

Evaluación de zonas con riesgo de inundación a través de análisis multicriterio, en el municipio del Carmen de Viboral, Antioquia.

María Camila Gómez Sánchez, mcgomezs@unadvirtual.edu.co

Daniel Fernando Ríos Sierra, dfrioss@unadvirtual.edu.co

Evangelina Parra Pérez, evangelina.parra@unad.edu.co

Resumen

El documento presenta un análisis detallado sobre la modelación agroambiental para el municipio de El Carmen de Viboral, Antioquia. A través de una combinación de métodos de análisis multicriterio y Sistemas de Información Geográfica (SIG), el estudio aborda la creación de un mapa de riesgo de inundación como herramienta crucial para la planificación territorial y la gestión del riesgo. Utilizando plataformas como ArcGIS, el equipo llevó a cabo procesos como la reclasificación de datos topográficos, hidrológicos y climáticos, destacando las áreas más vulnerables a eventos meteorológicos e hidrológicos.

Este trabajo con su enfoque estratégico e integrador resalta cómo las herramientas tecnológicas pueden transformar la manera en que gestionamos los riesgos ambientales, ofreciendo un modelo aplicable a otros territorios y un llamado a la acción para repensar la sostenibilidad y la preparación ante el cambio climático.

Palabras claves: Desbordamiento, hidrología, inundación, precipitación.

Introducción

Las inundaciones son eventos naturales que generan impactos significativos en la infraestructura, la agricultura y las comunidades, especialmente en zonas de alta vulnerabilidad. Factores como lluvias intensas, deslizamientos de tierra y desbordamientos de ríos contribuyen al incremento de estos eventos, siendo exacerbados por fenómenos climáticos como La Niña y el cambio climático.

Colombia, debido a su ubicación tropical, recibe una alta cantidad de energía solar, lo que influye en su diversidad climática. Este clima está determinado por fenómenos que regulan las lluvias de manera estacional e intraestacional. Además, factores como el

cambio climático y el aumento del fenómeno de La Niña han intensificado la frecuencia de las inundaciones (Riascos et al. 2019).

Según Etxeberria et al. (2005) cada año se registran cientos de desastres naturales que ocasionan pérdidas humanas significativas y daños económicos considerables. La magnitud de estas pérdidas ha mostrado un aumento constante debido a fenómenos como las variaciones extremas de temperatura y las lluvias torrenciales, muchas de ellas asociadas al cambio climático. Una gran parte de estos desastres puede prevenirse mediante la identificación y monitoreo de zonas de alto riesgo. Esto subraya la necesidad de desarrollar mapas de riesgo, herramientas esenciales para la planificación y gestión de emergencias. De

acuerdo con Castañeda Castrillón (2024), estos mapas no solo permiten mitigar los impactos potenciales, sino que también son fundamentales para orientar políticas públicas y estrategias de adaptación en comunidades vulnerables.

Las inundaciones súbitas suceden en lugares donde lugares con pendientes pronunciadas se juntan con áreas planas, particularmente cerca de fuentes de agua en las laderas de las montañas, la corriente puede incrementarse bruscamente debido a intensas precipitaciones, deslizamientos de tierra u obstáculos río arriba, a menudo provocados por fuertes precipitaciones. Como lo mencionan Flórez y Suavita (1997), estos eventos pueden extenderse desde unas horas hasta varios días, ocurriendo de manera tan sorpresiva que impiden completamente la evacuación o cualquier tipo de preparación previa. Su capacidad devastadora se ve potenciada al arrastrar consigo objetos pesados como piedras, plantas, edificaciones e incluso, seres vivos, a medida que avanzan.

Durante el fenómeno de La Niña, ocurre un aumento en la cantidad de lluvia, esto puede provocar de manera imprevista inundaciones en regiones de menor altitud. Esta situación tiene efectos significativos en zonas tanto urbanas como rurales, resultando en daños a la infraestructura, cultivos y caminos. Este fenómeno incrementa la posibilidad de desprendimientos en áreas montañosas y causa cambios en la naturaleza al variar los flujos de agua. Esto tiene consecuencias severas en comunidades con menos recursos para enfrentar este tipo de crisis. (Pabón & Torres, 2007).

La ubicación geográfica del departamento de Antioquia, junto con su sobreexplotación, lo ha vuelto más vulnerable al cambio climático, lo

que ha incrementado los eventos hidrometeorológicos como lluvias intensas o sequías. Estas condiciones extremas afectan a gran parte de la población, con un 46.8% expuesta a amenazas de este tipo (Zuliani Coletti, 2016).

Analizando todos los riesgos que presentan las fuertes lluvias provocadas por el fenómeno de la niña, en este caso en el municipio de El Carmen De Viboral, es muy importante la aplicación de un sistema de información geográfica tal y como lo plantea Sedano Cruz (2013), que menciona que la aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) es esencial en la construcción de mapas de riesgo, ya que sintetizan el conocimiento sobre el daño potencial de una inundación y sirven como herramienta para la toma de decisiones.

