conocimiento sobre las consecuencias de dos escenarios de cambio climático en la amenaza de inundación en el corregimiento El Cerrito. Aún así, en este apartado de resultados, análisis y discusión de resultados, también se mencionan algunas posibles estrategias de mitigación y adaptabilidad que actúen en sinergia en pro a los locales contra afectaciones por el cambio climático.

Las SbN tiene como ventajas ser más rentables en proporcionar soluciones de adaptación al cambio climático, obtener beneficios sociales y económicos mientras se aprovechan y preservan los servicios ecosistémicos, generan un sistema socio-ecológico integrando componentes sociales, ecológicos y económicos y también tienen un enfoque en los procesos para facilitar la creación de capacidades en comunidades e instituciones (PNUMA, 2021).

Para mejorar el estado hidromorfológico de los sistemas fluviales, las soluciones basadas en la naturaleza más frecuentes incluyen la restauración de humedales, la mejora de la conectividad del río con sus llanuras aluviales, la reconexión de meandros y cauces secundarios, así como la diversificación y el fortalecimiento de la estructura de las riberas (Magdaleno et al., 2021). No obstante, las infraestructuras verdes y las medidas de retención natural de agua deben desempeñar un papel importante en el diseño de acciones multifuncionales que favorezcan la recuperación del espacio, los procesos y funciones del ecosistema fluvial mientras contribuyen a disminuir impactos de inundación (Magdaleno et al., 2021).

La restauración fluvial, que se refiere al conjunto de acciones destinadas a devolver a los ríos su estructura y funcionamiento natural como ecosistemas, representa la máxima expresión de las SbN en práctica. Esta es una medida clave incluida en los planes de gestión del riesgo de inundación y planes hidrológicos de las cuencas en España (Magdaleno et al., 2021)

Por otra parte, las ciudades atraviesan un crecimiento exponencial, lo cual crea la necesidad de evaluar los sistemas urbanos, encontrar posibles problemas y sus soluciones y también crear una adaptación ante los cambios que trae el cambio climático con el objetivo de crear una resiliencia urbana. (Marino Zamudio et al., 2023). Con base a lo anterior, en Colombia se evaluaron los sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) como una potencial SbN para adaptar las ciudades al cambio climático. Los SUDS son soluciones diseñadas para gestionar y mitigar los efectos negativos del agua lluvia y el manejo de aguas en áreas urbanas. El objetivo principal de los SUDS es controlar la amenaza por inundación mediante su retención y detención. Además, estos sistemas contribuyen a proteger la calidad del agua, mejorar el entorno urbano y fomentar la biodiversidad, creando condiciones favorables para la conservación de los servicios ecosistémicos esenciales para nuestra supervivencia y la de la flora y fauna circundante.(Marino Zamudio et al., 2023).

Entre las diferentes soluciones en práctica que tienen los SUDS están las cubiertas verdes, el drenaje subterráneo, la retención de parcelas, drenaje pluvial o riego en zonas verdes (Marino Zamudio et al., 2023).

Las SbN como los SUDS actualmente no están incluidos en los estándares normativos de diseño del espacio público en Colombia, por ende, se crea un desperdicio del recurso hídrico en actividades que no necesitan agua potable. Asimismo, la incorporación de estas estrategias es sumamente importante debido a que el fenómeno de la niña y el niño aumentará más las precipitaciones o sequias en las regiones colombianas, incrementando así una afectación de inundación, erosión, deslizamientos y crecimiento en el nivel del mar en las comunidades urbanas y rurales (Marino Zamudio et al., 2023).

En Colombia, para prevenir inundaciones se estima que una de las SbN más apropiada es la instalación de medidas de infraestructura verde en espacios públicos, la cual incluye jardines de lluvia, techos verdes y sistemas de recolección de agua (Marino Zamudio et al., 2023).

