

JACQUELINE CAPA MORENO

**EVALUACIÓN MULTICRITERIO DEL RIESGO
POTENCIAL DE INUNDACIÓN FLUVIAL MEDIANTE SIG
Y SU RELACIÓN CON LA PLANIFICACIÓN
TERRITORIAL URBANA DE FRANCISCO DE ORELLANA,
ECUADOR**

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Dirigido por el Dr. Aitor Àvila Callau

Máster interuniversitario en Planificación, Gobernanza y Liderazgo Territorial



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Vila-Seca

Septiembre, 2026

Índice general

Resumen	i
Resum	ii
Abstract	iii
1. Introducción.....	1
1.1. Contexto y problemática de las inundaciones fluviales	1
1.2. Conceptualización del riesgo de inundación	2
1.3. Evaluación multicriterio y SIG en el análisis del riesgo de inundación	3
1.4. Justificación y planteamiento del estudio.....	6
2. Objetivos	7
2.1. Objetivos generales.....	7
2.2. Objetivos específicos	7
3. Área de estudio y contexto histórico de las inundaciones fluviales	7
3.1. Evolución histórica y dinámica del cauce del río Coca.....	9
4. Metodología	11
4.1. Conceptualización de riesgo	11
4.2. Selección de criterios.....	12
4.3. Procesamiento de criterios	12
4.3.1. Elevación derivada del Modelo Digital de Elevaciones (MDE)	14
4.3.2. Pendiente del terreno derivada del MDE	14
4.3.3. Proximidad a la red hidrográfica	15
4.3.4. Zonas según susceptibilidad a inundación	15
4.3.5. Usos del suelo y coberturas vegetales expuestas.....	16
4.3.6. Distribución espacial de la población total expuesta	17
4.3.7. Infraestructura crítica expuesta	17
4.3.8. Red de transporte terrestre y aéreo expuesta	18
4.3.9. Vulnerabilidad asociada a los usos del suelo y coberturas vegetales.....	18
4.3.10. Vulnerabilidad demográfica de la población.....	19
4.3.11. Vulnerabilidad de la infraestructura crítica	20
4.3.12. Vulnerabilidad de la red vial y de transporte	21

4.4. AHP (Analytic Hierarchy Process)	21
4.4.1. Factor peligrosidad	23
4.4.2. Factor exposición	24
4.4.3. Factor vulnerabilidad	24
4.5. Construcción de mapas de factores	25
4.6. Construcción de escenarios de riesgo de inundación	26
4.7. Análisis de sensibilidad	27
4.7.1. Generación de escenarios.....	28
4.7.2. Evaluación de cambios.....	28
4.7.3. Cuantificación del impacto.....	29
4.8. Evaluación de la coherencia entre el modelo de riesgo potencial de inundación y la planificación territorial vigente	29
5. Resultados	30
5.1. Mapas normalizados de los criterios de evaluación del riesgo.....	31
5.1.1. Factor de peligrosidad.....	31
5.1.2. Factor de exposición	33
5.1.3. Factor de vulnerabilidad	35
5.2. Ponderación de criterios e integración de factores	37
5.3. Mapas integrados de los factores de riesgo.....	39
5.4. Escenarios de riesgo potencial de inundación.....	41
5.5. Análisis cuantitativo de la superficie por categorías de riesgo.....	43
5.6. Análisis de sensibilidad	45
5.7. Evaluación de la coherencia entre el modelo de riesgo potencial de inundación y la planificación territorial vigente	46
5.7.1. Clasificación del Ordenamiento Territorial (COT)	46
5.7.2. Áreas de expansión urbana	47
5.7.3. Zonas de retención natural.....	48
5.7.4. Comparación con la cartografía institucional	48
5.7.5. Relación entre el riesgo potencial y los conflictos de uso del suelo	49
6. Discusión	50
6.1. Interpretación general del modelo.....	51

6.2. Limitaciones	56
6.3. Futuras líneas de investigación	59
7. Conclusiones	61
8. Referencias bibliográficas.....	64
9. Anexos	70

Índice de figuras

Figura 1. Interacción entre los componentes del riesgo de inundación.....	3
Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio.....	8
Figura 3. Evolución histórica del cauce del río Coca entre 1965 y 2005 y situación del riesgo para la ciudad de El Coca	10
Figura 4. Mapas normalizados correspondientes al factor de peligrosidad	32
Figura 5. Mapas normalizados correspondientes al factor de exposición	34
Figura 6. Mapas normalizados correspondientes al factor de vulnerabilidad	36
Figura 7. Distribución espacial de los factores de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad	39
Figura 8. Escenarios de riesgo potencial de inundación	42
Figura 9. Superposición de las zonas de riesgo potencial de los escenarios evaluados con la Clasificación del Ordenamiento Territorial (COT), las áreas de expansión urbana y las zonas de retención natural	47
Figura 10. Superposición de las zonas de riesgo potencial de los escenarios evaluados con la cartografía institucional y los conflictos de uso del suelo.....	49

Índice de tablas

Tabla 1. Descripción detallada de criterios, fuente de datos y referencias bibliográficas.....	12
Tabla 2. Criterios utilizados en el modelo de evaluación del riesgo de inundación, agrupados según sus factores	13
Tabla 3. Rango de pendientes	15
Tabla 4. Reclasificación de zonas susceptibles a inundación	15
Tabla 5. Reclasificación del uso del suelo y cobertura vegetal expuesta	16
Tabla 6. Reclasificación de la infraestructura crítica expuesta	17
Tabla 7. Reclasificación de la red de transporte terrestre y aéreo expuesta al riesgo de inundación	18
Tabla 8. Reclasificación del uso del suelo y cobertura vegetal vulnerable	19
Tabla 9. Reclasificación de la infraestructura vulnerable	21
Tabla 10. Reclasificación de la red vial y la infraestructura aeroportuaria según su nivel de vulnerabilidad	21
Tabla 11. Comparación por pares del factor peligrosidad correspondiente al participante 1.....	23
Tabla 12. Matriz normalizada y pesos del factor peligrosidad correspondiente al participante 1.....	23
Tabla 13. Comparación por pares del factor exposición correspondiente al participante 1.....	24
Tabla 14. Matriz normalizada y pesos del factor exposición correspondiente al participante 1.....	24
Tabla 15. Comparación por pares del factor vulnerabilidad correspondiente al participante 1.....	25
Tabla 16. Matriz normalizada y pesos del factor vulnerabilidad correspondiente al participante 1.....	25
Tabla 17. Ponderaciones de criterios para el factor de peligrosidad	37
Tabla 18. Ponderaciones de criterios para el factor de exposición	37
Tabla 19. Ponderaciones de criterios para el factor de vulnerabilidad	37
Tabla 20. Superficie y porcentaje por categoría de riesgo potencial de inundación en los tres escenarios	44
Tabla 21. Relación entre las categorías de conflicto de uso del suelo y las clases de riesgo de los escenarios	50
Tabla A.22. Variación de las ponderaciones de cada criterio del factor peligrosidad utilizada en el análisis de sensibilidad.....	70
Tabla A.23. Variación de las ponderaciones de cada criterio del factor exposición utilizada en el análisis de sensibilidad.....	70

Tabla A.24. *Variación de las ponderaciones de cada criterio del factor vulnerabilidad utilizada en el análisis de sensibilidad.....71*

Tabla A.25. *Número de píxeles del escenario 1 que cambian de categoría de riesgo tras la variación de ± 10 % en la ponderación de cada criterio durante el análisis de sensibilidad.....72*

Resumen

Las inundaciones fluviales representan una de las principales amenazas naturales en la Amazonía ecuatoriana debido a la interacción entre factores hidrometeorológicos, dinámica fluvial y ocupación de áreas susceptibles. En este contexto, la presente investigación evaluó el riesgo potencial de inundación fluvial en el área urbana de Francisco de Orellana (El Coca) mediante una evaluación multicriterio basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el propósito de aportar información útil para la planificación territorial y la gestión del riesgo.

La metodología integró los componentes de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad mediante el método Analytic Hierarchy Process (AHP), que permitió establecer la importancia relativa de los criterios a través de comparaciones pareadas. La información espacial fue procesada en un entorno SIG para construir el modelo de riesgo potencial. Además, se definieron tres escenarios de ponderación que modificaron la contribución de la exposición y la vulnerabilidad, con el fin de analizar la sensibilidad del modelo ante diferentes configuraciones.

Los resultados identificaron como criterios más influyentes las zonas según susceptibilidad a inundación, la distribución espacial de la población expuesta y la vulnerabilidad demográfica. La comparación entre escenarios mostró diferencias relevantes en la distribución espacial del riesgo. El escenario con mayor peso de la vulnerabilidad (E3) concentró el 60,57 % de la superficie en categorías de riesgo alto y muy alto, mientras que el escenario con mayor peso de la exposición (E2) acumuló el 64,55 % en categorías muy bajo y bajo. El escenario equilibrado (E1) presentó una distribución intermedia.