La creación de mapas de riesgo por inundación con el método hidrológico e hidráulico delimita zonas inundables considerando registros pluviométricos, caudales y la interacción del agua con la morfología del terreno, permitiendo también calcular el período de retorno, es decir, la probabilidad de ocurrencia del evento. Aunque estos métodos proporcionan un análisis detallado, la cartografía resultante tiene la limitación de describir únicamente el espacio inundable, sin integrar otros factores de riesgo (Ribera Masgrau, 2004).

A partir de 2020, en el Carmen de Viboral se observó un incremento significativo en la subdivisión predial, lo que afectó de manera destacada las áreas de protección. Estas áreas, que representan aproximadamente 398 hectáreas, evidenciaron un impacto considerable en comparación con las cerca de 14 hectáreas registradas durante la pandemia. Las zonas de protección, comúnmente vinculadas a la estructura ecológica principal del municipio, incluyen áreas de retiro en

quebradas, lo que genera preocupación por los potenciales conflictos asociados al uso del suelo y a la conservación de los recursos hídricos. Adicionalmente, la expansión de actividades económicas y la creación de zonas residenciales han intensificado la presión sobre estos terrenos, aumentando el riesgo de vertimientos no tratados, desequilibrios en la disponibilidad de agua y una mayor vulnerabilidad ante fenómenos hidrometeorológicos, como inundaciones y avenidas torrenciales (Torres et al., 2024). Este panorama resalta la necesidad de implementar estrategias de manejo sostenible del suelo para garantizar la estabilidad ambiental y la seguridad hídrica en estas áreas estratégicas.

Objetivos

General

Evaluar las zonas con riesgo de inundación a través de análisis multicriterio, en el municipio del Carmen de Viboral, Antioquia.

Específicos

- Desarrollar un modelo espacial de riesgo por inundación utilizando herramientas de análisis geográfico en ArcGIS.
- Identificar y categorizar las zonas con mayor susceptibilidad de inundación mediante el análisis de factores físicos.
- Analizar la influencia de los patrones de precipitación en el riesgo de inundación, considerando la variabilidad climática y el fenómeno de la niña.

Identificación del caso de estudio

El municipio de estudio es reconocido por sus paisajes imponentes y por su particular topografía.

El Carmen de Viboral, está situado al Suroriente del Departamento de Antioquia, en la Subregión Valles de San Nicolás que limita al norte con los municipios de Marinilla, Cocorná y El Santuario, al Este con el municipio de Cocorná, al Sur con el municipio de Sonsón y al Oeste con los municipios de la Unión, la Ceja y Rionegro (CORNARE, 2016).

El clima en la cabecera municipal es frío y en cuanto precipitaciones “presenta un régimen de lluvias entre 1000 y 4000 mm por año, con dos temporadas de lluvias en abril-mayo y octubre-noviembre y tiempo seco entre enero-marzo y julio-septiembre, aunque esto puede variar significativamente” (CORNARE, 2012)

Este municipio cuenta con una altitud de 2150 msnm. tiene una extensión de 448km^2 . En las zonas del cañón del río Melcocho y del cañón del río Santo Domingo se encuentra a una altitud de 700 hasta los 2900 msnm (Pulgarín Mejía, 2021).

En la región sur, el terreno presenta una topografía irregular caracterizada por depresiones profundas delimitadas por pendientes largas y pronunciadas. En el fondo de estas depresiones se encuentran valles aluviales angostos que canalizan las corrientes de agua, las cuales fluyen en dirección de occidente a oriente. Este paisaje conforma el frente erosivo del río Magdalena. Las áreas bajas cercanas a los cauces fluviales muestran niveles de riesgo elevados, producto del escurrimiento acelerado facilitado por las empinadas pendientes de las cuencas, que oscilan entre 35% y 75%, o incluso superiores al 75%. Estas zonas cuentan con cobertura de bosques en algunas partes, mientras que otras están destinadas al pastoreo y al cultivo de pastos, en ocasiones de manera extensa. La

precipitación en este sector varía de alta (2785 a 2933 mm) a muy alta (2933 a 3122 mm) anualmente.

Entre los principales factores que generan una amenaza alta o muy alta de inundación en esta región se destacan las intensas precipitaciones, las inclinadas pendientes que aceleran el flujo de agua hacia los drenajes y la creciente conversión del suelo para la ganadería y agricultura, lo que implica una expansión de las áreas cubiertas por pastos. La interacción de estos elementos intensifica el escurrimiento superficial, incrementando significativamente el riesgo de inundaciones (CORNARE, 2012).

Figura 1.

Ubicación del Carmen de Viboral.