Por otra parte, PNUMA(2021) menciona que para llevar a cabo las SbN se debe tener en cuenta que los desafíos sociales y ambientales como el cambio climático y los servicios ecosistémicos

se determinan por la función del entorno urbano o rural, por ende, se debe tener una comprensión de sus dinámicas para generar una mejor inversión y mejores soluciones. Lo anterior se realiza por medio de un análisis que identifica las problemáticas comunes de la zona de estudio, su respectivo análisis poblacional y los hotspots, los cuales son las áreas con mayor amenaza de una afectación. Asimismo, con la integración de todos los actores de la zona de estudio, se realizan talleres participativos para poder identificar los problemas, sus causas y consecuencias y así escoger las mejores SbN integrando todas las perspectivas posibles (PNUMA, 2021). La participación de todos los actores permite lograr un desarrollo económico que facilita el acceso a alimentos, energía, agua suficiente, mejores oportunidades de planificación, reducción en los impactos de los desastres naturales y el desarrollo sostenible (PNUMA, 2021).

Dado que el corregimiento de El Cerrito presenta una extensión territorial limitada y una población relativamente pequeña, las SbN como los SUDS pueden no ser las más adecuadas, ya que están diseñadas principalmente para contextos urbanos. No obstante, en áreas de menor escala y con poblaciones reducidas, es posible implementar SbN enfocadas en la mitigación de inundaciones, tales como la restauración de humedales, el establecimiento de sistemas agroforestales, la creación de corredores ecológicos, la construcción de diques vegetativos y la reforestación de cuencas hidrográficas.

Con base a esto se puede concluir que la sinergia entre medidas estructurales (SbN) y no estructurales (divulgación de conocimiento como la presente investigación) es muy funcional, ya que permite a las autoridades competentes mejorar en la toma de decisiones para una adaptación y resiliencia ante afectaciones por el cambio climático. También es importante mencionar que todo este análisis se pudo realizar a partir de un modelo matemático como lo es la modelación hidrodinámica, la cual, respondiendo a la pregunta de investigación, es una herramienta muy útil para identificar la amenaza por inundación incorporando escenarios de cambio climático, y a partir de esta identificación poder presentar a las autoridades pertinentes resultados técnicos e ingenieriles que puedan guiar la toma de decisiones.

Conclusiones

En este apartado se presentan las conclusiones derivadas de cada objetivo específico, estableciendo una coherencia entre la metodología aplicada y el cumplimiento del propósito central de este proyecto de grado. El primer objetivo específico, el cual tenía como propósito estimar un caudal máximo para un periodo de retorno de 100 años se alcanzó satisfactoriamente mediante el uso de datos abiertos suministrados por entidades públicas como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Estos datos, que reflejan el comportamiento del río Magdalena, resultan esenciales para profundizar en el estudio de los recursos hídricos en Colombia.

Particularmente, para el presente trabajo, los datos obtenidos de la estación hidrometeorológica “PENONCITO” fueron determinantes para analizar la relación entre el cuerpo de agua y la influencia por escenarios de cambio climático elaborados por el IPCC. Este análisis permite no solo entender mejor la dinámica del río Magdalena, sino también anticipar los impactos que el cambio climático podría tener sobre este recurso estratégico para el país. La información obtenida constituye, así, una base sólida para proponer estrategias de gestión y conservación que consideren los desafíos ambientales actuales y futuros.

El segundo objetivo específico se logró exitosamente mediante la aplicación de un modelo matemático, en particular con el uso de la herramienta IBER. Esta herramienta permitió desarrollar un modelo hidrodinámico capaz de simular el comportamiento de una inundación asociada a un

periodo de retorno de 100 años. Además, posibilitó la proyección del comportamiento de dicha inundación al incorporar los escenarios de cambio climático representados por los RCP 2.6 y RCP 8.5.

El uso del modelo matemático resultó fundamental para ofrecer una visión detallada y fundamentada sobre las posibles condiciones de inundación en el futuro. Esta información proporciona a las autoridades datos precisos, respaldados por la ingeniería, sobre el potencial impacto de fenómenos hidrometeorológicos en las comunidades, permitiendo así una mejor planificación de adaptabilidad y mitigación.

