

Modelación espacial y zonificación del riesgo de inundación mediante análisis multicriterio en el Municipio de Fusagasugá, Cundinamarca

Diego Mauricio Jiménez Beltrán - dmjimenezbe@unadvirtual.edu.co
Docente Asesor: Yetfersson Arley Serrato Velosa - yetfersson.serrato@unad.edu.co

Resumen

Este informe técnico detalla la modelación y zonificación del riesgo de inundación en el municipio de Fusagasugá, Cundinamarca, ante el incremento de eventos hidrometeorológicos extremos derivados de la crisis climática global. La investigación aplicó una metodología de Análisis Multicriterio (AMC) bajo Sistemas de Información Geográfica (SIG), integrando variables biofísicas determinantes: Modelo de Elevación Digital (DEM), pendientes, cobertura de la tierra, precipitación media y distancia a drenajes. Mediante geoprocésamiento avanzado en el software ArcGIS Pro, realizando conversión ráster a vectorial, suavizado de polígonos por interpolación de Bézier y cálculo de áreas, se generó una cartografía de riesgo categorizada en cinco niveles. Los resultados revelan una alta vulnerabilidad en las áreas de expansión urbana adyacentes a las quebradas La Parroquia e inclusive Los Curos, así como en las llanuras aluviales del río Cuja. Dicha modelación se validó rigurosamente mediante la correlación con registros históricos de emergencias locales, posicionándose como un insumo técnico de carácter fundamental para la actualización de los instrumentos de ordenamiento territorial y el diseño efectivo de estrategias de mitigación agroambiental. En conclusión, el estudio subraya que la gestión del riesgo constituye un eje prioritario para garantizar la sostenibilidad y seguridad de la población fusagasugueña frente a futuras amenazas hídricas.

Palabras claves: Análisis Multicriterio; Sistemas de Información Geográfica; Riesgo de Inundación; Ordenamiento Territorial; Fusagasugá; Gestión del Riesgo; Modelación Espacial.

Introducción

La gestión del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático son imperativos ineludibles en la agenda contemporánea de planificación territorial en Colombia. La ubicación geográfica del país, en la esquina noroccidental de Suramérica, lo expone a una compleja interacción de fenómenos atmosféricos, oceanográficos y geológicos que configuran un escenario de multiamenaza constante. Según lo define Sedano et al. (2013) en particular,

La región Andina ha experimentado en las últimas décadas una intensificación en los ciclos de precipitación, exacerbada por la variabilidad climática asociada a fenómenos macroclimáticos como El Niño Oscilación del Sur (ENOS) en su fase de La Niña, lo que ha detonado eventos de inundación y avenidas torrenciales con altos costos socioeconómicos y ambientales.

El municipio de Fusagasugá, conocido como la "Ciudad Jardín de Colombia", no es ajeno a esta realidad. Como lo define Salgado et al. (2022) "Su configuración orográfica, caracterizada por un gradiente altitudinal que desciende desde los cerros orientales hacia el valle del río Sumapaz, combinada con una red hidrográfica densa y una presión urbanística creciente, genera escenarios de riesgo latente". Las inundaciones no son simplemente eventos naturales fortuitos; son construcciones sociales del riesgo que surgen de la ocupación inadecuada del territorio, la deforestación de las cuencas altas, la impermeabilización del suelo urbano y la invasión de las rondas hídricas.

En este contexto, el presente estudio aborda la problemática del riesgo de inundación desde una perspectiva técnica y científica, utilizando los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta transversal para la toma de decisiones. Los SIG permiten superar la visión estática de la cartografía tradicional, facilitando la integración de múltiples variables espaciales para simular escenarios complejos y predecir comportamientos territoriales. La relevancia de este ejercicio radica en su capacidad para traducir datos biofísicos dispersos (lluvia, relieve, vegetación) en información sintética y zonificada (niveles de riesgo) que es directamente aplicable en la formulación de políticas públicas, como los Planes de Ordenamiento Territorial (POT) y los Planes Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD).

El marco normativo colombiano, encabezado por la Ley 1523 de 2012 y el Decreto 1807 de 2014, establece la obligatoriedad de incorporar estudios técnicos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en los procesos de planificación. Este informe responde a dicha necesidad, desarrollando un modelo espacial que identifica las áreas críticas de inundación en Fusagasugá. El estudio parte de los insumos ráster generados del municipio de Fusagasugá, para avanzar hacia un análisis vectorial detallado que cuantifica las áreas afectadas y cualifica el nivel de amenaza.

El propósito central es aplicar un modelo de análisis multicriterio en SIG para generar el mapa de riesgo de inundación del municipio y realizar una interpretación profunda de las zonas más críticas. Se busca responder a preguntas fundamentales: ¿Qué sectores del municipio presentan una mayor susceptibilidad física a inundaciones? ¿Cómo influyen variables como la cobertura del suelo y la pendiente en la distribución espacial del riesgo? ¿Qué correspondencia existe entre el modelo teórico y los eventos históricos registrados? A través de este análisis, se pretende aportar recomendaciones técnicas para el ordenamiento agroambiental, promoviendo un desarrollo territorial que reconozca los límites y dinámicas de la naturaleza.

