



Zonificación de la amenaza por inundación en el municipio de San Jacinto del Cauca en el departamento de Bolívar

Andrés Fernando Baloco Vega,

Leidys Vanesa Ballesteros

Andrea Sofía Sánchez Olivella

Julián David Rivera Romero

Kiana Valbuena Mejía

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia
2026

Cita	(Baloco et al., 2026)
Referencia	Baloco Vega, A. D., Ballesteros Rodríguez, L. V., Rivera J. R., Sánchez A. S., Valbuena K. R. (2026). <i>Zonificación de la amenaza por inundación en el municipio de San Jacinto del Cauca en el departamento de Bolívar</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, II

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT, Copilot, Gemini, entre otras, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: biblioteca.umanizales.edu.co

Repositorio Institucional: ridum.umanizales.edu.co

Universidad de Manizales: umanizales.edu.co

Revistas: revistasum.umanizales.edu.co

Fondo Editorial: editorialum.umanizales.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo, en primer lugar, a nuestras familias, por su apoyo incondicional, paciencia y confianza durante cada etapa de este proceso académico. Agradezco profundamente a quienes, con su acompañamiento y palabras de aliento, hicieron posible culminar este logro profesional.

Asimismo, dedicamos este esfuerzo a todas las personas y comunidades que han sufrido y que sufren hoy de los impactos de las inundaciones en La Mojana, muy especialmente en Montería y sus alrededores, esperando que en nuestro país herramientas como estas alcancen cada rincón y sirvan para ayudar a planificar mejor nuestra ocupación y uso del territorio, reduciendo así las emergencias que hoy tocan nuestros corazones.

Agradecimientos

Los autores expresamos nuestro sincero agradecimiento a la institución académica por brindar el espacio y las herramientas necesarias para el desarrollo de este trabajo de especialización. De manera especial, agradecemos a los docentes y tutores que, con su orientación, acompañamiento y rigor académico, contribuyeron de forma significativa al fortalecimiento de nuestras capacidades profesionales y a la culminación exitosa de este proceso.

Tabla de contenido

Resumen.....	9
Abstract.....	10
Introducción	11
1 Planteamiento del problema.....	12
1.1 Descripción del área problemática.....	12
1.2. Formulación del problema	16
2 Justificación	17
3 Objetivos.....	19
3.1 Objetivo general.....	19
3.2 Objetivos específicos	19
4 Marco teórico	20
4.1 Herramientas y metodología.....	21
4.2 Gestión de inundaciones	24
4.3 Contexto regional.....	26
4.4 Conexiones clave	27
5 Metodología.....	29
5.1 Enfoque metodológico	29
5.2 Tipo de estudio.....	29
5.3 Procedimiento	30
5.3.1 Fase 1. Recolección y sistematización de la información	30
5.3.2 Fase 2. Procesamiento de datos SIG.....	31
5.3.2.1 Cobertura de la tierra.	31
5.3.2.2 Precipitación.	32
5.3.2.3 Pendientes.	32

5.3.2.4 Distancia a red de drenajes.	33
5.3.2.5 Geomorfología.	33
5.3.3 Fase 3. Elaboración del mapa de zonificación de amenaza.....	34
6 Resultados.....	41
6.1 Fase 1.	41
6.2 Fase 2.	43
6.3 Fase 3. Mapa de zonificación de la amenaza.....	52
7 Discusión.....	58
8 Conclusiones.....	61
9 Recomendaciones	64
Referencias.....	65

Lista de tablas

Tabla 1.....	36
---------------------	-----------

Lista de figuras

Figura 1.....	12
Figura 2.....	25
Figura 3	44
Figura 4.....	44
Figura 5.....	45
Figura 6.....	46
Figura 7	47
Figura 8.....	48
Figura 9.....	49
Figura 10.....	50
Figura 11.....	51
Figura 12.....	51
Figura 13.....	53
Figura 14.....	53

Siglas, acrónimos y abreviaturas

SIG	Sistemas de información geográfica
AHP	Proceso Analítico Jerárquico
FHI	Índice de Amenaza por Inundación
GDB	Geodatabase

Resumen

El presente proyecto tuvo como objetivo zonificar la amenaza por inundación en el municipio de San Jacinto del Cauca, Bolívar, una zona altamente vulnerable de la región de La Mojana. El problema central abordado fue la recurrente afectación social, ambiental y productiva causada por inundaciones, lo que evidencia la necesidad de contar con insumos técnicos que fortalezcan la gestión del riesgo y la planificación territorial.

La metodología se estructuró en tres fases: (1) recolección de información cartográfica y temática de fuentes oficiales; (2) procesamiento y homogenización de datos para generar mapas de geomorfología, cobertura de la tierra, precipitación, pendientes y distancia a la red de drenaje; y la (3) integración de variables mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) y análisis espacial en un entorno SIG para calcular el Índice de Amenaza por Inundación (FHI), posteriormente reclasificado en cinco categorías utilizando el método de quiebres naturales (Jenks).

Los resultados evidencian que casi el 50 % del municipio corresponde a áreas de amenaza alta y muy alta, localizadas en planicies aluviales y sectores agrícolas cercanos al río Cauca. En contraste, menos de un 20 % del territorio se clasificó con amenaza baja y muy baja, ubicándose en lomeríos y terrazas con mejores condiciones de drenaje.

La principal conclusión es que casi la mitad del municipio (48,60%) se encuentra en niveles de amenaza alta y muy alta. Esto implica que San Jacinto del Cauca es un territorio donde la inundación es una condición estructural y no solo coyuntural, concentrándose la mayor peligrosidad en las zonas colindantes al río Cauca y el sistema del Dique Caregato.

la zonificación obtenida constituye una herramienta útil para priorizar medidas de mitigación, orientar el ordenamiento territorial aportando a la reducción del riesgo de desastres en el municipio.

Palabras clave: zonificación de amenaza, inundaciones, SIG, gestión del riesgo.

Abstract

The aim of this project was to zone flood hazard in the municipality of San Jacinto del Cauca, Bolívar, an area of the Mojana region highly vulnerable to hydrometeorological events. The central problem addressed was the recurrent social, environmental, and productive impacts caused by floods, highlighting the need for technical inputs to strengthen risk management and land-use planning.

The methodology was structured in three phases: (1) collection of cartographic and thematic information from official sources; (2) data processing and standardization to generate maps of geomorphology, land cover, precipitation, slope, and distance to the drainage network; and (3) integration of variables through the Analytic Hierarchy Process (AHP) and spatial analysis in a GIS environment to calculate the Flood Hazard Index (FHI), later reclassified into five categories using the Natural Breaks (Jenks) method.

Results show that nearly 50% of the municipality corresponds to areas of high and very high hazard, mainly located in alluvial plains and agricultural areas near the Cauca River. In contrast, less than 20% of the territory was classified as low or very low hazard, concentrated in hills and terraces with better drainage conditions.

The main conclusion is that the hazard zoning obtained is a key tool to prioritize mitigation measures, guide land-use planning, and strengthen community resilience, contributing directly to disaster risk reduction in San Jacinto del Cauca.

Keywords: hazard zoning, floods, GIS, risk management.

Introducción

El municipio de San Jacinto del Cauca, ubicado en la región de La Mojana (departamento de Bolívar), se caracteriza por una amplia red de humedales, ciénagas y planicies aluviales que lo convierten en un territorio altamente susceptible a inundaciones. Estos eventos han ocasionado históricamente afectaciones significativas en la población, la infraestructura y los ecosistemas locales, acentuando las condiciones de vulnerabilidad social y económica. La recurrencia de inundaciones, sumada a procesos de transformación del territorio por actividades agrícolas y la variabilidad climática, exige el desarrollo de estudios técnicos que aporten a la gestión del riesgo y al ordenamiento territorial.

En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen una herramienta esencial para integrar y analizar múltiples variables ambientales y territoriales, permitiendo modelar y representar espacialmente las zonas de mayor amenaza. Mediante su aplicación es posible identificar las áreas más expuestas y establecer niveles de amenaza que sirvan como insumo para la toma de decisiones.

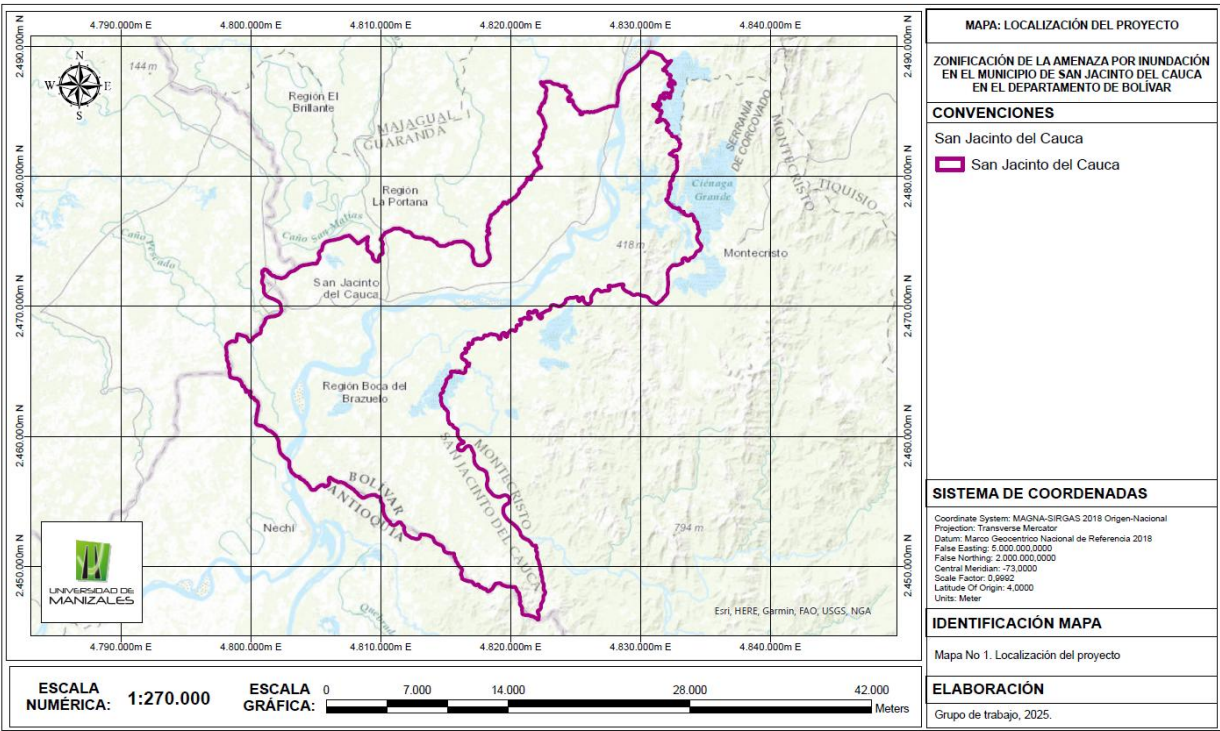
El presente proyecto tiene como objetivo general zonificar la amenaza por inundación en San Jacinto del Cauca, a través de la integración de variables como geomorfología, cobertura de la tierra, precipitación, pendientes y distancia a la red de drenaje. Para ello, se emplea el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) como método de ponderación y el cálculo del Índice de Amenaza por Inundación (FHI) en un entorno SIG. Los resultados se materializan en un mapa de amenaza clasificado en cinco categorías, que busca convertirse en un instrumento estratégico para la planificación territorial, la reducción del riesgo de desastres y el fortalecimiento de la resiliencia comunitaria.

1 Planteamiento del problema

1.1 Descripción del área problemática

La región de La Mojana, ubicada en el norte de Colombia, representa una de las zonas más singulares y estratégicas desde el punto de vista hídrico y ecológico. Esta extensa llanura aluvial se extiende por los departamentos de Sucre, Bolívar y Córdoba, y actúa como un sistema natural de regulación del agua, producto de la convergencia de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge (Figura 1).

Figura 1.
Ubicación del municipio de San Jacinto del Cauca.



Dicha confluencia da lugar a una compleja red de humedales, ciénagas y canales naturales que le han valido el reconocimiento como el “corazón hidráulico de Colombia” (PNUD, 2020). Dentro de esta región, el municipio de San Jacinto del Cauca, ubicado en el departamento de Bolívar, se encuentra en una zona particularmente baja y vulnerable, lo que incrementa su exposición a fenómenos hidrometeorológicos extremos como las inundaciones.

Las condiciones físicas y ambientales del territorio han definido desde siempre su comportamiento hidrológico. La topografía plana, los suelos altamente saturables y la existencia de una extensa red hídrica hacen de La Mojana un espacio naturalmente propenso a inundaciones periódicas (Montoya & Ramírez, 2018). Sin embargo, en las últimas décadas, esta vulnerabilidad natural se ha visto intensificada por la acción humana. La expansión de la frontera agrícola, la deforestación de áreas ribereñas, la sedimentación progresiva de los cauces fluviales y la ocupación de zonas de alto riesgo han incrementado la exposición y sensibilidad del territorio (IAvH, 2019; IDEAM, 2020). La falta de mantenimiento de los sistemas de drenaje y la intervención inadecuada en la dinámica natural de las aguas han alterado significativamente los patrones de escurrimiento y almacenamiento, reduciendo la capacidad natural de amortiguamiento de los humedales.

En este contexto, los eventos de inundación han manifestado un incremento progresivo en su frecuencia y magnitud, afectando especialmente al municipio de San Jacinto del Cauca, y de manera particular al área del Dique Caregato, una infraestructura clave que ha sido históricamente utilizada para contener las aguas del río Cauca. En los últimos años, las crecientes intensas, asociadas tanto a fenómenos climáticos extremos como a la falta de gestión integral del riesgo, han provocado desbordamientos que impactan directamente a las comunidades rurales de la zona (Montoya & Ramírez, 2018; PNUD, 2020). Estos eventos no solo representan pérdidas materiales, sino también una amenaza constante a la seguridad alimentaria y al bienestar de la población.

Como consecuencia directa de esta dinámica, los impactos en el territorio han sido devastadores. Miles de personas han perdido sus viviendas, cultivos y animales, afectando de forma directa su sustento económico y su calidad de vida. Las principales actividades económicas del municipio (Agricultura, pesca y ganadería) dependen directamente de los recursos naturales del territorio, los cuales han sido degradados por las constantes emergencias (DIMAR, 2021). En muchas zonas, las aguas permanecen estancadas durante largos periodos, generando problemas de salubridad, desplazamientos forzados, afectaciones en la infraestructura vial y limitaciones en el acceso a servicios básicos como educación y salud (CVS, 2021; UNGRD, 2015). Estas condiciones de precariedad se ven agravadas por los altos índices de pobreza de la población, lo cual limita su capacidad de recuperación y adaptación frente a los impactos climáticos.

A pesar de los múltiples esfuerzos institucionales para mitigar esta problemática, la situación sigue sin resolverse de forma estructural. Las acciones implementadas —como

canalizaciones, adecuaciones hidráulicas y proyectos de reubicación— han representado inversiones significativas de recursos económicos y técnicos, sin que hasta ahora se haya logrado una solución integral, sostenible y adaptada a la realidad biofísica y sociocultural de La Mojana. El enfoque reactivo y fragmentado de las intervenciones ha demostrado ser insuficiente ante una problemática que exige una mirada territorial, multiescalar y adaptativa (IDEAM, 2020; UNGRD, 2015).

En el municipio de San Jacinto del Cauca persiste un vacío significativo en la implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta para la gestión del riesgo de inundaciones. Aunque estas tecnologías permiten integrar información cartográfica de variables críticas —como la red de drenaje, la geomorfología, la precipitación y la cobertura de la tierra—, su aplicación en los procesos locales de planificación y toma de decisiones ha sido limitada. Diversos estudios señalan que en muchos municipios colombianos el uso de SIG se concentra en proyectos puntuales y no se consolida como un instrumento permanente de gestión, lo que restringe la capacidad de las autoridades para identificar zonas de alta susceptibilidad y priorizar intervenciones preventivas (Cardona et al., 2023). Esta brecha tecnológica y metodológica genera una dependencia de estudios externos y reduce la eficacia de los Planes de Ordenamiento Territorial, que carecen de un soporte técnico sólido basado en análisis espaciales actualizados, dificultando así la construcción de estrategias sostenibles de reducción del riesgo en la región.

Frente a esta situación, surge la necesidad de generar información geoespacial precisa y actualizada que permita caracterizar la amenaza, analizar la evolución de las dinámicas hídricas y orientar decisiones de planificación del territorio basadas en evidencia. En este sentido, el presente proyecto de investigación planteó un análisis de la amenaza por inundación en el municipio de San Jacinto del Cauca, mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). El propósito de zonificar la amenaza por inundación es identificar y delimitar las áreas en el municipio que presentan condiciones de susceptibilidad a este fenómeno, teniendo en cuenta factores como la topografía, la geomorfología, distancia a las redes de drenaje, la cobertura de la tierra y la dinámica climática. Esta caracterización permite comprender cuáles sectores del municipio tienen mayor probabilidad de ser afectados incrementos súbitos de caudal, desbordamientos o acumulación de agua en zonas de baja pendiente. En consecuencia, el presente estudio provee insumos de carácter cartográfico (mapas de amenaza), estadísticos (frecuencias de eventos) y metodológicos (basados

en el modelo FIGUSED-AHP). Estos productos están dirigidos a la Alcaldía Municipal de San Jacinto del Cauca y al Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres (CMGRD), con el fin de fortalecer la toma de decisiones técnica y la implementación de medidas de mitigación que respondan a las particularidades sociales, ambientales y climáticas del territorio.