El tercer objetivo específico, referido a la caracterización de la amenaza por inundación, se logró plenamente gracias al uso de la matriz de amenaza proporcionada por el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER), que emplea variables de profundidad y velocidad. La metodología de IDIGER demostró ser óptima, ya que permitió utilizar datos hidrológicos derivados de los rásters de velocidad y profundidad generados por el modelo matemático. Esto facilitó la identificación de las zonas del corregimiento de El Cerrito con mayor probabilidad a ser afectadas por eventos de inundación. Este enfoque aporta una base sólida para la implementación de estrategias de mitigación y adaptabilidad que reduzcan el impacto de las inundaciones y refuercen la capacidad de respuesta de las comunidades ante eventos climáticos extremos

Asimismo, por medio de la caracterización de la amenaza con la matriz de IDIGER se pudo analizar como los efectos del cambio climático agravan la clasificación de amenaza por inundación en cada escenario simulado. Para el escenario de periodo de retorno de 100 años estos efectos aumentan la probabilidad de ocurrencia de la inundación, para el escenario RCP 2.6 estos efectos negativos prevalecen debido a la permanencia de GEI en la atmósfera por el lento ajuste térmico del sistema climático, y para el escenario RCP 8.5 estos efectos aumentan un 16% la clasificación de amenaza alta por inundación respecto a los otros dos escenarios simulados.

La identificación y caracterización de la amenaza por inundación en el corregimiento El Cerrito fue funcional como una medida no estructural ya que permitió generar nueva información respecto a cómo actúa la inundación en el corregimiento incorporando escenarios de cambio climático y así aumentar una noción de responsabilidad en las autoridades acerca de la toma de decisiones tempranas para que no se generen desastres. De igual manera, esta divulgación de conocimiento también puede ser funcional para que entidades u otras organizaciones realicen proyectos que relaciones los fenómenos hidrometeorológicos extremos que ocurran en Colombia y como seria su comportamiento incorporando escenarios de cambio climático, para así poder ampliar el conocimiento de los efectos del cambio climático en el contexto colombiano.

Recomendaciones

El presente proyecto de grado constituye un aporte significativo a la ingeniería ambiental, al ofrecer un análisis riguroso sobre la amenaza de inundación en el corregimiento El Cerrito, en el marco de escenarios de cambio climático. Mediante la aplicación de modelos matemáticos, en particular de modelación hidrodinámica, se lograron identificar patrones y tendencias en el comportamiento del caudal, así como su interacción con las características locales del entorno. Estos hallazgos no solo enriquecen el conocimiento técnico, sino que también permiten generar recomendaciones concretas para fortalecer la disciplina de la ingeniería ambiental.

En primer lugar, se sugiere la promoción de investigaciones que evalúen los impactos del cambio climático a nivel regional, con el fin de sensibilizar a las autoridades y orientar políticas públicas más efectivas. Adicionalmente, es esencial enfocar esfuerzos en las comunidades locales más vulnerables desde el punto de vista socioeconómico, promoviendo el desarrollo sostenible en dichas áreas y garantizando que las inversiones en adaptación al cambio climático prioricen estos territorios.

Además, se recomienda que para lograr una divulgación eficaz del conocimiento adquirido se desarrollen cartillas, guías ilustradas u otros materiales interactivos adaptados a diversos niveles de comprensión. Estos documentos deben estar diseñados para facilitar el acceso a la información tanto a las autoridades competentes como a las comunidades locales. De esta manera, se promueve una comunicación inclusiva y accesible que asegure que el conocimiento sobre la influencia del cambio climático en los fenómenos hidrometeorológicos extremos llegue a todos los interesados.

La implementación de herramientas de comunicación visual, como gráficos explicativos, mapas de amenaza simplificados y ejemplos prácticos, pueden ser particularmente útiles para fortalecer la comprensión del tema en la comunidad. Así, la transmisión del conocimiento se convierte en un proceso participativo, fomentando el compromiso de la población y facilitando la adopción de medidas de adaptación y mitigación ante posibles fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Por último, se recomienda investigar y aplicar nuevas Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), que ofrezcan respuestas sostenibles a los desafíos ambientales de Colombia. Esto no solo contribuiría a la resiliencia climática del país, sino que también lo posicionaría como un referente en la implementación de estrategias innovadoras para enfrentar las consecuencias del cambio climático a nivel global.

