

Modelación del riesgo de inundación mediante análisis multicriterio en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el municipio de Manizales (Caldas)

Autores:

Deiner Jose Conde Sanguino – djcondes@unadvirtual.edu.co

Lily Johana Gamarra Pacheco – ljgamara@unadvirtual.edu.co

Roberth Fabian Santamaria Roa – rfsantamariar@unadvirtual.edu.co

Yulibet Pianeta de la Hoz – ypianetad@unadvirtual.edu.co

Docente asesor: Gina Carolina Posada Correa - gina.posada@unad.edu.co

Resumen

El presente estudio analiza la distribución espacial del riesgo de inundación en el municipio de Manizales, Caldas, mediante la aplicación de técnicas de modelación multicriterio apoyadas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para ello, se integraron capas temáticas de precipitación, pendiente, modelo de elevación digital, distancia a drenajes y coberturas del suelo, las cuales fueron sometidas a procesos de transformación ráster y vectorial, interpolación espacial y reclasificación en cinco niveles cualitativos de riesgo. Mediante operaciones de análisis espacial, cálculos geométricos y la aplicación de simbología, se obtuvo un mapa final que representa la susceptibilidad del territorio frente a eventos de inundación.

Los resultados indican que las categorías de riesgo medio, alto y muy alto abarcan el 69,28 % del área total del municipio, equivalente a 353,89 km², concentrándose principalmente en zonas cercanas a la red hidrográfica y en terrazas fluviales. El riesgo medio representa el 23,17% del territorio, el riesgo alto el 23,01% y el riesgo muy alto el 13,63%. Por su parte, las áreas clasificadas como riesgo bajo y muy bajo ocupan el 30,72% restante, asociadas a sectores con mayor estabilidad geomorfológica. Estos resultados presentan coherencia con registros históricos de afectaciones y aportan insumos técnicos relevantes para la gestión del riesgo y la planificación territorial.

Palabras clave: Análisis multicriterio, Manizales, Modelación espacial, Riesgo de inundación, SIG

Introducción

El riesgo de inundación constituye una de las amenazas naturales de mayor crecimiento a nivel global, tanto en territorios urbanos como rurales, principalmente por la intensificación de eventos hidrometeorológicos extremos asociados al cambio climático. Según el Instituto de Hidrología,

Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2022), Colombia ha experimentado un incremento significativo en la variabilidad climática, con aumentos notables en los volúmenes de precipitación y en la frecuencia de episodios de lluvia extrema, lo que ha favorecido la ocurrencia recurrente de desbordamientos fluviales, avenidas torrenciales, inundaciones pluviales y daños severos en infraestructura vial, viviendas y sistemas productivos. Este fenómeno se agrava particularmente en regiones montañosas, donde la interacción de pendientes pronunciadas, suelos inestables de origen volcánico-andino y una alta densidad de drenajes naturales incrementa de manera exponencial la susceptibilidad territorial ante eventos hidrológicos extremos (UNGRD, 2021; Tellman et al., 2021).

En el caso específico del municipio de Manizales, ubicado en el corazón de la cordillera Central colombiana, su compleja dinámica geomorfológica —caracterizada por altitudes entre 1.800 y 2.150 m s. n. m., fuertes pendientes y una densa red hidrográfica integrada por los ríos Chinchiná, Olivares, Guacaica y numerosas quebradas— lo convierte en un territorio de alta exposición permanente a riesgos hidrogeomorfológicos. El Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de la ciudad documenta desde hace décadas eventos recurrentes de inundación y movimientos en masa que han afectado sectores urbanos consolidados como Aranjuez, San José, Persia y la zona industrial, así como áreas rurales dedicadas a la producción de café, plátano y ganadería, donde la erosión acelerada y la pérdida de suelo productivo representan amenazas crecientes para la seguridad alimentaria local (Alcaldía de Manizales, 2017). Estos antecedentes históricos, combinados con proyecciones climáticas que anticipan mayor intensidad y frecuencia de lluvias extremas en la región andina, evidencian la necesidad urgente de herramientas analíticas robustas que permitan identificar, cuantificar y priorizar zonas críticas (IDEAM, 2022; Suárez et al., 2024).

En este contexto, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han consolidado como instrumentos fundamentales para la evaluación integral del riesgo, al facilitar la integración de variables ambientales heterogéneas, el procesamiento espacial de grandes volúmenes de información y la generación de modelos predictivos que apoyan la toma de decisiones informada (Goodchild, 2020; Olaya, 2020). Especialmente, la combinación de análisis multicriterio (MCA) con plataformas SIG permite ponderar y superponer factores topográficos, hidrológicos, climáticos y de uso del suelo para construir escenarios de riesgo altamente detallados, superando las limitaciones de enfoques tradicionales y logrando una representación más precisa de la susceptibilidad espacial (Efraimidou & Spiliotis, 2024; Malczewski & Rinner, 2015).

Con base en lo anterior, el presente estudio tiene como propósito principal aplicar un modelo de análisis multicriterio en ambiente SIG para generar el mapa de riesgo de inundación del municipio de Manizales, identificando y caracterizando las zonas de mayor susceptibilidad mediante la integración de capas temáticas derivadas de variables biofísicas y climáticas. A través de la interpretación de los resultados obtenidos, se busca no solo validar el modelo con registros históricos de afectaciones, sino también aportar insumos técnicos y cartográficos concretos para

el fortalecimiento del ordenamiento agroambiental del territorio, la planificación urbana resiliente y la gestión integral del riesgo de desastres en un municipio que enfrenta crecientes desafíos derivados del cambio climático y la presión antrópica sobre sus ecosistemas estratégicos.