1.2. Antecedentes

El municipio de San Jacinto del Cauca, departamento de Bolívar, ubicado en la región de La Mojana, se caracteriza por su extensa red de humedales y cuerpos de agua, escenario de repetidos eventos de inundación producto de factores naturales y antropogénicos. Estos fenómenos han puesto en evidencia la alta vulnerabilidad y exposición de las comunidades locales y los ecosistemas. Diversos estudios han abordado esta problemática desde distintas perspectivas, aportando conocimientos relevantes para la gestión del riesgo en la región.

Uno de los trabajos significativos es el de Mejía Ávila et al. (2023) quienes aplicaron un modelo espacio-temporal en el Complejo de Humedales de Ayapel, Córdoba, empleando imágenes multiescala y métricas de paisaje para analizar cambios en la vegetación y su relación con las inundaciones. Este estudio resaltó la utilidad de los SIG para identificar patrones de riesgo y generar información que sirva de base para la planificación ambiental. De manera complementaria, la Organización Panamericana de la Salud (2024) documentó los impactos de las inundaciones en La Mojana entre 2021 y 2023, tras el rompimiento de diques como el Caregato. Dicho informe enfatizó los efectos en la infraestructura y la salud pública, a la vez que recomendó fortalecer la gestión del riesgo mediante la integración de SIG y sistemas de alerta temprana.

Los antecedentes también evidencian el impacto de las intervenciones hidráulicas en la dinámica natural de La Mojana. Desde mediados del siglo XX, la construcción de diques y canales buscó mitigar las inundaciones, pero ha generado consecuencias no deseadas al aumentar la vulnerabilidad de los humedales y la frecuencia de eventos descontrolados. Caraballo & De La Ossa (2011) analizaron cómo estas obras, al alterar el flujo natural de los ríos, han limitado la capacidad de los ecosistemas para regular el agua, destacando la necesidad de restaurar los humedales y promover enfoques integrados de gestión.

Otro aspecto crítico es el cambio climático, Bertel Ricardo & Burgos Barba (2020) estudiaron la variabilidad climática y sus efectos en los sistemas productivos de La Mojana,

concluyendo que el aumento de temperaturas y la intensificación de eventos extremos, como inundaciones, agravan la inseguridad alimentaria y el desplazamiento poblacional. Esto subraya la necesidad de estrategias de adaptación que garanticen la sostenibilidad de los medios de vida en contextos vulnerables.

En cuanto a la gestión institucional, Urquijo-Merchán & Vargas-Gámez (2013) evaluaron la vulnerabilidad en contextos rurales de La Mojana y señalaron las limitaciones en infraestructura y capacidades institucionales para responder a emergencias. Los autores resaltan la ausencia de sistemas de alerta temprana y la baja incorporación de tecnologías como SIG, lo que amplifica los impactos de las inundaciones en las comunidades. En la misma línea, el Banco Mundial (2012) concluyó que las deficiencias en la planificación territorial y en la implementación de políticas de gestión del riesgo incrementan los problemas en áreas propensas a inundaciones, recomendando la adopción de un marco normativo más sólido que articule el ordenamiento del suelo con medidas de infraestructura adaptativa.

En conjunto, estos estudios coinciden en señalar la complejidad de la problemática de inundaciones en La Mojana, aunque difieren en sus enfoques: algunos privilegian el análisis espacial (Mejía Ávila et al., 2023) otros se centran en la salud pública (Organisation Panaméricaine de la Santé, 2024), la dinámica ecosistémica (Caraballo & De La Ossa, 2011), el cambio climático (Bertel Ricardo & Burgos Barba, 2020) o las capacidades institucionales (Banco Mundial, 2012; Urquijo-Merchán & Vargas-Gámez, 2013). Sin embargo, todos convergen en la necesidad de fortalecer la gestión del riesgo y reconocen vacíos importantes: la falta de integración de herramientas SIG en la planificación territorial, la ausencia de un enfoque integral que combine infraestructura y restauración ecológica, y la limitada capacidad institucional para anticipar y responder a eventos extremos. Estos vacíos justifican el desarrollo de investigaciones aplicadas en municipios como San Jacinto del Cauca, orientadas a generar insumos técnicos que fortalezcan la resiliencia comunitaria frente a la amenaza por inundaciones.

1.2. Formulación del problema

¿De qué manera la integración de variables biofísicas y antropogénicas, mediante técnicas de Evaluación Multicriterio en un entorno SIG, permite determinar con precisión la zonificación de la amenaza por inundación en el municipio de San Jacinto del Cauca?

2 Justificación

La investigación sobre la amenaza por inundación en el municipio de San Jacinto del Cauca, Bolívar, tiene como propósito generar un insumo técnico para la gestión del riesgo, a través de la caracterización y zonificación de las áreas susceptibles a este fenómeno. Este producto busca aportar información clave que permita a las autoridades locales y regionales orientar acciones de prevención, mitigación y planificación territorial en un municipio que presenta alta vulnerabilidad frente a eventos hidrometeorológicos. El estudio cobra especial relevancia por la posibilidad de integrar técnicas de análisis geoespacial en la identificación de zonas de amenaza, ofreciendo un soporte científico y práctico a la toma de decisiones en un contexto de alto impacto social, ambiental y económico.

La motivación principal de la investigación es contribuir a la resiliencia de comunidades constantemente afectadas por desastres, donde el conocimiento actualizado y preciso sobre las áreas de amenaza es fundamental para la implementación de medidas preventivas y de mitigación. Al emplear SIG para analizar las dinámicas de inundación, el proyecto busca ofrecer un modelo de zonificación cartográfica basado en el Índice de Amenaza por Inundación (FHI). Este instrumento proporciona una base técnica cuantitativa que permite optimizar la planificación territorial y fundamentar la priorización de recursos en infraestructura de mitigación, basándose en la identificación espacial de niveles de riesgo críticos y la reducción de la incertidumbre en el proceso de toma de decisiones.

Los productos generados, como los mapas de zonificación de amenaza, pueden ser usados para delimitar áreas estables y no estables en la expansión urbana, orientar la ubicación de equipamientos sociales e infraestructura crítica, y definir corredores ambientales que reduzcan la presión sobre las zonas de inundación. Asimismo, estos insumos cartográficos servirán como base técnica para la formulación y ajuste de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y para la focalización de programas de reubicación de comunidades expuestas, priorizando intervenciones donde la vulnerabilidad social y física sea más alta (Kazakis et al., 2015a; Valle Junior et al., 2014). De esta manera, los SIG no solo aportan al diagnóstico del riesgo, sino que se convierten en instrumentos estratégicos para diseñar políticas públicas y proyectos de inversión con un enfoque preventivo y de sostenibilidad (United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), 2015a).

Ante este panorama, se hace necesaria la formulación de estrategias técnicas para el análisis y gestión de la amenaza por inundaciones. En este contexto, el presente proyecto de investigación se planteó como una respuesta orientada a caracterizar la amenaza, desde una perspectiva geoespacial en el municipio de San Jacinto del Cauca. Para ello, se hizo uso de Sistemas de Información Geográfica como herramienta central para integrar datos históricos y recientes sobre geomorfología, eventos de precipitación, cobertura de la tierra, distancia a red de drenajes y pendientes.

A través del análisis espacial de las zonas afectadas, se buscó generar insumos cartográficos y técnicos que contribuyan a la toma de decisiones en el ámbito de la gestión del riesgo de desastres y la planificación territorial adaptativa. Asimismo, el estudio pretende complementar el conocimiento sobre el estado de las inundaciones en esta zona y ofrecer herramientas útiles para la formulación de políticas públicas más eficaces y sensibles al contexto local (Montoya & Ramírez, 2018; UNGRD, 2015). En última instancia, con el proyecto se buscó aportar al fortalecimiento de la resiliencia municipal, apoyando la capacidad de adaptación de las comunidades frente a la variabilidad climática y el cambio climático, a través del conocimiento técnico validado (IAvH, 2019; PNUD, 2020)

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Zonificar la amenaza por inundación en el municipio de San Jacinto del Cauca del departamento de Bolívar.

3.2 Objetivos específicos

Sistematizar la información cartográfica y temática necesaria para el análisis de la amenaza por inundación, a partir de fuentes oficiales y confiables.

Generar los mapas temáticos de geomorfología, cobertura de la tierra, precipitación, distancia a la red de drenaje y pendientes, mediante herramientas de análisis espacial en ArcGIS Pro.

Integrar los mapas temáticos mediante técnicas de superposición y ponderación multicriterio, con el fin de elaborar el mapa de zonificación de la amenaza por inundación en San Jacinto del Cauca.

4 Marco teórico

El análisis de amenazas por inundación debe abordarse desde un marco conceptual amplio que reconozca la interacción entre los factores biofísicos y sociales. En este sentido, el enfoque de Sistemas Socioecológicos (SES, por sus siglas en inglés) ofrece una perspectiva integral, al considerar que los desastres no son únicamente el resultado de procesos naturales, sino también de las dinámicas sociales que incrementan la exposición y la vulnerabilidad. Según (Berkes & Folke, 1998), los SES se caracterizan por la retroalimentación entre sistemas humanos y naturales, lo cual implica que la gestión del riesgo debe integrar tanto la dinámica hidrológica y geomorfológica como las formas de ocupación del territorio y el uso del suelo.

Asimismo, el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015–2030, adoptado por Naciones Unidas, constituye un referente internacional en la formulación de políticas y estrategias orientadas a reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia de las comunidades. Este marco enfatiza la necesidad de contar con información geoespacial precisa para identificar y mapear amenazas, además de fomentar el uso de herramientas como los Sistemas de Información Geográfica para fortalecer la toma de decisiones en planificación territorial (United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR), 2015b).

La aplicación práctica de la zonificación de amenazas ha demostrado su utilidad en distintos contextos. Por ejemplo, en el Valle del Po (Italia), la elaboración de mapas de amenaza por inundación permitió rediseñar zonas agrícolas y priorizar obras de infraestructura hidráulica, reduciendo significativamente la exposición de la población (Alfieri et al., 2015). En Colombia, se han hecho estudios de zonificación de amenaza en La Mojana y estos debieron ser incorporados en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) de acuerdo con la normativa colombiana que así lo exige, con el uso de estos insumos, los municipios han podido reubicar familias y proteger áreas importantes. Ante estas posibilidades, los mapas de amenaza constituyen un insumo técnico y un instrumento clave para planificar el territorio con criterios de sostenibilidad y resiliencia.

Finalmente, la integración del enfoque socioecológico, el Marco de Sendai y las experiencias prácticas de zonificación en diferentes territorios aporta un sustento teórico y empírico sólido. Este enfoque permite no solo una caracterización más precisa de la amenaza, sino también una vinculación directa con estrategias globales y regionales de reducción del riesgo, contribuyendo a la construcción de territorios más seguros y resilientes.

4.1 Herramientas y metodología

La gestión del riesgo de inundaciones ha experimentado una transición paradigmática en la última década, alejándose de los enfoques puramente reactivos para centrarse en la modelación geoespacial predictiva. Este cambio ha sido impulsado por la capacidad de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para integrar múltiples variables físicas y climáticas en un solo entorno de análisis. Como señalan Nair et al. (2025), la identificación de factores condicionantes como la elevación, el uso del suelo y la densidad de drenaje mediante SIG es hoy el pilar fundamental para mitigar desastres en cuencas tropicales.

En este contexto, el trabajo de Kazakis et al. (2015) en Grecia se ha consolidado como una base metodológica de referencia internacional mediante el Índice de Amenaza por Inundación (FHI). Este modelo analiza siete parámetros críticos: acumulación de flujo, distancia a la red hídrica, elevación, pendiente, uso del suelo, geología e intensidad de la precipitación. La fortaleza de este índice radica en su diseño para escalas regionales, donde el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) permite ponderar el peso de cada variable según su relevancia física. Este enfoque es altamente transferible a llanuras de inundación, ya que prioriza la morfología del terreno sobre la simple proximidad al cauce.

La literatura reciente destaca que la precisión de estos mapas depende críticamente de la resolución de los datos de entrada. Según Cea & Costabile (2022), los desafíos actuales en la cartografía de amenazas residen en la representación de micro-relieves en zonas planas, donde incluso pequeñas variaciones topográficas alteran la dirección del flujo. Esta necesidad de precisión técnica ha llevado a la integración de modelos de Evaluación Multicriterio (EMC) con sensores remotos, permitiendo que la zonificación sea un reflejo fiel de la dinámica hidrológica del territorio y no solo una representación estadística.

En Colombia, la aplicación de estos métodos ha ganado terreno en la planificación urbana y rural. Sevillano Rodríguez (2020) demostró que, al aplicar AHP en ciudades con dinámicas hídricas complejas como Cali, la acumulación de flujo y la profundidad de inundación son las variables con mayor peso específico. Sus hallazgos subrayan que la zonificación no debe ser un ejercicio estático, sino un proceso de geoprocésamiento avanzado que considere la transformación antrópica del suelo como un factor que acelera la escorrentía superficial.

Por otro lado, la investigación global ha comenzado a explorar la sinergia entre el análisis multicriterio y el aprendizaje automático (Machine Learning). Al-Aizari et al. (2022) explican que, si bien el AHP es excelente por su lógica estructurada y fundamentada en el conocimiento experto, su combinación con algoritmos permite validar la consistencia de los mapas de susceptibilidad. Para una llanura de inundación como la de San Jacinto del Cauca, entender esta relación entre los pesos asignados y la realidad física es vital para garantizar la transferibilidad de los resultados a los planes de ordenamiento territorial.

La dinámica de las inundaciones en llanuras aluviales presenta retos únicos debido a la baja pendiente del terreno. Rahman et al. (2023) argumentan que en estos entornos, la "distancia a la red de drenaje" debe analizarse junto con la "capacidad de infiltración" de la geología local. No es suficiente saber dónde está el agua, sino entender cuánto tiempo permanecerá en el terreno. Esta perspectiva técnica complementa el modelo de Kazakis al introducir una capa de análisis sobre la persistencia del evento, algo fundamental para la región de La Mojana.

A nivel regional, estudios en la cuenca del río Magdalena-Cauca han evidenciado una alta exposición debido a la ocupación de zonas de ronda hídrica. La UNGRD (2022) reporta que los eventos hidrometeorológicos han aumentado su frecuencia, lo que invalida las zonificaciones basadas únicamente en datos históricos. Por ello, la adopción de metodologías internacionales como el FHI permite que municipios como San Jacinto del Cauca cuenten con herramientas técnicas que superen la descripción social y se fundamenten en el rigor de la geomática aplicada.

La eficacia de los SIG en este ámbito también se refleja en su capacidad de visualización y toma de decisiones. Sun et al. (2024) resaltan que la zonificación de amenazas es la fase más importante de la gestión del riesgo, ya que de ella dependen los sistemas de alerta temprana y la infraestructura de mitigación. Al utilizar herramientas como ArcGIS o QGIS para procesar modelos digitales de elevación (MDE), se logra una precisión espacial que los métodos tradicionales de campo no podrían alcanzar por sí solos debido a la extensión y complejidad de las áreas inundables.

En cuanto a la transferencia de métodos, investigaciones en cuencas de Asia y África han validado que los parámetros propuestos por Kazakis son universales, siempre que se ajusten los pesos mediante AHP. Sahraei et al. (2023) señalan que el uso del índice Kappa y el Área Bajo la Curva (AUC) son estándares internacionales obligatorios para validar cualquier mapa de amenaza.

Una zonificación sin validación técnica carece de respaldo científico, lo que refuerza la necesidad de aplicar procesos de geoprocésamiento estandarizados y auditables.

Finalmente, esta investigación se inserta en la tendencia global de usar la ciencia de la información geográfica para el desarrollo sostenible. La integración de variables biofísicas mediante un motor de análisis espacial permite que la zonificación de San Jacinto del Cauca sea un modelo técnico-práctico. Al seguir los estándares de Wang et al. (2011) y las actualizaciones metodológicas de los últimos cinco años, el presente trabajo buscó proporcionar un insumo cartográfico con rigor científico que facilite la resiliencia del territorio frente a las dinámicas hídricas extremas.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) representan una herramienta metodológica fundamental para el análisis de amenazas por inundación en el municipio de San Jacinto del Cauca, Bolívar, ya que permiten integrar variables físicas y ambientales en un marco espacial común. Su aplicación posibilita transformar datos geográficos complejos —como geomorfología, cobertura de la tierra, precipitación, pendientes y distancia a la red de drenaje— en información estratégica para la gestión del riesgo y la planificación territorial (Kazakis et al., 2015a).

El análisis espacial de estas variables constituye un componente esencial de la investigación, ya que permite documentar cómo las condiciones geomorfológicas y climáticas influyen en la susceptibilidad del territorio. La incorporación de información proveniente de fuentes oficiales, como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC), proporciona la base para construir cartografía temática de alta precisión y confiabilidad (Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2020; Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022; INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC), 2011).

La metodología aplicada comprende varias etapas: recopilación y homogenización de información cartográfica, transformación de datos vectoriales a formato raster, reclasificación y normalización de las variables, ponderación mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) e integración a través de superposición lineal ponderada en ArcGIS Pro. Este procedimiento da como resultado el cálculo del Índice de Amenaza por Inundación (FHI), el cual es posteriormente reclasificado en cinco niveles de amenaza —muy baja, baja, moderada, alta y muy alta— mediante el método estadístico de quiebres naturales (Jenks & Caspall, 1971a).

La precisión y calidad de los datos constituyen un aspecto crítico del estudio, razón por la cual se incorporan protocolos de validación que incluyen la verificación espacial con registros históricos de inundaciones y el uso de múltiples fuentes de información. Esto garantiza la confiabilidad de los resultados y reduce los márgenes de error en la representación cartográfica (Ayalew & Yamagishi, 2005).