Nota: Adaptado de CORNARE (2012)

Metodología

Para el desarrollo de este trabajo, se empleó un método de análisis multicriterio, basado en la integración de variables espaciales mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), estableciendo una escala de valoración, donde 1 representa el menor nivel de riesgo y 5 el máximo nivel. Este método, de acuerdo con González Valencia (2006), posibilita realizar un análisis con diversas variables, y

simultáneamente, posee la capacidad de otorgar más relevancia o valorar aquellas variables que, de acuerdo con la experiencia de los investigadores, podrían tener un mayor impacto en la aparición de inundaciones y deslizamientos.

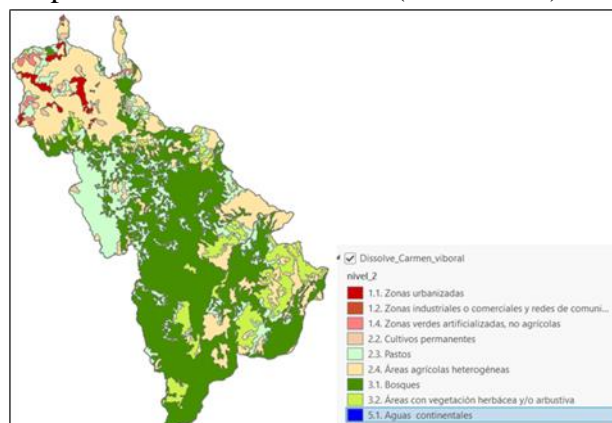
No obstante, Riaño (2024) expone que el análisis multicriterio es un método diseñado para evaluar soluciones potenciales a problemas específicos. Este enfoque emplea herramientas que integran diversos criterios, facilitando la toma de decisiones y la identificación de la solución más adecuada. Durante su implementación, se definen criterios y subcriterios, asignándoles pesos que se comparan directamente para establecer su relevancia y jerarquía en el proceso de decisión. Para obtener y procesar los datos, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

1. Adquisición de datos base:

- Modelo de elevación digital (DEM) del municipio de El Carmen de Viboral, obtenido a través del geoportail USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos).
- Mapa de Cobertura de la Tierra en formato shapefile, obtenido del IGAC, basado en la adaptación Corine Land Cover para Colombia, escala 1:100.000, periodo 2018.
- Datos de precipitación en formato TIFF correspondientes al mes de noviembre (seleccionado por presentar los mayores registros de precipitación en la zona), que fueron compartidos por el director del curso.

Figura 2.

Mapa de coberturas de tierras (Land cover)



Nota: Elaboración propia, 2024.

Es importante mencionar que, las distintas capas fueron descargadas y procesadas teniendo en cuenta que el tamaño del píxel debía ser de 30 metros, esto con el objetivo de facilitar la integración de los distintos datos y hacerlos “manejables” en el procesamiento.

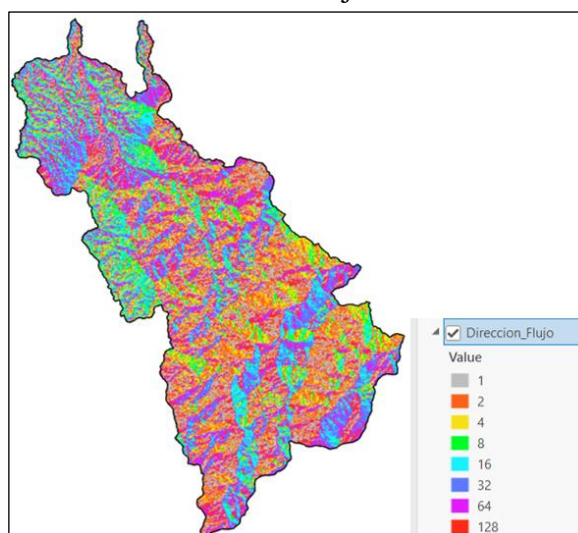
2. Procesamiento de la red de drenajes:

Se realizaron los siguientes geo procesos:

- Relleno del DEM: esto para eliminar pequeñas depresiones o “vacíos” que podrían interrumpir el flujo natural del agua.
- Cálculo de dirección de flujo: con el DEM sin depresiones, se calcula la dirección hacia donde fluiría el agua en cada celda del ráster.
- Acumulación de flujo: permite calcular cuántas celdas “aguas arriba” drenan hacia cada celda.
- Desviación típica: permite identificar qué tan diferentes son los valores de acumulación de flujo respecto a la media.

Figura 3.

Cálculo de dirección de flujo



Nota: Elaboración propia, 2024.

- Reclasificación: se realiza en el ráster de acumulación de flujo y para el caso, se hace en dos clases.
- Cálculo de distancia euclidiana: permite para cada celda, calcular la distancia hasta el origen más cercano.