Objetivos

General

Modelar el riesgo de inundación en el municipio de Manizales (Caldas) mediante análisis multicriterio en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Específicos

1. Transformar y procesar las capas temáticas asociadas al riesgo mediante herramientas SIG para generar el mapa vectorial reclasificado del municipio.
2. Calcular las áreas correspondientes a cada categoría cualitativa de riesgo e identificar los sectores territoriales con mayor nivel de criticidad.
3. Comparar los resultados del modelo espacial con los registros históricos de afectaciones y analizar el impacto potencial sobre comunidades, infraestructura y ecosistemas.

Identificación del caso de estudio

El municipio de Manizales se ubica en el departamento de Caldas, en plena región andina colombiana, y cuenta con una superficie aproximada de 508 km² que integra áreas urbanas, rurales, productivas y zonas de protección ambiental. Su territorio se extiende sobre el costado occidental de la cordillera Central, lo que le otorga un relieve fuertemente montañoso. Las altitudes se encuentran entre los 1.800 y 2.150 m s. n. m., rango que influye de manera directa en los procesos hidrológicos, la distribución de las lluvias y la dinámica ambiental del municipio. (Alcaldía de Manizales, 2017).

Figura 1

Localización Municipio de Manizales en el departamento de Caldas – Colombia



Fuente. *Elaboración Propia a partir de Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/AIRBUS DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, The GIS User Community.*

Desde el punto de vista biofísico presenta un régimen de lluvias bimodal típico de los Andes centrales. Los periodos más lluviosos se concentran entre abril–mayo y octubre–noviembre. De acuerdo con el IDEAM (2022), el municipio registra más de 2.200 mm de precipitación al año, con variaciones asociadas a la altitud y la orientación del relieve. Esta elevada pluviosidad genera condiciones propicias para procesos de saturación de suelos, escorrentía y eventos de inundación, razón por la cual la precipitación es un insumo central en el análisis de riesgo; así mismo sus suelos predominantes se originan a partir de materiales volcánicos, lo que les confiere una alta porosidad y buena capacidad de retención de agua. No obstante, en zonas de pendiente fuerte tienden a presentar inestabilidad estructural y susceptibilidad a procesos erosivos. En áreas rurales se emplean en actividades agrícolas y ganaderas, con niveles de fertilidad moderados, mientras que en laderas más pronunciadas el suelo suele ser más delgado y frágil. La variación en textura, profundidad y humedad de los suelos incide directamente en los patrones de infiltración y escorrentía superficial. (UNGRD, 2021).

Su red hidrográfica es una red hídrica muy densa, integrada por los ríos Chinchiná, Guacaica, Olivares y Manizales, además de numerosas quebradas que descienden desde las montañas. Esta red determina zonas con mayor potencial de inundación, especialmente en terrazas fluviales,

cauces estrechos y sectores donde convergen flujos de agua. La configuración hidrográfica es, por tanto, un elemento clave en la identificación de áreas vulnerables. (IDEAM, 2022).

Los sistemas productivos predominantes en las zonas rurales incluyen cultivos de café, plátano, frutales y ganadería extensiva, actividades que se desarrollan principalmente en suelos frágiles y pendientes fuertes, lo que los hace particularmente vulnerables a la erosión hídrica y a la pérdida de fertilidad ante eventos de lluvias intensas, no obstante, estos usos del suelo influyen en la dinámica hidrológica local, ya que modifican la cobertura vegetal y pueden aumentar o disminuir los niveles de infiltración dependiendo del manejo agrícola (Alcaldía de Manizales, 2017).

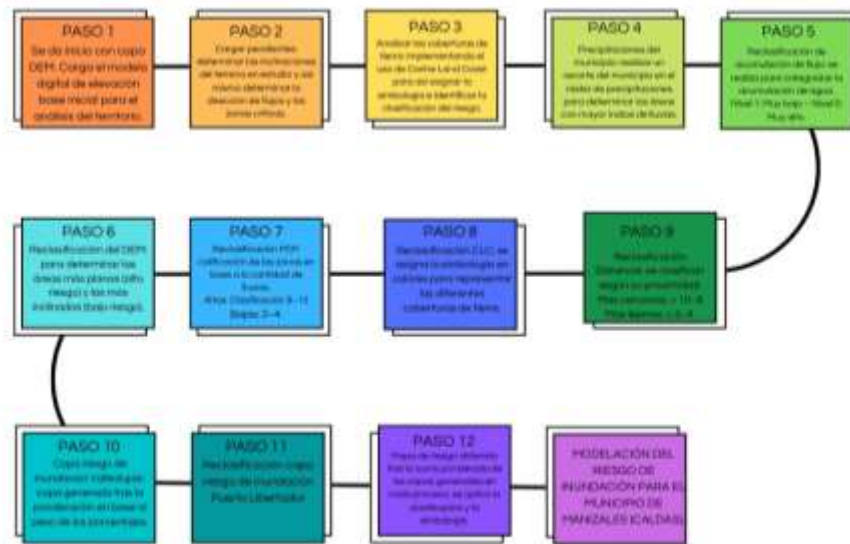
En cuanto a los antecedentes de riesgo, el Plan de Ordenamiento Territorial documenta desde 2017 afectaciones recurrentes por inundaciones y movimientos en masa en sectores urbanos como Aranjuez, San José y la zona industrial, así como en áreas rurales con vocación agropecuaria (Alcaldía de Manizales, 2017). La Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres reporta que entre 2010 y 2021 se registraron múltiples emergencias hidrometeorológicas en el municipio, con daños significativos en infraestructura vial, viviendas y sistemas productivos, asociados principalmente a los periodos de mayor precipitación (UNGRD, 2021). Estos eventos históricos confirman la alta exposición del territorio y justifican la necesidad de modelos espaciales de riesgo como el desarrollado en el presente estudio.