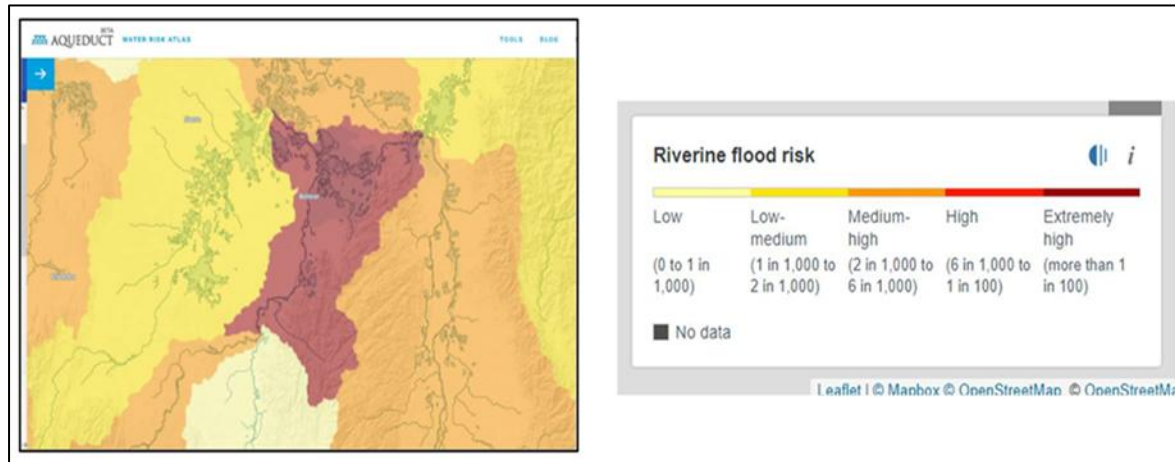
En este sentido, el desarrollo metodológico trasciende la simple caracterización descriptiva y se orienta a la generación de conocimiento aplicado que contribuya al fortalecimiento de la resiliencia en las comunidades vulnerables de San Jacinto del Cauca. El producto final no solo constituye un diagnóstico técnico, sino también una herramienta de gestión para la toma de decisiones en materia de ordenamiento territorial y reducción del riesgo de desastres asociados a inundaciones (Valle Junior et al., 2014).

4.2 Gestión de inundaciones

El municipio de San Jacinto del Cauca, se encuentra ubicado en la región de La Mojana, en donde se presentan recurrentes inundaciones que se ven favorecidas por una combinación de factores naturales y antropogénicos. La zona, caracterizada por ser una extensa planicie de inundación con una topografía de bajas pendientes, se encuentra en una cuenca hídrica de gran importancia, donde confluyen los ríos Cauca, Magdalena y San Jorge (Departamento Nacional de Planeación (DNP) et al., 2008). Esta configuración geográfica la hace particularmente vulnerable a inundaciones (Figura 2), especialmente en las épocas de lluvias intensas, que ocurren de octubre a diciembre y de abril a junio. El clima cálido y húmedo de la región, con precipitaciones que varían entre 1,000 y 4,138 mm anuales, contribuye aún más a la variabilidad del régimen de inundaciones (Urquijo-Merchán & Vargas-Gámez, 2013).

Figura 2.

Riesgo de inundación fluvial en la región de La Mojana.



Fuente: (Instituto de Recursos Mundiales, 2025)

El cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos han intensificado la ocurrencia de inundaciones, que anteriormente ya eran comunes debido a las características físicas de la región. Sin embargo, las actividades humanas han exacerbado este riesgo, particularmente la transformación del uso del suelo. La deforestación, impulsada por la expansión de la frontera agropecuaria, y la urbanización han alterado los ecosistemas naturales de humedales y ciénagas que tradicionalmente han funcionado como amortiguadores frente a las inundaciones. La conversión de estas áreas en zonas de cultivo y pastoreo ha reducido la capacidad de regulación hídrica del territorio, incrementando la escorrentía y los caudales de los ríos, lo que, a su vez, favorece la erosión y aumenta la frecuencia e intensidad de las inundaciones (Avila León, 2022).

Además de los factores naturales y climáticos, existen desafíos relacionados con la gobernanza territorial y la gestión del riesgo de inundaciones. La falta de una planificación adecuada y la debilidad institucional en el manejo de los recursos hídricos y el ordenamiento territorial han dificultado la implementación de estrategias efectivas para mitigar las inundaciones. La falta de coordinación entre las distintas entidades gubernamentales, sumada a una débil capacidad técnica y financiera, ha limitado la ejecución de medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático (Angulo, 2014).

En este contexto, la integración de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT) es esencial para la reducción de riesgos, aunque la implementación efectiva de estos sistemas a nivel municipal

sigue siendo incierta. La coordinación de esfuerzos y la adopción de enfoques sectoriales integrados, que consideren las interacciones socio-ecológicas, son cruciales para lograr un manejo adecuado de los riesgos y reducir la vulnerabilidad de la población. De no abordarse de manera integral, las inundaciones seguirán siendo un desafío creciente para la región, exacerbado por las dinámicas de urbanización, el crecimiento demográfico y los efectos del cambio climático.

Este escenario refleja una problemática común en muchas regiones de América Latina y el mundo, donde la débil gestión territorial y la falta de visión sostenible frente al cambio climático se traducen en una mayor vulnerabilidad de los ecosistemas y las poblaciones humanas. El municipio de San Jacinto del Cauca, al igual que otras zonas del país, enfrenta grandes retos en términos de resiliencia y adaptación, pero también tiene la oportunidad de avanzar hacia un ordenamiento territorial más justo y sostenible si se logran mejorar las capacidades técnicas y la cooperación entre los actores clave en la gestión del riesgo y el cambio climático.

4.3 Contexto regional

San Jacinto del Cauca es un municipio ubicado en la región de La Mojana, en la Costa Caribe colombiana, y forma parte del departamento de Bolívar. Geográficamente, San Jacinto del Cauca se encuentra en una región de planicie de inundación, lo que lo hace particularmente vulnerable a los efectos de las inundaciones. La topografía de la zona presenta pendientes muy bajas, lo que, combinado con la alta variabilidad climática, la convierte en una región propensa a eventos hidrológicos extremos, especialmente en los meses de mayor precipitación (de octubre a diciembre y de abril a junio) (Montoya & Ramírez, 2018).

El municipio de San Jacinto del Cauca tiene una economía predominantemente agrícola, donde los cultivos de arroz, maíz, caña de azúcar y palma de aceite son las principales actividades productivas. Además, la ganadería extensiva es una actividad importante para la región. Sin embargo, estas prácticas agrícolas y ganaderas se ven afectadas recurrentemente por las inundaciones, lo que genera un impacto negativo en la producción y la estabilidad económica de las comunidades locales (Martínez-Reina, 2013).

Las inundaciones tienen un impacto significativo en las comunidades de San Jacinto del Cauca. Debido a su ubicación en una zona de planicie de inundación, las inundaciones recurrentes afectan tanto la infraestructura como los medios de vida de las personas. Durante los períodos de

lluvias intensas, el desbordamiento de los ríos Cauca, Magdalena y San Jorge genera inundaciones que afectan los cultivos agrícolas, destruyen viviendas y limitan el acceso a servicios básicos como la salud y la educación (Avila León, 2022).

La pérdida de tierras agrícolas productivas y la destrucción de infraestructuras esenciales (vías de comunicación, puentes, viviendas) genera un ciclo de vulnerabilidad que afecta especialmente a los grupos más pobres de la región. Las familias más afectadas son aquellas que dependen directamente de la agricultura y la ganadería para su sustento. Además, la pérdida de recursos hídricos de calidad y la contaminación de fuentes de agua durante las inundaciones agravan las condiciones de salud pública (Torres Torres & Torres Roza, 2016).

El Dique Caregato es una estructura hidráulica crucial para la gestión de las inundaciones en la región de La Mojana. Ubicado en la parte baja de la cuenca, este dique tiene como función principal regular los flujos de agua de los ríos Cauca y Magdalena, controlando las aguas que ingresan a la región y mitigando los efectos de las inundaciones. Actúa como una barrera de protección que permite reducir el impacto de los desbordamientos y desvíos de aguas que afectan a las comunidades cercanas (Posada García & Duque Marín, 2006).

Sin embargo, el Dique Caregato ha enfrentado desafíos en su mantenimiento y en la efectividad de su operación. La falta de inversiones en su rehabilitación y las presiones derivadas del cambio climático, como el aumento de las precipitaciones extremas, han dificultado su capacidad para contener las inundaciones de manera eficiente. Además, el uso intensivo del suelo en las áreas circundantes y la pérdida de humedales naturales han reducido la efectividad del dique como sistema de regulación hídrica, lo que ha incrementado la vulnerabilidad de las comunidades locales a los eventos extremos.

4.4 Conexiones clave

El análisis mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) juega un papel fundamental en la zonificación de la amenaza por inundación, ya que permite integrar y visualizar de manera conjunta diferentes tipos de información espacial relacionada con el territorio. En este contexto, los SIG facilitan la recopilación, procesamiento y análisis de variables como la topografía, la red de drenaje, la cobertura de la tierra, la precipitación y la geomorfología, las cuales son determinantes para caracterizar la susceptibilidad del terreno frente a eventos de inundación

(Kazakis et al., 2015a). A través de la superposición y el análisis espacial de estas capas temáticas, es posible identificar las zonas con mayor predisposición a verse afectadas, diferenciando niveles de amenaza que van desde muy baja hasta muy alta (Ayalew & Yamagishi, 2005).

El uso de los SIG en la zonificación de la amenaza permite transformar datos geográficos complejos en mapas temáticos que sirven como herramientas clave para la planificación territorial y la gestión del riesgo. Estos mapas no solo muestran las áreas potencialmente inundables, sino que también constituyen un insumo estratégico para la priorización de intervenciones preventivas y correctivas, orientando la toma de decisiones en materia de ordenamiento territorial y reducción de la vulnerabilidad (Valle Junior et al., 2014).

Las variables asociadas a la dinámica de las inundaciones, como la intensidad de la precipitación, la proximidad a los ríos, la pendiente del terreno y los cambios en la cobertura de la tierra, desempeñan un papel central en la delimitación de los niveles de amenaza. Al integrarlas en un entorno SIG, se logra identificar de manera objetiva qué sectores presentan mayor susceptibilidad, lo que permite orientar de forma técnica la zonificación del territorio (Shrestha et al., 2025).

En este sentido, las zonas bajas y cercanas a la red hídrica, donde las condiciones geomorfológicas favorecen la acumulación de agua, se clasifican como áreas de alta o muy alta amenaza. Por su parte, los sectores con pendientes pronunciadas o mayor altitud tienden a presentar niveles bajos de amenaza. Asimismo, los cambios recientes en el uso del suelo, asociados a procesos de urbanización o expansión agrícola, requieren un monitoreo constante, ya que incrementan la susceptibilidad a inundaciones y deben ser considerados en la definición de políticas de ordenamiento territorial (Oikonomidis et al., 2015).

5 Metodología

5.1 Enfoque metodológico

El presente proyecto se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo de tipo proceso, ya que la investigación sigue una secuencia ordenada y sistemática para alcanzar los objetivos planteados. Este tipo de enfoque parte de la definición del problema, continúa con la recopilación de información objetiva, el procesamiento de datos mediante herramientas estadísticas y geoespaciales, y culmina en la obtención de resultados verificables y replicables.

5.2 Tipo de estudio

El proyecto corresponde a un estudio descriptivo, ya que su propósito fue caracterizar el fenómeno de la amenaza por inundación en el municipio de San Jacinto del Cauca, identificando sus componentes y representándolos espacialmente. No se buscó probar hipótesis complejas ni establecer relaciones de causalidad, sino definir y clasificar variables (pendiente, elevación, cobertura de la tierra, geomorfología, drenajes, etc.) para delimitar áreas con diferentes niveles de amenaza.

La zonificación se centró en medir y representar objetivamente los atributos del territorio que influyen en la ocurrencia de inundaciones, con el fin de generar un producto cartográfico que sirva de insumo para la gestión del riesgo.

Por ello, el proyecto se clasificó como una investigación de alcance descriptivo, enmarcada en el enfoque cuantitativo, pues mide variables ambientales y territoriales, las organiza en categorías de análisis y presenta resultados en forma de mapas temáticos y zonificaciones útiles para la planificación territorial.

5.3 Procedimiento

5.3.1 Fase 1. Recolección y sistematización de la información

De acuerdo con el objetivo específico 1, en esta fase se llevó a cabo la recopilación, organización y estandarización de la información cartográfica y temática necesaria para el análisis de la amenaza por inundación. La sistematización consistió en la consolidación de todos los insumos en una geodatabase (GDB) en ArcGIS Pro, estructurada mediante feature datasets y feature classes organizadas por temática, lo cual permitió garantizar la trazabilidad, integridad y consistencia espacial de los datos.

Inicialmente, se realizó una revisión de fuentes oficiales y confiables, priorizando información proveniente del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y repositorios internacionales reconocidos.

Posteriormente, los insumos cartográficos fueron descargados, verificados, reproyectados al sistema MAGNA-SIRGAS, homogenizados en escala y formato, y almacenados en la geodatabase.

Este proceso permitió consolidar una base de datos espacial organizada, estandarizada y apta para los análisis posteriores, fortaleciendo la coherencia entre los objetivos planteados y los procedimientos desarrollados.

La información de cobertura de la tierra se obtuvo del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022, a través del geovisor institucional, donde se encuentra disponible la cartografía oficial de coberturas a escala 1:100.000. El procedimiento consistió en acceder al portal web, seleccionar la opción de descargas por límites administrativos y exportar el archivo en formato shapefile correspondiente al municipio de San Jacinto del Cauca.

En cuanto a la precipitación, igualmente se consultó la información en el IDEAM, específicamente en su sección de datos hidrometeorológicos. Para este insumo se descargaron registros históricos de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio y, en caso necesario, se complementó con información interpolada disponible en coberturas ráster publicadas por la entidad.

El mapa de pendientes se generó a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE), cuya fuente fue el satélite ALOS PALSAR con resolución de 12,5 m. El procedimiento consistió en descargar el insumo desde plataformas internacionales como Alaska Satellite Facility (ASF) y repositorios autorizados, procesarlo en un software SIG (ArcGIS Pro) y derivar el mapa de pendientes a partir de la superficie de elevación.

De igual forma, las elevaciones provienen del mismo insumo satelital ALOS PALSAR 12,5 m, pero en este caso se utilizó directamente el MDE como producto base. Este archivo raster se descargó en formato geotiff y se reproyectó al sistema oficial de coordenadas MAGNA-SIRGAS, asegurando su compatibilidad con los demás insumos cartográficos.

Para el mapa de geomorfología, se recurrió a la información oficial del Servicio Geológico Colombiano (SGC). De esta fuente se obtuvo la cartografía geomorfológica disponible, la cual fue recortada a los límites del municipio y ajustada a la escala de trabajo.

Finalmente, el mapa de ubicación se elaboró a partir de las planchas cartográficas oficiales del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) a escala 1:100.000, que contienen la delimitación administrativa del municipio y los elementos básicos de referencia. A partir de estas planchas se identificó el centro poblado principal, la cabecera municipal de San Jacinto del Cauca, complementando la información con bases oficiales del SGC y del DANE, en las que se encuentran registrados los centros poblados y veredas reconocidos en Colombia.

5.3.2 Fase 2. Procesamiento de datos SIG

5.3.2.1 Cobertura de la tierra. El producto de Cobertura de la Tierra 100:000, periodo 2022, descargada desde el geovisor IDEAMV1 para el municipio de San Jacinto del Cauca, corresponde a una representación cartográfica en formato shapefile que muestra la distribución espacial de los distintos tipos de coberturas presentes en el territorio. En esta capa se identificaron categorías como bosques, cultivos, pastos, cuerpos de agua y áreas urbanas, lo que permite comprender cómo está ocupado el suelo y cuáles son las dinámicas naturales y antrópicas que inciden en el área de estudio.

La capa de cobertura se construyó a partir de la Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000, desarrollada por el IDEAM. Esta metodología tiene como propósito generar un inventario homogéneo de la cubierta biofísica del territorio, a través de la

interpretación visual de imágenes satelitales asistida por computador y complementada con información de campo.

5.3.2.2 Precipitación. Para la elaboración del producto Precipitación acumulada anual es necesario iniciar con la definición del objetivo, el periodo de análisis y el área de estudio. En este caso, la variable corresponde a la precipitación anual expresada en milímetros, el periodo recomendado es de 1990 a 2020 y el área de análisis corresponde al municipio de San Jacinto del Cauca. Estos criterios permiten orientar tanto la búsqueda de información como la escala cartográfica del producto final.

El segundo paso consiste en la consulta y descarga de datos hidrometeorológicos. Para ello se debe acceder a la sección de “consulta y descarga de datos hidrometeorológicos” del IDEAM, filtrar por el área de interés y seleccionar únicamente las estaciones que cuenten con datos de precipitación acumulada anual dentro del periodo de estudio. Una vez identificadas las estaciones, se procede a exportar la información en formato tabular (CSV o Excel), asegurando que se incluyan las coordenadas de ubicación, el nombre de la estación y la serie de datos disponible. En este punto es conveniente organizar una tabla resumen con los nombres y coordenadas de las estaciones, la cual servirá como insumo para el procesamiento en SIG.

La interpolación espacial es el paso siguiente y consiste en transformar los datos puntuales en una superficie continua de precipitación. Para este caso se recomienda utilizar el método IDW (Inverse Distance Weighting), disponible en ArcGIS Pro con el mismo nombre. Este método estima los valores de precipitación en las zonas sin estaciones a partir de la influencia de las estaciones más cercanas.