3. Estandarización de capas:

Para homogenizar y permitir su análisis conjunto, se realizó una reclasificación de las siguientes capas:

- DEM del municipio
- Pendientes
- Precipitación
- Cobertura de tierras
- Distancia a drenajes

Para esto se tuvo en cuenta la siguiente tabla:

Tabla 1. Estimación de clasificación cualitativa y cuantitativa

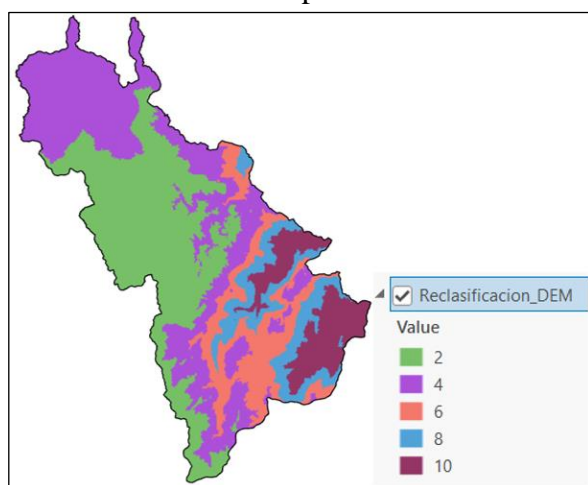
Clasificación cualitativa	Valores
Riesgo muy bajo	2
Riesgo bajo	4
Riesgo medio	6
Riesgo alto	8
Riesgo muy alto	10

Nota: Adaptada de Guía de actividades y rúbrica de evaluación – Fase 4 Modelación agroambiental del territorio

Esta estandarización nos permitió combinar capas con diferentes unidades de medida en un análisis multicriterio consistente.

Figura 4.

Reclasificación de la capa DEM



Nota: Elaboración propia, 2024.

4. Suma ponderada:

Se continua con la realización la suma ponderada de las capas reclasificadas, asignando porcentajes específicos a cada variable según su importancia relativa en el análisis. Para esto se tuvo en cuenta la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios de análisis para riesgo de inundación

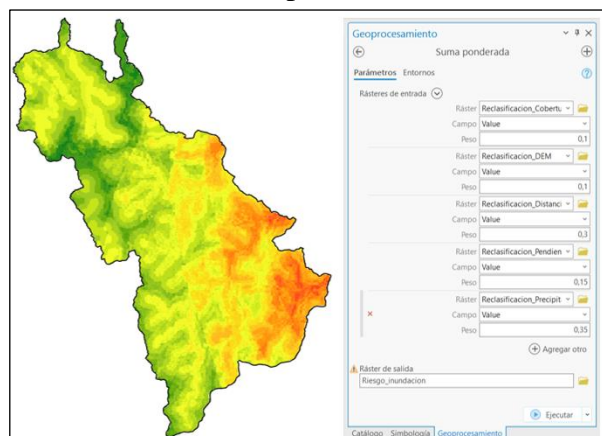
Factor reclasificado	Ponderación
Modelo de elevación digital DEM	0.1
Pendientes	0.15
Cobertura de tierras	0.1
Precipitación	0.35
Distancia entre drenajes	0.30
Total	1

Nota: Adaptada de Guía de actividades y rúbrica de evaluación – Fase 4 Modelación agroambiental del territorio

El criterio/capa de “precipitación” tiene el puntaje más alto en el análisis, pues la intensidad de la lluvia determina la cantidad de agua que debe ser drenado y que, de no ser así, puede desencadenar una inundación. El segundo criterio con puntaje alto es la “distancia entre drenajes” y es importante, pues indica la capacidad de evacuación natural de agua del terreno y la densidad de esa red de drenaje, influye en la acumulación de agua. La “pendiente” tiene el 0.15 y ocupa el tercer lugar en el análisis, pues esta influye en la velocidad de escorrentía y la acumulación de agua, pues las zonas con poca pendiente o planas son las más propensas a inundarse. Las capas “Modelo de elevación digital DEM” y “Cobertura de tierras” tienen un puntaje de 0.1 de peso en el análisis, pues el primero es la representación general del terreno y el segundo permite determinar la resistencia al flujo superficial, es decir la velocidad de drenaje natural. El ráster resultante fue reclasificado en 5 categorías de riesgo.

Figura 5.

Resultado de la suma ponderada



Nota: Elaboración propia, 2024.

La suma ponderada de estas variables permitió generar un mapa que clasifica el municipio en 5 niveles de riesgo, desde muy bajo a muy alto, permitiendo la identificación de zonas vulnerables.

5. Análisis final:

Del resultado obtenido del análisis multicriterio (ráster reclasificación de riesgo), se transforma esa capa en una capa vectorial utilizando la herramienta de conversión de ArcGIS Pro “De ráster a polígono”, luego de ello se realiza un geoproceto adicional de disolver (el gridcode) para simplificar los datos. Una vez creada la capa, a la tabla de atributos se le agregaron 2 columnas: “Class_riesgo_inundación” y “Área”.

En la columna de “Class_riesgo_inundación”, se asignaron valores cualitativos de acuerdo con la Tabla 3. En la columna “Área”, se hace el cálculo de geometría para determinar el área de cada polígono. Para realizar el análisis, la unidad de medida fue de hectáreas.