Metodología

La metodología implementada para la modelación del riesgo de inundación en el municipio de Manizales (Caldas) se basó en el uso de herramientas avanzadas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y un enfoque de análisis multicriterio. Este enfoque permitió identificar, clasificar y mapear las zonas con mayor vulnerabilidad a inundaciones, integrando diversas variables espaciales, hidrometeorológicas y topográficas. La metodología comenzó con la recopilación de datos de precipitación, modelo de elevación digital (DEM) y uso del suelo, con los cuales se elaboraron mapas temáticos que permitieron visualizar la distribución de los niveles de riesgo en el territorio. Además, se utilizaron análisis espaciales para evaluar la influencia de factores clave como la pendiente, la proximidad a cuerpos de agua y la capacidad de drenaje del terreno. La aplicación del análisis multicriterio permitió asignar ponderaciones específicas a cada variable según su impacto en el riesgo de inundación, lo que resultó en la clasificación del territorio en diferentes niveles de riesgo (alto, medio, bajo y muy bajo). Este enfoque permitió generar información precisa para la toma de decisiones y el diseño de estrategias de mitigación y planificación territorial en Manizales.

Figura 2

Diagrama metodológico del riesgo de inundación mediante análisis multicriterio en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para el municipio de Manizales (Caldas).



Fuente. Diseño propio de autor, 2025

Este análisis multicriterio en el municipio de Manizales se desarrolló con la ayuda de los sistemas de información geográfica, el primer paso permitió recopilar y depurar las capas bases entre ellas (coberturas del suelo, distancias de drenajes, DEM, precipitaciones y pendientes, las cuales se proyectan con el sistema de coordenadas MAGNA – SIRGAS CTM12, garantizando que los resultados obtenidos sean coherentes y compatibles para los futuros procesos, tal cual como lo indican (Ariza & Bernal, 2021; Chuvieco, 2018; Eastman, 2016) puedan precisar más adelante en el Geoproceso de ponderación. Es fundamental que los resultados sean compatibles ya que a la hora de aplicar el Geoproceso de ponderación estos elementos respondan de forma adecuada a la escala del análisis y a los criterios de evaluación establecidos.

Después ejecuta el proceso de reclasificación en una escala de 1 – 5, en el que 1 representa el riesgo muy bajo y el 5 riesgo muy alto, es importante este Geoproceso ya que integra las variables de naturaleza y rangos distintos dentro del desarrollo del análisis multicriterio, asegurando la comparabilidad y consistencia metodológica (Malczewski, 1999; Saaty, 2008). La tabla proyectada a continuación, contiene la escala cualitativa y cuantitativa utilizada;

Tabla 1.*Estimación de clasificación cualitativa y cuantitativa*

<i>Clasificación cualitativa</i>	<i>Valores</i>
<i>Riesgo muy bajo</i>	1
<i>Riesgo bajo</i>	2
<i>Riesgo medio</i>	3
<i>Riesgo alto</i>	4
<i>Riesgo muy alto</i>	5

Nota. La tabla anterior relaciona la descripción cualitativa del riesgo con el valor cuantitativo del riesgo destinado según el valor numérico. **Fuente:** Autoría propia, 2025.

Una vez reclasificados todos los resultados se emplea el Geoproceso de ponderación, el cual integra cada uno de los factores por medio del peso determinado según el nivel de influencia en la ocasión de inundaciones. La aplicación de los pesos asignados se tomó como referencia metodológica de estudios recientes en análisis multicriterio aplicados inundaciones, según lo proponen Efraimidou & Spiliotis (2024) y Kourgialas & Karatzas (2011), además del método jerárquico de decisión AHP desarrollado por Saaty (2008).

La suma ponderada final de los factores utilizados para Manizales se representa en la tabla a continuación;

Tras culminar con el Geoproceso de ponderación se ejecutó el Geoproceso suma ponderada utilizando la calculadora ráster en ArcGIS Pro, obteniendo así la capa final del índice de riesgo por inundación para el municipio de Manizales. Este Geoproceso permitió integrar la información que se obtuvo del Modelo de Elevación Digital (DEM) Asimismo, se comprobó que el mes de abril concentra los mayores valores de precipitación, consolidándose como el periodo crítico para la gestión del riesgo en Manizales. coberturas del suelo, Tabla 1. Clasificación de coberturas de suelo nivel 2 generando un mapa de riesgo donde se identifican las zonas más sensibles ante eventos de inundaciones.

A continuación, se presenta la categorización de los niveles de riesgos resultantes en la tabla 3.