5.3.2.3 Pendientes. El producto cartográfico de pendiente se generó a partir de los datos de elevación satelital ALOS PALSAR con resolución espacial de 12.5 m, insumo que permitió obtener un modelo digital de elevación (MDE) del área de estudio. Con esta base se procedió al cálculo de la pendiente utilizando las herramientas de análisis espacial del software ArcGIS Pro, mediante la derivación de la superficie de pendientes expresada en porcentaje.

Este producto debe generarse a partir de un modelo digital de elevación (MDE) de buena resolución espacial, que permita capturar con suficiente detalle las variaciones topográficas del área de estudio. En el caso de trabajos a escala municipal, resoluciones de 12,5 m como las que

ofrece ALOS PALSAR, o superiores, resultan adecuadas para identificar las diferencias morfológicas del terreno que inciden en la ocurrencia de procesos de inundación y movimientos en masa.

Una vez calculada la pendiente, la información debe ser clasificada en rangos porcentuales que faciliten su interpretación. Estos rangos deben asociarse a categorías morfológicas (ejemplo: plano, ligeramente inclinado, moderadamente inclinado, escarpado, etc.) y a los procesos característicos que suelen ocurrir en cada clase (erosión, solifluxión, desprendimiento de rocas, acumulación de agua, entre otros). Este paso es fundamental porque transforma un dato puramente geométrico en información útil para la gestión del riesgo.

La salida inicial se clasificó de acuerdo con los rangos de pendiente establecidos en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), en correspondencia con los intervalos presentados en la tabla de referencia. Estos rangos comprenden desde valores de 0 – 5% (superficies ligeramente inclinada) hasta >50,01% (superficies moderadamente escarpada), lo que permitió diferenciar con detalle las condiciones morfológicas del terreno. Cada categoría de pendiente se asoció a una descripción morfológica y a los procesos característicos que la afectan, tales como erosión hídrica, solifluxión, movimientos en masa, desprendimiento de rocas y caídas por efecto de tectonismo y bioclastia.

5.3.2.4 Distancia a red de drenajes. El producto de red de drenaje consistió en la recolección de la información base. Para ello, se recurre a la cartografía oficial suministrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), entidad responsable de generar y mantener actualizada la información geográfica de referencia en Colombia. Dentro de esta cartografía se incluyen las capas de hidrografía, que contienen la representación vectorial de ríos, quebradas y demás cuerpos de agua superficiales a nivel nacional. Estas coberturas pueden consultarse y descargarse a través del Geoportal del IGAC o mediante los servicios interoperables que ofrece el Instituto.

5.3.2.5 Geomorfología. El producto Geomorfología, obtenida a partir de la cartografía del Servicio Geológico Colombiano (SGC), corresponde a una representación espacial de las formas del relieve y de los procesos que las originan. Esta información permitió identificar unidades geomorfológicas tales como terrazas fluviales, planicies de inundación, llanuras aluviales, colinas,

montañas y depresiones, entre otras. Cada una de estas unidades reflejó tanto la dinámica geológica como la acción de procesos superficiales (erosión, sedimentación, transporte de materiales), lo cual resultó clave para comprender la configuración física del territorio.

La metodología propuesta por el SGC, desarrollada por Carvajal Perico (2012), se basa en la identificación, delimitación y categorización de unidades geomorfológicas a partir de la interpretación de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y trabajos de campo. El proceso combina criterios morfográficos (forma), morfométricos (dimensiones y pendientes) y morfogenéticos (origen y procesos de formación), lo que permitió una clasificación completa del relieve. Esta estandarización también incluye la definición de símbolos y convenciones cartográficas, lo que facilita la lectura e interpretación de los mapas geomorfológicos a nivel nacional.

5.3.3 Fase 3. Elaboración del mapa de zonificación de amenaza

La metodología FIGUSED se basa en la integración de parámetros hidrogeológicos, morfológicos y socioeconómicos para la identificación de zonas con peligro de inundación. En este enfoque, cada parámetro es ponderado según su importancia relativa, de manera que su peso define la influencia en el resultado final. Los siete parámetros empleados son: acumulación de flujo (F), intensidad de precipitación (I), geología (G), uso del suelo (U), pendiente (S), elevación (E) y distancia a la red de drenaje (D), de cuyos acrónimos deriva el nombre de la metodología (Kazakis et al., 2015a).

Para asignar los pesos de cada criterio se utilizó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), desarrollado por Saaty (1990a, 1990b). Este proceso es una técnica estructurada diseñada para abordar problemas complejos en los que intervienen múltiples criterios interrelacionados. Su objetivo principal es asignar ponderaciones a cada criterio, de manera que se refleje su importancia relativa dentro del análisis Saaty (1990a, 1990b).

El procedimiento comienza con la jerarquización de los criterios, es decir, organizarlos de forma ordenada según su nivel de influencia en el problema estudiado. Una vez definida esta estructura, se construye una matriz de comparación por pares, en la cual cada criterio se compara directamente con los demás.

Por otro lado, el Índice de Amenaza por Inundación (FHI, por sus siglas en inglés) es una medida sintética que permite evaluar el nivel de susceptibilidad de un territorio frente a eventos de

inundación. Se construye a partir de la integración de diferentes variables condicionantes —como pendientes, elevaciones, cobertura de la tierra, precipitación, geomorfología o distancia a los cauces— que se reclasifican en una misma escala y se combinan mediante ponderaciones obtenidas a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). De esta manera, cada celda del área de estudio recibe un valor numérico que refleja el grado de amenaza en función de las condiciones locales y de la importancia relativa de cada criterio. La fórmula general para calcular el índice de amenaza por inundación (FHI) es la siguiente:

$$FHI = \sum_{i=1}^n r_i * w_i \quad (1)$$

Fuente: Saaty (1990a, 1990b).

Donde r_i es la puntuación del parámetro en cada píxel y w_i es su peso relativo.

Para la zonificación de la amenaza por inundación en el municipio de San Jacinto del Cauca, departamento de Bolívar, se tomó como base la metodología FIGUSED (Kazakis et al., 2015a), sin embargo, la metodología fue adaptada a las condiciones y a la información disponible para la región, considerando cinco variables principales: cobertura de la tierra, precipitación, pendientes, distancia a la red de drenaje, y geomorfología. Estas variables se seleccionaron en función de su relevancia en los procesos de inundación y de la disponibilidad de datos en los portales y entidades nacionales como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC), así como en fuentes internacionales y otras bases de datos públicas.

Entonces mediante el método del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) se asignaron ponderaciones relativas a los factores considerados —geomorfología, cobertura de la tierra, precipitación, pendientes y distancia a la red de drenaje—, de acuerdo con su importancia en la generación y propagación de inundaciones. La aplicación del AHP permitió estructurar una comparación por pares entre los criterios, generando una asignación de pesos con enfoque sistemático. La siguiente tabla muestra los pesos dados a cada factor considerado.

Tabla 1*Pesos asignados a mapas temáticos.*

Mapa temático	Descripción técnica	Peso asignado	Categoría Mapas Temáticos
Cobertura y uso del suelo	Incluye zonas naturalmente propensas a inundación como ríos, lagunas, pantanos y humedales, etc; su clasificación refleja condiciones reales de acumulación hídrica.	0.35	1, Territorio Artificializado 2.1, Cultivos transitorios 2.3, Pastos 2.4.2, Mosaico de Cultivos y Pastos 2.4.3, Mosaico de Cultivos, Pastos y Espacios Naturales 2.4.4, Mosaico de Pastos y Espacios Naturales 2.4.5, Mosaico de cultivos y espacios naturales 3.1.1.1, Bosque denso alto 3.1.3.1, Bosque fragmentado con pastos y cultivos 3.1.3.2, Bosque fragmentado con vegetación secundaria 3.2.2.1, Arbustal denso 3.2.3, Vegetación Secundaria o en Transición 4.1.1, Zonas Pantanosas 4.1.3, Vegetación Acuática sobre Cuerpos de Agua 5.1.1, Ríos (50 m) 5.1.2, Lagunas, Lagos y Ciénagas
Pendientes	Las pendientes suaves o planas favorecen la acumulación de agua y aumentan la susceptibilidad a inundaciones.	0.25	0 – 5%: Ligeramente inclinada 5,01 – 12%: Moderadamente inclinada 12,01 – 25%: Fuertemente inclinada 25,01 – 50%: Fuertemente quebrada >50,01%: Moderadamente escarpada
Geomorfología	Identifica geoformas asociadas a procesos de inundación de mayor o menor intensidad.	0.15	1, Territorio Artificializado 2.1, Cultivos transitorios 2.3, Pastos 2.4.2, Mosaico de Cultivos y Pastos 2.4.3, Mosaico de Cultivos, Pastos y Espacios Naturales 2.4.4, Mosaico de Pastos y Espacios Naturales 2.4.5, Mosaico de cultivos y espacios naturales 3.1.1.1, Bosque denso alto 3.1.3.1, Bosque fragmentado con pastos y cultivos 3.1.3.2, Bosque fragmentado con vegetación secundaria

Mapa temático	Descripción técnica	Peso asignado	Categoría Mapas Temáticos
			3.2.2.1, Arbustal denso
			3.2.3, Vegetación Secundaria o en Transición
			4.1.1, Zonas Pantanosas
			4.1.3, Vegetación Acuática sobre Cuerpos de Agua
			5.1.1, Ríos (50 m)
			5.1.2, Lagunas, Lagos y Ciénagas
Distancia a drenajes	Representa la cercanía a cauces principales; aunque relevante, su peso es moderado debido a la existencia de drenajes artificiales o controlados.	0.15	0 m 50 m 100 m 130 m 150 m
Precipitación	Zonas con mayores volúmenes de lluvia tienen mayor exposición al riesgo, aunque su efecto puede estar atenuado por otras variables locales.	0.10	4763 – 4956 mm 4570 – 4763 mm 4377 – 4570 mm 4185 – 4377 mm 3992 – 4185 mm
Total		1.00	-----

Una vez obtenidas las ponderaciones, estas se integraron en un entorno SIG para calcular el Índice de Amenaza por Inundación (FHI, por sus siglas en inglés), el cual combina de manera lineal las capas temáticas reescaladas. Este índice generó un mapa continuo de valores, que posteriormente fue reclasificado en cinco categorías de amenaza: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta. La ponderación obtenida con AHP asegura que el resultado refleje de manera equilibrada

la influencia de cada variable en el riesgo de inundación, fortaleciendo la confiabilidad y utilidad de los productos cartográficos para la planificación territorial y la gestión del riesgo.

La metodología fue adaptada a las condiciones físicas, climáticas y de disponibilidad de información del municipio de San Jacinto del Cauca, priorizando las variables con mayor incidencia en los procesos de inundación y con respaldo en fuentes oficiales. Esta adaptación permitió garantizar la aplicabilidad local del modelo y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Siguiendo la estructura metodológica FIGUSED (Kazakis & Voudouris, 2015), se integraron cinco parámetros, cada uno con su respectivo procedimiento de obtención y procesamiento:

Intensidad de precipitación (I): Calculada a partir del método IDW usando series pluviométricas del IDEAM.

Geomorfología (G): Cartografía del Servicio Geológico Colombiano (SGC), desarrollada por Carvajal representa la estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia (Carvajal Perico, 2012).

Cobertura de la tierra (U): Representación cartográfica en formato shapefile que usa la Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000, desarrollada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022.

Pendiente (S): Calculada de datos de elevación satelital ALOS PALSAR con resolución espacial de 12.5 m.

Distancia a la red de drenaje (D): Cartografía oficial del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Los parámetros ponderados se integraron mediante superposición lineal en un entorno SIG, lo que permitió obtener un mapa continuo de valores del Índice de Amenaza por Inundación (FHI). Para clasificar este índice en cinco categorías ordinales de amenaza —muy baja, baja, media, alta y muy alta— se empleará el método de quiebres naturales (Jenks). Esta técnica se fundamenta en un criterio estadístico que busca minimizar la varianza interna de cada clase y, al mismo tiempo, maximizar las diferencias entre clases, identificando “saltos” naturales en la distribución de los datos (Jenks & Caspall, 1971b). De esta manera, los umbrales entre categorías se configuraron en función de la propia estructura de los valores del FHI. A pesar de que bajo este sistema no existe una escala estandarizada, reconocida ampliamente, las categorías no se establecen de forma

arbitraria lo que garantiza una representación más objetiva y coherente de los niveles de amenaza en el territorio.

Entorno SIG

Para la elaboración del mapa en ArcGIS Pro de zonificación de la amenaza por inundación en el municipio de San Jacinto del Cauca, se partió de los mapas temáticos disponibles de geomorfología, cobertura de la tierra, precipitación, distancia a la red de drenaje y pendientes. Cada una de estas variables representa factores clave que influyen en la escorrentía superficial, la acumulación de agua y, en general, en la susceptibilidad del territorio frente a eventos de inundación.

En la primera etapa se realizó la homogenización de los datos espaciales. Para ello, se reproyectaron y recortaron todas las capas al límite del municipio utilizando las herramientas Project y Clip. Asimismo, se definieron las condiciones del entorno de análisis en ArcGIS Pro, estableciendo un mismo sistema de coordenadas, resolución espacial, raster de referencia (snap raster) y extensión de trabajo, lo cual garantizó la compatibilidad de los datos.

Posteriormente, las variables en formato vectorial fueron convertidas a raster mediante la herramienta Feature to Raster, con el fin de unificarlas bajo una misma estructura de análisis. Cada capa raster fue procesada con la herramienta Reclassify, asignando valores en una escala ordinal que reflejara su relación con la amenaza de inundación. Por ejemplo, en la capa de pendientes, las áreas planas recibieron valores altos de amenaza, mientras que, en la capa de distancia a la red de drenaje, los valores más altos correspondieron a las zonas más cercanas a los cauces.

La asignación de los pesos de cada criterio se llevó a cabo mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Una vez definidos los pesos, se integraron las capas reclasificadas en un análisis de superposición, inicialmente con la herramienta Raster Calculator, aplicando un proceso de normalización para homogenizar los valores. La normalización se realizó con la expresión:

$$\left[\text{Normalización} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \right] \quad (2)$$

Fuente: Elaboración propia mediante ArcGIS Pro, 2026.

donde (X) corresponde a los valores de cada capa, ($X_{\max}$) es el valor máximo y ($X_{\min}$) el valor mínimo de la capa en cuestión. Este paso permitió que todos los criterios se

integraran bajo una misma escala continua. Posteriormente, para combinar los mapas ponderados, se aplicaron la herramienta Weighted Sum, que facilitó la integración considerando la influencia relativa de cada variable.

Adicionalmente, para optimizar la base de datos espacial y evitar archivos demasiado pesados derivados de información repetitiva, se empleó la herramienta Dissolve en aquellas capas con gran cantidad de entidades redundantes. Esto permitió simplificar los datos y mejorar la eficiencia en el procesamiento.

El resultado de este proceso fue un raster que representa el Índice de Amenaza por Inundación (FHI). Finalmente, este índice se reclasificó nuevamente en cinco categorías —muy baja, baja, moderada, alta y muy alta— utilizando Reclassify y aplicando métodos de clasificación estadística como Natural Breaks (Jenks). La simbología se configuró con escalas de color graduadas en el módulo de Symbology, y se elaboró el diseño cartográfico final en el entorno de Layout View de ArcGIS Pro.

6 Resultados

6.1 Fase 1.

En la primera fase del proyecto, correspondiente a la recopilación de información, se consolidó una base de datos cartográfica y temática a partir de fuentes oficiales y confiables como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC). Esta fase permitió obtener los insumos, entre ellos la cartografía de geomorfología, cobertura de la tierra, precipitaciones, pendientes y red de drenaje. Los datos recolectados fueron estandarizados en términos de formato y proyección, garantizando su compatibilidad para el análisis posterior en un entorno SIG. Como resultado de la primera fase, se consolidó la Geodatabase denominada TrabajodeGrado.gdb (ver Ilustración 1), la cual centraliza toda la información cartográfica necesaria para el análisis multitemporal y espacial del municipio. Este repositorio no es solo una carpeta de archivos, sino una estructura lógica que garantiza la integridad de los datos bajo el sistema de referencia MAGNA-SIRGAS, tal como se definió en el procedimiento. (Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2020; Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2022; INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC), 2011)

Ilustración 1

Geodatabase producto de la sistematización de Información.