Estas acciones consolidan el valor del presente estudio en la planificación ambiental y su impacto positivo en el desarrollo sostenible.

Referencias

Abella Castaño, L. M., & Barrero Vergara, G. P. (2018). *Modelación numérica y de transporte de sedimentos caso de estudio El Banco Magdalena (Colombia)*. Universidad Santo Tomás.

Aguilar Manríquez, N. (2017). *Modelo de regresión Log-Gamma general aplicado a datos censurados*. Universidad de Valparaíso.

Aguilera Díaz, M. M. (2011). La economía de las ciénagas del Caribe colombiano. In Banco de la República (Ed.), *Banco de la Republica: Vol. Economia Regional*. Banco de la República.

Alatorre, J. E., & Fernández Sepúlveda, I. (2022). *Impactos macroeconómicos del cambio climático en América Latina y el Caribe: revisión de la literatura, 2010-2021*. www.issuu.com/publicacionescepal/stacks

Alcaldía de El Banco. (2020). *Plan de desarrollo: Construyendo ciudad 2020-2023*. https://www.elbanco-magdalena.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-municipal-8-2020-2023-alcaldia-municipal

Alcaldía de El Banco Magdalena. (n.d.). *Información de la entidad*. Transparencia. Retrieved October 20, 2024, from https://www.elbanco-magdalena.gov.co/transparencia

Aljure Jiménez, Y., & Gallego, J. A. (2010). Desigualdad y leyes de potencia . *Cuadernos de Economía*, *29*(53), 57–95.

Alonso Cadavieco, B. (2023). *Sucesiones estocásticas recursivas con ruido multiplicativo*. Universidad de Oviedo.

Alzate-Navarro, A., & Castro-Díaz, R. (2024). Ordenamiento territorial, cambio climático, y género en Medellín. *Bitácora Urbano Territorial*, *34*(2). https://doi.org/https://doi.org/10.15446/bitacora.v34n2.113555

Aristizábal-Quintero, V. (2024). El comercio por el río Magdalena: rutas, puertos, itinerarios y embarcaciones (1543-1611). *Historia y Sociedad*, *46*, 214–241.

ARNPER. (2022, July 9). En canoas acuden a estudiar niños en zona rural del Magdalena. *El Tiempo*. https://login.ezproxy.unbosque.edu.co/login?qurl=https%3A%2F%2Fwww.proquest.com%2Fnewspapers%2Fen-canoas-acuden-estudiar-ni%C3%B1os-zona-rural-del%2Fdocview%2F2686831781%2Fse-2%3Faccountid%3D41311

Beleño Orozco, E. E., & Borrero Guzmán, L. (2024). *Descripción de los Elementos con el Fin de Actualizar el Pot del Municipio el Banco, Magdalena con Base en la Zonificación Ambiental para el Territorio de Dominio de la Ciénaga de Zapatosa Propuesta en los Documentos Pomcas.*

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Metodos Numericos Para Calculo y Diseno En Ingenieria*, *30*(1), 1–10. https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004

Calandra, M. V., & Costa, V. A. (2016). Exploración bibliográfica sobre la enseñanza a nivel universitario de los conceptos de variable aleatoria y función de distribución de probabilidad . *II Congreso Internacional de Enseñanza de Las Ciencias y La Matemática-CIECyM y III Encuentro Nacional de Enseñanza de La Matemática-ENEM (UNICEN, 6 al 9 de Septiembre de 2016)*.

Carlos Ernesto Flores Tapia, K., & Lissette Flores Cevallos, K. (2021). *Pruebas para comprobar la normalidad de los datos en procesos productivos: Anderson-Darling, Ryan-Joiner, Shapiro-Wil y Kilmogórov-Smirnov* . *23*(2), 83–106. http://orcid.org/0000-0002-1892http://orcid.org/0000-0003

Colombia. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Posada, C. C., & Cuadros, C. A. (2010). *Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico*. Imprenta Nacional de Colombia.