Tabla 2. Clasificación de coberturas de suelo nivel 2

Corine Land Cover Nivel 2	Clasificación de valores
1.1. Zonas urbanizadas	6
1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	2
1.3. Zonas de extracción mineras y escombreras	4
1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas	2
2.1. Cultivos transitorios	8
2.2. Cultivos permanentes	8
2.3. Pastos	4
2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	8
3.1. Bosques	2
3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	4
3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	6
4.1. Áreas húmedas continentales	8
4.2. Áreas húmedas costeras	6
5.1. Aguas continentales	10
5.2. Aguas marítimas	6

Figura 3.
Reclasificación de Coberturas de tierras



Fuente. Autoría propia, 2025 (ArcGIS Pro)

Las capas reclasificadas DEM, pendiente, precipitación, cobertura y distancia a drenajes fueron ajustadas a una escala de 2 a 10, donde los valores más altos representan mayor riesgo.






Para analizar el riesgo de inundación de la zona se debe hacer una suma ponderada, que combine múltiples capas de datos, cada factor tendrá su importancia relativa en la modelación de este riesgo, es importante identificar la información de la *Tabla 2*.

Se realizó una suma ponderada según los pesos establecidos en la guía (precipitación 35 %, distancia a drenajes 30 %, pendiente 15 %, DEM 10 %, cobertura 10 %).

Tabla 3. Criterios de análisis para el riesgo de inundación

Factor	Porcentaje	/100
Modelo de elevación digital DEM	10%	0,1
Pendientes	15%	0.15
Cobertura de tierras (Land cover)	10%	0.1
Precipitación	35%	0.35
Distancia entre drenajes	30%	0.3
Total	100%	1

Tabla 4.
Clasificación de riesgos

<i>Clasificación cualitativa</i>	<i>Riesgo</i>	<i>Simbología</i>
Riesgo muy Bajo	1	
Riesgo Bajo	2	
Riesgo medio	3	
Riesgo Alto	4	
Riesgo muy Alto	5	

Nota. La tabla establece los niveles cualitativos de riesgo por inundación y su correspondiente valor numérico, permitiendo diferenciar de manera ordenada las categorías utilizadas en el modelo final. **Fuente.** Diseño propio de autor, 2025

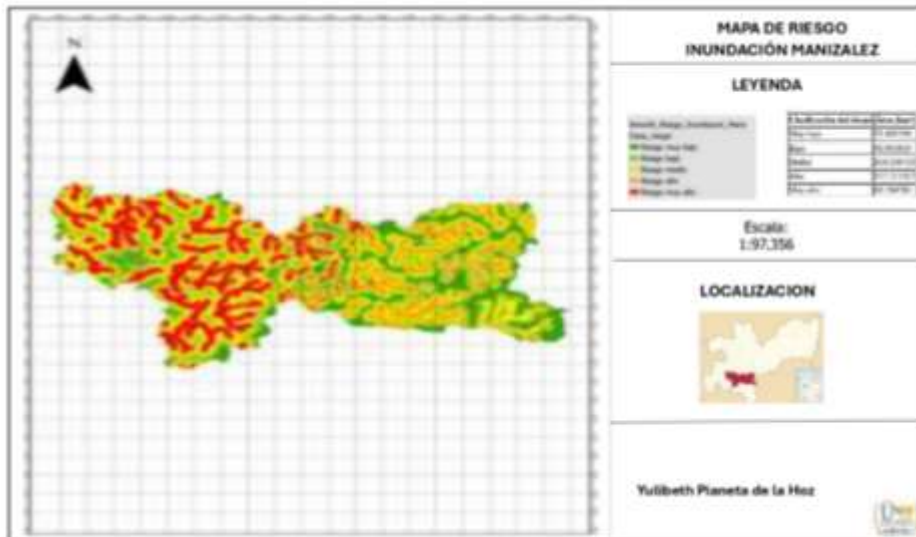
Resultados

Los resultados del modelo de análisis multicriterio desarrollado en ArcGIS Pro permiten visualizar la distribución espacial del riesgo de inundación en el municipio de Manizales a través del siguiente mapa temático (Figura 3). En este, las cinco categorías cualitativas de riesgo —muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto— se representan mediante una escala cromática que va del verde claro

al rojo oscuro, facilitando la identificación inmediata de las zonas más vulnerables. El mapa, generado a partir de la integración y reclasificación de variables topográficas, hidrológicas y de precipitación, muestra que las categorías de riesgo medio, alto y muy alto ocupan la mayor proporción del territorio (69,28 % del área total, equivalente a 353,89 km²), concentrándose principalmente en las laderas de fuerte pendiente, las terrazas fluviales y los sectores de convergencia de la red de drenaje. Por el contrario, las áreas de riesgo muy bajo y bajo se restringen a zonas de mayor estabilidad geomorfológica y mejor capacidad de infiltración. A continuación, se presenta el mapa final de riesgo por inundación del municipio de Manizales, acompañado de la tabla de áreas calculadas por categoría.

Figura 4

Mapa de riesgo por inundación municipio de Manizales (Caldas).