Tabla 3. Reclasificación de riesgo por inundación

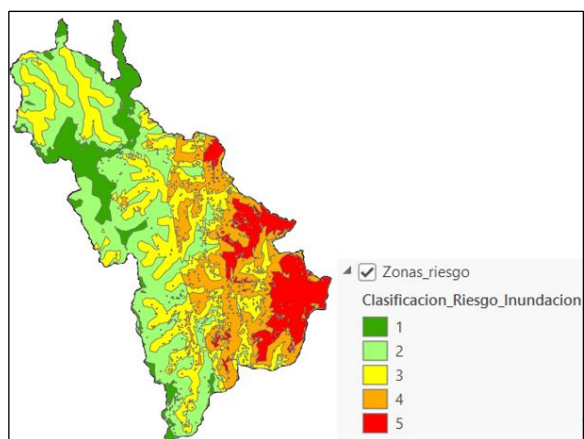
Clasificación cualitativa	Valores	Simbología
Riesgo muy bajo	1	
Riesgo bajo	2	
Riesgo medio	3	
Riesgo alto	4	
Riesgo muy alto	5	

Nota: Adaptada de Guía de actividades y rúbrica de evaluación – Fase 6 Evaluación final

Esta metodología permitió evaluar el riesgo de inundación en El Carmen de Viboral a través del análisis multicriterio teniendo en cuenta 5 variables: DEM, pendientes, cobertura de tierras, precipitación y distancia entre drenajes.

Figura 6.

Reclasificación de ráster de riesgo por inundación



Nota: Elaboración propia, 2024.

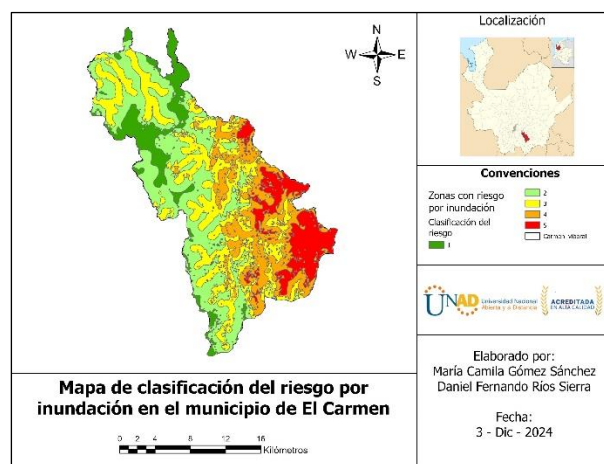
Resultados

Una vez aplicada la metodología, se procede a realizar la construcción del diseño del mapa con los respectivos valores de riesgo por inundación, obteniendo como resultado la Figura 7, que indica y evidencia una dispersión desigual de zonas susceptibles, con una fuerte

concentración de zonas de alto riesgo en el oriente del municipio. Esta disposición espacial ejemplifica la interacción de diversos elementos físicos y ambientales, como el relieve ondulado, el sistema de drenaje y los patrones de lluvia típicos de la zona.

Figura 7.

Mapa de riesgo por inundación de el Carmen de Viboral



Nota: Elaboración propia, 2024.

De acuerdo con la Tabla 4 y la Figura 7, es posible evidenciar que, del total de 43.473,807 hectáreas analizadas, la mayor extensión corresponde a las zonas de riesgo bajo y medio, sumando aproximadamente el 60% del territorio (31.6% y 28.3% respectivamente).

Las zonas clasificadas como de riesgo muy alto se concentran en los sectores bajos de los cañones de los ríos Melcocho y Santo Domingo, donde las pendientes pronunciadas y el escurrimiento superficial incrementan significativamente la acumulación de agua. Estas áreas coinciden con regiones donde se ha intensificado la actividad agrícola y turística, lo que agrava la vulnerabilidad debido a la modificación del uso del suelo.

Tabla 4. Distribución de áreas por nivel de riesgo (hectáreas)

Distribución de áreas por nivel de riesgo		
Zona	Class_riesgo_inundación	Área (ha)
1	1	4467,7
2	2	13732,847
3	3	12304,32
4	4	8019,27
5	5	4949,67
Total		43473,807

Nota: Elaboración propia, 2024

Dichas áreas muestran una clasificación de riesgo más elevada y demandan una atención prioritaria, abarcan el 29.8% de la extensión total del municipio, dividiéndose en riesgo alto (18.4%) y riesgo muy alto (11.4%). Las zonas del territorio que representan el 10.3% son aquellas cuyo riesgo es muy bajo, por lo tanto, no son susceptibles a sufrir inundaciones. Es así como de acuerdo con los datos recopilados podemos decir que la mayor parte del área municipal tiene cierta probabilidad de ser afectado por inundaciones, lo cual debe ser tenido en cuenta al planificar el desarrollo del área.