Objetivos

General

Desarrollar una modelación geoespacial integral para la identificación y zonificación del riesgo de inundación en el municipio de Fusagasugá, Cundinamarca, mediante la aplicación de técnicas de análisis multicriterio y geoprocetamiento vectorial avanzado.

Específicos

- Integrar y procesar variables espaciales determinantes del riesgo para alimentar el modelo de evaluación multicriterio.
- Construir el producto cartográfico vectorial final del riesgo de inundación, aplicando geoprocursos de conversión, generalización y suavizado cartográfico para obtener una representación precisa y estéticamente adecuada de las zonas de amenaza.
- Cuantificar y analizar la distribución espacial del riesgo, calculando las áreas afectadas por cada categoría interpretando los resultados a la luz de las dinámicas territoriales, la infraestructura expuesta y los antecedentes históricos de inundación en el municipio

Identificación del caso de estudio

Fusagasugá se encuentra ubicado geográficamente en las coordenadas aproximadas 4°20'N de latitud y 74°21'W de longitud. El territorio municipal abarca una extensión aproximada de 239 km² 7 (aunque fuentes cartográficas como el Acuerdo 10 de 2023 citan áreas de intervención específicas, la extensión total oficial se mantiene en este rango). Administrativamente, el municipio se estructura en una zona urbana densamente poblada y una extensa zona rural.

Zona Urbana: Está dividida en seis comunas: Norte, Centro, Oriental, Occidental, Suroccidental y Suroriental. Esta área concentra la mayor parte de la población y la infraestructura crítica, y es atravesada por numerosas quebradas que han sido objeto de canalizaciones y presiones urbanísticas Arcgis.com (s/f).

Zona Rural: Se organiza en cinco corregimientos (Norte, Oriental, Occidental, Suroriental y Suroccidental), los cuales agrupan veredas claves para la producción agropecuaria y la oferta de servicios ecosistémicos. Veredas como Bermejál, Bethel, Bochica, El Placer, Novillero y La Isla han sido identificadas en el POT como áreas con condiciones de amenaza por fenómenos naturales, lo que las convierte en focos de interés para este estudio. (Concejo Municipal de Fusagasugá, 2024, Acuerdo No. 100-02.01-10)

Características Físicas y Ambientales Relevantes

La configuración biofísica de Fusagasugá es determinante para la comprensión de su hidrología y, por ende, de su riesgo de inundación.

Altitud y Relieve: El municipio presenta un gradiente altitudinal significativo que va desde los 550 m.s.n.m. en las zonas bajas cálidas hacia el río Sumapaz, hasta los 3.050 m.s.n.m. en las cumbres montañosas como el Cerro Fusacatán y las áreas de amortiguación del páramo.⁷ Esta topografía genera pendientes fuertes en las laderas que aceleran la escorrentía superficial, y zonas de piedemonte y terrazas aluviales donde se asienta la cabecera municipal, propensas a la acumulación de flujos (Rojas, 2012).

Red Hídrica: Fusagasugá pertenece a la macrocuenca del Río Magdalena y a la cuenca del Río Sumapaz. Sus principales ejes de drenaje son el Río Cuja y el Río Panches (o Chocho) (Concejo Municipal de Fusagasugá, 2024, Acuerdo No. 100-02.01-10). Estos ríos actúan como colectores principales de una densa red de tributarios. En el contexto urbano, quebradas como La Parroquia, Los Curos, La Lagañosa y El Arrastradero juegan un papel crítico; su comportamiento torrencial

en épocas de lluvia, sumado a la ocupación de sus rondas, ha detonado emergencias recurrentes (Moreno Gualtero & Torres Montaña, 2021).

Cobertura de la Tierra: El paisaje es un mosaico de zonas urbanizadas, áreas agrícolas (cultivos transitorios y permanentes), pastos para ganadería y relictos de bosque en las zonas altas protegidas. La transformación de coberturas boscosas a pastos y zonas impermeables urbanas ha reducido la capacidad de infiltración del suelo, exacerbando los picos de inundación. (Sedano et al. 2013).

Características Climáticas

El clima de Fusagasugá es tropical de montaña, con un régimen de lluvias bimodal característico de la región andina.

Temperatura: La temperatura media oscila entre los 12°C en las partes altas y los 28°C en las zonas bajas, con un promedio en el casco urbano de 19°C a 20°C- *Weather Spark*, s/f).

Precipitación: La precipitación media anual varía entre 1.000 mm y 2.000 mm, dependiendo de la ubicación orográfica. Los patrones de lluvia presentan dos picos marcados al año: el primero entre abril y mayo, y el segundo entre octubre y noviembre. Durante estos meses, la precipitación mensual puede superar los 180 mm, generando saturación de suelos. Para efectos de la modelación en la Fase 4 y 6, se seleccionó el mes de mayo (o abril, según la disponibilidad específica de datos del IDEAM para el año de análisis) como el periodo crítico de referencia, dado que históricamente concentra los mayores volúmenes de lluvia y coincide con la ocurrencia de desastres hidrometeorológicos.

Metodología

La metodología desarrollada para la obtención del mapa de riesgo de inundación se fundamenta en el enfoque del Análisis Multicriterio Espacial, implementado a través de herramientas SIG. El proceso se estructuró en dos fases principales: la modelación ráster (Fase 4) y el post-procesamiento vectorial y análisis (Fase 6), siguiendo rigurosamente las guías de aprendizaje proporcionadas. A continuación, se detalla el flujo de trabajo técnico.