Fuente. Autoría propia, 2025 (ArcGIS Pro)

El mapa de riesgo (Figura 4) por inundación del municipio de Manizales (figura 3), generado mediante análisis multicriterio en Sistemas de Información Geográfica (SIG), revela una distribución espacial heterogénea de la susceptibilidad, donde las categorías de riesgo medio (representado en amarillo), alto (naranja) y muy alto (rojo oscuro) dominan el paisaje, abarcando aproximadamente el 69,28% del territorio total, equivalente a más de 300 km² según los cálculos geométricos realizados en ArcGIS Pro (Olaya, 2020). Estas zonas se concentran principalmente en las laderas pronunciadas de la cordillera Central, las terrazas fluviales asociadas a los ríos Chinchiná, Olivares y Guacaica, y las áreas de convergencia de microcuencas y quebradas de montaña, donde la acumulación de escorrentía superficial se ve exacerbada por la alta densidad de drenaje y la inestabilidad geomorfológica (UNGRD, 2021). Visualmente, el patrón fractal de los

contornos en tonos cálidos (amarillo a rojo) resalta cómo el relieve montañoso canaliza el flujo hídrico hacia sectores bajos, incrementando la vulnerabilidad en transiciones entre pendientes fuertes y zonas de acumulación, lo que coincide con la descripción de suelos frágiles de origen volcánico-andino y pendientes que favorecen la erosión y los desbordamientos durante periodos de precipitación bimodal intensa, con máximos en abril-mayo y octubre-noviembre (IDEAM, 2022). Esta integración de variables topográficas, hidrológicas y climáticas se alinea con enfoques de modelado espacial en SIG, donde los modelos de datos ráster y vectorial permiten una representación precisa del espacio geográfico para evaluaciones de riesgo (Escolano Utrilla, 2015).

Tabla de áreas por categoría de riesgo

Tabla 5.

Riesgo por categoría con sus respectivas áreas

Clasificación del riesgo	Área (km²)
Muy bajo	39.688394
Bajo	92.961929
Medio	118.030433
Alto	117.211107
Muy alto	69.284786

Fuente. Diseño propio de autor, 2025

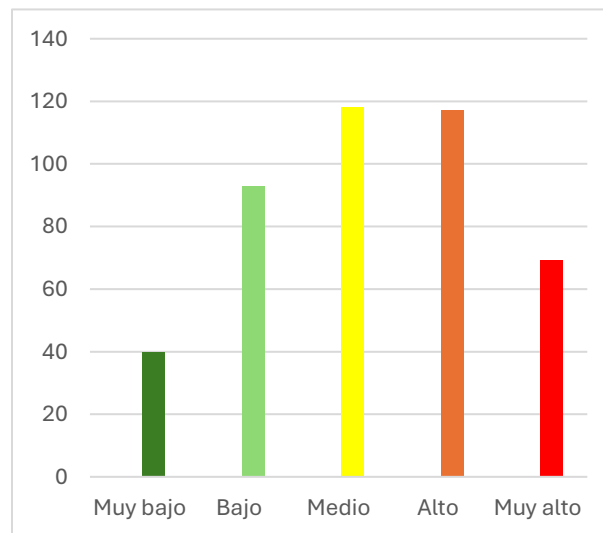
En contraste, las áreas de riesgo muy bajo (verde claro) y bajo (verde oscuro) ocupan una proporción menor, alrededor del 30,72% del área (aproximadamente 137 km²), localizándose en sectores de mayor estabilidad, como crestas elevadas o zonas con buena infiltración y pendientes suaves, que reducen la probabilidad de inundaciones directas. La tabla adjunta al mapa cuantifica estas categorías: riesgo muy bajo con 39,69 km², bajo con 97,96 km², medio con 118,03 km², alto con 117,21 km² y muy alto con 69,29 km², confirmando que las clases intermedias y elevadas predominan y se alinean con registros históricos de afectaciones, tales como las inundaciones recurrentes en barrios urbanos como Aranjuez, San José y la zona industrial, así como en áreas rurales con sistemas productivos agropecuarios vulnerables a la pérdida de suelos (Alcaldía de Manizales, 2017). Esta correlación entre el modelo espacial y los eventos documentados por entidades oficiales valida la metodología aplicada, que integró variables mediante conversión ráster-vectorial, suavizado Bézier y reclasificación cualitativa, destacando la utilidad del mapa para identificar transiciones de riesgo que podrían escalar bajo escenarios de cambio climático con lluvias extremas superiores a 2.200 mm anuales (IDEAM, 2022). La aproximación multicriterio utilizada en este estudio resuena con métodos avanzados como el enfoque DEMATEL en evaluaciones de riesgo de inundación basadas en SIG, que incorporan interdependencias entre

indicadores de peligro y vulnerabilidad para generar índices compuestos y mapas temáticos en regiones con limitaciones de datos (Efraimidou & Spiliotis, 2024; Sosa-Franco et al., 2023).

Desde una perspectiva de gestión territorial, el análisis del mapa subraya la necesidad de priorizar intervenciones en las zonas de riesgo alto y muy alto, que no solo representan amenazas directas para la infraestructura y las comunidades, sino que también impactan ecosistemas y actividades productivas como el cultivo de café y ganadería en suelos erosionables, similares a los efectos económicos en agricultura observados en escenarios de cambio climático en otras cuencas (Djanibekov et al., 2024). La concentración de rojo oscuro en proximidades a la red hidrográfica sugiere la implementación de medidas como la restauración de rondas hídricas, sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) y prácticas agrícolas resilientes, alineadas con las recomendaciones del estudio para integrar estos resultados en el Plan de Ordenamiento Territorial y sistemas de alertas tempranas (Alcaldía de Manizales, 2017; UNGRD, 2021). En general, el mapa no solo reproduce patrones consistentes con evidencias históricas desde 2010 hasta 2021, sino que aporta insumos cuantitativos y visuales para la toma de decisiones en ordenamiento agroambiental, enfatizando la prevención en un contexto de creciente variabilidad climática, respaldado por metodologías de investigación que combinan procesamiento de consultas espaciales y análisis integrados (Hernández Sampieri, 2019).