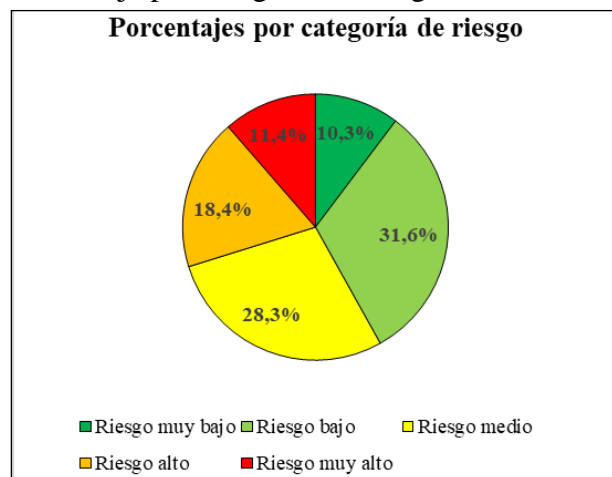
Debido a las temporadas de lluvias que suelen ser intensas y que influenciadas por el calentamiento global y el fenómeno de La Niña, han intensificado su agresividad y han provocado comportamientos más extremos, aumentando de manera significativa el riesgo de sufrir inundaciones (Gómez & Romero, 2018).

Teniendo en cuenta que El Carmen de Viboral tiene un régimen de lluvias entre 1.000 y 4.000 mm por año y que las zonas consideradas de riesgo alto y muy alto abarcan 12968,94 hectáreas o 29,8% de la tierra, exhiben una mayor susceptibilidad durante abril-mayo y octubre-noviembre, coincidiendo con los picos

de precipitación histórica y con los hallazgos de este análisis, pues noviembre fue el mes que se utilizó como insumo para el criterio de precipitaciones.

Figura 8.

Porcentaje por categoría de riesgo



Nota: Elaboración propia, 2024

Aproximadamente un tercio del territorio tiene zonas con alto y muy alto riesgo, en términos de comunidades y estructuras esta situación supone una amenaza importante para las comunidades ribereñas, pues son las áreas bajas y cercanas a drenajes (ríos y quebradas), que han sido elegidas históricamente para la construcción de centros poblados debido a su acceso al agua y su topografía favorable. En estas áreas problemáticas, es crucial prestar atención a las vías y servicios públicos, y a la toma de medidas de protección adecuadas, como la reforestación, que como menciona Carrasquilla (2019) el establecimiento de bosques en una región incrementa la capacidad de absorción de agua tanto en la biomasa como en los suelos, lo que disminuye la escorrentía hacia quebradas y ríos. La reforestación contribuye significativamente a minimizar la escorrentía anual de las lluvias, disminuyendo

así la erosión del suelo y la frecuencia de eventos de inundaciones. Asimismo, la planificación urbana debe tener en cuenta estos datos para impedir la expansión hacia zonas peligrosas.

Méndez Morales et al. (2024) hace mención en su estudio que el incremento en la temperatura mundial y las alteraciones en los esquemas de lluvias están exacerbando las sequías, lo que disminuye la cantidad de agua disponible en la superficie y en el subsuelo, impactando tanto en la agricultura como en el suministro de agua potable.

En la agricultura, el efecto puede ser considerable, ya que las áreas planas, normalmente son las más fértiles y utilizadas para cultivar, también suelen estar en lugares con mayor riesgo de sufrir inundaciones, esto coincide con el 58,1% del total de las zonas que presentan algún nivel de riesgo de inundación en el municipio y que corresponden a pendientes menos pronunciadas y topografía más plana (riesgo medio 28,3%, riesgo alto 18,4 y riesgo muy alto 11,4%). Los sistemas productivos que están ubicados en estas zonas podrían sufrir pérdidas económicas si hay inundaciones, mostrando la importancia de ajustar las técnicas agrícolas para protegerse mejor, como lo mencionan González et al. (2021) y Santos Morán (2024), incorporar árboles o arbustos en los sistemas de cultivo, ayuda a mejorar la retención de agua y proteger el suelo contra el impacto directo de las lluvias. El turismo es otra razón clave para prestar atención al 11,4% del área clasificada como de muy alto riesgo de inundación. Estas zonas, caracterizadas por sus valles con cascadas y ríos cristalinos, atraen a numerosos visitantes que realizan actividades recreativas río arriba dentro de áreas propensas a inundaciones. Pulgarín Mejía (2021) expone lo siguiente, “la

reserva comenzó a reconocerse y a generar un incremento desmedido de turistas que visitan la reserva del río Melcocho con un aproximado de 2 mil turistas cada fin de semana”, este flujo turístico incrementa la exposición al peligro, especialmente ante crecientes repentinas que podrían poner en riesgo la vida de propios y visitantes. Por ello, resulta imperativo implementar medidas de prevención y señalización en estas áreas, así como estrategias de gestión que minimicen la vulnerabilidad sin comprometer la actividad turística.