El análisis de sensibilidad confirmó la robustez del modelo, evidenciando cambios espaciales relativamente reducidos ante variaciones en las ponderaciones. Finalmente, la comparación con la planificación territorial vigente permitió identificar áreas donde los usos actuales y las propuestas de desarrollo requieren una mayor consideración del riesgo de inundación. Se concluye que la metodología aplicada constituye una herramienta útil y transferible para apoyar la planificación territorial y la gestión del riesgo de inundación en contextos urbanos similares.

Palabras clave: inundación fluvial; evaluación multicriterio; AHP; peligrosidad; exposición; vulnerabilidad; SIG; El Coca.

Resum

Les inundacions fluvials representen una de les principals amenaces naturals a l'Amazònia equatoriana a causa de la interacció entre factors hidrometeorològics, dinàmica fluvial i ocupació d'àrees susceptibles. En aquest context, aquesta investigació va avaluar el risc potencial d'inundació fluvial a l'àrea urbana de Francisco d'Orellana (El Coca) mitjançant una avaluació multicriteri basada en sistemes d'informació geogràfica (SIG), amb l'objectiu d'aportar informació útil per a la planificació territorial i la gestió del risc.

La metodologia va integrar els components de perillositat, exposició i vulnerabilitat mitjançant el mètode Analytic Hierarchy Process (AHP), que va permetre establir la importància relativa dels criteris a través de comparacions aparellades. La informació espacial va ser processada en un entorn SIG per tal de construir el model de risc potencial. A més, es van definir tres escenaris de ponderació que van modificar la contribució de l'exposició i la vulnerabilitat, a fi d'analitzar la sensibilitat del model davant de diferents configuracions.

Els resultats van identificar com a criteris més influents la susceptibilitat a inundació, la distribució espacial de la població exposada i la vulnerabilitat demogràfica. La comparació entre escenaris va mostrar diferències rellevants en la distribució espacial del risc. L'escenari amb més pes de la vulnerabilitat (E3) va concentrar el 60,57% de la superfície en categories de risc alt i molt alt, mentre que l'escenari amb més pes de l'exposició (E2) va acumular el 64,55% en categories molt baix i baix. L'escenari equilibrat (E1) va presentar una distribució intermèdia.

L'anàlisi de sensibilitat va confirmar la robustesa del model, evidenciant canvis espacials relativament reduïts davant de variacions en les ponderacions. Finalment, la comparació amb la planificació territorial vigent va permetre identificar àrees on els usos actuals i les propostes de desenvolupament requereixen una consideració més gran del risc d'inundació. Es conclou que la metodologia aplicada constitueix una eina útil i transferible per donar suport a la planificació territorial i a la gestió del risc d'inundació en contextos urbans similars.

Paraules clau: inundació fluvial; avaluació multicriteri; AHP; perillositat; exposició; vulnerabilitat; SIG; El Coca.

Abstract

River flooding is one of the major natural hazards in the Ecuadorian Amazon due to the interaction of hydrometeorological factors, fluvial dynamics, and the occupation of flood-prone areas. In this context, this study evaluated the potential river flood risk in the urban area of Francisco de Orellana (El Coca) through a multicriteria assessment based on Geographic Information Systems (GIS), with the aim of providing useful information for territorial planning and risk management.

The methodology integrated the components of hazard, exposure, and vulnerability using the Analytic Hierarchy Process (AHP), which enabled the establishment of the relative importance of the criteria through pairwise comparisons. Spatial data were processed within a GIS environment to develop the potential flood risk model. In addition, three weighting scenarios were defined by modifying the contribution of exposure and vulnerability in order to analyze the sensitivity of the model under different configurations.

The results identified flood susceptibility zones, the spatial distribution of the exposed population, and demographic vulnerability as the most influential criteria. The comparison of scenarios revealed significant differences in the spatial distribution of risk. The scenario assigning greater weight to vulnerability (E3) concentrated 60.57% of the study area within high and very high risk categories, whereas the scenario assigning greater weight to exposure (E2) accumulated 64.55% within very low and low risk categories. The balanced scenario (E1) showed an intermediate distribution.

The sensitivity analysis confirmed the robustness of the model, demonstrating relatively limited spatial changes in response to variations in weighting values. Finally, the comparison with current territorial planning instruments made it possible to identify areas where existing land uses and proposed development initiatives require greater consideration of flood risk. It is concluded that the applied methodology constitutes a useful and transferable tool to support territorial planning and flood risk management in similar urban contexts.

Keywords: river flooding; multicriteria assessment; AHP; hazard; exposure; vulnerability; GIS; El Coca

1. Introducción

Las inundaciones fluviales constituyen uno de los fenómenos naturales que generan mayores impactos sobre la población, las infraestructuras y las actividades económicas a nivel mundial. Su ocurrencia responde a la interacción de factores naturales y antrópicos que, en muchos casos, se han visto intensificados por los efectos del cambio climático y las transformaciones del territorio. En este contexto, la evaluación del riesgo de inundación se ha convertido en una herramienta fundamental para comprender la distribución espacial de sus posibles impactos y apoyar la planificación territorial orientada a la reducción del riesgo de desastres.

1.1. Contexto y problemática de las inundaciones fluviales

El cambio climático constituye uno de los principales factores que incrementan el riesgo de inundaciones fluviales a escala mundial. No obstante, las evaluaciones sobre la evolución futura de este riesgo aún son limitadas y, en la mayoría de los casos, se han centrado únicamente en un indicador: la variación en la frecuencia de ocurrencia de eventos específicos. En conjunto, estos estudios coinciden en que el cambio climático podría incrementar significativamente el riesgo de inundaciones, aunque la magnitud de estos efectos depende en gran medida del escenario climático considerado (Arnell & Gosling, 2016). Paralelamente, las actividades humanas han transformado de forma creciente la dinámica natural de los ríos mediante la modificación de sus cauces y trazados, reduciendo en un 63 % el número de grandes ríos de flujo libre y favoreciendo procesos generalizados de estrechamiento y erosión de los cauces (Barneveld et al., 2025).

En el contexto ecuatoriano, la provincia de Orellana dispone de abundantes recursos hídricos al formar parte de la Demarcación Hidrográfica del Napo, específicamente de la cuenca baja del río Napo, una de las de mayor caudal del país (GADPO, 2023). Estas características hidrológicas, combinadas con las condiciones climáticas de la región, hacen que las inundaciones constituyan la amenaza natural de mayor impacto en la provincia. Entre 2010 y 2023, la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, a través de la Coordinación Zonal 2, registró 113 eventos de inundación distribuidos principalmente en las riberas de los ríos y en centros poblados, con un total de 920 familias afectadas. Dentro de este período, el cantón Francisco de Orellana concentró el mayor número de eventos registrados (GADPO, 2023).

Diversos estudios han señalado que la ciudad de El Coca presenta una elevada vulnerabilidad frente a las inundaciones fluviales. Entre los principales factores que incrementan esta vulnerabilidad se encuentran la expansión urbana hacia áreas no aptas para el desarrollo, la proliferación de actividades antrópicas, como las

trilladoras, y la apertura de vías en zonas vinculadas a cuerpos de agua. A ello se suma la limitada disponibilidad de información actualizada sobre los riesgos hidrológicos y la escasa sensibilización de la población respecto a la prevención de desastres, aspectos que dificultan la planificación territorial y reducen la capacidad de respuesta frente a eventos extremos. Esta problemática se enmarca en un contexto regional en el que las inundaciones constituyen uno de los desastres naturales más frecuentes en América Latina, cuya ocurrencia e intensidad se han visto agravadas por la variabilidad y el cambio climático (Guerrero Calero et al., 2025).

1.2. Conceptualización del riesgo de inundación

El riesgo de inundación se define, según la Directiva de la UE sobre inundaciones (European Council, 2007), como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de una inundación y de sus posibles consecuencias adversas para la salud humana, el medio ambiente y la actividad económica asociadas a dicha inundación. De forma análoga a la definición estándar de riesgo de eventos extremos, el riesgo de inundación se entiende como la interacción de tres componentes fundamentales: la peligrosidad, que hace referencia a la frecuencia y magnitud de las inundaciones; la exposición, entendida como la presencia de población, edificios, infraestructuras, actividades económicas y sociales localizadas en zonas susceptibles de inundación; y la vulnerabilidad, que representa el grado de susceptibilidad de los elementos expuestos a sufrir daños ante la ocurrencia del evento (Figura 1) (Field et al., 2012; Kron, 2005).

Bajo este enfoque, el riesgo de inundación no depende únicamente de la ocurrencia del fenómeno hidrológico, sino también de las características de los elementos expuestos y de su capacidad para resistir, absorber o recuperarse de sus efectos. En consecuencia, una evaluación integral del riesgo requiere considerar simultáneamente la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad, ya que la interacción entre estos componentes determina la magnitud de los impactos potenciales sobre el territorio.