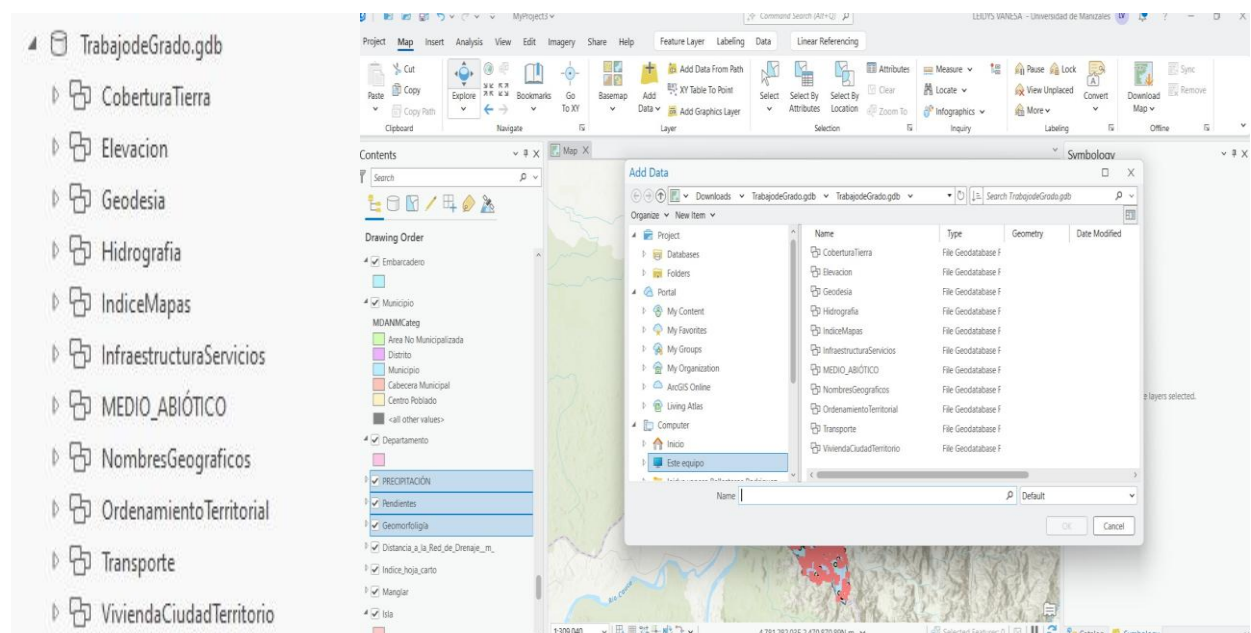
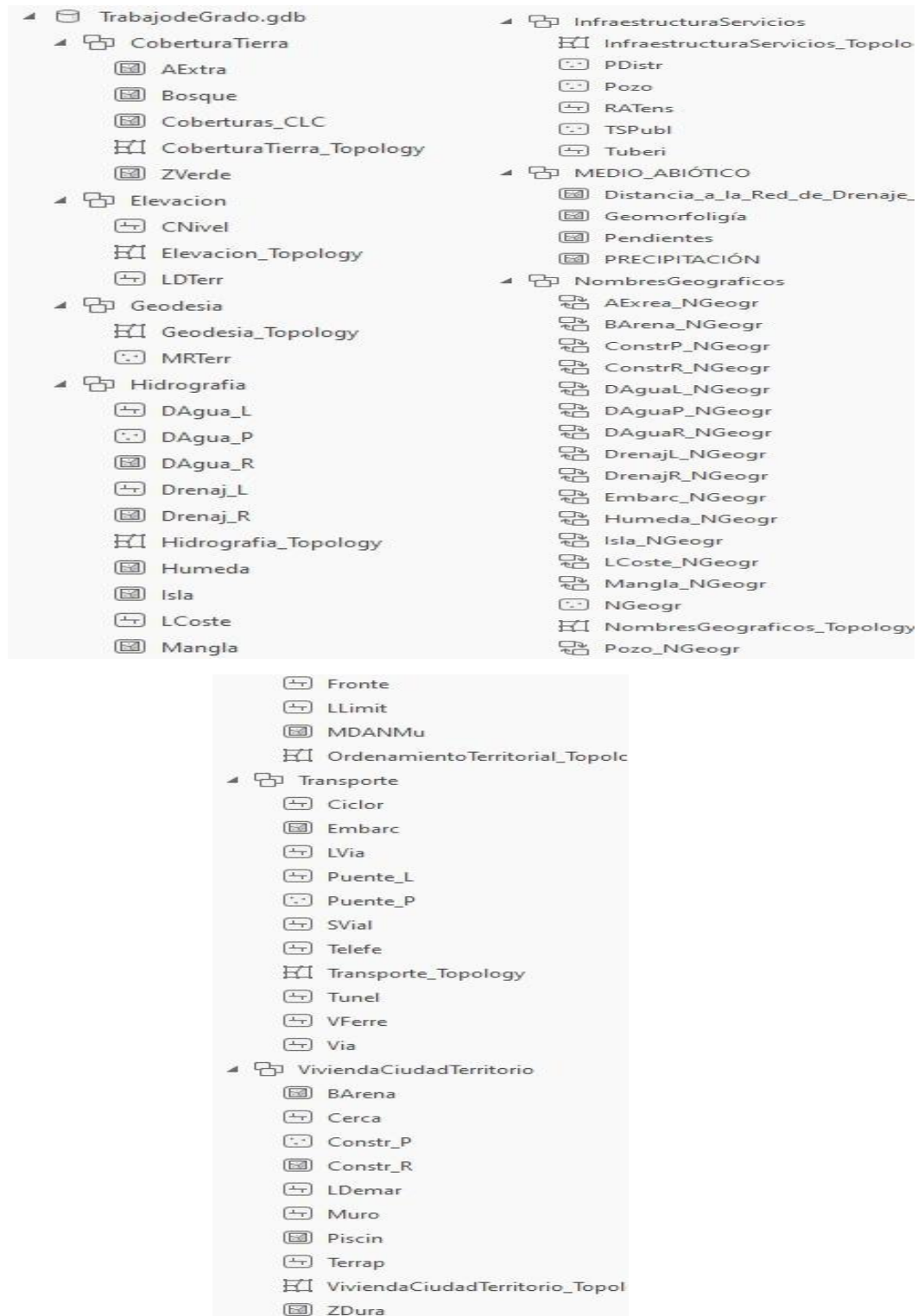


Ilustración 2

Features por temáticas de la GDB.



Dentro de esta GDB, se destaca la creación del Feature Dataset, el cual agrupa las capas vectoriales (Feature Classes) obtenidas y procesadas (ver Ilustración 2). Los insumos clave integrados incluyen:

- Componente Biofísico: Capas de geomorfología (SGC), cobertura de la tierra (IDEAM) y red de drenaje (IGAC).
- Componente de Elevación: Elevación proveniente del sensor ALOS PALSAR
- Componente Administrativo: Delimitación de la cabecera municipal, etc.

La sistematización permitió la homogenización de escalas (1:100.000) y formatos, asegurando que todas las variables fueran compatibles para los procesos de superposición ráster de las fases subsiguientes. Se logró una base de datos con error de topografía cero y total coincidencia espacial entre capas

6.2 Fase 2.

El análisis de la geomorfología muestra que la mayor extensión territorial corresponde a los planos o llanuras de inundación, que abarcan el 41,62 % del área total, seguidos por los abanicos aluviales con un 14,97 % y los planos anegadizos con un 7,74 %. Estos tres elementos concentran más del 64 % del territorio.

Las sierras denudadas representan un 5,78 %, mientras que otras unidades como las colinas remanentes disectadas (3,44 %), las terrazas de acumulación (1,96 %) y los lomeríos disectados (2,07 %) ocupan proporciones menores, aunque significativas.

Por otra parte, unidades como las ciénagas (1,12 %), lagunas (1,33 %) y lomos (1,28 %) tienen poca participación, al igual que las barras aluviales en sus diferentes formas (menos del 1 % en conjunto). Finalmente, los elementos de menor representatividad, como los conos de deyección (0,05 %) y los conos y lóbulos coluviales de solifluxión (0,03 %), muestran áreas muy puntuales dentro del municipio.

En general, la geomorfología del territorio está fuertemente dominada por las unidades de acumulación aluvial y planos de inundación, mientras que las formas residuales, estructurales o denudacionales tienen una presencia limitada. La amplia presencia de estas unidades geomorfológicas, estrechamente asociadas a dinámicas fluviales y procesos de acumulación, favorece la ocurrencia de eventos de inundación y tiene una incidencia directa en la delimitación de los escenarios de amenaza identificados para el municipio

Figura 5

Relación de coberturas de la tierra identificadas.

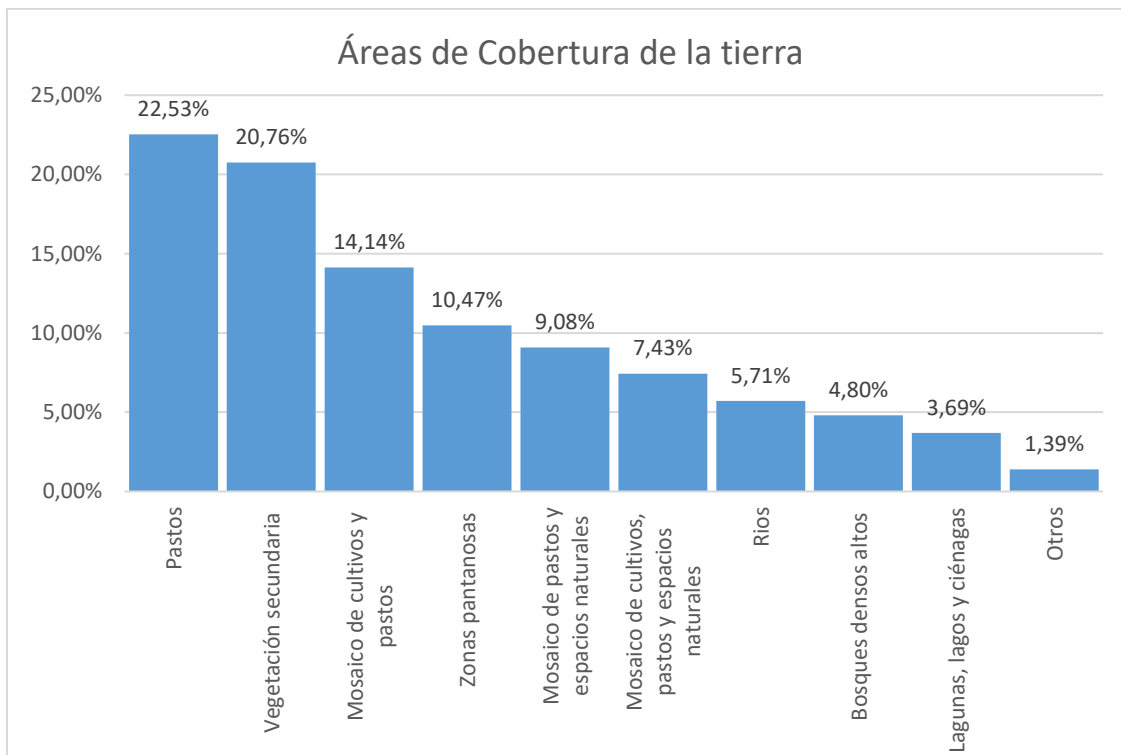
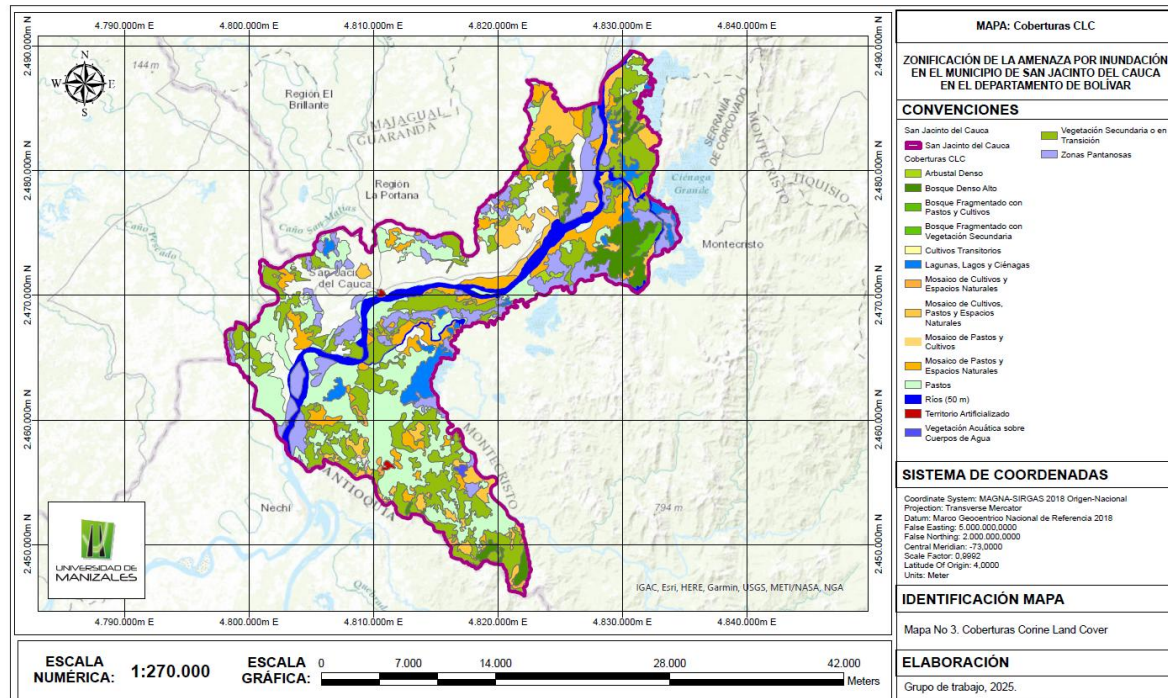


Figura 6*Mapa de cobertura de la tierra.*

El análisis de la cobertura de la tierra muestra que la mayor proporción corresponde a pastos, que abarcan el 22,53 % del área total, seguidos por la vegetación secundaria o en transición con un 20,76 % y el mosaico de cultivos y pastos con un 14,14 %. En conjunto, estas coberturas representan más del 57 % del territorio.

Las zonas pantanosas ocupan el 10,47 %, mientras que el mosaico de pastos y espacios naturales (9,08 %) y el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (7,43 %) constituyen proporciones intermedias. Por su parte, los bosques densos altos (4,80 %) y las lagunas, lagos y ciénagas (3,69 %) muestran una presencia más limitada.

En el rango de coberturas minoritarias se encuentran los ríos (5,71 %), junto con coberturas menores al 1 %, como arbustales, bosques fragmentados, cultivos transitorios, mosaicos pequeños de cultivos y espacios naturales, así como la vegetación acuática, que en conjunto no superan el 2 % del territorio.

La gráfica de áreas de cobertura de la tierra muestra un territorio predominantemente transformado por actividades agropecuarias, donde los pastos, la vegetación secundaria y los

mosaicos de cultivos y pastos ocupan la mayor extensión, evidenciando un uso del suelo orientado principalmente a la ganadería y a sistemas productivos mixtos. De manera complementaria, se identifican coberturas transicionales como los mosaicos de pastos y espacios naturales y los mosaicos de cultivos, pastos y espacios naturales, que reflejan una interacción entre áreas intervenidas y remanentes de cobertura natural. Las zonas pantanosas y los cuerpos de agua, incluyendo ríos, lagunas, lagos y ciénagas, tienen una presencia relevante pero más localizada, asociada a la dinámica hídrica del municipio. Por su parte, los bosques densos altos presentan una participación menor, lo que indica una cobertura boscosa limitada y fragmentada dentro del área de estudio, confirmando un paisaje mayoritariamente modificado por el uso antrópico del suelo.

Las áreas de coberturas de la tierra predominantes favorecen las inundaciones extensas, debido a que reflejan un territorio ampliamente intervenido y con una capacidad limitada para regular de manera natural los procesos hidrológicos.

Figura 7

Relación rangos de precipitación.

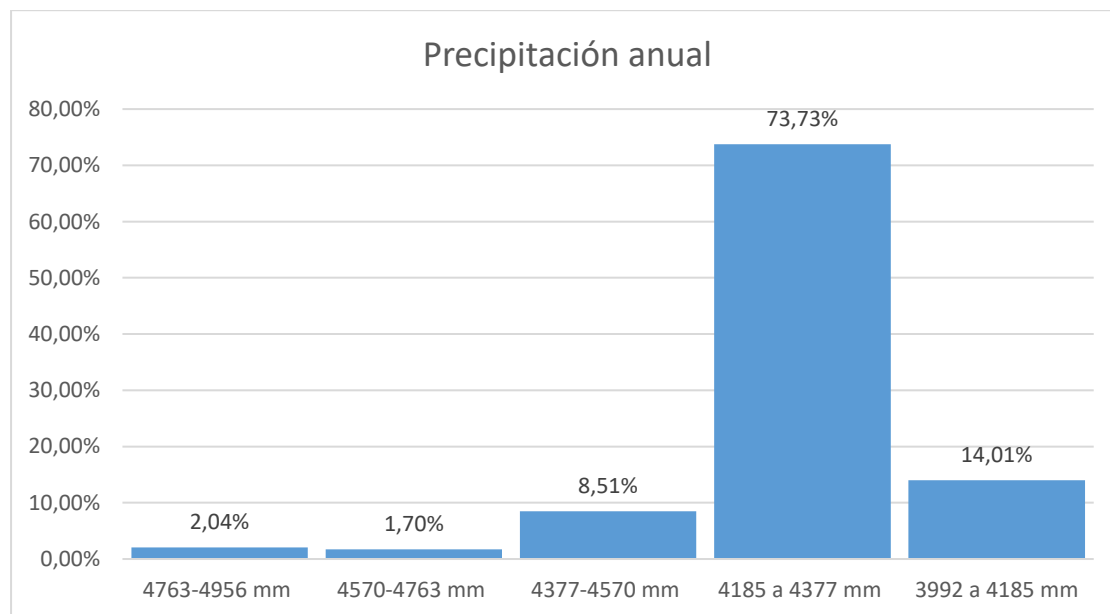
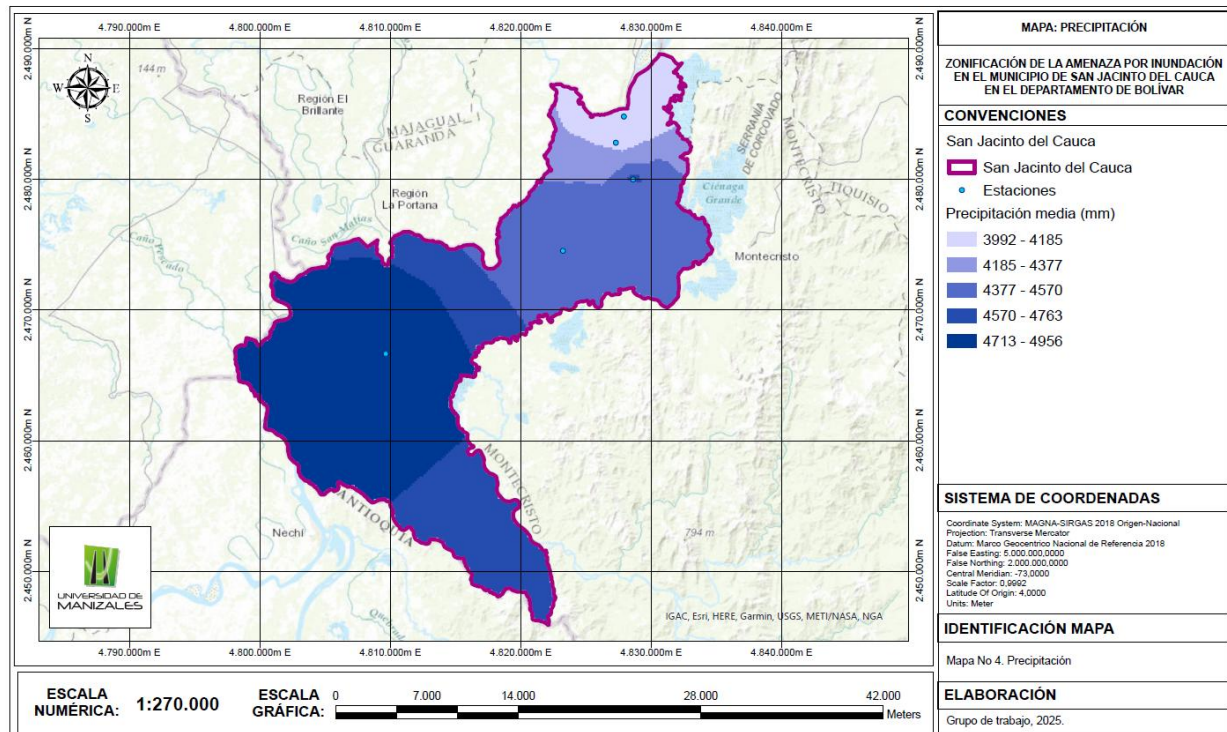