Figura 5

Distribución del área por categorías de riesgo de inundación



Fuente. Diseño propio de autor, 2025

La Figura 5 evidencia la distribución cuantitativa de las categorías de riesgo de inundación en el municipio de Manizales, destacando que las zonas de riesgo medio (aproximadamente 118 km²,

en amarillo) y alto (alrededor de 117 km², en naranja) representan las mayores extensiones territoriales, seguidas por el riesgo bajo (cerca de 98 km², en verde claro) y muy alto (unos 69 km², en rojo), mientras que el riesgo muy bajo (alrededor de 40 km², en verde oscuro) ocupa la menor proporción. Esta representación visual confirma los hallazgos del modelo espacial multicriterio, donde las categorías intermedias y elevadas dominan con más del 69% del área analizada (equivalente a unos 354 km²), alineándose con la metodología de reclasificación cualitativa en SIG que integra variables como precipitación bimodal superior a 2.200 mm anuales, pendientes pronunciadas y red hidrográfica densa (IDEAM, 2022; Olaya, 2020). La progresión cromática de verdes fríos a rojos cálidos enfatiza la transición de estabilidad a vulnerabilidad, revelando patrones espaciales consistentes con enfoques de evaluación de riesgo que utilizan indicadores compuestos para mapear susceptibilidades en regiones montañosas (Efraimidou & Spiliotis, 2024).

Al comparar estos resultados con registros históricos de afectaciones, se observa una correlación directa entre las zonas de riesgo alto y muy alto modeladas y los eventos documentados en Manizales desde 2010. Por ejemplo, la emergencia por inundaciones de abril de 2017, provocada por fuertes lluvias que causaron deslizamientos e inundaciones urbanas, afectó barrios como Aranjuez, Persia y San Ignacio, coincidiendo con las áreas de convergencia de microcuencas identificadas en el modelo como de alto riesgo (Alcaldía de Manizales, 2017). Eventos más recientes, como las lluvias intensas de septiembre de 2022 y las emergencias por precipitaciones en 2025 (incluyendo deslizamientos en vías y afectaciones en el norte de la ciudad), refuerzan esta coincidencia, ya que han generado inundaciones leves en sectores como Villamaría y Ciudadela del Norte, áreas que el modelo clasifica predominantemente en categorías medias a altas debido a su exposición a escorrentía y erosión (UNGRD, 2021). Esta validación histórica respalda la fiabilidad del modelo, similar a estudios que emplean procesamiento de consultas espaciales para correlacionar datos SIG con eventos reales (Sosa-Franco et al., 2023), y resalta cómo el cambio climático ha intensificado avenidas torrenciales recurrentes desde la década de 2010 (IDEAM, 2022).

El impacto potencial de estos resultados sobre comunidades se evidencia en la exposición de poblaciones urbanas y rurales a riesgos elevados, donde las categorías alto y muy alto podrían replicar daños históricos como los de 2017, con 17 muertes, 23 heridos y más de 1.000 personas afectadas por colapsos de viviendas y desalojos en laderas inestables. En términos de infraestructura, las zonas medias y altas amenazan vías, servicios básicos y instituciones educativas, como se vio en suspensiones de clases y cortes de agua/gas en eventos pasados, potenciando vulnerabilidades en un territorio con alta densidad de drenaje que favorece obstrucciones y derrumbes (Escolano Utrilla, 2015). Respecto a ecosistemas, el predominio de riesgos intermedios implica erosión acelerada en suelos volcánico-andinos frágiles y afectación a rondas hídricas, impactando sistemas productivos agropecuarios como cultivos de café y ganadería, con pérdidas similares a las observadas en cuencas bajo escenarios de cambio climático (Djanibekov et al., 2024; Hernández Sampieri, 2019). En conjunto, estos análisis subrayan la

urgencia de integrar el modelo en planes de mitigación para reducir impactos recurrentes en un contexto de variabilidad climática creciente.

Conclusiones

El análisis multicriterio aplicado en el presente estudio ha permitido identificar que las zonas de riesgo medio, alto y muy alto de inundación representan la mayor proporción del territorio municipal de Manizales, abarcando aproximadamente el 69,28% del área total (equivalente a más de 353 km²), lo que subraya la urgencia de fortalecer acciones de mitigación y adaptación en áreas críticas como las laderas pronunciadas, terrazas fluviales y convergencias de microcuencas asociadas a los ríos Chinchiná, Olivares y Guacaica. Esta predominancia de categorías elevadas de riesgo no solo refleja la compleja dinámica geomorfológica y climática de la región andina, caracterizada por precipitaciones bimodales superiores a 2.200 mm anuales y suelos inestables de origen volcánico, sino que también resalta la necesidad de intervenciones integrales que incorporen medidas de restauración ecológica y manejo sostenible del suelo para reducir la vulnerabilidad ambiental y socioeconómica, alineándose con enfoques de modelado hidrodinámico que han demostrado eficacia en la mitigación de inundaciones en ciudades andinas similares. Además, estos resultados enfatizan la importancia de priorizar recursos en zonas urbanas como Aranjuez y San José, donde los impactos históricos han afectado comunidades e infraestructura, promoviendo estrategias de adaptación al cambio climático que consideren proyecciones de incremento en eventos extremos de precipitación.