Figura 1. Interacción entre los componentes del riesgo de inundación



Fuente: elaboración propia; imagen generada con ChatGPT (OpenAI, 2026)

1.3. Evaluación multicriterio y SIG en el análisis del riesgo de inundación

En este contexto, la cartografía del riesgo de inundación constituye una herramienta fundamental para la gestión del riesgo, ya que permite representar espacialmente la distribución del riesgo y estimar los posibles daños asociados a distintos escenarios de inundación. Estos mapas proporcionan información clave para la planificación de la respuesta ante emergencias, la ordenación del territorio y la gestión del uso del suelo, así como para la implementación de medidas de prevención y mitigación. Además, contribuyen a fortalecer la sensibilización de la población frente al riesgo y facilitan la adaptación de las comunidades ante condiciones hidrológicas cambiantes (Maranzoni et al., 2023; Merz et al., 2007; Sayers et al., 2013).

En los últimos años, los mapas de riesgo de inundación han adquirido un papel cada vez más relevante como instrumentos de apoyo para la toma de decisiones y la comunicación del riesgo entre gestores, responsables políticos y otros actores involucrados. Al mismo tiempo, el desarrollo de nuevas tecnologías geoespaciales y de diferentes metodologías de análisis ha ampliado las posibilidades para representar y evaluar el riesgo con mayor precisión, haciendo necesario comprender las fortalezas y limitaciones de los distintos enfoques disponibles (Sayers et al., 2013).

En este sentido, la selección de la metodología de evaluación resulta determinante, ya que condiciona la forma en que se representan los componentes del riesgo y la precisión de los resultados obtenidos.

La evaluación del riesgo de inundación se ha abordado mediante diversos enfoques metodológicos, cuya aplicación depende de la disponibilidad de datos, la escala de análisis y los objetivos del estudio. Entre los más utilizados se encuentran los modelos hidrológicos e hidráulicos, capaces de simular la generación y propagación de las inundaciones con un elevado nivel de detalle físico; sin embargo, su implementación requiere información hidrometeorológica extensa, modelos digitales del terreno de alta resolución y una considerable capacidad computacional (Apel et al., 2009; Merz et al., 2010). En contextos donde la información disponible es limitada, han adquirido especial relevancia los enfoques espaciales basados en Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales permiten integrar variables físicas, ambientales y socioeconómicas mediante técnicas de evaluación multicriterio, proporcionando una representación espacial del riesgo especialmente útil para apoyar la planificación territorial y la gestión del riesgo de desastres (De Moel et al., 2009; de Brito & Evers, 2016).

La elaboración de mapas de susceptibilidad y riesgo de inundación requiere integrar información hidrológica, topográfica, antrópica y meteorológica, además de seleccionar un modelo de análisis capaz de representar adecuadamente la interacción entre estos factores (Islam et al., 2025; Tariq et al., 2022). En este contexto, los SIG se han consolidado como una de las herramientas más utilizadas para el análisis espacial del riesgo debido a su capacidad para gestionar, analizar e integrar grandes volúmenes de información georreferenciada (Prashar et al., 2023). Asimismo, su combinación con métodos de evaluación multicriterio permite incorporar simultáneamente variables de distinta naturaleza y generar modelos espaciales más flexibles y precisos para apoyar la toma de decisiones (Abdo et al., 2024; Idrees et al., 2022; Mishra & Sinha, 2020; Wijesinghe et al., 2023).

En este sentido, la Evaluación Multicriterio (EMC) se ha consolidado como una de las metodologías más empleadas para el análisis espacial del riesgo, ya que permite integrar de forma sistemática múltiples criterios físicos, ambientales, sociales y económicos en un único modelo de evaluación (Rincón et al., 2018). Su principal ventaja radica en la posibilidad de combinar información cuantitativa y cualitativa, facilitando la incorporación simultánea de los componentes de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad en el proceso de toma de decisiones (de Brito & Evers, 2016).

Entre los métodos de evaluación multicriterio, el Analytic Hierarchy Process (AHP), desarrollado por Saaty (1990), es uno de los más utilizados debido a su capacidad para estructurar problemas complejos mediante una jerarquía de criterios y subcriterios, asignando ponderaciones a partir de comparaciones por pares y verificando la consistencia de los juicios emitidos. Su flexibilidad para integrar datos cuantitativos con el conocimiento de expertos ha favorecido su aplicación en ámbitos como la planificación urbana, las ciencias ambientales y la gestión del riesgo de desastres (Mazarakis et al., 2025; Poddar et al., 2023; Saaty, 1990b, 1990a). En estudios de riesgo de inundación, el método se ha utilizado para ponderar variables relacionadas con la topografía, la hidrología, el uso del suelo y la infraestructura expuesta, facilitando la elaboración de mapas de susceptibilidad y riesgo (Diriba & Karuppannan, 2024; Hagos et al., 2022).

Diversos estudios han demostrado la utilidad de la evaluación multicriterio integrada con SIG para la cartografía del riesgo de inundación. Por ejemplo, Jayawardane et al. (2026) aplicaron un enfoque de toma de decisiones multicriterio basado en SIG para identificar zonas de riesgo de inundación urbana en Colombo (Sri Lanka), Auckland (Nueva Zelanda) y Valencia (España). Se utilizaron capas de mapas temáticos que representaron características topográficas, geológicas, climáticas e hidrológicas para evaluar las zonas de riesgo de inundación urbana. Se aplicó de forma singular un marco híbrido interregional del método AHP en tres ciudades globales diferentes, utilizando un proceso híbrido para reducir la subjetividad y la incertidumbre de las ponderaciones de susceptibilidad.

De forma similar, Tikuye et al. (2025) integraron datos geoespaciales con un enfoque de análisis de decisiones multicriterio, se empleó el AHP para elaborar mapas de susceptibilidad a inundaciones en Texas, EE. UU. Validando sus resultados mediante la curva ROC (Curva Característica Operativa del Receptor), centrándose en el Área bajo la Curva. Asimismo, Khan et al. (2025) avaluó el riesgo de inundación en la Cuenca del Río Swat utilizando 22 indicadores distribuidos en las tres dimensiones principales del riesgo de inundación: peligro, vulnerabilidad y exposición. El peligro

de inundación se modeló utilizando 11 indicadores, categorizados en aspectos ambientales, hidrológicos y geográficos, mientras que la vulnerabilidad se evaluó mediante factores socioeconómicos, proximidad geográfica y características del uso del suelo. La exposición se analizó en función de métricas de población e infraestructura crítica. Todos los datos se convirtieron en capas temáticas en un SIG, se ponderaron sistemáticamente mediante el método AHP y se combinaron para producir mapas de peligro, vulnerabilidad y exposición, respectivamente. Estos mapas se integraron mediante una ecuación de riesgo para generar el mapa final de riesgo de inundación.

Por otra parte, Xu et al. (2026) combinaron el método CRITIC (Criterios de Importancia a Través de la Correlación Intercriterio) y la técnica TOPSIS (Técnica de Ordenación por Preferencia según la Similitud con la Solución Ideal) con SIG para evaluar el riesgo de inundación urbana de la provincia de Hubei.

En conjunto, estos estudios evidencian que la integración de los SIG con técnicas de evaluación multicriterio, particularmente mediante el método AHP, constituye un enfoque robusto para representar espacialmente el riesgo de inundación y apoyar los procesos de planificación territorial y gestión del riesgo en distintos contextos geográficos.

1.4. Justificación y planteamiento del estudio

A pesar de la recurrencia de las inundaciones y de los impactos registrados en el cantón Francisco de Orellana, son escasos los estudios que evalúan de manera integrada el riesgo de inundación mediante la combinación de los componentes de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad utilizando técnicas de evaluación multicriterio. Asimismo, existe una limitada incorporación del análisis de sensibilidad que permita evaluar la incertidumbre asociada a las ponderaciones asignadas en estos modelos.

En este contexto, resulta necesario desarrollar herramientas que permitan evaluar el riesgo de inundación de forma integrada y generar información espacial que apoye la planificación territorial y la gestión del riesgo de desastres. Con base en esta necesidad, el presente estudio propone analizar el riesgo potencial de inundación fluvial en la ciudad de Francisco de Orellana (El Coca) mediante un enfoque de evaluación multicriterio basado en el método AHP integrado con GIS.

El estudio busca generar información espacial que contribuya a la planificación urbana y a la gestión del riesgo territorial. Adicionalmente, se incorpora un análisis de sensibilidad desarrollado en el lenguaje de programación R con el fin de evaluar la robustez del modelo y la influencia de las ponderaciones asignadas durante el proceso

AHP, aportando un elemento de validación que aún ha sido escasamente abordado en estudios similares. Como resultado, se obtuvieron mapas de factores de riesgo y escenarios de riesgo de inundación que representan la distribución espacial y los distintos niveles de intensidad del riesgo en el área de estudio.