Debido a los impactos en el ecosistema, las comunidades decidieron buscar soluciones para conservar su patrimonio natural y promover la sostenibilidad del territorio. En alianza con CORNARE (Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare), se creó una estrategia para regular el turismo, dando origen al Centro de Atención, Información y Cultura Ambiental (CAICA). Este centro tiene como objetivo proporcionar herramientas para fomentar la cultura ambiental y fortalecer al sector turístico mediante bienes, servicios y emprendimientos sostenibles liderados por las comunidades locales (Gómez & Cuadros, 2021).

Los resultados del análisis de riesgo por inundación en El Carmen de Viboral revelan un panorama complejo que requiere atención inmediata en la planificación territorial y un enfoque integral que considere tanto los aspectos agrícolas como turísticos.

Conclusiones

La metodología de análisis multicriterio aplicada permitió clasificar el municipio del Carmen de Viboral en diferentes niveles de riesgo de inundación. Las zonas de alto y muy alto riesgo, que representan el 29,8% del

territorio, son las más vulnerables debido a factores como precipitaciones intensas, pendientes pronunciadas y uso inadecuado del suelo. El uso de herramientas como ArcGIS demostró ser efectivo para sintetizar y visualizar datos complejos relacionados con la topografía, la cobertura del suelo y los patrones de precipitación, lo que puede facilitar la toma de decisiones para la planificación territorial.

La expansión de actividades económicas y la subdivisión predial han incrementado la presión sobre las áreas de protección, reduciendo la capacidad de mitigación natural de riesgos y aumentando la vulnerabilidad de las comunidades locales.

Del total de las 43,473.807 hectáreas analizadas, se identificó que el 29.8% del territorio (12,968.94 hectáreas) presenta riesgo alto y muy alto de inundación. Las zonas más vulnerables se concentran en los sectores bajos de los cañones de los ríos Melcocho y Santo Domingo, donde la topografía y el uso del suelo aumentan el riesgo. La mayor parte del territorio (59.9%) se encuentra en categorías de riesgo bajo y medio, lo que indica una susceptibilidad moderada generalizada.

El análisis confirmó que las zonas con mayor riesgo son particularmente vulnerables durante el periodo de octubre-noviembre, coincidiendo con los picos de precipitación histórica. El régimen de lluvias del municipio, que oscila entre 1,000 y 4,000 mm anuales, junto con los efectos del fenómeno de La Niña y el cambio climático, intensifica el riesgo de inundaciones. Las actividades humanas, como la expansión agrícola y el turismo, combinadas con los patrones de precipitación, aumentan la vulnerabilidad en las zonas identificadas como de alto riesgo.

Los resultados subrayan la necesidad de implementar estrategias de manejo territorial,

como la reforestación, la planificación agrícola adaptada y el turismo responsable, para mitigar los riesgos y proteger tanto a las comunidades locales como al ecosistema. Este modelo representa una herramienta replicable y útil para abordar problemáticas similares en otros territorios, promoviendo la sostenibilidad y la resiliencia frente al cambio climático.

Recomendaciones

La planificación agroambiental es una estrategia clave para asegurar la durabilidad en la gestión de los recursos naturales y la reducción de peligros vinculados a la agricultura. Como parte final de esta investigación, estas ideas se basan en un análisis detallado del área y buscan promover un balance adecuado entre la eficiencia agrícola y la protección del entorno natural, teniendo en cuenta las zonas de riesgo identificadas y las características topográficas específicas de la región.

Desde un punto de vista agrícola se deben tener en cuenta lo siguiente:

Reforestación en zonas críticas: Tal como lo indican los resultados, las pendientes pronunciadas en los sectores de los ríos Melcocho y Santo Domingo agravan la acumulación de agua. Reforestar estas áreas no solo reducirá la velocidad del escurrimiento superficial, sino que también mejorará la absorción de agua en el suelo, estableciendo franjas de mínimo 30 metros en cada margen para reducir el impacto de las crecientes

Capacitación en agricultura adaptada: Las zonas agrícolas en áreas planas (riesgo medio y alto, según la clasificación) enfrentan riesgos económicos significativos debido a inundaciones. Se recomienda diversificar cultivos y usar coberturas vivas, alineándose

con las conclusiones que destacan la necesidad de técnicas agrícolas resilientes, así mismo establecer sistemas silvopastoriles en áreas ganaderas, combinando pastos mejorados con árboles nativos como el aliso (*Alnus acuminata*) o guayacán (*Handroanthus chrysanthus*), para mejorar la retención de agua y prevenir la compactación del suelo.

Gestión turística responsable: Las áreas de alto valor turístico, como los valles y cascadas, están dentro de zonas de alto riesgo. Según los resultados, se requiere establecer rutas turísticas seguras con señalización clara y programas educativos para minimizar la exposición de visitantes a crecidas repentinas.