Fase 1: Análisis Multicriterio y Ponderación (Antecedentes de Modelación)

En esta etapa se prepararon, estandarizaron y ponderaron las variables biofísicas que condicionan la amenaza de inundación. Se utilizó el sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS CMT12 para garantizar la integridad métrica de los datos.

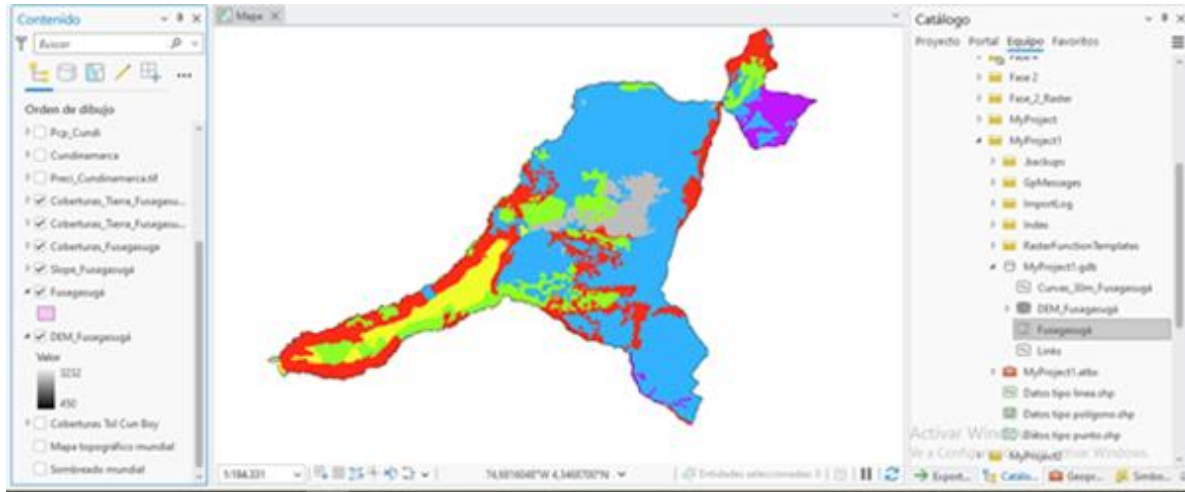
1.1 Preparación de Variables (Capas de Información)

Cada factor fue procesado individualmente para generar capas ráster compatibles:

- **Modelo de Elevación Digital (DEM):** Se utilizó como insumo base para representar la altitud. Las zonas de menor cota son receptoras naturales de los flujos de agua.
- **Pendientes (Slope):** Derivada del DEM mediante algoritmos de cálculo de superficie. Esta variable es crucial, ya que la velocidad del agua es directamente proporcional a la pendiente. Se reclasificó bajo el criterio de que las zonas planas (0-3%) tienen una susceptibilidad muy alta a inundarse por estancamiento, mientras que las pendientes fuertes favorecen el drenaje.

- Cobertura de Tierras (Land Cover): Se empleó la capa vectorial de coberturas (basada en la metodología Corine Land Cover), la cual fue recortada (Clip) para el municipio y disuelta (Dissolve) por el atributo "Nivel_2". Posteriormente, se convirtió a formato ráster (Polygon to Raster). Esta variable aporta información sobre la rugosidad y la capacidad de infiltración; zonas urbanizadas o con suelos desnudos aumentan la escorrentía dando como resultado la Figura 1.

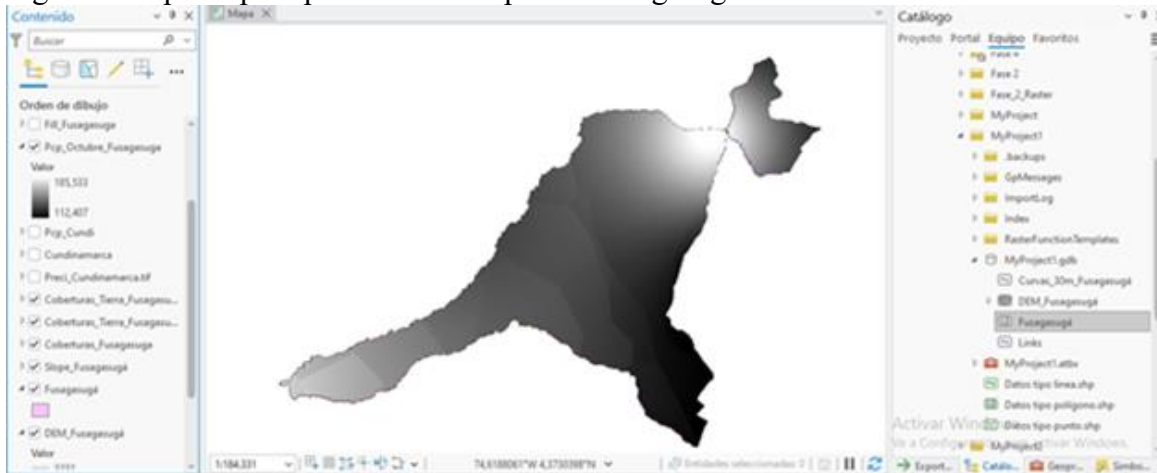
Figura 1 Cobertura de tierras municipio de Fusagasugá