Congreso de Colombia (2023). Ley 99 de 1993. https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=80c5b8e1-e665-3f95-b10c-b9bd94070f2c

Corporación autónoma regional del Magdalena. (2021, November 19). *Información Ambiental*. CORPAMAG. https://www.corpamag.gov.co/en/informacion-ambiental

Fernández de Córdova, C. J., León Méndez, A. J. F., & Martínez Ramírez, P. G. (2018). Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales . *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, *39*.

Field, C. B., & Barros, V. R. (2020). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects: Working group ii contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Garcia Garavito, A. K., & Malaver Gomez, E. F. (2016). *Construcción y análisis comparativo de las curvas IDF de los municipios Anolaima, Cáqueza, Machetá y Fúquene* . Universidad Distrital Francisco José De Caldas.

García Montero, P. (2023). El cambio climático: posibles impactos en la agricultura en el contexto de América Latina y Venezuela. *Agroalimentaria Journal-Revista Agroalimentaria*, *28*(55), 167–189.

Gelmi, M., & Seoane, R. (2013). Variación temporal de índices de precipitaciones extremas en el centro de la provincia de Buenos Aires. *GEOACTA*, *38*(1), 47–60.

Gil, C., Villanueva, I., Godiksen, P., & Ofiteco, S. A. (2006). Efectos de la cartografía sobre la modelización hidráulica bidimensional de crecidas. *Conference: II Jornadas Ingenieria AguaAt: Barcelona*.

Granados Pinedo, J. P. (2022). *Adecuación de tierras privadas para garantizar el riego, drenaje y seguridad alimentaria un deber estatal*. Universidad Externado de Colombia.

Gutierrez, T., Castellanos, C., & Hernandez, N. (2016). El ordenamiento territorial frente a las consecuencias de los cambios climáticos. *REVISTA AMBIENTAL AGUA, AIRE Y SUELO*, *7*(2).

Hincapie, J. A., Mejia, C. Z., & Prieto, L. E. (2019). Climate change and water resources in Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad and Divulgacion Cientifica*, *22*(2). https://doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1368

IDEAM. (2023). *Estudio Nacional Del Agua 2022*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales Bogotá, Colombia.

IDIGER. (2021). Guía para la Elaboración de Conceptos Técnicos para la Planificación Territorial. IDIGER.

Ignacio, F., Cea, L., & Jerónimo, P. (2020). MERLIN: a flood hazard forecasting system for coastal river reaches. *Natural Hazards*, *100*(3), 1171–1193. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11069-020-03855-7

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. (n.d.). *Información de la entidad*. IDEAM. Retrieved October 20, 2024, from https://ideam.gov.co/transparencia/informacion-de-la-entidad/mision-vision-funciones-y-deberes

IPCC. (2013). *Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (T. F. Stocker, G.-K. Qin, M. T. Plattner, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley, Eds.). Cambridge University Press.

IPCC. (2014). *Resumen para responsables de políticas. En: Cambio climático 2014: Mitigación del cambio climático. Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, K. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, P. E. Brunner, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel, & J. C. Minx, Eds.). Cambridge University Press.

IPCC. (2021). *Resumen para responsables de políticas. En: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

IPCC. (2024a). *Así funciona el IPCC*. Intergovernment Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/

IPCC. (2024b). *¿Qué es el IPCC?* Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/languages-2/spanish/

López Ramírez, D. P., & Gómez Rojas, D. F. (2019). *Determinación de la cota de inundación del río Arauca en la vereda Barracones, municipio de Arauca mediante un modelo hidrodinámico* . Universidad Católica de Colombia.