2. Objetivos

En función de la problemática planteada y de la necesidad de evaluar el riesgo potencial de inundación fluvial en el área urbana de la ciudad Francisco de Orellana, se establecen los objetivos que orientan el desarrollo de la presente investigación. Estos permiten delimitar el alcance del estudio y definir las principales acciones necesarias para caracterizar los componentes asociados al riesgo, integrar la información mediante técnicas de evaluación multicriterio basadas en SIG y analizar los resultados obtenidos en relación con la planificación urbana.

2.1. Objetivos generales

1. Evaluar el riesgo potencial de inundación fluvial en la ciudad de Francisco de Orellana (El Coca), mediante la aplicación de un análisis multicriterio basado en SIG, como apoyo a la planificación urbana y la gestión del riesgo territorial.
2. Analizar de forma complementaria la coherencia entre los escenarios de riesgo potencial de inundación fluvial y la planificación territorial vigente del cantón Francisco de Orellana, como apoyo para la formulación de recomendaciones orientadas a la planificación urbana y la gestión del riesgo.

2.2. Objetivos específicos

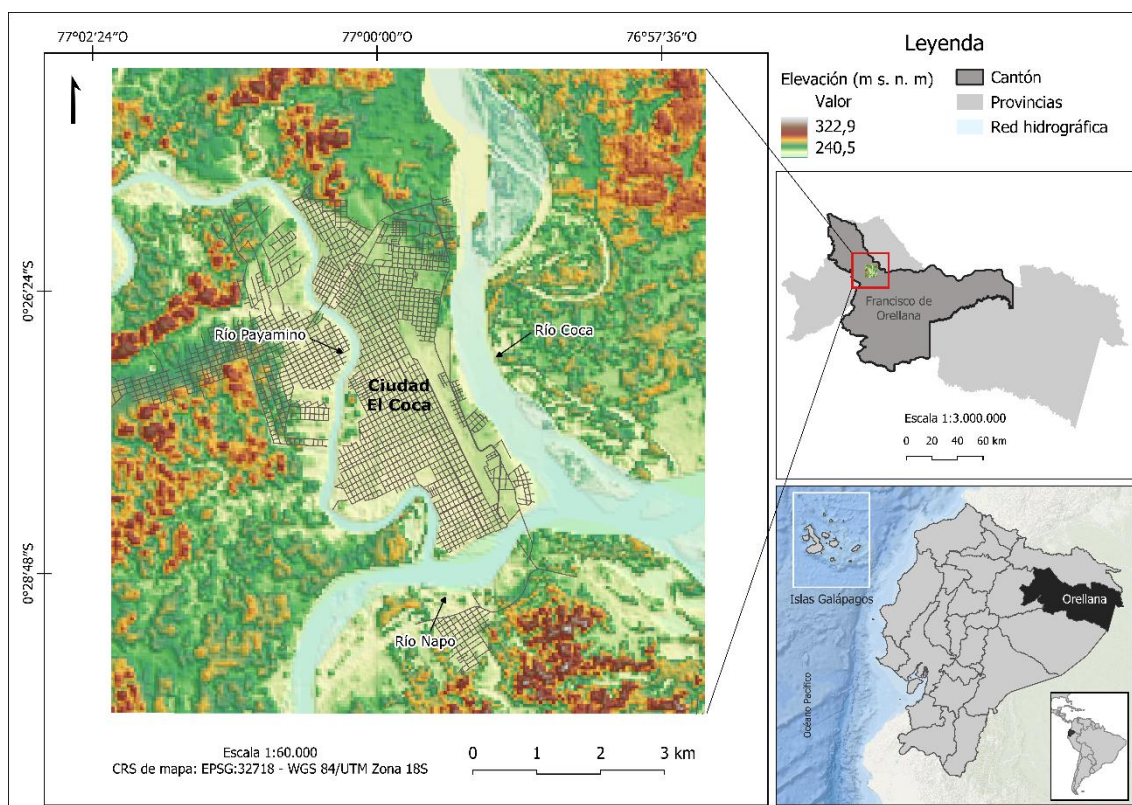
1. Identificar y calcular los factores y subfactores que intervienen en el riesgo potencial de inundación fluvial mediante el uso de SIG.
2. Integrar los factores y subfactores mediante técnicas de evaluación multicriterio para generar distintos escenarios de riesgo potencial de inundación fluvial.
3. Realizar un análisis de sensibilidad de los escenarios generados para evaluar la robustez y estabilidad del modelo.
4. Comparar los escenarios de riesgo obtenidos, con la planificación urbana vigente del cantón Francisco de Orellana, con el propósito de formular recomendaciones que fortalezcan la planificación urbana y la gestión del riesgo.

3. Área de estudio y contexto histórico de las inundaciones fluviales

El cantón Francisco de Orellana, ubicado en la provincia de Orellana, Ecuador, tiene una superficie de 7.083 km² y, de acuerdo con el Censo de Población y Vivienda de

2022, cuenta con 95.130 habitantes (INEC, 2022). La presente investigación se desarrolla exclusivamente en el área urbana de la ciudad de El Coca (Figura 2), cabecera cantonal, que comprende una superficie aproximada de 93,79 km² y una población de 61.186 habitantes.

Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio



Fuente: elaboración propia en QGIS a partir de datos abiertos del Ministerio de Gobierno, 2025

El cantón presenta una altitud comprendida entre los 200 y 330 m. s. n. m., mientras que la parroquia San José de Guayusa registra las mayores elevaciones, alcanzando entre 395 y 460 m. s. n. m. El clima es tropical húmedo, con precipitaciones anuales que oscilan entre 2.800 y 4.500 mm y temperaturas medias entre 24 °C y más de 30 °C (Barragán, 2023; GADMFO, 2024; Guerrero Calero et al., 2025). Estas condiciones climáticas favorecen una elevada disponibilidad hídrica y contribuyen a la ocurrencia recurrente de inundaciones en el territorio.

En este contexto, la provincia presenta un régimen pluviométrico bimodal, con máximos de precipitación en mayo, cuando se registran en promedio 345,2 mm/mes, y mínimos en agosto y enero, con valores medios de 166,4 mm y 198,0 mm, respectivamente. Además, la precipitación media anual ha variado entre 1.546,6 mm, registrada en 1984, y 4.430,7 mm en 1999 (GADPO, 2023). A estas condiciones climáticas se suma la localización estratégica de la ciudad de El Coca en la confluencia

de los ríos Coca, Payamino y Napo, característica que ha favorecido su desarrollo como uno de los principales centros urbanos de la Amazonía ecuatoriana, pero que también incrementa su exposición a inundaciones fluviales.

Como consecuencia de estas condiciones hidroclimáticas, las inundaciones constituyen uno de los principales peligros naturales del cantón. Los registros históricos desde 2010 reportan afectaciones a 6.131 personas y 757 viviendas. El año 2024 representó el evento de mayor impacto del período analizado, con 3.101 personas y 411 viviendas afectadas, cifras que representan más de la mitad del total histórico de afectaciones registradas (GADMFO, 2024).

3.1. Evolución histórica y dinámica del cauce del río Coca

La evolución histórica del cauce del río Coca evidencia que la migración lateral y la erosión de sus márgenes constituyen procesos naturales que han modelado el territorio durante varias décadas. De acuerdo con el informe técnico de la Dirección de Gestión de Riesgos del GAD Municipal de Francisco de Orellana, la comparación del trazado del río entre 1965 y 2005 (Figura 3) muestra un desplazamiento progresivo del cauce principal y una importante pérdida de terreno por erosión en la ribera. La superposición de ambos cauces permite apreciar la magnitud de estos cambios geomorfológicos y pone de manifiesto la situación de riesgo para los asentamientos urbanos ubicados en las proximidades del río (GAD Municipal de Francisco de Orellana, 2025).

A esta dinámica histórica se sumó el colapso de la cascada San Rafael, ocurrido el 2 de febrero de 2020, que desencadenó un proceso de erosión regresiva aún activo. Este fenómeno incrementó el transporte de sedimentos hacia los tramos inferiores de la cuenca, favoreciendo la colmatación parcial de los cauces y reduciendo su capacidad hidráulica durante eventos de crecida (Barrera Crespo et al., 2024). Como consecuencia, se han intensificado los procesos de erosión lateral y la susceptibilidad a inundaciones en distintos sectores del cantón Francisco de Orellana.

Aunque en la cuenca alta del río Coca se localiza la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, esta corresponde a una central de pasada, por lo que no dispone de un embalse destinado a regular las crecidas extraordinarias aguas abajo. En consecuencia, el comportamiento hidrológico de los ríos Coca, Napo y Payamino continúa dependiendo principalmente de las condiciones meteorológicas y de la dinámica natural de la cuenca.

Figura 3. Evolución histórica del cauce del río Coca entre 1965 y 2005 y situación del riesgo para la ciudad de El Coca



Fuente: adaptado de la Dirección de Gestión de Riesgos, GAD Municipal de Francisco de Orellana, 2025

Los informes de la Dirección de Gestión de Riesgos del GAD Municipal de Francisco de Orellana indican que la elevada carga de sedimentos ha favorecido procesos de erosión e inundación que han afectado terrenos, infraestructura y asentamientos ubicados en las riberas de estos ríos (GAD Municipal de Francisco de Orellana, 2025). Este contexto refuerza la necesidad de disponer de herramientas que permitan identificar las áreas con mayor riesgo potencial de inundación y aportar información para la planificación territorial y la gestión del riesgo.