Figura 8*Mapa de precipitación.*

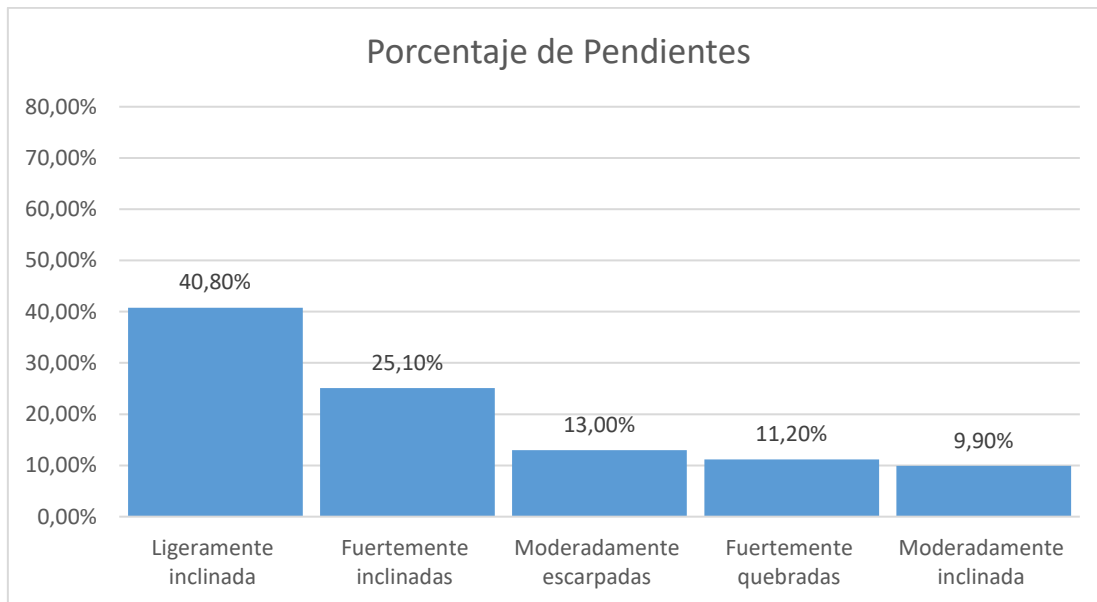
El análisis de la precipitación en el área de estudio muestra una marcada concentración en determinados rangos. El 73,73 % del territorio se ubica dentro del intervalo de 4185 a 4377 mm anuales, lo que evidencia que la mayor parte del municipio se caracteriza por un régimen de lluvias alto y relativamente homogéneo. Esta condición define un patrón hídrico predominante que influye en la disponibilidad de agua y la dinámica de los ecosistemas, lo que configura un patrón de alta pluviosidad que, al combinarse con las condiciones topográficas bajas y planas propias de la zona, incrementa la susceptibilidad a encharcamientos prolongados y desbordamientos de los cuerpos de agua. Este rango constituye, por tanto, un detonante de la amenaza hídrica en el municipio.

En contraste, un 14,01 % del área presenta precipitaciones ligeramente menores (3992 a 4185 mm), lo que podría reducir parcialmente la intensidad de los eventos de inundación, aunque no elimina el riesgo dada la cercanía a ciénagas y el desbordamiento recurrente del río Cauca. Estas zonas, si bien menos críticas, continúan siendo vulnerables, especialmente durante temporadas de lluvia intensa o creciente.

Los sectores con precipitaciones superiores a 4377 mm, que en conjunto representan un 12,25 % del territorio (4763-4956 mm - 2,04%, 4570-4763mm - 1,7%, 4377-4570 mm - 8,51 %), concentran los valores más extremos. Estas áreas, aunque más reducidas espacialmente, generan condiciones de mayor saturación de suelos y escorrentía superficial, aumentando significativamente la probabilidad de inundaciones súbitas y de mayor magnitud.

Figura 9

Porcentaje por tipo de Pendientes.



Por otro lado, el análisis de las unidades de pendiente en el municipio permitió identificar que el 50,70 % del territorio se encuentra clasificado en las categorías de pendiente ligeramente inclinada (40,8 %) y pendiente moderadamente inclinada (9,9 %). Estas condiciones topográficas representan una alta susceptibilidad a procesos de inundación, en la medida en que favorecen la acumulación de aguas superficiales en las zonas bajas, lo que incrementa la probabilidad de encharcamientos y desbordamientos de cauces fluviales.

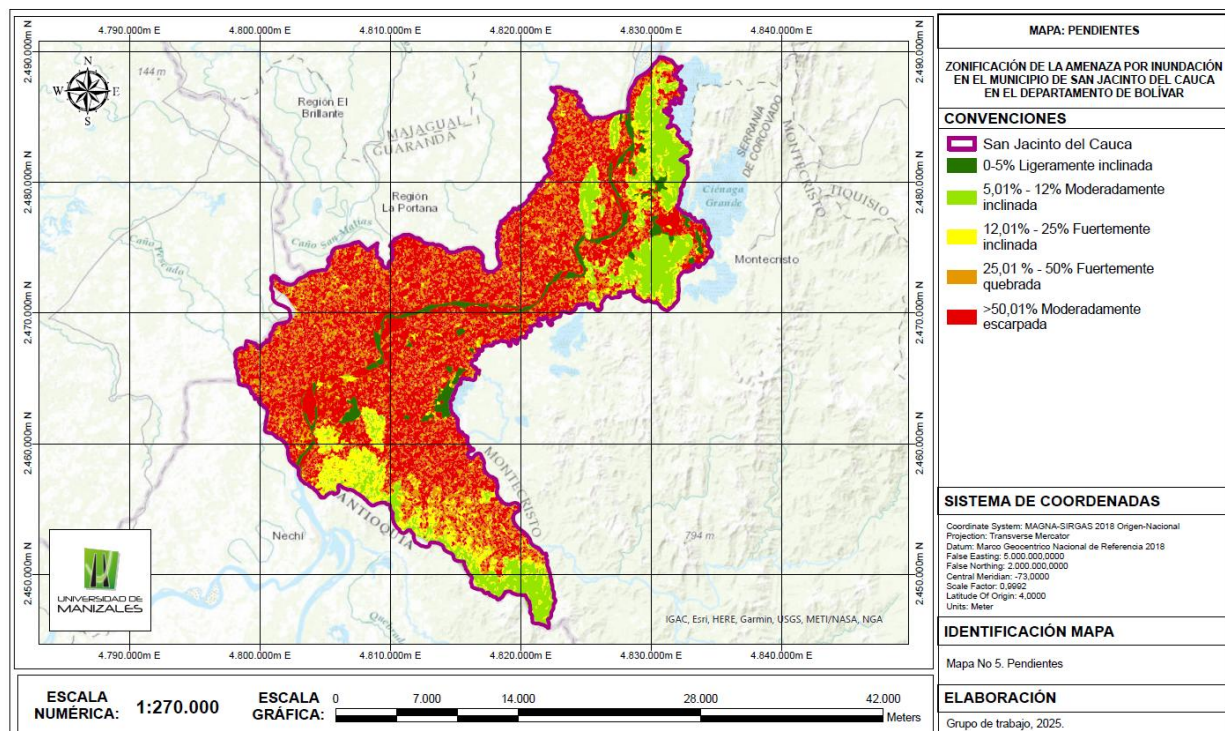
Por su parte, el 49,30 % restante del territorio municipal corresponde a áreas con pendientes fuertemente inclinadas (25,1 %), fuertemente quebradas (11,2 %) y moderadamente escarpadas (13,0 %). Estas categorías presentan una menor predisposición a la ocurrencia de inundaciones,

dado que la mayor inclinación del relieve facilita el drenaje superficial y reduce la acumulación de agua.

Teniendo en cuenta lo anterior se puede observar que la distribución de las áreas muestra un predominio en el territorio de relieves suaves y de baja pendiente. En menor proporción se identifican zonas con pendientes moderadas y fuertemente inclinadas, así como sectores con relieve quebrado y escarpado, los cuales se concentran de manera más localizada. Esta configuración refleja un territorio mayoritariamente plano a suavemente ondulado, interrumpido por áreas con mayor complejidad topográfica que responden a procesos geomorfológicos y estructurales específicos

Figura 10

Mapa de pendientes.



En relación con el análisis de la distancia a la red de drenaje evidencia que la mayor parte del territorio se encuentra en rangos cercanos a los cauces. El intervalo de 0 m concentra el 41,71 % del área total, seguido por la franja de 50 m con un 31,35 % y la de 100 m con un 15,20 %. En conjunto, estas tres categorías representan más del 88 % del territorio, lo que indica una marcada proximidad del municipio a la red hidrográfica.

Figura 11

Porcentaje de Áreas cercanas a la red de drenaje.

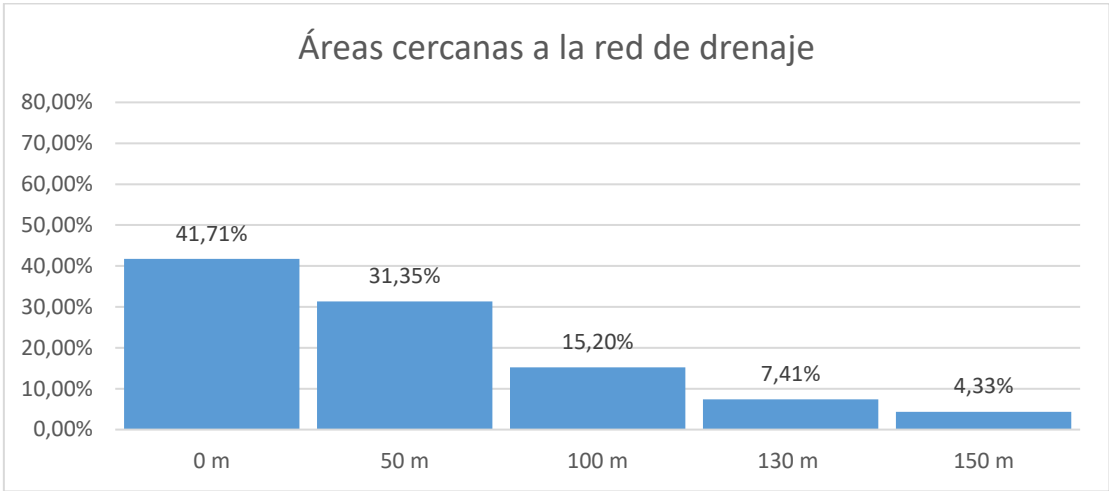
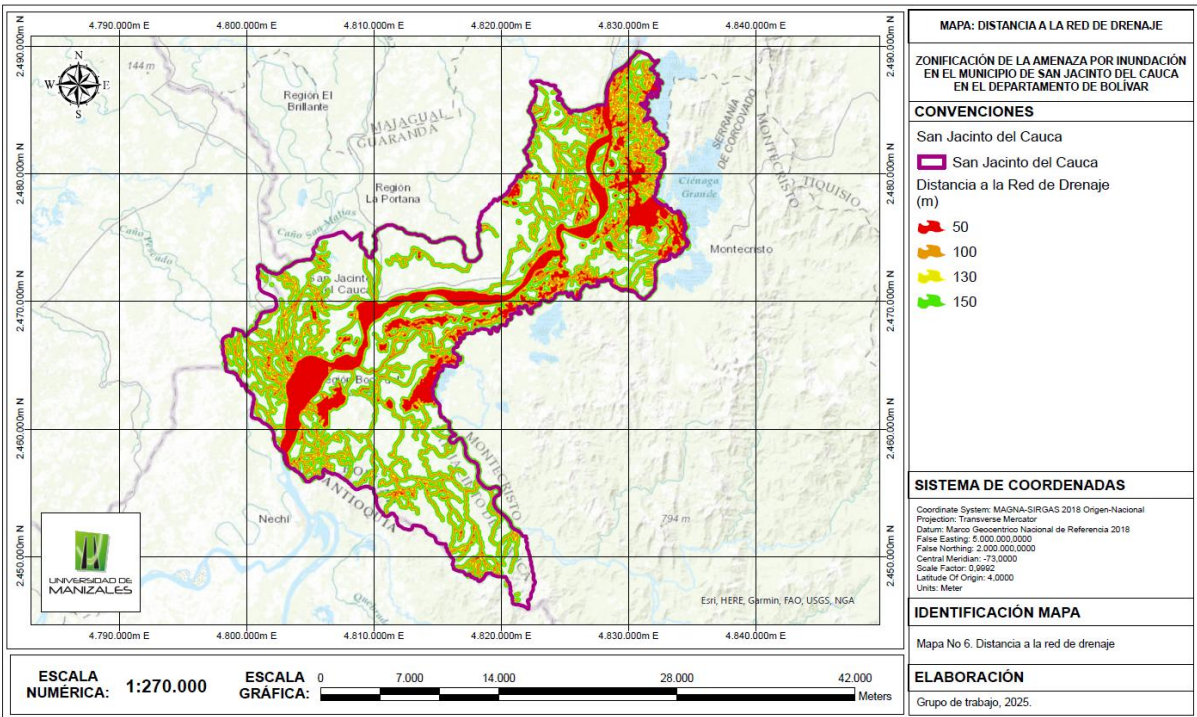


Figura 12

Mapa de distancia a la red de drenaje.



Las áreas comprendidas entre 130 m (7,41 %) y 150 m (4,33 %) abarcan proporciones significativamente menores, reflejando que solo una fracción reducida del municipio se encuentra a distancias más amplias de los cauces principales.

La distribución de las áreas cercanas a la red de drenaje evidencia que una parte significativa del territorio se localiza en zonas de proximidad directa a los cauces, seguida por franjas progresivamente más alejadas. Esta configuración refleja la fuerte influencia de la red hídrica en la organización espacial del municipio, con amplios sectores desarrollados en áreas próximas a ríos, quebradas y drenajes naturales. A medida que aumenta la distancia respecto a la red de drenaje, la extensión de las áreas disminuye, lo que pone de manifiesto la concentración del territorio en entornos directamente condicionados por la dinámica fluvial.

La proximidad a los drenajes favorece procesos como el desbordamiento, la acumulación de agua y la saturación de los suelos durante eventos de lluvia intensa, lo que contribuye a la intensificación de estos escenarios. En este sentido, la cercanía a la red de drenaje actúa como un factor condicionante clave en la delimitación de las zonas críticas del municipio, evidenciando una clara correspondencia espacial con los niveles más elevados de amenaza identificados en el mapa final de zonificación.