Luzuriaga Jaramillo, H. A., Espinosa Pinos, C. A., Haro Sarango, A. F., & Ortiz Román, H. D. (2023). Histograma y distribución normal: Shapiro-Wilk y Kolmogorov Smirnov aplicado en SPSS. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, *4*(4). https://doi.org/10.56712/latam.v4i4.1242

Magdaleno, G., Monte, J., Aparicio, M., Magdaleno, F., & Sánchez, F. J. (2021). Las SbN en la gestión del riesgo de inundación y restauración fluvial. *Ambienta: La Revista Del Ministerio de Medio Ambiente*, *127*, 32–41.

Marino Zamudio, R. A., Kuller, M., Zurita, B., Carrasco, L., Patrycja, G., Kustosik, K., & Riveros Rueda, A. (2023). *Ciudades sensibles al agua en Colombia: cartilla para adaptación de espacios públicos al cambio climático*. Urban Mapping Agency (UMA). https://doi.org/10.48713/10336_42288

Marulanda, S., & Tafur, L. A. (2017). Problema 12. Volumen de un embalse a partir de datos batimétricos dispersos. In H. Perez, C. A. Castro, Y. Castrillon, G. M. Valencia, & J. C. Valdés (Eds.), *Geoinformática aplicada con Aprendizaje Basado en Problemas* (Diciembre 2017, pp. 171–175). Instituto Antioqueño de Investigación (IAI).

Medina Torre, A. (2016). *Simulación hidráulica del río Yucaes para diseño de obras de defensa ribereña en el valle Acocro-Ayacucho-2016*. Universidad Nacional De San Cristobal De Huamanga.

Mena Rentería, D., Ángel Cañón, M. Á., Suarez, A. M., & Castañeda, X. (2018). Modelación de los impactos de los escenarios de cambio climático en la disponibilidad hídrica en la cuenca del río Pamplonita en Norte de Santander. *Revista EIA*, *17*(3).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Plan Integral de Gestión del Cambio Climático Territorial del Departamento de Magdalena*.

Ministerio de vivienda, ciudad y territorio (2024). Decreto 1807 de Septiembre 19 de 2014. https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=f6157f7a-b7af-3505-ad69-271080eba593

Natenzon, C. E., Bronstein, P. M., Marlenko, N., González, S. G., Ríos, D., Barrenechea, J., Murgida, A. N., Boudín, M. C., Micou, A. P., & Gentile, E. (2005). Impactos económicos y sociales por inundaciones. *El Cambio Climático En El Rio de La Plata*, 121–130.

Oruezabal, V. A., Martin, P. B., & Castañeda, M. E. (2023). Los cambios observados en el régimen de precipitación en la Patagonia Argentina. *Revista de La Facultad de Agronomía*, *121*(2), 114. https://doi.org/10.24215/16699513e114

Pabón Caicedo, J. D. (2012). Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, *36*(139), 261–278.

Palacio, D. C. (2021). Retos y aprendizajes para el manejo de eventos extremos por cambio climático. Caso de estudio: el sistema de alerta temprana comunitaria en la cuenca del rio Bogotá como medida de adaptación ante la amenaza de inundación. *Espacios*, *42*(23), 1–15. https://doi.org/10.48082/espacios-a21v42n21p01

Paredes Cerón, S. P., & Sánchez Dorado, J. A. (2013). *Análisis del desempeño a nivel físico del enlace de bajada de un sistema LTE con MIMO*. Universidad del Cauca.

PNUMA. (2021). Soluciones basadas en la Naturaleza para ciudades de América Latina y el Caribe - Guía metodológica. *Programa de Las Naciones Unidas Para El Medio Ambiente, Oficina Para América Latina y El Caribe, Panamá.*

Ramírez Pabón, D. S. (2022). *Estudio para la formulación del Plan Integral de Gestión del Cambio Climático del municipio de Cáchira Norte de Santander en cumplimiento a la ley 1931 de 2018*.

Rivera, A. N., & Salazar B, J. J. (2017). *Sedimentación del embalse Boconó, problemática y soluciones.* Universidad Católica Andrés Bello.

Robledo, O. (2000). *Optimización del costo de mantenimiento de sistemas de distribución eléctrica: Una aplicación a la función de distribución de Weibull*.