En concordancia con estos antecedentes, la plataforma ThinkHazard clasifica el peligro de inundación fluvial en la provincia de Orellana como alto, indicando la probabilidad de que, al menos una vez en los próximos diez años, ocurra un evento con potencial para ocasionar pérdidas humanas y daños significativos. En consecuencia, la planificación territorial, el diseño de infraestructuras y las estrategias de gestión del riesgo deben incorporar este nivel de amenaza con el fin de reducir la vulnerabilidad y fortalecer la resiliencia del territorio (ThinkHazard, 2024).

4. Metodología

La metodología propuesta integra técnicas de análisis multicriterio y sistemas de información geográfica (SIG) para evaluar el riesgo potencial de inundación en el área urbana de la ciudad de Francisco de Orellana (El Coca). El procedimiento metodológico comprendió la selección de doce criterios representativos de la peligrosidad, exposición y la vulnerabilidad, identificados a partir de la revisión de la literatura y el juicio de expertos. Posteriormente, los criterios fueron procesados en QGIS para la generación de los mapas temáticos, ponderados mediante Analytic Hierarchy Process (AHP) y combinados para obtener los escenarios de riesgo. Finalmente, se realizó un análisis de sensibilidad con el fin de evaluar la estabilidad del modelo frente a variaciones en las ponderaciones asignadas.

4.1. Conceptualización de riesgo

El riesgo es un concepto multifactorial que integra la probabilidad de que un fenómeno peligroso produzca daños, pérdidas humanas, daños materiales, interrupción de servicios, impactos socioeconómicos o deterioro ambiental, en función de la exposición de la población, los bienes, la infraestructura, los ecosistemas y otros activos, así como su vulnerabilidad y capacidad de respuesta frente a sus efectos. En términos generales, el riesgo resulta de la interacción entre la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad (Abajo et al., 2023; Secretaría de Medio Ambiente et al., 2025).

A partir de esta conceptualización, cada factor fue representado mediante criterios espaciales que permitieron representar sus diferentes dimensiones dentro del área de estudio. En el contexto de las inundaciones, el factor peligrosidad permite identificar las áreas con mayor predisposición a ser afectadas por el fenómeno. En este estudio, la peligrosidad se representó mediante variables físicas del territorio relacionadas con la generación y propagación de las inundaciones, como la distancia a la red hidrográfica, la altitud, la pendiente y las zonas susceptibles de inundación.

Por su parte, la exposición permite identificar los elementos localizados en las áreas potencialmente inundables y susceptibles de experimentar pérdidas o daños. En el modelo propuesto, la exposición se representó mediante las capas de población, uso y cobertura del suelo, infraestructuras y vías de acceso, al considerarse los principales elementos expuestos presentes en el área de estudio.

El componente de vulnerabilidad refleja las características sociales y territoriales que condicionan la capacidad de resistir, afrontar o recuperarse de los efectos del evento. En este estudio, la vulnerabilidad se representó mediante criterios asociados a la distribución de la población vulnerable, el uso y cobertura del suelo, las

infraestructuras y la accesibilidad proporcionada por la red de transporte terrestre y aérea, al considerarse factores que influyen tanto en el nivel de afectación como en la capacidad de respuesta y recuperación frente a una inundación.

4.2. Selección de criterios

Los criterios considerados en esta investigación representan los principales factores asociados al riesgo potencial de inundación y constituyen la base para la construcción del modelo de evaluación. Su selección respondió a la necesidad de caracterizar las dimensiones de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad mediante información espacial representativa del área de estudio. La Tabla 1 presenta la descripción de cada criterio, las fuentes de datos utilizadas para su elaboración y las referencias bibliográficas que respaldan su incorporación al modelo.

Tabla 1. Descripción detallada de criterios, fuente de datos y referencias bibliográficas

Criterios	Fuente de datos	Referencias bibliográficas
Uso del suelo y cobertura vegetal	(Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), 2024)	(Gün & Yılmaz, 2026) (Parsian et al., 2021)
Población	Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2022)	(Gün & Yılmaz, 2026)
Infraestructura crítica	(Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), 2023)	(Rincón et al., 2018)
Red de transporte terrestre y aéreo	(Instituto Geográfico Militar (IGM), 2017)	(Gün & Yılmaz, 2026)
Zonas según susceptibilidad a inundación	(Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), 2025)	(Grupo de Evaluación de Riesgo de la Agencia de Medio Ambiente (AMA), 2014)
Proximidad a la red hidrográfica	(Instituto Geográfico Militar (IGM), 2017)	(Rincón et al., 2018) (Parsian et al., 2021)
Elevación derivada del Modelo Digital de Elevaciones (MDE)	A partir del DEM, (MAG-SIGTIERRAS, 2014)	(Parsian et al., 2021)
Pendiente del terreno derivada del MDE	A partir del DEM, (MAG-SIGTIERRAS, 2014)	(Parsian et al., 2021) (Gün & Yılmaz, 2026) (Rincón et al., 2018)

Fuente: elaboración propia

4.3. Procesamiento de criterios

Los doce criterios espaciales seleccionados fueron procesados en QGIS y convertidos a formato ráster para su integración en el modelo de evaluación multicriterio. Estos

se agruparon en los tres componentes del riesgo de inundación: peligrosidad, exposición y vulnerabilidad (Tabla 2).

Tabla 2. Criterios utilizados en el modelo de evaluación del riesgo de inundación, agrupados según sus factores

Factor Peligrosidad	Proximidad a la red hidrográfica
	Elevación derivada del Modelo Digital de Elevaciones (MDE)
	Pendiente del terreno derivada del MDE
	Zonas según susceptibilidad a inundación
Factor Exposición	Usos del suelo y coberturas vegetales expuestas
	Distribución espacial de la población total expuesta
	Infraestructura crítica expuesta
	Red de transporte terrestre y aéreo expuesta
Factor Vulnerabilidad	Vulnerabilidad asociada a los usos del suelo y coberturas vegetales
	Vulnerabilidad demográfica de la población
	Vulnerabilidad de la infraestructura crítica
	Vulnerabilidad de la red vial y de transporte
Fuente: elaboración propia	

Como etapa previa al procesamiento de los criterios espaciales, se utilizó una capa vectorial de referencia que delimita el área urbana de la ciudad de Francisco de Orellana, correspondiente al ámbito de estudio de esta investigación. Esta capa definió la extensión espacial común del análisis y sirvió como base para las operaciones de geoprocésamiento, incluyendo las intersecciones y uniones espaciales necesarias para preparar las capas de entrada del modelo. Posteriormente, las capas resultantes fueron convertidas a formato ráster utilizando la extensión de la capa de referencia, un tamaño de píxel uniforme de 50 × 50 m y el sistema de referencia de coordenadas WGS 84 / UTM zona 18S (EPSG:32718), con el propósito de garantizar la homogeneidad espacial durante la integración de las capas.

La resolución espacial de 50 × 50 m se seleccionó como un compromiso entre el nivel de detalle requerido para el análisis urbano y la necesidad de integrar de manera homogénea variables procedentes de distintas fuentes y escalas de información. Esta resolución permitió reducir el volumen de procesamiento sin perder representatividad espacial necesaria para la evaluación del riesgo potencial de inundación.

Posteriormente, todas las capas fueron representadas en formato ráster y estandarizadas en una escala común entre 0 y 1, donde el valor 1 representa la mayor contribución relativa a la peligrosidad, la exposición o la vulnerabilidad y, en consecuencia, un mayor aporte al riesgo de inundación. Las capas continuas se normalizaron mediante el método Min-Max, el cual permite reescalar los valores

originales a un rango común entre 0 y 1 (Kappal, 2019; Peng & Zhang, 2022), mientras que las capas categóricas fueron reclasificadas de acuerdo con los criterios definidos para cada una de ellas, asignando valores comprendidos entre 0 y 1 según su contribución relativa al riesgo.

4.3.1. Elevación derivada del Modelo Digital de Elevaciones (MDE)

La elevación constituye uno de los parámetros más relevantes en la evaluación del riesgo de inundación, ya que influye directamente en la acumulación y el drenaje superficial del agua. En general, las zonas de menor altitud presentan una mayor probabilidad de inundación debido a la acumulación de escorrentía, mientras que las áreas situadas a mayor altitud son menos susceptibles a este tipo de eventos (Parsian et al., 2021).

La capa de elevación se obtuvo a partir de un MDE con una resolución espacial de 3 m y un error cuadrático medio (RMS) de 1,5 m. Este modelo fue generado mediante técnicas de fotogrametría y tecnología LIDAR, referidas al sistema geodésico SIRGAS 95, y desarrollado por el Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (Mancero et al., 2015).