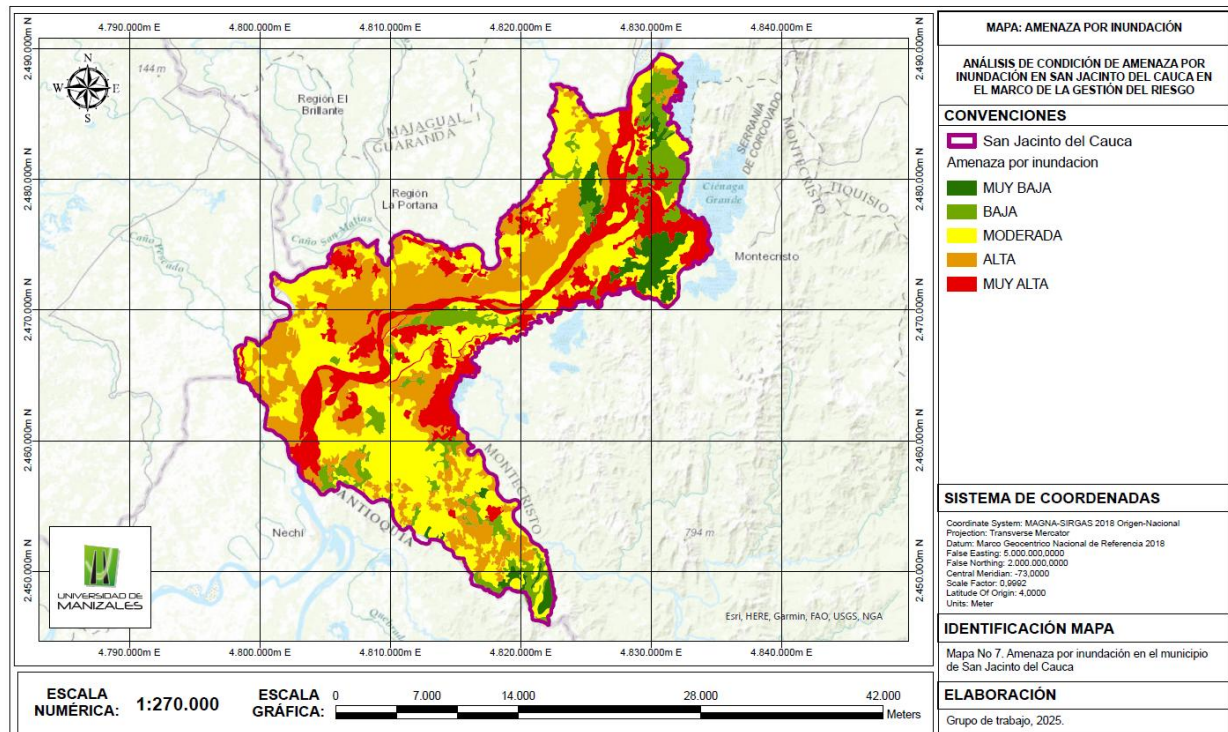
6.3 Fase 3. Mapa de zonificación de la amenaza

El Proceso Analítico Jerárquico (AHP) permitió la integración de las variables utilizadas para calcular las zonas de amenaza por inundación en el municipio de San Jacinto del Cauca.

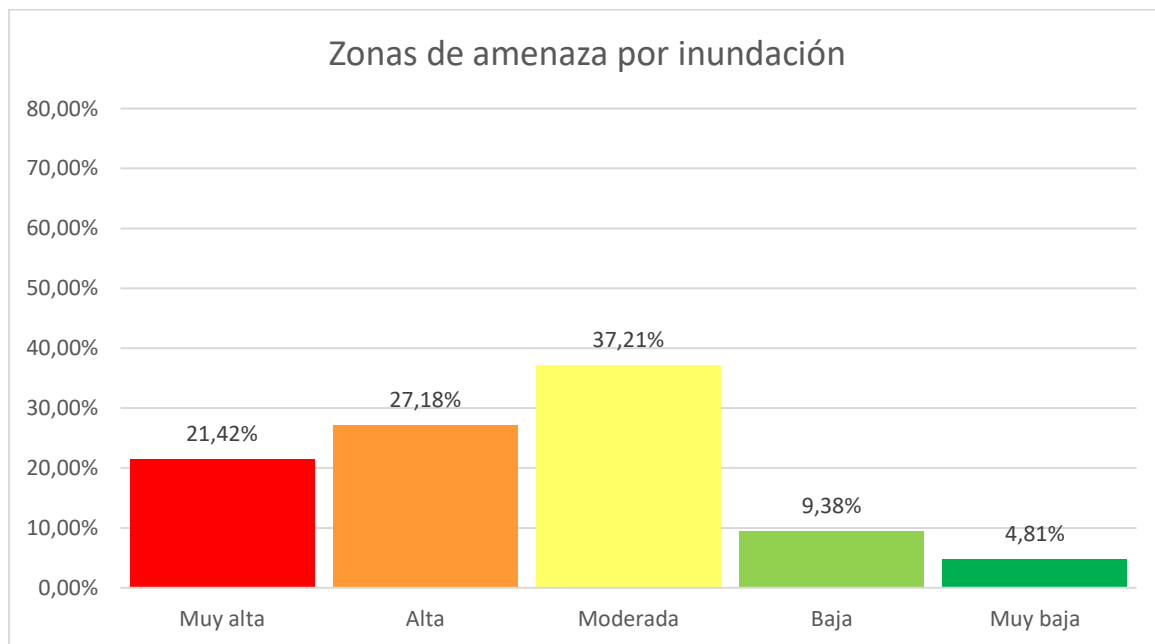
El mapa resultante (Figura 13) muestra la distribución de las clases de amenaza mediante una escala de colores: verde oscuro (muy baja), verde claro (baja), amarillo (media), naranja (alta) y rojo (muy alta).

Figura 13

Mapa de zonificación de la Amenaza por inundación en el municipio de San Jacinto del Cauca.

**Figura 14**

Porcentajes de áreas zonificadas según nivel de amenaza.



Muy alta amenaza (zona roja)

Las áreas clasificadas con muy alta amenaza se concentran en los sectores adyacentes al cauce del río Cauca y al sistema de canales menores asociados al dique Caregato, principalmente en su margen oriental. Estas zonas presentan topografía muy plana, baja altitud relativa (entre 15 y 20 msnm) y una alta acumulación de flujo superficial. Han sido históricamente afectadas por eventos extremos, como las inundaciones de 2010 y 2021 (UNGRD, 2022) y coinciden con tramos del dique con evidencia de deterioro estructural. El uso predominante del suelo es agrícola, aunque también se identifican viviendas rurales dispersas. Se trata de áreas críticas con alto riesgo de pérdida de vidas y daños materiales, especialmente ante la ocurrencia de crecientes súbitas o falla del dique (Tehrany et al., 2014).

Alta amenaza (zona naranja)

La zona de alta amenaza rodea la franja roja, en áreas que, si bien no están directamente en contacto con el cauce, se ubican en planicies aluviales de transición, con pendiente leve y suelos de baja permeabilidad. Estas áreas presentan riesgo significativo de inundación por desbordamiento lateral o por el colapso de estructuras secundarias de drenaje. En algunos puntos se han documentado procesos de encharcamiento persistente tras eventos de lluvia intensa, lo cual afecta la funcionalidad de cultivos, caminos rurales y pequeños centros poblados (Kazakis & Voudouris, 2015).

Amenaza media (zona amarilla)

Las áreas de amenaza media corresponden a sectores con elevación moderada, ubicados a una mayor distancia del canal principal y con pendientes suaves. Estas zonas tienen menor frecuencia de inundación directa, pero podrían ser afectadas por eventos excepcionales, acumulación de escorrentía o mal manejo del drenaje superficial. Son relevantes como zonas de amortiguamiento y deben ser consideradas en el ordenamiento territorial, dado que la expansión urbana hacia estas áreas puede incrementar el riesgo social (Kourgialas & Karatzas, 2011).

Amenaza baja (zona verde claro)

Las zonas de baja amenaza se distribuyen principalmente en terrazas aluviales altas, con buena pendiente de evacuación natural y cobertura vegetal que favorece la infiltración. Aunque el riesgo de inundación es bajo, estas áreas pueden verse afectadas de forma indirecta por bloqueos de drenaje o por la saturación de suelos aguas abajo. Su adecuada gestión como zonas de transición

o protección ecológica es clave para reducir la presión sobre los sectores más vulnerables (Tehrany et al., 2013).

Muy baja amenaza (zona verde oscuro)

Las áreas de muy baja amenaza corresponden a los sectores más elevados y alejados del sistema fluvial principal. Estas zonas no han registrado eventos de inundación histórica y presentan condiciones morfotopográficas que dificultan la acumulación de agua superficial. Son apropiadas para usos productivos o asentamientos humanos siempre que se respeten las condiciones de conectividad hidráulica y no se genere presión sobre el sistema de drenaje natural (Kazakis et al., 2015a).

El mapa permitió cuantificar la superficie del municipio en cinco categorías de amenaza: muy alta, alta, moderada, baja y muy baja. Los resultados evidencian que aproximadamente el 21,42% del territorio corresponde a zonas de amenaza muy alta, concentradas principalmente en planicies aluviales adyacentes al río Cauca y sus afluentes. Las áreas de amenaza alta representan cerca del 27,18%, asociadas a sectores agrícolas y pastizales ubicados en zonas bajas con pendientes suaves. La categoría de amenaza moderada abarca alrededor del 37,21%, distribuyéndose en áreas de transición con coberturas mixtas y condiciones geomorfológicas intermedias. Por su parte, las áreas clasificadas como de amenaza baja corresponden al 9,38% del territorio, localizadas en terrazas aluviales y sectores con mayor altitud relativa. Finalmente, la amenaza muy baja representa el 4,81%, localizada en zonas de lomeríos y áreas con pendientes más pronunciadas, donde las condiciones naturales favorecen un mejor drenaje del agua. Esta distribución porcentual evidencia que casi la mitad del municipio (48,60%) presenta condiciones de amenaza alta y muy alta, lo que resalta la urgencia de implementar medidas de gestión del riesgo y planificación territorial que prioricen estas áreas críticas.

Los resultados muestran que las zonas de alta y muy alta amenaza corresponden principalmente a las áreas cercanas al río Cauca y sus afluentes, caracterizadas por planicies aluviales, pendientes suaves y coberturas agrícolas extensivas. Estas áreas representan una parte considerable del territorio y coinciden con los sectores históricamente más afectados por inundaciones. En contraste, las zonas de baja y muy baja amenaza se localizan en sectores con mayores elevaciones, pendientes más pronunciadas y menor influencia directa de la red hídrica.

En síntesis, la zonificación obtenida refleja una coherencia espacial con los antecedentes históricos de inundación en la región de La Mojana y proporciona un insumo técnico para orientar

la planificación territorial, priorizar medidas de mitigación y fortalecer la gestión del riesgo en el municipio.

Coherencia de los resultados con los objetivos planteados

En lo que respecta al objetivo general, centrado en la zonificación de la amenaza por inundación en San Jacinto del Cauca, su cumplimiento se materializa en la cartografía final del estudio. Este producto no solo identifica y delimita cinco niveles de amenaza (desde muy baja hasta muy alta), sino que logra sintetizar la interacción de variables físicas, climáticas y antrópicas. De este modo, el mapa puede ser un instrumento técnico para la gestión del riesgo y la planificación del territorio municipal.

El primer objetivo específico, enfocado en la sistematización de información base, halló su respuesta en la Fase 1 mediante la construcción de una base de datos geoespacial. Al consolidar insumos de organismos como el IGAC, IDEAM y SGC, se aplicaron procesos de estandarización en formatos y sistemas de referencia. Este rigor en el tratamiento de los datos aportó a la interoperabilidad de los insumos y la trazabilidad de un modelo de amenaza fundamentado en fuentes oficiales.

Por su parte, el segundo objetivo específico se alcanzó mediante la generación y el análisis de la cartografía temática en ArcGIS Pro durante la Fase 2. La modelación de variables como geomorfología, precipitación y dinámica de drenajes permitió una caracterización precisa del entorno ambiental de San Jacinto del Cauca. El análisis cuantitativo resultante fue determinante, pues permitió establecer cómo la configuración de planicies aluviales y los regímenes pluviométricos actúan como los importantes detonantes de los procesos de inundación en la zona de estudio.

Finalmente, el cumplimiento del tercer objetivo específico se evidencia en la integración final de la Fase 3, donde se empleó el Proceso Analítico Jerárquico (AHP). La aplicación de esta técnica de ponderación multicriterio permitió calcular el Índice de Amenaza por Inundación (FHI) bajo un enfoque sistemático. Al reclasificar estos valores en categorías cualitativas, el procedimiento aseguró una transición objetiva entre los datos matemáticos y la zonificación final, otorgando al modelo una validez técnica y confiabilidad cartográfica.

Como resultado nos presenta a casi la mitad del municipio (48,60%) en niveles de amenaza alta y muy alta. Esto implica que San Jacinto del Cauca es un territorio donde la inundación es una

condición estructural y no solo coyuntural, concentrándose la mayor peligrosidad en las zonas colindantes al río Cauca y el sistema del Dique Caregato.

En cuanto a Riesgo las zonas clasificadas como "Muy Alta Amenaza" (zona roja) presentan un riesgo inminente de pérdida de vidas, viviendas y medios de vida. Dado que la economía es predominantemente agrícola y ganadera, el riesgo económico es sistémico, pues los cultivos de arroz y los pastos se ubican precisamente en las planicies de mayor susceptibilidad.

Los resultados obligan a una reconfiguración del Plan de Ordenamiento Territorial (POT). Las implicaciones incluyen la necesidad de delimitar zonas no urbanizables, regular el uso del suelo agrícola para que sea compatible con las inundaciones y priorizar inversiones en infraestructura hidráulica adaptativa y soluciones basadas en la naturaleza (restauración de humedales)

7 Discusión

Los patrones espaciales identificados en San Jacinto del Cauca no son aislados; responden a una convergencia clara entre la geografía del terreno y su comportamiento climático. Al contrastar la zonificación con la memoria histórica de inundaciones en La Mojana, se hace evidente que la interacción entre geomorfología, pendientes y red de drenaje es la que realmente articula la amenaza. No se trata solo de variables aisladas, sino de una influencia natural determinante que da forma al riesgo en el municipio.

Llama la atención que un 48,60% del territorio esté bajo amenaza alta o muy alta. Esta cifra, aunque elevada, tiene una explicación técnica sólida: el dominio de llanuras de inundación asociadas al río Cauca. En estas zonas, la combinación de una altitud relativa baja y pendientes casi nulas crea una "trampa hídrica" donde el agua se acumula ante la falta de una evacuación natural eficiente. Esta dinámica es consistente con lo que investigadores como Tehrany et al. (2014) y Kazakis et al. (2015b) han descrito en otros sistemas aluviales tropicales del mundo.

El factor de la precipitación también juega un papel crítico y casi constante. Con más del 70% del municipio recibiendo más de 4.100 mm de agua al año, la saturación de los suelos es una realidad recurrente. Lo complejo ocurre cuando estos picos pluviométricos coinciden con los periodos de creciente del río Cauca; ahí el desbordamiento se vuelve inevitable. Este escenario coincide plenamente con los reportes de entidades como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2022) y la UNGRD (2022) para las cuencas del Caribe y el Cauca.

La transformación del paisaje, marcada por la expansión de pastizales y zonas agropecuarias a expensas de bosques y humedales, ha alterado la regulación hídrica. Al perderse estas coberturas naturales, la capacidad de infiltración cae y la escorrentía superficial se dispara. Como señalan autores como Kourgialas & Karatzas (2011), esta intervención humana termina amplificando el impacto de las lluvias en zonas rurales, volviéndolas mucho más vulnerables.

En consecuencia este porcentaje de territorio en amenaza alta o muy alta, se puede traducir en que uno de cada dos metros cuadrados del municipio tiene una probabilidad muy elevada de sufrir inundaciones que afecten la seguridad humana y la productividad económica. Lo que indica que el municipio tiene un margen de maniobra limitado para la expansión urbana tradicional. Solo el 4,81% del territorio se considera de "Muy Baja Amenaza" (zonas de lomeríos), lo que convierte

a estos pequeños sectores en áreas estratégicas para el asentamiento de infraestructura crítica (hospitales, escuelas, refugios) que deba permanecer operativa durante una emergencia.

Los datos confirman que, sin una intervención estructural en la gestión del riesgo, el municipio seguirá atrapado en un ciclo donde la recuperación tras cada inundación es cada vez más difícil debido a la degradación de los ecosistemas reguladores.

Metodológicamente, el uso del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) permitió organizar y ponderar estas variables de manera estructurad. La mejor prueba de la validez del modelo es su correspondencia espacial con las inundaciones críticas de 2010 y 2021. Es cierto que existen limitaciones, como la ausencia de datos hidrológicos detallados (caudales máximos) o modelaciones hidrológicas e hidráulicas, pero, aun así, el resultado es un insumo técnico válido. En territorios donde la información detallada es un lujo, una aproximación técnica como esta es útil para decidir sobre el ordenamiento y la gestión del riesgo.

La definición de los umbrales de amenaza no responde a un criterio arbitrario, sino a la estructura estadística intrínseca de los valores calculados para el FHI. Mediante el algoritmo de Quiebres Naturales (Jenks), se logra una partición del gradiente de amenaza que minimiza la varianza interna de cada grupo, maximizando simultáneamente las diferencias entre categorías. Este procedimiento es fundamental en estudios de escala regional donde, ante la ausencia de una norma técnica universal que dicte valores absolutos para definir la 'amenaza alta', se opta por una clasificación fundamentada en la distribución real de los datos físicos del área de estudio (Kazakis et al., 2015). De este modo, la zonificación en San Jacinto del Cauca adquiere una coherencia espacial que permite discriminar áreas críticas basándose en la condición del territorio. Al evitar límites impuestos externamente, el modelo garantiza una representación objetiva y ajustada a la morfología de la llanura aluvial, convirtiendo el procesamiento de datos en una herramienta para la toma de decisiones técnicas que integra análisis de la geografía local.