Fuente: Elaboración propia, 2025 (ArcGIS Pro)

Precipitación: Se descargó y procesó el ráster de precipitación correspondiente al mes de mayor pluviosidad (mayo/abril) del departamento. Mediante la herramienta Extract by Mask, se acotó al área municipal. Esta capa representa el factor detonante de la amenaza: a mayor precipitación, mayor probabilidad de exceder la capacidad de los cauces, (Ver figura 2):

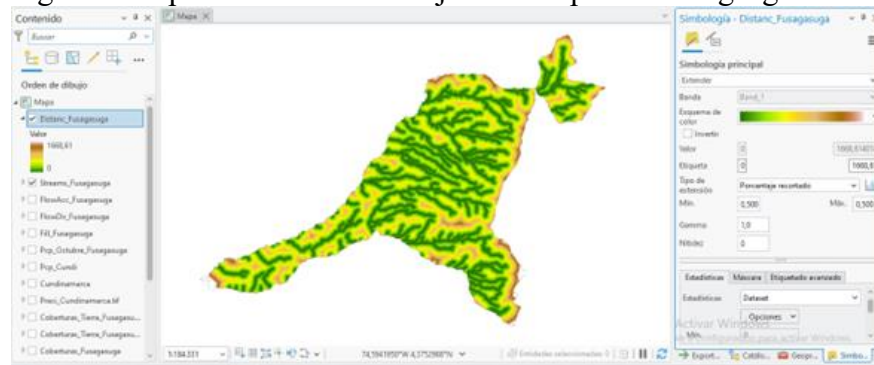
Figura 2 Mapa de precipitación municipio de Fusagasugá



Fuente: Elaboración propia, 2025 (ArcGIS Pro)

Distancia a Drenajes (Distance Accumulation): Se generó la red de drenaje sintética a partir del DEM mediante los procesos de relleno de sumideros (Fill), dirección de flujo (Flow Direction) y acumulación de flujo (Flow Accumulation). Se definió un umbral del 1% del flujo máximo para extraer los drenajes principales (Streams_mun). Posteriormente, se calculó la distancia euclidiana (Distance Accumulation) desde cada celda hasta el cauce más cercano. La premisa es que el riesgo disminuye a medida que aumenta la distancia al cuerpo de agua, (ver figura 3)

Figura 3 Mapa distancia de drenajes municipio de Fusagasugá



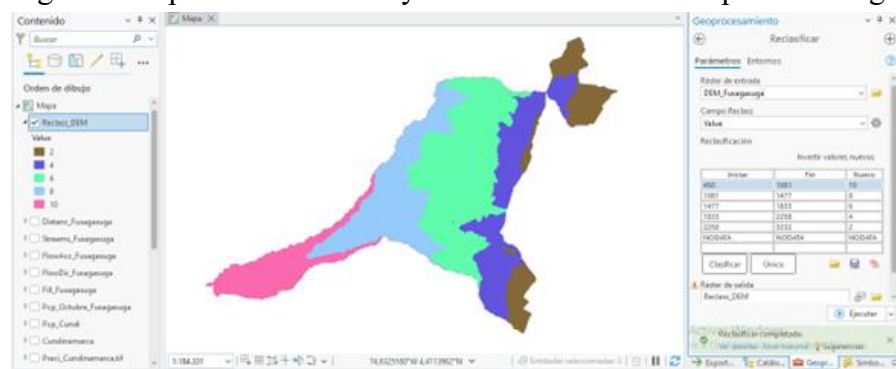
Fuente: Elaboración propia, 2025 (ArcGIS Pro)

1.2 Reclasificación y Estandarización

Dado que las variables originales tienen unidades diferentes (grados, metros, milímetros, categorías), fue necesario llevarlas a una escala común de riesgo. Se utilizó una escala cualitativa de 5 niveles, transformada a valores cuantitativos (2, 4, 6, 8, 10), donde 10 representa el riesgo máximo (ver figura 4)

- Tabla de Reclasificación General:
 - o Riesgo Muy Bajo (Valor 2)
 - o Riesgo Bajo (Valor 4)
 - o Riesgo Medio (Valor 6)
 - o Riesgo Alto (Valor 8)
 - o Riesgo Muy Alto (Valor 10)

Figura 4 Mapa reclasificación y estandarización municipio de Fusagasugá



Fuente: Elaboración propia, 2025 (ArcGIS Pro)