Para su incorporación al modelo de evaluación multicriterio, la capa de elevación fue reclasificada y normalizada en una escala de 0 a 1, donde los valores cercanos a 0 representan las zonas de mayor altitud y, por tanto, menor susceptibilidad a inundaciones, mientras que los valores próximos a 1 corresponden a las áreas de menor altitud, asociadas a un mayor riesgo de inundación.

4.3.2. Pendiente del terreno derivada del MDE

La pendiente es un parámetro que influye en el comportamiento de la escorrentía superficial y, por consiguiente, en la susceptibilidad a las inundaciones. Las pendientes suaves reducen la velocidad del flujo y favorecen la acumulación del agua, lo que incrementa la probabilidad de inundación. En contraste, las pendientes más pronunciadas facilitan el drenaje y el rápido desplazamiento de la escorrentía, disminuyendo la posibilidad de acumulación de agua (Parsian et al., 2021; Rincón et al., 2018).

La capa de pendiente se generó a partir del MDE mediante las herramientas de análisis del terreno disponibles en QGIS. Posteriormente, fue reclasificada y normalizada en una escala de 0 a 1, asignando el valor 0 a las pendientes más elevadas, asociadas a una menor susceptibilidad de inundación, y el valor 1 a las pendientes más suaves, correspondientes a una mayor susceptibilidad (Tabla 3).

Tabla 3. Rango de pendientes

Categoría	Clase (%)	Peso
Muy suave	0-5	1
Suave	5-12	0.75
Media	12-25	0.50
Media a fuerte	25-40	0.25
Fuerte	40-70	0

Fuente: adaptado de la Secretaría de Gestión de Riesgos, 2019

4.3.3. Proximidad a la red hidrográfica

La distancia a los ríos constituye un factor determinante en la distribución espacial de las inundaciones, ya que la probabilidad e intensidad de estos eventos tienden a ser mayores en las zonas próximas a los cauces principales (Parsian et al., 2021; Rincón et al., 2018). En consecuencia, este parámetro permite delimitar las áreas potencialmente más susceptibles a inundaciones fluviales.

Para su elaboración, se partió de la capa vectorial de ríos del área de estudio. A partir de esta, se generó una malla regular de píxeles de 50 m de resolución, en la cual se calcularon los centroides de cada celda. Posteriormente, se estimó la distancia desde cada centroide hasta el cauce más cercano mediante la herramienta de distancia mínima en QGIS. El resultado fue rasterizado a partir de la malla vectorial, utilizando el campo de distancia como variable de referencia.

Finalmente, la capa fue normalizada en una escala de 0 a 1, donde los valores cercanos a 0 representan las zonas más alejadas de los ríos, asociadas a una menor susceptibilidad a inundaciones, mientras que los valores próximos a 1 corresponden a áreas cercanas a los cauces, con mayor nivel de riesgo.

4.3.4. Zonas según susceptibilidad a inundación

La capa de zonas susceptibles a inundación del Ministerio de Agricultura y Ganadería (2025) fue reclasificada según los valores establecidos en la Tabla 4 y posteriormente rasterizada, con el propósito de integrarla al modelo multicriterio de evaluación del riesgo.

Tabla 4. Reclasificación de zonas susceptibles a inundación

Clase	Valor reclasificado
Alta	1
Media	0.50
Baja	0

Fuente: elaboración propia

4.3.5. Usos del suelo y coberturas vegetales expuestas

El uso y la cobertura del suelo constituyen un factor clave en la dinámica hidrológica del territorio, ya que determinan la capacidad de infiltración y la generación de escorrentía superficial. En términos generales, las coberturas naturales, como bosques y áreas agrícolas, favorecen la infiltración del agua, mientras que las superficies urbanizadas, caracterizadas por un alto grado de impermeabilización, incrementan la escorrentía superficial. Estas diferencias, asociadas tanto a procesos naturales como a la intervención humana, influyen directamente en el comportamiento hidrológico del territorio, especialmente en áreas urbanas con una alta heterogeneidad del suelo, afectando de manera significativa la susceptibilidad a inundaciones (Gün & Yılmaz, 2026; Parsian et al., 2021). A la capa de uso y cobertura del suelo se le aplicó una reclasificación binaria (Tabla 5), asignando a cada categoría un valor entre 0 y 1 en función de su nivel de exposición al riesgo. Se asignó el valor 0 a los cuerpos de agua, ya que corresponden al elemento asociado a la amenaza de inundación y no constituyen elementos expuestos. Al resto de las coberturas del suelo se les asignó el valor 1, al considerarse que presentan exposición potencial frente al riesgo de inundación analizado. Posteriormente, la capa fue incorporada al modelo multicriterio en formato ráster.

Tabla 5. Reclasificación del uso del suelo y cobertura vegetal expuesta

Clase	Valor reclasificado
Antrópico (urbano, complejo industrial, planta de tratamiento de agua potable, pista de aterrizaje, área en proceso de urbanización, centro poblado, campamento empresarial, complejo recreacional, complejo educacional)	1
Tierras improductivas (banco de arena, área erosionada)	1
Pecuario (pasto cultivado)	1
Agropecuario mixto (pasto cultivado con presencia de árboles, misceláneo de frutales)	1
Agrícola (plátano, cacao, malanga, café, palma aceitera, maíz)	1
Acuícola (piscícola)	1
Protección o producción (balsa, laurel)	1
Conservación y producción (vegetación herbácea húmeda muy alterada, vegetación herbácea húmeda medianamente alterada)	1
Conservación y protección (matorral húmedo poco alterado, matorral húmedo medianamente alterado, matorral húmedo muy alterado, bosque húmedo poco alterado, bosque húmedo medianamente alterado, bosque húmedo muy alterado, vegetación herbácea de humedal poco alterada, vegetación herbácea de humedal muy alterada)	1
Agua (río doble, lago/laguna)	0

Fuente: elaboración propia

4.3.6. Distribución espacial de la población total expuesta

La densidad de población constituye un factor determinante en la evaluación del riesgo de inundación, ya que influye directamente en el nivel de exposición de la población. En áreas con alta densidad poblacional, el número de personas potencialmente afectadas ante un evento de inundación es mayor, lo que incrementa el nivel de riesgo asociado (Gün & Yilmaz, 2026).

Para su incorporación al modelo, la capa de población fue sometida a un proceso de normalización, mediante el cual los valores de población fueron transformados a una escala continua entre 0 y 1. En esta escala, los valores cercanos a 0 representan las áreas con menor densidad poblacional, mientras que los valores próximos a 1 corresponden a aquellas con mayor concentración de población. Posteriormente, la capa fue incorporada al modelo multicriterio en formato ráster.

4.3.7. Infraestructura crítica expuesta

La exposición física se refiere a los elementos de infraestructura construida que se encuentran potencialmente expuestos a los efectos de las inundaciones. Este componente del riesgo se asocia principalmente con los posibles daños materiales y las pérdidas socio-económicas derivadas de la afectación de infraestructuras esenciales (Rincón et al., 2018).

La capa de infraestructuras críticas, representada mediante puntos georreferenciados, se transformó en una capa ráster binaria para su integración en el modelo multicriterio. Se asignó el valor 1 a los píxeles que contenían una infraestructura considerada vulnerable frente a inundaciones y el valor 0 al resto del territorio (Tabla 6), generando una representación de presencia y ausencia de infraestructuras críticas.

Tabla 6. Reclasificación de la infraestructura crítica expuesta

Clase	Valor reclasificado
Establecimiento de salud	1
Edificio educacional	1
Edificio de referencia/edificio importante	1
Gasolinera	1
Casa comunal	1
Campo deportivo	1
Parque/plaza	1
Templo religioso	1
Cementerio	1
Resto del territorio	0

Fuente: elaboración propia

4.3.8. Red de transporte terrestre y aéreo expuesta

La accesibilidad a la red vial y aeroportuaria constituye un factor relevante en la gestión del riesgo de inundación, ya que influye en la capacidad de respuesta, evacuación y atención de emergencias. La proximidad y disponibilidad de infraestructuras de transporte adecuadas facilitan la movilidad de la población, mientras que su afectación durante eventos de inundación puede incrementar la severidad de sus impactos (Gün & Yılmaz, 2026).

Para su incorporación al modelo, la capa de vías de comunicación se reclasificó en una variable binaria. Se asignó el valor 1 a los píxeles correspondientes a las carreteras principales, las carreteras secundarias y al aeropuerto, considerados elementos expuestos al riesgo de inundación, mientras que los píxeles del resto del territorio recibieron el valor 0 (Tabla 7).