Roblero-Hidalgo, R., Chávez-Morales, J., Ibáñez-Castillo, L. A., & Palacios-Vélez, O. L. (2022). Peligro por inundación durante el huracán Stan en la cuenca del río Vicente Guerrero, Siltepec, Chiapas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *13*(2), 85–135. https://doi.org/https://doi.org/https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-02-02

Romero Pérez, D., & Gómez Romero, D. C. (2021). *Implementación del software IBER para realizar un modelo de calidad del agua y evaluar escenarios en el río Ranchería, Guajira*. Universidad Católica de Colombia.

Romero-Cuéllar, J., Buitrago-Vargas, A., Quintero-Ruiz, T., & Francés, F. (2018). Simulación hidrológica de los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Aipe, en Huila, Colombia. *Ribagua*, *5*(1), 63–78. https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1454574

Romo, M. de L., & Ortiz Pérez, M. A. (2001). Riesgo de inundación en la llanura fluvial del curso bajo del río San Pedro, Nayarit. *Investigaciones Geográficas*, *45*, 7–23.

Sampieri Hernández, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6th ed.). Mc Graw Hill Education.

Sierra Flórez, R. (2024). *Plan de Desarrollo Municipal El Banco DifeRente 2024-2027*.

Tapasco, J., Quintero, M., Uribe, N., Valencia, J., Calderón, S., Romero, G., Ordóñez, D. A., Álvarez, A., Sánchez-Aragón, L., & Ludeña, C. E. (2015). *Impactos Económicos del Cambio Climático en Colombia: Recurso Hídrico*. http://creativecommons.

Tironi-Silva, A., Marin, V. H., & Delgado, L. E. (2014). *Un modelo hidrodinámico 3D del humedal del rio Cruces:Cálculo del tiempo de residencia utilizando MOHID* (Vol. 6, Issue 2). www.mohid.com

Torres González, J. S. (2019). *Modelo hidrodinámico para identificar las zonas inundables en municipio de Campoalegre-Huila* . Universidad Central.

TYC GIS. (2017). *Curso de Iber. Modelización hidráulica bidimensional con Iber y Arcgis: Condiciones Hidrodinámica : Vol. Unidad 4*. Servicios de consultoria GIS y Teledetección. www.tycgis.com

TYG GIS. (2017a). *Curso de Iber. Modelización hidráulica bidimensional con Iber y Arcgis: Mallado* (Vol. 6). Servicios de consultoria GIS y Teledetección. www.tycgis.com

TYG GIS. (2017b). *Curso de Iber. Modelización Hidráulica bidimensional con Iber y Arcgis: Rugosidad* (Vol. 5). Servicios de consultoria GIS y Teledetección. www.tycgis.com

Useche, D., Carvajal, A., Cuervo, M. P., Gonzalez, J., Celis, L., Chavarro, J., Verdugo, N., Angarita, H., Rogeliz, C., Ruiz, D., Armenta, G., Ruiz, J., Yates, D., Gonzalez, D., Lopez, L., Dorado, J., Lopez, S., & Herrera, C. (2019). *Análisis de vulnerabilidad y riesgo al cambio climático de las planicies inundables de la macrocuenca Magdalena-Cauca*. IDEAM.

Velázquez-Zapata, J. A., Troin, M., & Dávila-Ortiz, R. (2017). Evaluación del impacto del cambio climático en los indicadores hidrológicos de una cuenca del centro de México con base en un ensamble de modelos climáticos y en el modelo hidrológico SWAT. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, *18*(3), 341–351.

Winograd, M., Van Eupen, M., & Hardoy, J. (2021). *El ABC sobre las soluciones basadas en la naturaleza (SbN)*. https://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/benefits/index_en.htm.

Zamora, J. S. R., & Chamorro, F. R. M. (2024). Amenaza de inundaciones por encharcamiento en la zona de expansión Aranda, Pasto, Nariño *: Science and Engineering Neogranadina. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, *34*(1), 67–82. https://doi.org/https://doi.org/10.18359/rcin.7192