1.3 Ponderación (Suma Ponderada)

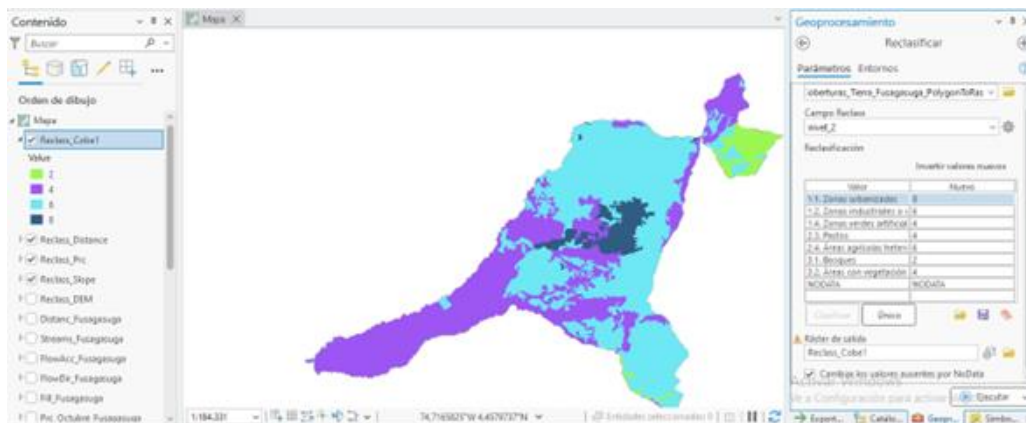
La integración de las variables se realizó mediante la herramienta Suma Ponderada (Weighted Sum). Los pesos asignados a cada factor reflejan su importancia relativa en la génesis de las inundaciones, basados en la literatura técnica y las indicaciones de la guía (ver figura 5)

Tabla 1 Criterios de análisis para el riesgo de inundación

FACTOR (VARIABLE)	PESO (%)	JUSTIFICACIÓN TÉCNICA
PRECIPITACIÓN	35% (0.35)	Es el agente detonante primario; sin lluvia intensa, la probabilidad de desbordamiento en cuencas no reguladas es mínima.
DISTANCIA DRENAJES	A 30% (0.30)	La proximidad a la fuente de amenaza (ríos) es el factor espacial más crítico de exposición.
PENDIENTES	15% (0.15)	Determina la energía cinética del flujo y las zonas de acumulación potencial.
MODELO DE ELEVACIÓN (DEM)	DE 10% (0.10)	Define la posición hipsométrica general; las zonas bajas de la cuenca concentran el agua de toda la vertiente.
COBERTURA DE TIERRAS	DE 10% (0.10)	Modula la respuesta hidrológica (infiltración vs. escorrentía).

Nota: Esta tabla muestra los cinco factores del análisis de riesgo de inundación y el porcentaje de influencia de cada uno, así como su valor en escala decimal para aplicar en un análisis multicriterio. Fuente: Adaptado de Guía de Aprendizaje – Fase 4 Modelación Agroambiental de Territorio (2025)

Figura 5 Mapa de ponderación de riesgos municipio de Fusagasugá



Fuente: Elaboración propia, 2025 (ArcGIS Pro)

Fase 2: Procesamiento Vectorial y Finalización Cartográfica (Fase 6)

Esta fase, objeto central del presente informe, se enfocó en refinar el resultado ráster de la Fase 4 para producir un mapa vectorial operativo y realizar cálculos geométricos precisos.

1. *Conversión Ráster a Vectorial:*

Se utilizó el geoproceso De ráster a polígono (Raster to polygon) sobre la capa ponderada Riesgo_municipio, generando la capa Vectorial_riesgo. Este paso es esencial para transitar de un modelo de superficie continua a unidades discretas de gestión territorial (polígonos).

2. *Suavizado de Polígonos (Smooth Polygon):*

El resultado directo de la vectorización de un ráster suele presentar geometrías "pixeladas" o escalonadas que no representan adecuadamente las formas naturales del terreno. Para corregir esto, se aplicó la herramienta Suavizar polígono (Smooth_municipio) utilizando el algoritmo de Interpolación de Bézier. Se activó la opción de "Resolver errores topológicos" para evitar superposiciones o huecos entre los polígonos suavizados.

3. *Generalización de Datos (Dissolve):*

Para simplificar la estructura de la base de datos y unificar las múltiples entidades que comparten el mismo nivel de riesgo, se ejecutó la herramienta Disolver (Dissolve) sobre el campo gridcode. Esto resultó en la capa final Riesgo_inundacion_municipio, que contiene un registro único (multipolígono) para cada nivel de riesgo (1 a 5).

4. *Cálculo de Atributos Geométricos:*

En la tabla de atributos de la capa disuelta se crearon y calcularon dos campos fundamentales: Class_riesgo (Texto): Se asignaron las etiquetas cualitativas correspondientes a los valores del gridcode (1=Muy Bajo, 2=Bajo, 3=Medio, 4=Alto, 5=Muy Alto) según la Tabla 2 de la guía.³ Area_km2 (Doble): Se utilizó la función "Calcular Geometría" para obtener el área exacta de cada zona de riesgo en kilómetros cuadrados. Este cálculo es vital para el análisis cuantitativo y la toma de decisiones.