Tabla 7. Reclasificación de la red de transporte terrestre y aéreo expuesta al riesgo de inundación

Clase	Valor reclasificado
Carreteras principales y secundarias	1
Aeropuerto	1
Resto del territorio	0

Fuente: elaboración propia

4.3.9. Vulnerabilidad asociada a los usos del suelo y coberturas vegetales

La capa de uso del suelo y cobertura vegetal fue reclasificada en función de su grado de vulnerabilidad frente a la inundación, de acuerdo con los parámetros establecidos en la Tabla 8. A diferencia del factor de exposición, que identifica la presencia de elementos potencialmente afectados, este indicador valora la capacidad de los distintos usos y coberturas del suelo para resistir o verse afectados por un evento de inundación. Para ello, las categorías de uso y cobertura del suelo se reclasificaron asignando valores estandarizados en un rango de 0 a 1, donde los valores próximos a 0 representan una menor vulnerabilidad frente a la inundación y los cercanos a 1 una mayor vulnerabilidad potencial. Finalmente, la capa fue incorporada al modelo multicriterio en formato ráster.

Tabla 8. Reclasificación del uso del suelo y cobertura vegetal vulnerable

Clase	Valor reclasificado
Antrópico (urbano, complejo industrial, planta de tratamiento de agua potable, pista de aterrizaje, área en proceso de urbanización, centro poblado, campamento empresarial, complejo recreacional, complejo educacional)	1
Tierras improductivas (banco de arena, área erosionada)	0.777
Pecuario (pasto cultivado)	0.666
Agropecuario mixto (pasto cultivado con presencia de árboles, misceláneo de frutales)	0.555
Agrícola (plátano, cacao, malanga, café, palma aceitera, maíz)	0.444
Acuícola (piscícola)	0.333
Protección o producción (balsa, laurel)	0.222
Conservación y producción (vegetación herbácea húmeda muy alterada, vegetación herbácea húmeda medianamente alterada)	0.111
Conservación y protección (matorral húmedo poco alterado, matorral húmedo medianamente alterado, matorral húmedo muy alterado, bosque húmedo poco alterado, bosque húmedo medianamente alterado, bosque húmedo muy alterado, vegetación herbácea de humedal poco alterada, vegetación herbácea de humedal muy alterada)	0.111
Agua (río doble, lago/laguna)	0

Fuente: elaboración propia

4.3.10. Vulnerabilidad demográfica de la población

Las inundaciones no afectan de manera uniforme a toda la población, sino que sus impactos varían en función de las características físicas, sociales y económicas de los distintos grupos poblacionales. Diversos estudios han identificado a los niños, las personas adultas mayores y las mujeres como grupos con mayor vulnerabilidad frente a estos eventos, debido a una combinación de limitaciones físicas, condiciones de movilidad, dependencia, acceso desigual a recursos e información y, en algunos contextos, barreras sociales y culturales que dificultan su capacidad de respuesta y recuperación (Hoque et al., 2019; Hussain et al., 2021; Khan et al., 2025).

En el caso de los niños, la limitada capacidad para reconocer el peligro y actuar de forma autónoma incrementa su susceptibilidad durante una inundación. Las personas adultas mayores pueden presentar restricciones de movilidad, problemas de salud o aislamiento social que dificultan su evacuación y acceso oportuno a la asistencia. Por su parte, las mujeres pueden experimentar mayores niveles de vulnerabilidad debido a desigualdades sociales y de género que condicionan el acceso a recursos, información, redes de apoyo y mecanismos de protección, especialmente en contextos de emergencia (Khan et al., 2025).

Considerar estas diferencias resulta esencial para la evaluación de la vulnerabilidad, ya que permite identificar los grupos con mayores necesidades de protección y orientar estrategias de gestión del riesgo más inclusivas. En el presente estudio, esta dimensión se operacionalizó mediante la estructura etaria de la población, debido a la información demográfica disponible que permitió representar espacialmente la vulnerabilidad de la población frente a eventos de inundación.

Para este estudio, la población vulnerable se definió a partir de la estructura etaria del área de estudio, considerando los grupos de edad entre 0 y 19 años y de 65 años o más como los de mayor vulnerabilidad frente a eventos de inundación. Para su cálculo, se determinó la proporción de población vulnerable respecto de la población total en cada unidad espacial de análisis, obteniéndose un indicador relativo de vulnerabilidad demográfica. Posteriormente, este indicador se normalizó mediante el método Min-Max, reescalando los valores a un rango entre 0 y 1. Finalmente, la capa se incorporó al modelo multicriterio en formato ráster.

4.3.11. Vulnerabilidad de la infraestructura crítica

La capa de infraestructura crítica corresponde a la misma utilizada en el factor de exposición; sin embargo, en este indicador se evaluó el grado de vulnerabilidad de esos mismos elementos frente a eventos de inundación. La vulnerabilidad de la infraestructura se refiere al nivel de susceptibilidad de los elementos construidos del territorio a sufrir daños y afectar la continuidad de los servicios que prestan durante la ocurrencia de una inundación.

La asignación de los niveles de vulnerabilidad a cada categoría de infraestructura se realizó mediante criterio técnico, sustentado en el conocimiento de la zona de estudio y en la importancia funcional de cada tipo de infraestructura frente a un evento de inundación (Tabla 9).

Posteriormente, las categorías fueron reclasificadas en una escala normalizada de 0 a 1, donde los valores más altos representan infraestructuras con mayor vulnerabilidad frente a inundaciones y los valores más bajos corresponden a aquellas con menor vulnerabilidad.

Tabla 9. Reclasificación de la infraestructura vulnerable

Clase	Valor reclasificado
Establecimiento de salud	1
Edificio educacional	0.8
Casa comunal	0.8
Campo deportivo	0.6
Parque/plaza	0.6
Edificio de referencia/edificio importante	0.4
Templo religioso	0.2
Gasolinera	0.2
Cementerio	0.2
Resto del territorio	0

Fuente: elaboración propia

4.3.12. Vulnerabilidad de la red vial y de transporte

La capa de la red vial y la infraestructura aeroportuaria fue reclasificada en función de su nivel de vulnerabilidad frente a eventos de inundación, de acuerdo con los criterios establecidos en la Tabla 10. Para ello, se asignaron valores estandarizados entre 0 y 1, donde el valor 1 correspondió a las rutas primarias y al aeropuerto, al considerarse los elementos de transporte cuya interrupción generaría un mayor impacto sobre la conectividad territorial y la capacidad de respuesta ante emergencias. Este componente representa la vulnerabilidad del sistema de transporte frente a inundaciones, considerando la importancia de estas infraestructuras para la movilidad, la evacuación de la población y el acceso de los servicios de emergencia.

Tabla 10. Reclasificación de la red vial y la infraestructura aeroportuaria según su nivel de vulnerabilidad

Clase	Valor reclasificado
Ruta primaria	1
Aeropuerto	1
Ruta secundaria	0.5
Resto del territorio	0

Fuente: elaboración propia

4.4. AHP (Analytic Hierarchy Process)

El AHP (Analytic Hierarchy Process), desarrollado por Saaty en la década de 1970 y formalizado posteriormente en 1990, es uno de los métodos de ponderación de criterios más utilizados en los enfoques de toma de decisiones multicriterio (Saaty, 1990b). Este método está diseñado para apoyar la toma de decisiones en problemas

complejos mediante la estructuración de criterios en un marco jerárquico y la evaluación de su importancia relativa a través de comparaciones por pares. En este proceso, cada criterio se compara con otro utilizando una matriz de comparación, donde se asignan valores para expresar el grado de importancia relativa entre los criterios. Este enfoque proporciona una medida cuantitativa de la consistencia del juicio, respaldada por una sólida base teórica (Khan et al., 2025; Rincón et al., 2018).

El principio fundamental del AHP es la transformación de juicios subjetivos de expertos en ponderaciones cuantitativas, lo que permite evaluar criterios tanto tangibles como intangibles. Mediante matrices de comparación por pares y algoritmos matemáticos, se puede determinar la importancia relativa de los criterios y subcriterios, y posteriormente utilizarla para clasificar las alternativas según factores como el costo, el beneficio y el riesgo (Khan et al., 2025; Parsian et al., 2021).

En este estudio, el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) se utilizó para estimar las ponderaciones de los distintos parámetros de entrada empleados en la elaboración de los mapas de riesgo de inundación. Para ello, se construyeron inicialmente matrices de comparación por pares a partir de los cuatro criterios considerados dentro de cada uno de los factores de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad.

Las comparaciones se realizaron utilizando la escala estándar de Saaty, que varía de 1 a 9, donde el valor 1 indica igual importancia entre dos elementos y el valor 9 representa una importancia extrema de un criterio sobre otro. De forma equivalente, la escala recíproca (1 a 1/9) se emplea para expresar la menor importancia relativa.

Menos importante						Más importante		
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extrema	fuerte	moderada		igual	moderada		fuerte	extrema

Posteriormente, cada matriz de comparación fue normalizada dividiendo cada elemento por la suma de su respectiva columna. A partir de esta matriz normalizada, el valor promedio simple de cada fila se calculó para obtener el peso final asociado a cada criterio.