El empleo de Sistemas de Información Geográfica (SIG) combinado con análisis multicriterio se ha demostrado altamente adecuado para integrar variables ambientales multifactoriales —como topografía, hidrología, precipitación y uso del suelo y generar un modelo espacial coherente y validado con registros históricos de inundaciones en Manizales, desde eventos documentados en 2010 hasta emergencias recientes en 2025. Esta metodología no solo facilita la conversión de datos ráster a vectorial, suavizado y reclasificación cualitativa para una representación precisa de la susceptibilidad espacial, sino que también se alinea con marcos de evaluación de vulnerabilidad física co-producidos entre academia, practitioners y comunidades, que han mejorado la precisión en la identificación de riesgos naturales en entornos montañosos. La consistencia entre el modelo generado y las afectaciones históricas reportadas por entidades como la UNGRD valida su robustez, sugiriendo su aplicación en escenarios multi-riesgo que incorporen interacciones entre inundaciones, deslizamientos y cambios climáticos, como se propone en revisiones recientes sobre evaluaciones integradas en la región andina. De esta manera, el enfoque SIG-multicriterio emerge como una herramienta esencial para la modelación predictiva en contextos de datos limitados, fomentando su escalabilidad a otras cuencas andinas vulnerables.

Los resultados obtenidos en este estudio constituyen una herramienta de apoyo invaluable para las entidades territoriales, al facilitar la toma de decisiones informadas en el ordenamiento

agroambiental, la gestión integral del riesgo y la planificación de infraestructuras resilientes en Manizales, promoviendo la integración de mapas de riesgo en instrumentos como el Plan de Ordenamiento Territorial para orientar el uso del suelo y la expansión urbana sostenible. Esta contribución no solo cuantifica las áreas expuestas, con énfasis en sistemas productivos agropecuarios afectados por erosión y pérdida de suelos en zonas rurales, sino que también aboga por la adopción de índices de vulnerabilidad climática adaptados a acueductos comunitarios y ecosistemas locales, como los desarrollados para cuencas andinas en Colombia, que incorporan impactos de cambios en la cobertura vegetal y urbanización sobre flujos hidrológicos y riesgos de inundación. En última instancia, estos insumos respaldan políticas de prevención que mitiguen impactos en accesibilidad a servicios básicos durante eventos de inundación y deslizamientos, destacando la necesidad de evaluaciones cuantitativas que consideren proyecciones climáticas para una gestión territorial proactiva y equitativa en regiones andinas expuestas a multi-amenazas.

Recomendaciones

Desde el enfoque agroambiental, se recomienda fortalecer de manera prioritaria los procesos de restauración y protección de las rondas hídricas, especialmente en aquellas zonas clasificadas con riesgo alto y muy alto de inundación, mediante la implementación de estrategias integrales que incluyan no solo reforestación con especies nativas adaptadas al clima local, sino también la creación de buffers vegetales que actúen como barreras naturales contra la erosión y la sedimentación. Estas áreas representan una amenaza directa para las comunidades y los ecosistemas, por lo que su recuperación mediante control de usos inadecuados del suelo, como la prohibición de actividades agropecuarias intensivas en márgenes ribereños, y la conservación de coberturas vegetales es fundamental para reducir la vulnerabilidad ambiental y mitigar los efectos de los eventos hidrometeorológicos extremos, como se ha demostrado en iniciativas de restauración de ríos urbanos en Latinoamérica que han mejorado la resiliencia ante inundaciones (Tellman et al., 2018). Adicionalmente, se sugiere incorporar monitoreo continuo de la calidad del agua y la biodiversidad en estas zonas, fomentando alianzas con comunidades locales para el mantenimiento de las intervenciones, lo que ha probado ser efectivo en contextos similares de la región andina (Suárez et al., 2024).

En el ámbito urbano, es indispensable la implementación de sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) en los sectores más vulnerables del casco urbano, con el fin de mejorar la infiltración del agua a través de técnicas como techos verdes, pavimentos permeables y zanjas de infiltración, disminuir la escorrentía superficial y evitar la sobrecarga de los sistemas tradicionales de alcantarillado, integrando estos elementos en el diseño de nuevos desarrollos urbanísticos para maximizar su efectividad en la gestión de aguas pluviales. Complementariamente, en las áreas rurales con actividades agropecuarias se deben promover estrategias de protección de suelos y manejo adecuado de la escorrentía, tales como la construcción de terrazas agrícolas, barreras vivas con vegetación perenne y prácticas de agricultura sostenible como la rotación de cultivos y el uso

de cubiertas vegetales, que permitan reducir la erosión y la pérdida de la capacidad productiva del suelo, alineándose con enfoques probados que han minimizado pérdidas por inundaciones en entornos montañosos (Meliho et al., 2021). Estas medidas no solo mitigan el riesgo inmediato, sino que también contribuyen a la adaptación al cambio climático, como se observa en estudios de SUDS en ciudades colombianas que han reducido significativamente los volúmenes de escorrentía durante eventos extremos (Ortega Sandoval et al., 2023).