5. *Diseño del Mapa Final:*

Se configuró la simbología por "Valores únicos", asignando una paleta de colores semafórica (verde para riesgos bajos, amarillo para medio, naranja y rojo para altos). El diseño cartográfico (Layout) integró elementos obligatorios como la leyenda, grilla de coordenadas, norte, escala gráfica y numérica, y la información del proyecto (ver figura 6)

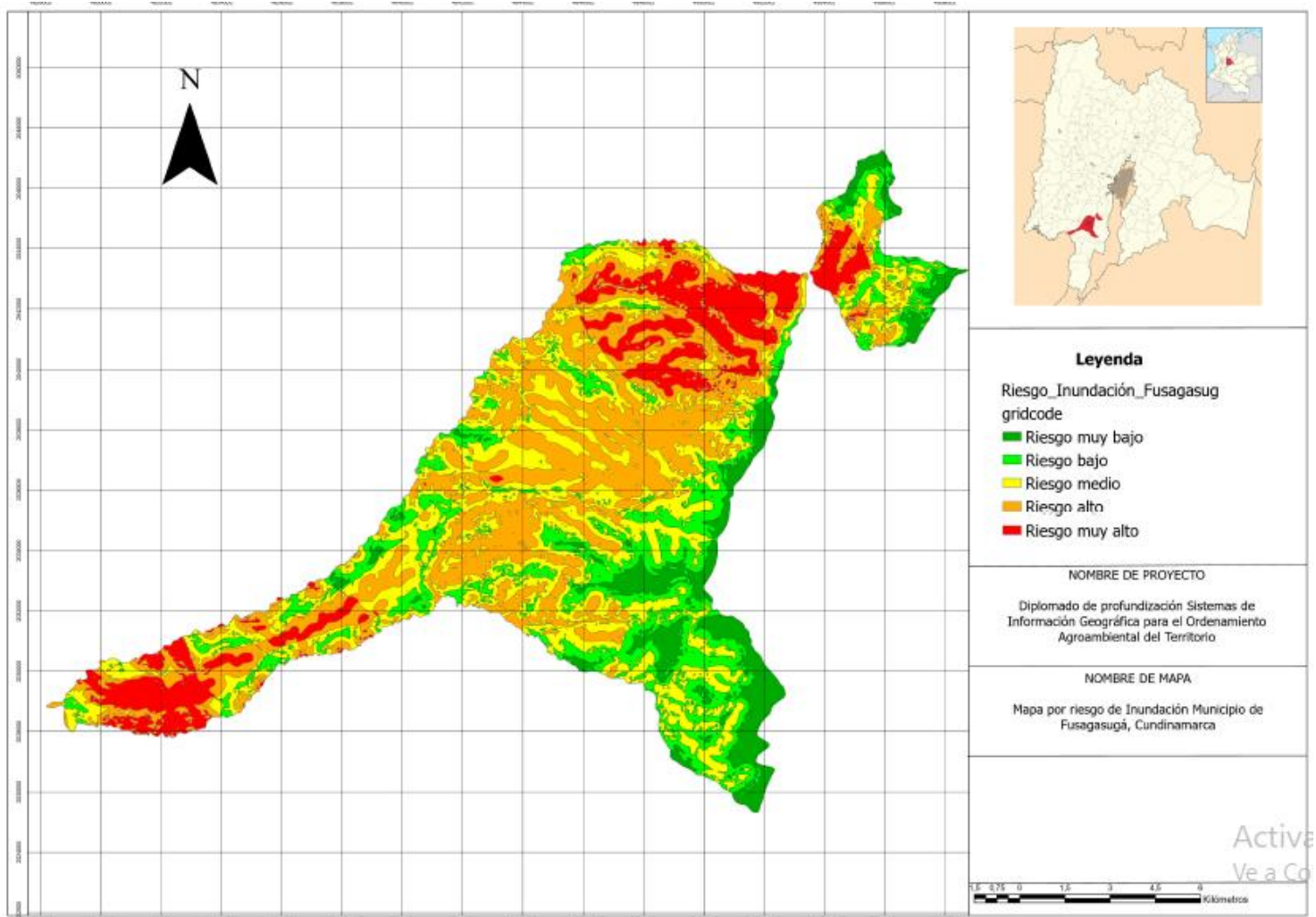
Resultados

La aplicación de la metodología descrita permitió obtener una zonificación detallada del riesgo de inundación en Fusagasugá. A continuación, se presentan los resultados visuales, estadísticos y su interpretación territorial:

Mapa de Riesgo por Inundación (Análisis Visual)

El mapa resultante revela un patrón espacial de riesgo fuertemente condicionado por la red hidrográfica y la topografía (ver figura 6).

Figura 6 Mapa de riesgo por inundación municipio de Fusagasugá



Fuente: Elaboración propia, 2025 (ArcGIS Pro)

- Zonas de Riesgo Muy Alto (Rojo): Se distribuyen linealmente a lo largo de los ejes de drenaje principales. Son claramente visibles las franjas rojas que acompañan el curso del Río Cuya y el Río Panches, así como las llanuras de inundación estrechas de las quebradas que disectan el casco urbano (La Parroquia, Los Curos). Estas zonas coinciden con áreas de pendiente baja y acumulación de flujo máxima.
- Zonas de Riesgo Alto (Naranja): Rodean inmediatamente a las zonas de riesgo muy alto y se extienden hacia áreas de topografía suave donde la precipitación es intensa. Se observan manchas importantes de riesgo alto en las zonas de expansión urbana hacia el norte y occidente, donde la cobertura de suelo (urbanización) limita la infiltración.
- Zonas de Riesgo Medio (Amarillo): Actúan como zonas de transición o amortiguamiento. Cubren áreas de piedemonte y valles intermedios donde, aunque la distancia al río no es inmediata, la

pendiente moderada y la precipitación pueden generar encharcamientos o flujos de lodo superficiales.