Este enfoque se fundamenta en la capacidad de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para ejecutar el Índice de Amenaza por Inundación (FHI). Tal como proponen Kazakis et al. (2015), la precisión técnica no surge solo de la cantidad de datos, sino de la validación lógica de los mismos; en este trabajo, la obtención de un Índice de Consistencia (CR) de 0.04 garantiza que las ponderaciones asignadas a variables críticas, como la morfología de la llanura aluvial, sean científicamente coherentes. Al integrar el Modelo Digital de Elevación (MDE) con los registros de

precipitación y la cercanía a la red de drenaje, el sistema identifica cubetas naturales de acumulación que el ojo humano o los métodos descriptivos tradicionales suelen omitir.

En síntesis, la zonificación obtenida refleja fielmente la realidad hidrológica y los antecedentes de afectación de San Jacinto del Cauca, consolidándose como una herramienta que puede aportar a la planificación territorial futura.

8 Conclusiones

1. Los hallazgos permiten concluir que la amenaza por inundación en San Jacinto del Cauca es una respuesta directa a su propia configuración natural. Factores como la extensión de sus planicies aluviales, las pendientes mínimas y la densidad de su red hídrica, sumados a una pluviometría alta y uniforme, dictan el comportamiento del riesgo. Es precisamente esta convergencia de variables la que justifica por qué las zonas colindantes al río Cauca y sus tributarios concentran los niveles de amenaza más críticos.
2. Se confirmó una correlación espacial robusta entre la zonificación lograda y la memoria histórica de desastres en La Mojana. Esta coincidencia no solo valida el modelo aplicado, sino que da un respaldo empírico a la interpretación de los resultados: los sectores que el análisis multicriterio señala como críticos son, efectivamente, aquellos que han sufrido con mayor rigor los eventos extremos del pasado.
3. La elaboración de una geodatabase organizada representa un insumo clave para futuros estudios en San Jacinto del Cauca, donde el uso de herramientas de análisis espacial aún es limitado. Al integrar en una sola estructura la información cartográfica y temática, facilita su actualización y aplicación en procesos de planificación y gestión del riesgo.
4. La elaboración de mapas temáticos (geomorfología, cobertura de la tierra, precipitación, pendientes y distancia a la red de drenaje), empleando herramientas de análisis espacial en ArcGIS Pro, permitió estructurar los insumos cartográficos necesarios para la construcción del modelo de amenaza por inundación.
5. El uso del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) resultó ser una metodología acertada para la evaluación espacial de la amenaza. Al permitir una ponderación objetiva de los factores físicos y ambientales, este enfoque demostró su eficacia para generar cartografía consistente y técnica, incluso en escenarios donde la escasez de datos hidrológicos de detalle suele ser un obstáculo para la modelación.
6. Este método no se limita a una simple superposición de capas; por el contrario, jerarquiza la influencia real de factores como la pendiente, la red hídrica y el uso del suelo. De esta manera, el sistema transforma datos geográficos en un Índice de Amenaza por Inundación (FHI) que refleja la susceptibilidad del terreno.

7. Esta metodología destaca sobre otros modelos hidráulicos tradicionales debido a su eficiencia en entornos con escasez de datos hidrológicos históricos. A diferencia de las simulaciones físicas complejas que requieren datos de campo exhaustivos, el uso de la Evaluación Multicriterio (AHP) en un entorno SIG permite obtener resultados aceptables utilizando insumos satelitales y cartografía base. Es una opción viable para evaluar zonas extensas como San Jacinto del Cauca, ya que optimiza los recursos técnicos sin sacrificar demasiado la precisión espacial. Al final, la capacidad de este enfoque para jerarquizar variables biofísicas lo convierte en la herramienta más viable y equilibrada para la gestión del riesgo en territorios con limitaciones de información.
8. No se puede ignorar que el modelo de cobertura actual incide de forma directa en el comportamiento de las inundaciones. Al sustituir coberturas naturales por pastizales y zonas agrícolas, el terreno pierde su facultad para regular el agua; como consecuencia, la escorrentía fluye con mayor rapidez y potencia el impacto de los eventos pluviométricos extremos. Es una realidad que sitúa a la gestión del suelo como un eje indisociable de cualquier estrategia de planificación del riesgo.
9. La distribución espacial de la precipitación muestra un claro predominio de áreas con precipitaciones anuales altas, propias de un régimen climático húmedo, que se extienden sobre la mayor parte del municipio. De manera secundaria, se identifican rangos de precipitación ligeramente superiores e inferiores, los cuales se presentan de forma puntual y localizada. Este comportamiento evidencia condiciones de lluvia intensas y relativamente homogéneas en el territorio, las cuales influyen de manera directa en la dinámica hidrológica, favoreciendo altos caudales, saturación de suelos y la ocurrencia de procesos asociados como inundaciones y encharcamientos, especialmente en sectores con baja capacidad de drenaje.
10. Las áreas con precipitaciones anuales altas tienen una incidencia directa en la configuración de las zonas críticas de amenaza identificadas en el mapa final de zonificación, ya que las lluvias intensas y persistentes favorecen el aumento de los volúmenes de escorrentía y la saturación prolongada de los suelos. Esta condición incrementa la presión sobre los sistemas de drenaje natural y artificial, intensificando la ocurrencia de inundaciones y encharcamientos, particularmente en sectores de baja pendiente y asociados a planos de inundación. En consecuencia, se observa una clara correspondencia espacial entre las áreas

de mayor precipitación y las zonas clasificadas con amenaza muy alta, lo que evidencia la influencia determinante de las lluvias intensas en la configuración de los escenarios críticos identificados en el municipio

11. Finalmente, esta zonificación trasciende el ejercicio académico para convertirse en un instrumento técnico de primer orden para San Jacinto del Cauca. Al identificar y jerarquizar las áreas de mayor vulnerabilidad, el estudio proporciona una base, que sumado a los análisis correspondientes, permitiría priorizar intervenciones de mitigación y adaptación, en pro de fortalecer la toma de decisiones orientada a reducir el impacto de futuros desastres hídricos.

9 Recomendaciones

A partir de los hallazgos de esta investigación, se proponen las siguientes recomendaciones orientadas a fortalecer la gestión integral del riesgo por inundaciones en el municipio de San Jacinto del Cauca:

A partir de los resultados obtenidos en la zonificación de la amenaza por inundación en San Jacinto del Cauca, se recomienda a la administración municipal incorporar los mapas generados en la actualización del Plan de Ordenamiento Territorial (POT). Estos insumos deben servir como base para delimitar zonas no urbanizables, orientar la expansión urbana hacia áreas seguras y regular el uso del suelo en sectores de alta y muy alta amenaza, garantizando un desarrollo territorial sostenible.

De igual forma, se sugiere a la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y a la Gobernación de Bolívar fortalecer la inversión en infraestructura hidráulica y adaptativa, priorizando la rehabilitación de diques y sistemas de drenaje, pero también incorporando soluciones basadas en la naturaleza, como la restauración de humedales y corredores de amortiguamiento que permitan reducir la exposición al riesgo de manera integral.

Adicionalmente se recomienda a las entidades ambientales y comunitarias, promover programas de educación, capacitación y participación ciudadana, que fomenten la apropiación de los mapas de amenaza por parte de las comunidades locales. Estas acciones permitirán una respuesta más temprana y organizada frente a emergencias, al tiempo que contribuyen a la reducción de la vulnerabilidad social.

Finalmente, es conveniente mantener un monitoreo permanente de las condiciones ambientales y territoriales del municipio por parte de la academia y centros de investigación. Este seguimiento debe realizarse de manera periódica, con una frecuencia mínima anual para la actualización de los mapas de amenaza y la incorporación de nueva información hidrometeorológica. En caso de presentarse eventos extraordinarios de inundación, se recomienda efectuar una revisión inmediata de la cartografía y los registros para ajustar los niveles de riesgo.

Referencias

- Al-Aizari, A. R., Al-Masnay, Y. A., Aydda, A., Zhang, J., Ullah, K., Islam, A. R. M. T., Habib, T., Kaku, D. U., Nizeyimana, J. C., Al-Shaibah, B., Khalil, Y. M., AL-Hameedi, W. M. M., & Liu, X. (2022). Assessment Analysis of Flood Susceptibility in Tropical Desert Area: A Case Study of Yemen. *Remote Sensing*, 14(16), 4050. <https://doi.org/10.3390/rs14164050>
- Alfieri, L., Feyen, L., Dottori, F., & Bianchi, A. (2015). Ensemble flood risk assessment in Europe under high end climate scenarios. *Global Environmental Change*, 35, 199-212. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.09.004>
- Angulo, K. (2014). *Análisis del Ordenamiento Territorial del municipio de San Marcos, Sucre a la luz del Fenómeno de la Niña (2009-2012)* [Universidad del Rosario]. <https://repository.urosario.edu.co/items/ab218f9b-a997-4663-86f1-75e405c526a4>
- Avila León, J. F. (2022). *Análisis de la gestión del riesgo de inundaciones en la región de la Mojana (2016-2022)*. <https://repository.umng.edu.co/items/2fe6bdeb-d6e6-435f-aced-6287dd685456>
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1), 15-31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>
- Banco Mundial. (2012). *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: Un aporte para la construcción de políticas públicas*. <https://doi.org/333.3109861/A56>
- Berkes, F., & Folke, C. (1998). *Linking social and ecological systems: Management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge University Press. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://assets.cambridge.org/97805217/85624/excerpt/9780521785624_excerpt.pdf

- Bertel Ricardo, L. M., & Burgos Barba, L. F. (2020). *Variabilidad de la evapotranspiración potencial bajo escenarios de cambio climático y sus efectos en los sistemas productivos agrícolas en la Mojana, Colombia*.
<https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/4863>
- Caraballo, P., & De La Ossa, J. (2011). *INUNDACIONES EN LA MOJANA: ¿VIA CRUSIS SOCIAL O CONDICIÓN AMBIENTAL?* Rev. Colombiana cienc.
<https://revistas.unisucre.edu.co/%2F>
- Cardona, O.-D., Bernal, G., & Escovar, M. A. (2023). Flood and Drought Risk Assessment, Climate Change, and Resilience. En S. Eslamian & F. Eslamian (Eds.), *Disaster Risk Reduction for Resilience: Climate Change and Disaster Risk Adaptation* (pp. 191-214). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22112-5_9
- Carvajal Perico, J. H. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/view/52/44/438>
- Cea, L., & Costabile, P. (2022). Flood Risk in Urban Areas: Modelling, Management and Adaptation to Climate Change. A Review. *Hydrology*, 9(3), 50.
<https://doi.org/10.3390/hydrology9030050>
- CVS. (2021). *Estudio de vulnerabilidad y análisis de riesgos en la región de La Mojana*.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP), Dirección de Prevención y Atención de Desastres, & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Colombia (PNUD). (2008). *Plan de acciones regionales prioritarias para el desarrollo sustentable de la Mojana*.
<https://doi.org/ISBN:%2520978-958-8447-16-2>
- DIMAR. (2021). *Caracterización meteomarina anual del Caribe Colombiano 2022*. Dirección General Marítima - DIMAR.

- https://mindefensa.primo.exlibrisgroup.com/permalink/57MDN_INST/offa8q/alma991299810107231
- IAvH. (2019). *La biodiversidad en los humedales de La Mojana: Aportes para la sostenibilidad y la conservación de la región*.
- IDEAM. (2020). *Estrategias para la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático en La Mojana*.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2022). *Estadísticas e información hidrometeorológica*. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI (IGAC). (2011). *Cartografía básica digital integrada*. <https://geoportal.igac.gov.co/>
- Jenks, G., & Caspall, F. (1971a). ERROR ON CHOROPLETHIC MAPS: DEFINITION, MEASUREMENT, REDUCTION. *Annals of the Association of American Geographers*. (world). <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1111/j.1467-8306.1971.tb00779.x>
- Jenks, G., & Caspall, F. (1971b). ERROR ON CHOROPLETHIC MAPS: DEFINITION, MEASUREMENT, REDUCTION. *Annals of the Association of American Geographers*. (world). <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1111/j.1467-8306.1971.tb00779.x>
- Kazakis, N., Kougias, I., & Patsialis, T. (2015a). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope–Evros region, Greece. *Science of The Total Environment*, 538, 555-563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.055>
- Kazakis, N., Kougias, I., & Patsialis, T. (2015b). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope–Evros region, Greece. *Science of The Total Environment*, 538, 555-563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.055>

- Kazakis, N., & Voudouris, K. S. (2015). Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology*, 525, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.035>
- Kourgialas, N. N., & Karatzas, G. P. (2011). Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—A case study. *Hydrological Sciences Journal*, 56(2), 212-225. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.555836>
- Martínez-Reina, A. (2013). Caracterización socioeconómica de los sistemas de producción de la región de La Mojana en el Caribe de Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 14(2), 165-185. https://doi.org/10.21930/rcta.vol14_num2_art:406
- Mejia Ávila, D., Martínez Lara, Z., & Soto Barrera, V. C. (2023). Space–time modelling of a tropical wetland using multiscale images, vegetation indices and landscape metrics: Case—Ayapel Wetland Complex, Colombia. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(10), 10787-10810. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04734-3>
- Montoya, J., & Ramírez, L. (2018). Cambio climático e inundaciones en Colombia: El caso de La Mojana. *Revista de Climatología Colombiana*, 150-162.
- Nair, P., Medhe, R., Das, S., Chatterjee, U., Singh, T. P., & Ghosh, A. (2025, agosto 27). *Full article: GIS-based flood vulnerability mapping in a tropical river basin using analytical hierarchy process (AHP) and machine learning approach.* 40. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10106049.2025.2551261>
- Oikonomidis, D., Dimogianni, S., Kazakis, N., & Voudouris, K. (2015). A GIS/Remote Sensing-based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece. *Journal of Hydrology*, 525, 197-208. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.056>

- Organisation Panaméricaine de la Santé. (2024). *Dos años apoyando a La Mojana en la emergencia por inundaciones*. <https://www.paho.org/es/historias/dos-anos-apoyando-mojana-emergencia-por-inundaciones>
- PNUD. (2020). *Plan de manejo y conservación de los recursos hídricos en La Mojana: Informe final de diagnóstico*.
- Posada García, L., & Duque Marín, O. A. (2006). *Diques fusibles para el control de inundaciones en La Mojana*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8072>
- Rahman, Z. U., Ullah, W., Bai, S., Ullah, S., Jan, M. A., Khan, M., & Tayyab, M. (2023). GIS-based flood susceptibility mapping using bivariate statistical model in Swat River Basin, Eastern Hindukush region, Pakistan. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1178540>
- Saaty, T. L. (1990a). An Exposition of the AHP in Reply to the Paper “Remarks on the Analytic Hierarchy Process”. *Management Science*. (world). <https://doi.org/10.1287/mnsc.36.3.259>
- Saaty, T. L. (1990b). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research, Decision making by the analytic hierarchy process: Theory and applications*, 48(1), 9-26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- Sahraei, R., Kanani-Sadat, Y., Safari, A., & Homayouni, S. (2023). FLOOD SUSCEPTIBILITY MODELLING USING GEOSPATIAL-BASED MULTI-CRITERIA DECISION MAKING IN LARGE SCALE AREAS. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4-W1-2022, 677-683. ISPRS WG IV/3
ISPRS GeoSpatial Conference 2022, Joint 6th Sensors and Models in Photogrammetry and Remote Sensing (SMPR) and 4th Geospatial Information Research (GIResearch) Conferences - 19–22 February 2023, Tehran, Iran (virtual). <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-677-2023>

- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2020). *Cartografía geológica y geomorfológica de Colombia. Bogotá: SGC*. <https://www2.sgc.gov.co/sgc/mapas/paginas/geoportal.aspx>
- Sevillano Rodríguez, M. E. S. (2020). Zonificación de la amenaza ante inundaciones a partir de un método de evaluación multicriterio en la ciudad de Santiago de Cali, Colombia. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, (25), 47-76. <https://doi.org/10.21138/GF.661>
- Shrestha, S., Dahal, D., Poudel, B., Banjara, M., & Kalra, A. (2025). Flood Susceptibility Analysis with Integrated Geographic Information System and Analytical Hierarchy Process: A Multi-Criteria Framework for Risk Assessment and Mitigation. *Water*, 17(7), 937. <https://doi.org/10.3390/w17070937>
- Sun, H., Zhang, X., Ruan, X., Jiang, H., & Shou, W. (2024). Mapping Compound Flooding Risks for Urban Resilience in Coastal Zones: A Comprehensive Methodological Review. *Remote Sensing*, 16(2), 350. <https://doi.org/10.3390/rs16020350>
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2013). Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of Hydrology*, 504, 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.034>
- Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*, 512, 332-343. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.008>
- Torres Torres, T. A., & Torres Rozo, A. (2016). *Plan de mitigación del riesgo por inundaciones con enfoque al mejoramiento de la salud. Caso de estudio: Municipio de Nechi región de La Mojana*. <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/10ccb2a2-6f3d-4211-bb16-4564aaa5ed04>

- UNGRD. (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa: Escala detallada*. Imprenta Nacional.
- UNGRD. (2022). *Informe anual de eventos hidrometeorológicos en Colombia*. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). (2015a). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030* | UNDRR. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
- United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). (2015b). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030* | UNDRR. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
- Urquijo-Merchán, D. C., & Vargas-Gámez, M. (2013). Gestión del riesgo de inundaciones en contextos rurales: Evaluación de la vulnerabilidad en La Mojana. *Revista de Estudios Ambientales. Revista de Estudios Ambientales*, 5(1), 22-35.
- Valle Junior, R. F., Varandas, S. G. P., Sanches Fernandes, L. F., & Pacheco, F. A. L. (2014). Environmental land use conflicts: A threat to soil conservation. *Land Use Policy*, 41, 172-185. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.05.012>
- Wang, Y., Li, Z., Tang, Z., & Zeng, G. (2011). A GIS-Based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resources Management*, 25(13), 3465-3484. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9866-2>