Referencias bibliográficas

- Ardila Riaño, E. T. (2024). *Evaluación de la amenaza por eventos de inundación en un sector de la cuenca alta del río Bogotá empleando un enfoque de análisis multicriterio AHP*. <https://hdl.handle.net/20.500.12495/12219>
- Carrasquilla, O. (2019). *Bosques para el agua: Integración del manejo forestal sostenible y el manejo de recursos hídricos*. Caracas: CAF. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1493>
- Castañeda Castrillón, G. X. (2024). Navegando las aguas del río Cauca: implementación de un mapa de amenaza por inundación en La Pintada, Antioquia como herramienta para la gestión territorial. *Sol de Aquino*, (26), 34-45. <https://doi.org/10.15332/27448487.10181>
- CORNARE. (2012). *Evaluación y Zonificación de Riesgos por avenida torrencial*,

- inundación y movimiento en masa y dimensionamiento de procesos erosivos el en municipio del Carmen de Viboral.* <https://www.cornare.gov.co/GestionRiesgo/EL-CARMEN/EL-CAMREN-DE-VIBORAL.pdf>
- CORNARE. (2016). *Reserva forestal protectora regional de los cañones de los ríos Melcocho y Santo Domingo. Plan de manejo.* <https://www.cornare.gov.co/SIAR/Plan-de-manejo/plan-de-manejo-melcocho-santo-domingo/Plan-de-Manejo-de-los-Canones-de-los-rios-Melcocho-y-Santo-Domingo.pdf>
- Etxeberria, P., Edeso, J. M., & Brazaola, A. (2005). Metodología para crear mapas de peligros naturales en Guipúzcoa utilizando SIG. *GeoFocus. International Review of Geographical Information Science and Technology*, (5), 250-267. <https://geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/68>
- Flórez Lage, A., & Suavita Bejarano, M. (1997). Génesis y manifestaciones de las inundaciones en Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 6(1), 60-110. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6581736>
- Gómez Chávez, P. A., & Romero Capera, J. N. (2018). *Influencia del fenómeno de La Niña en la vulnerabilidad a inundaciones de las quebradas Santa librada y Curí, ubicadas en el sector de los barrios Arizona, Santa Librada Norte y La Fortaleza de la Localidad de Usme.* Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia. <http://hdl.handle.net/10983/16382>
- Gómez Ramírez, H. F., & Cuadros Londoño, S. A. (2021). *Diagnóstico del potencial natural y cultural de El Carmen de Viboral: una mirada al Plan Local de Turismo (2016-2025) desde el rol desempeñado por los actores del sector público.* (Doctoral dissertation, Universidad EAFIT). <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/9a0b8476-b1f1-4eec-80b1-f9b803c0e68d/content>
- González, D., Santana, C., Fábrega, J., Leiva, J., & Muñoz, M. (2021). Clasificación Pedológica en la Subcuenca del Río Zaratí para el Desarrollo de Buenas Prácticas de Conservación de los Suelos y Aguas. *Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología – APANAC*, 515-522. <https://doi.org/10.33412/apanac.2021.3226>
- González Valencia, J. E., (2006). Propuesta metodológica basada en un análisis multicriterio para la identificación de zonas de amenaza por deslizamientos e inundaciones. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(8), 59–70. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75050806>
- Méndez Morales, E. G., González Sandoval, M. del R., Navarro Gómez, H. I., Contreras López, C., & Cerón Carballo, J. E. (2024). La cuenca Río Grande Tulancingo: Erosión hídrica y vulnerabilidad. *Pädi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 12(Especial3), 32-42. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial3.13439>

- Pabón, J. D., & Torres, G. (2007). Impacto socioeconómico de los fenómenos El Niño y La Niña en la Sabana de Bogotá durante el siglo XX. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, (16), 81-94. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281821949008>
- Pulgarín Mejía, A. M. (2021). *Estrategia de información y comunicación para los habitantes en el manejo y uso de la Reserva Forestal Protectora Regional de los Cañones Melcocho y Santo Domingo–Sector Melcocho*. <https://repository.uniminuto.edu/handle/10656/16558>
- Riascos, J. A. T., Gil, C., Pinto, P. J. R., & Velasco, R. (2019). Obras de infraestructura para el control de inundaciones. *Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería*. <https://doi.org/10.26507/ponencia.198>
- Ribera Masgrau, L. (2004). Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tecnológicas. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 2004, núm. 43, p. 153-171. <https://dugidoc.udg.edu/handle/10256/1839?show=full>
- Santos Morán, Á. A. (2024). *Problemática de los procesos erosivos de suelos de la Región Andina del Ecuador* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2024). <http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/16021>
- Sedano Cruz, R. K. (2013). 2013). *Gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia*. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/27223>
- Torres Alape, J. C., Toro Martínez, M. K., & Posada Marín, J. A. (2024). Potenciales conflictos por uso del suelo asociados a la subdivisión predial en el municipio de El Carmen de Viboral. *Revista Politécnica*, 20(39), 157-170. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v20n39a11>
- Zuliani Coletti, S. (2016). Análisis del fenómeno del desplazamiento ambiental por desastres naturales asociados a la variabilidad climática, en Antioquia – Colombia. <https://bibliotecadigital.uco/handle/10495/26655>

Enlace de sustentación:**<https://youtu.be/Ciruf08b4bQ>**