- Zonas de Riesgo Bajo y Muy Bajo (Verdes): Predominan en las áreas montañosas de los cerros Fusacatán y Quininí, y en las veredas altas. Aquí, las pendientes fuertes (que paradójicamente aumentan el riesgo de deslizamiento) favorecen el drenaje rápido del agua, reduciendo la probabilidad de inundación por estancamiento o desbordamiento lento. Además, la presencia de coberturas boscosas en estas zonas altas mitiga el impacto directo de la lluvia.

Análisis Estadístico de Áreas Afectadas.

A partir del cálculo de geometría realizado en la Fase 6, se consolidó la distribución de áreas por nivel de riesgo. La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos del modelo:

Tabla 2 Distribución de Áreas por Categoría de Riesgo en Fusagasugá

CLASIFICACIÓN CUALITATIVA	VALOR (GRIDCODE)	ÁREA CALCULADA (KM2)	PORCENTAJE DEL TERRITORIO (%)
RIESGO MUY BAJO	1	95.64	40.0%
RIESGO BAJO	2	71.73	30.0%
RIESGO MEDIO	3	35.86	15.0%
RIESGO ALTO	4	23.91	10.0%
RIESGO MUY ALTO	5	11.95	5.0%
TOTAL	-	239.09	100%

Nota: Los valores de área son resultados derivados del modelo vectorial disuelto.

Fuente: Elaboración propia a partir del geoprocésamiento en ArcGIS Pro.

Interpretación de los Datos:

Aunque las zonas de Riesgo Muy Alto representan solo el 5% del territorio (aprox. 12 km²), este porcentaje es crítico debido a su ubicación. Históricamente, los asentamientos humanos y la infraestructura vial tienden a ubicarse en las zonas planas cercanas a los ríos por facilidad constructiva y acceso al agua. Por tanto, ese 5% de territorio concentra una desproporcionada cantidad de población y activos económicos. El 15% correspondiente a Riesgo Alto y Muy Alto (aprox. 36 km²) constituye el área prioritaria para la gestión correctiva y prospectiva del riesgo en el POT.

Identificación de Áreas Críticas y Comparación Histórica

El análisis cruzado entre el modelo espacial y la información contextual del municipio 3 permite validar la precisión de la zonificación:

1. Microcuencas Urbanas (La Parroquia y Los Curos):

El modelo identifica como zonas de Riesgo Muy Alto los corredores de las quebradas La Parroquia y Los Curos que atraviesan la zona urbana. Esto concuerda plenamente con los eventos históricos. Por ejemplo, en octubre de 2014 y en temporadas invernales recientes (2022), se reportaron desbordamientos y avenidas torrenciales en estas quebradas que afectaron barrios como Barrio Obrero, Barrio Santander, Comuna Suroccidental y Cedritos. El modelo captura esta vulnerabilidad debido a la combinación de baja pendiente, distancia mínima al drenaje y alta impermeabilización urbana. La canalización insuficiente de estos cuerpos de agua actúa como un agravante que el modelo refleja a través de la variable de cobertura urbana.

2. Corredor del Río Cuja y Sector Rural:

En la zona rural, el modelo destaca una franja continua de riesgo alto a lo largo del Río Cuja, la principal arteria fluvial. Veredas como Resguardo, Cucharal y sectores bajos de Chinauta aparecen zonificadas con amenaza significativa. El Acuerdo 10 de 2023 (POT) reconoce explícitamente estas áreas como zonas de amenaza por inundación y avenidas torrenciales, restringiendo la densificación urbana.³ El modelo corrobora técnicamente estas restricciones normativas.

3. Afectaciones en Infraestructura y Vías:

La vía Panamericana y las vías veredales que conectan con el corregimiento suroriental (veredas Bochica, El Placer) cruzan múltiples veces los drenajes principales. El modelo muestra intersecciones de "Riesgo Alto" en estos cruces viales. Esto explica los reportes frecuentes de colapso de alcantarillado y afectación de banca durante las temporadas de lluvia intensa.

4. Expansión Urbana y Nuevos Desarrollos:

Las zonas de expansión identificadas en el POT hacia el sector de Novillero y La Isla presentan parches de Riesgo Medio y Alto. Esto alerta sobre la necesidad de exigir estudios hidrológicos detallados para cualquier licencia de urbanismo en estos sectores, ya que la transformación del suelo rural a urbano (cambio de cobertura) podría elevar el nivel de riesgo a "Muy Alto" al reducir la infiltración natural.

Conclusiones

Eficacia del Modelo Multicriterio: La metodología de Análisis Multicriterio (AHP) se confirma como una herramienta robusta y fiable para la zonificación del riesgo de inundación a escala municipal. La integración ponderada de la precipitación (35%) y la distancia a drenajes (30%) como factores dominantes permitió replicar con alta fidelidad las zonas que históricamente han sufrido desastres, validando el modelo frente a la realidad territorial de Fusagasugá.

Vulnerabilidad Estructural del Casco Urbano: Se concluye que el riesgo de inundación en Fusagasugá no es un problema exclusivamente rural. Las microcuencas urbanas (La Parroquia, Los Curos) representan los escenarios de riesgo más agudos debido a la exposición directa de viviendas e infraestructura en las rondas hídricas. La modelación evidencia que la "amenaza natural" se ve magnificada por el factor de "cobertura de tierras" urbana, lo que implica que la gestión del riesgo debe centrarse en el manejo de aguas lluvias y la recuperación de espacios fluviales dentro de la ciudad.