Desde la gestión territorial, se hace necesario integrar los resultados del modelo de riesgo en el sistema municipal de alertas tempranas y en los instrumentos de planificación territorial, como el Plan de Ordenamiento Territorial, para orientar de manera técnica las decisiones sobre uso del suelo, expansión urbana e infraestructura, incorporando análisis de escenarios futuros bajo proyecciones climáticas que consideren incrementos en la intensidad de precipitaciones. Asimismo, se recomienda promover la educación comunitaria en gestión del riesgo, especialmente en barrios con antecedentes de afectación, mediante programas de capacitación continua que incluyan simulacros, talleres sobre preparación familiar y el uso de tecnologías móviles para alertas en tiempo real, con el fin de fortalecer la prevención, la preparación y la capacidad de respuesta de la población frente a posibles eventos de inundación, siguiendo modelos exitosos de integración de sistemas de alerta que han reducido impactos en comunidades vulnerables (Perera et al., 2024). Además, se propone la colaboración interinstitucional para actualizar periódicamente los mapas de riesgo con datos en tiempo real, asegurando que las políticas de uso del suelo prioricen la resiliencia y eviten desarrollos en zonas de alto riesgo, como recomendado en guías globales para la planificación urbana ante inundaciones (World Bank, 2017)

Referencias bibliográficas

- Alcaldía de Manizales. (2017). Plan de Ordenamiento Territorial 2017–2031. Alcaldía de Manizales.
- Ariza, J., & Bernal, F. (2021). *Aplicación de SIG para la evaluación multicriterio en estudios territoriales*. Revista Colombiana de Geografía, 30(2), 45–60.
- Chuvieco, E. (2018). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (6.ª ed.). Editorial Ariel.
- Djanibekov, U., Polyakov, M., Craig, H., & Paulik, R. (2024). Flood impacts on agriculture under climate change: The case of the Awanui Catchment, New Zealand. *Economics of Disasters and Climate Change*, 8(3), 283–316. <https://doi.org/10.1007/s41885-024-00147-3>
- Eastman, J. R. (2016). *IDRISI TerrSet: A geospatial monitoring and modeling system*. Clark Labs.
- Efraimidou, E., & Spiliotis, M. (2024). A GIS-based flood risk assessment using the decision-making trial and evaluation laboratory approach at a regional scale. *Environmental Processes*, 11(1), Article 9. <https://doi.org/10.1007/s40710-024-00683-w>
- Escolano Utrilla, S. (2015). La representación del espacio geográfico en los SIG: Modelos de datos. En S. Escolano Utrilla (Ed.), *Sistemas de información geográfica: Una introducción para*

- estudiantes de geografía (pp. 47–78). Prensas de la Universidad de Zaragoza. <https://elibro-net.bibliotecavirtual.unad.edu.co/es/lc/unad/titulos/44840>
- ESRI. (2022). *ArcGIS Pro: Spatial analysis and modeling tools*. ESRI Press.
- Goodchild, M. F. (2020). *Geographic information science and systems* (5^a ed.). Wiley
- Hernández Sampieri, R. (2019). *Metodología de la investigación Plus*. McGraw-Hill Education. <https://www-ebooks7-24-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/?il=34866>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2022). Informe climatológico nacional 2022. IDEAM. <https://www.ideam.gov.co>
- Kourgialas, N., & Karatzas, G. (2011). *Flood management and multi-criteria analysis: A GIS-based approach*. *Natural Hazards*, 58(1), 305–327.
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2021). *Geographic Information Science and Systems* (5th ed.). Wiley.
- Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4>
- Meliho, M., Khattabi, A., & Mhammdi, N. (2021). Soil erosion risk assessment using GIS-based weighted overlay method in the upper Oum Er Rbia River basin (Morocco). *Journal of Mountain Science*, 18(12), 3125–3140. <https://doi.org/10.1007/s11629-021-6872-5>
- Olaya, V. (2020). *Sistemas de información geográfica*. Publicación independiente (Open Library). <https://openlibrary.org/works/OL17311222W>
- Ortega Sandoval, A., Vargas, J., & Torres, A. (2023). Evaluación de la efectividad de sistemas de drenaje urbano sostenible (SUDS) en la reducción de inundaciones pluviales en ciudades colombianas: Caso de estudio en Bogotá y Medellín. *Revista Ingeniería y Universidad*, 27(1), 1–22. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu27.eesu>
- Perera, D., Agnihotri, J., Seidou, O., & Djalante, R. (2024). Community-based early warning systems: A review of global best practices and lessons learned. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 101, 104223. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.104223>
- Saaty, T. L. (2008). *Decision making with the Analytic Hierarchy Process*. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98.
- Sosa-Franco, I., Pérez-Guerra, G., Machado-García, N., & Elena-Ruiz Pérez, M. (2023). Method for query processing in a geographic information system. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 32(2), 1–9.
- Suárez, A., Arias-Arévalo, P., & Martínez-Mera, M. (2024). Payment for hydrological environmental services and community-based restoration in Andean watersheds: The case of the Páramo de Santurbán, Colombia. *Ecosystem Services*, 65, 101586. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101586>
- Tellman, B., Saiers, J. E., & Cruz, R. A. (2018). Opportunities for natural infrastructure to improve urban water security in Latin America. *PLOS ONE*, 13(12), e0209470. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209470>

Tellman, B., Schank, C., Schwarz, B., & Howe, C. (2021). Urban flood risk and planning in Latin America and the Caribbean. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(5), e1546. <https://doi.org/10.1002/wat2.1546>

Triviantes. (2022). Mapa de localización de Manizales, departamento de Caldas, Colombia. <https://www.triviantes.com>

UNDRR. (2020). *Global Risk Assessment Report (GAR 2020)*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

UNGRD. (2023). *Informe nacional de situaciones por inundaciones y movimientos en masa en Colombia*. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres – UNGRD. (2021). Reporte nacional de emergencias por eventos hidrometeorológicos 2010-2021. UNGRD. <https://portal.ungrd.gov.co>

World Bank. (2017). Implementing nature-based flood protection: Principles and implementation guidance. World Bank Group. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/09906578>

Enlace de sustentación:

<https://youtu.be/WYQuEcSek34>