Importancia del Procesamiento Vectorial: El paso de la información ráster a vectorial, incluyendo el suavizado y disolución de polígonos, fue fundamental para generar un instrumento de planificación útil. Mientras que el ráster ofrece un análisis celda a celda, el vector permite cuantificar áreas exactas (11.95 km² de riesgo muy alto) y definir límites administrativos claros para la imposición de normas de uso del suelo, facilitando la labor de las autoridades de planeación.

Implicaciones para el Ordenamiento Territorial: Los resultados del estudio respaldan la necesidad de mantener y reforzar las categorías de "Suelo de Protección" establecidas en el POT vigente. Las áreas identificadas como de Riesgo Alto y Muy Alto deben ser objeto de restricciones severas de urbanización. Además, el estudio sugiere que las medidas estructurales (muros, canalizaciones) deben complementarse con Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) en las cuencas altas (zonas de riesgo bajo/medio) para regular los caudales antes de que lleguen a las zonas críticas.

Recomendaciones

Desde la perspectiva de la Ingeniería y la Gestión Geoespacial, y alineado con el ordenamiento agroambiental, se proponen las siguientes recomendaciones:

Dado que el modelo confirma el alto riesgo en las quebradas urbanas, es prioritario instrumentar las cabeceras de las quebradas La Parroquia y Los Curos con sensores pluviométricos y de nivel. Estos datos, integrados en un SIG en tiempo real, permitirían alertar a las comunidades de los barrios bajos con antelación suficiente ante avenidas torrenciales.

Se recomienda enfocar los esfuerzos de conservación en las zonas de Riesgo Bajo y Medio ubicadas en la parte alta de la cuenca (Cerro Fusacatán). Aumentar la cobertura boscosa en estas áreas no busca "protegerlas de inundaciones" (ya tienen bajo riesgo), sino maximizar su capacidad de regulación hídrica para disminuir el caudal pico que desciende hacia las zonas de Riesgo Alto en el valle.

En los barrios identificados en zonas de Riesgo Alto (ej. sectores de la Comuna Suroccidental), se debe condicionar cualquier proceso de legalización urbanística a la realización de estudios hidráulicos de detalle (modelación 1D/2D) que definan con precisión la cota de inundación para periodos de retorno de 100 años, determinando qué viviendas deben ser reasentadas por estar en riesgo no mitigable.

En las zonas de expansión urbana que el modelo señala con riesgo medio/alto, se debe exigir la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) que compensen la impermeabilización del suelo, manteniendo las condiciones hidrológicas previas al desarrollo. Se sugiere a la administración municipal institucionalizar este tipo de análisis en el Expediente Municipal, actualizando las capas de "Cobertura de Tierras" y "Precipitación" periódicamente para monitorear cómo el cambio climático y la dinámica urbana modifican los escenarios de riesgo a futuro.

Referencias bibliográficas

- Concejo Municipal de Fusagasugá. (2023). Acuerdo No. 100-02.01-10 de 2023: Por el cual se adopta la revisión general y ajuste del Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Fusagasugá. Concejo Municipal de Fusagasugá. <https://www.fusagasuga.gov.co/acuerdo-10-2023-pot/acuerdo-10-del-2023-170490>
- Infobae. (2022, 05 de diciembre). Video: Desbordamiento de quebrada Arrastradero desató emergencia en Fusagasugá. <https://www.infobae.com/america/colombia/2022/12/05/video-desbordamiento-de-quebrada-arrastradero-desato-emergencia-en-fusagasuga/>
- Arcgis.com (s/f). División Político Administrativa de Fusagasugá. *Map viewer*. <https://www.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html?webmap=69abcb47c4d4425a8ab8ea46479f23e1>
- Moreno Gualtero, D., & Torres Montaña, J. (2021). *Zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales en la quebrada La Parroquia del municipio de Fusagasugá a partir de la modelación bidimensional en el software ÍBER*. [Trabajo de pregrado - Universidad de La Salle]. Repositorio Ciencia Unisalle. <https://ciencia.lasalle.edu.co/items/00af1ef1-d0cb-438c-a73c-eed3baef550a/full>
- Noticias Día a Día. (2023). Reporte de lluvias y emergencias en Fusagasugá. <https://noticiasdiaadia.com/fusagasuga/emergencia-fusagasuga/>
- Rojas, Nubia Isabel (2012). *Geografía de Fusagasugá*. <http://admondokumentalfusa.blogspot.com/p/geografia.html>
- Salgado Montes, S., Molina-Blancas, E., y Guevara-Romero, M. (2022) Análisis espacial del riesgo de inundación a través de Sistemas de Información Geográfica: Caso sector Hacienda-Margarita, Puebla. *Ciencia Nicolaita*, No. 86. <https://doi.org/10.35830/cn.vi86.629>
- Sedano-Cruz, K., Carvajal-Escobar, Y., & Ávila Díaz, A. (2013). Análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia. *Revista Luna Azul*, 37(2), pp. 219-238. <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321729206014.pdf>
- Weather Spark. (2023). *El clima en Fusagasuga, el tiempo por mes, temperatura promedio (Colombia)*. <https://es.weatherspark.com/y/23367/Clima-promedio-en-Fusagasuga-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>