Con el fin de evitar que la asignación de prioridades dependiera de una única valoración, se contó con la participación de tres expertos adicionales para la aplicación del método AHP, incorporando así diferentes perspectivas técnicas en el proceso de ponderación. El grupo de evaluadores estuvo conformado por un investigador postdoctoral especializado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección, así como por tres ingenieros geógrafos y del medio ambiente. Todos

los participantes contaban con experiencia previa en la aplicación del método AHP en el ámbito profesional o de investigación.

Las ponderaciones finales se obtuvieron a partir del promedio de las valoraciones individuales de los cuatro evaluadores, y fueron posteriormente utilizadas en la generación de los mapas de riesgo de inundación.

Con fines ilustrativos, se presentan las matrices de comparación por pares (Tabla 11, Tabla 13 y Tabla 15) y sus correspondientes matrices normalizadas (Tabla 12, Tabla 14 y Tabla 16) de uno de los participantes.

4.4.1. Factor peligrosidad

Lista de abreviaciones

Abreviación Nombre

PRH	Proximidad a la red hidrográfica
EDMDE	Elevación derivada del Modelo Digital de Elevaciones (MDE)
PTDMDE	Pendiente del terreno derivada del MDE
ZSI	Zonas según susceptibilidad a inundación

Tabla 11. Comparación por pares del factor peligrosidad correspondiente al participante 1

Criterio	PRH	EDMDE	PTDMDE	ZSI
PRH	1	5	7	1/5
EDMDE	1/5	1	5	1/7
PTDMDE	1/7	1/5	1	1/9
ZSI	5	7	9	1
Σ	6,34	13,20	22,00	1,45

Fuente: elaboración propia

Tabla 12. Matriz normalizada y pesos del factor peligrosidad correspondiente al participante 1

Criterio	PRH	EDMDE	PTDMDE	ZSI	Pesos
PRH	0,16	0,38	0,32	0,14	0,25
EDMDE	0,03	0,08	0,23	0,10	0,11
PTDMDE	0,02	0,02	0,05	0,08	0,04
ZSI	0,79	0,53	0,41	0,69	0,60
Σ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fuente: elaboración propia

4.4.2. Factor exposición

Lista de abreviaciones

Abreviación Nombre

USCVE	Usos del suelo y coberturas vegetales expuestas
DEPTE	Distribución espacial de la población total expuesta
ICE	Infraestructura crítica expuesta
RTTAE	Red de transporte terrestre y aéreo expuesta

Tabla 13. Comparación por pares del factor exposición correspondiente al participante 1

Criterio	USCVE	DEPTE	ICE	RTTAE
USCVE	1	1/5	1/3	1/3
DEPTE	5	1	3	5
ICE	3	1/3	1	3
RTTAE	3	1/5	1/3	1
Σ	12,00	1,73	4,67	9,33

Fuente: elaboración propia

Tabla 14. Matriz normalizada y pesos del factor exposición correspondiente al participante 1

Criterio	USCVE	DEPTE	ICE	RTTAE	Pesos
USCVE	0,08	0,12	0,07	0,04	0,08
DEPTE	0,42	0,58	0,64	0,54	0,54
ICE	0,25	0,19	0,21	0,32	0,24
RTTAE	0,25	0,12	0,07	0,11	0,14
Σ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fuente: elaboración propia

4.4.3. Factor vulnerabilidad

Lista de abreviaciones

Abreviación Nombre

VUSCV	Vulnerabilidad asociada a los usos del suelo y coberturas vegetales
VDP	Vulnerabilidad demográfica de la población
VIC	Vulnerabilidad de la infraestructura crítica
VRVT	Vulnerabilidad de la red vial y de transporte

Tabla 15. Comparación por pares del factor vulnerabilidad correspondiente al participante 1

Criterio	VUSCV	VDP	VIC	VRVT
VUSCV	1	1/7	1/3	1/5
VDP	7	1	3	5
VIC	5	1/3	1	3
VRVT	3	1/5	1/3	1
Σ	16,00	1,68	4,67	9,20

Fuente: elaboración propia

Tabla 16. Matriz normalizada y pesos del factor vulnerabilidad correspondiente al participante 1

Criterio	VUSCV	VDP	VIC	VRVT	Pesos
VUSCV	0,06	0,09	0,07	0,02	0,06
VDP	0,44	0,60	0,64	0,54	0,56
VIC	0,31	0,20	0,21	0,33	0,26
VRVT	0,19	0,12	0,07	0,11	0,12
Σ	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fuente: elaboración propia

4.5. Construcción de mapas de factores

Para la construcción de los mapas correspondientes a los factores de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad se aplicó el método de suma lineal ponderada (Weighted Linear Combination, WLC), el cual consiste en combinar un conjunto de criterios mediante la asignación de un peso relativo a cada uno de ellos, de acuerdo con su nivel de importancia, obteniendo así un valor agregado para cada unidad espacial (Sorooshian & Parsia, 2019).

La combinación de los criterios (capas) se realizó mediante la calculadora ráster de QGIS, aplicando la suma de los productos entre cada criterio estandarizado y el peso promedio obtenido a partir de las valoraciones de los cuatro participantes del proceso AHP. Este procedimiento se ejecutó de forma independiente para cada uno de los factores de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad.

Con el fin de facilitar la comparación entre los mapas obtenidos, estos se convirtieron de formato ráster a vectorial (polígonos), excluyendo la superficie correspondiente a la red hidrográfica. Para ello, se utilizó el geoproceso Diferencia (Difference) entre los polígonos resultantes de los factores y la capa de la red hidrográfica. Posteriormente, los valores de los índices correspondientes a los tres mapas se integraron en un único conjunto de datos, sobre el cual se calcularon los percentiles

20, 40, 60 y 80. Estos percentiles se utilizaron para definir umbrales de clasificación comunes, permitiendo reclasificar los valores continuos en cinco categorías: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. De esta manera, se garantizó que la clasificación aplicada fuera uniforme y que los resultados de los tres factores pudieran compararse de forma directa.

4.6. Construcción de escenarios de riesgo de inundación

La mayoría de los estudios sobre evaluación del riesgo de inundación urbana se han centrado principalmente en el análisis del área y la profundidad de la inundación, prestando menor atención a la interacción entre los componentes que conforman el riesgo. En este sentido, Bin et al. (2023) proponen un enfoque que integra explícitamente la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad, demostrando que el riesgo de inundación resulta de la interacción de estos tres componentes y no de su análisis aislado. De forma similar, Zhang y Convertino (2026) evaluaron diferentes escenarios de riesgo mediante la combinación de la peligrosidad, la exposición y distintos supuestos de vulnerabilidad, evidenciando que las variaciones en este último componente generan cambios significativos en la distribución espacial del riesgo.

Tomando como referencia estos enfoques, en este estudio se plantearon tres escenarios de riesgo con el objetivo de analizar la influencia relativa de la exposición y la vulnerabilidad sobre el riesgo potencial de inundación. Para ello, el factor de peligrosidad se mantuvo constante en todos los escenarios, mientras que se modificaron las ponderaciones asignadas a los factores de exposición y vulnerabilidad. De esta manera, el Escenario 1 (E1) asigna la misma importancia a la exposición y a la vulnerabilidad, representando una situación de equilibrio entre ambos factores. El Escenario 2 (E2) otorga un mayor peso a la exposición, con el propósito de analizar cómo varía el riesgo cuando predominan las condiciones relacionadas con la concentración de población, infraestructura y elementos expuestos. Por su parte, el Escenario 3 (E3) prioriza la vulnerabilidad, permitiendo evaluar la influencia de las características sociales y territoriales que incrementan la susceptibilidad de la población frente a eventos de inundación. Las expresiones empleadas para cada escenario se presentan a continuación:

Escenario 1: Factor Peligrosidad $\times ((\text{Factor Exposición} \times 0.5) + (\text{Factor Vulnerabilidad} \times 0.5))$

Escenario 2: Factor Peligrosidad $\times ((\text{Factor Exposición} \times 0.8) + (\text{Factor Vulnerabilidad} \times 0.2))$

Escenario 3: Factor Peligrosidad $\times ((\text{Factor Exposición} \times 0.2) + (\text{Factor Vulnerabilidad} \times 0.8))$

Con el propósito de facilitar la comparación entre los escenarios, los mapas de riesgo obtenidos se convirtieron de formato ráster a vectorial (polígonos), excluyendo la superficie correspondiente a la red hidrográfica. Para ello, se utilizó el geoproceso Diferencia (Difference) entre los polígonos resultantes de los escenarios y la capa de la red hidrográfica. Posteriormente, se recopilaron los valores del índice de riesgo de los tres escenarios en un único conjunto de datos y, a partir de esta distribución conjunta, se calcularon los percentiles 20, 40, 60 y 80 con el propósito de establecer umbrales de clasificación comunes. Finalmente, los valores continuos del índice de riesgo se agruparon en cinco clases: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, garantizando que la clasificación empleada fuera consistente y directamente comparable entre los tres escenarios.

4.7. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad constituye una etapa fundamental en los procesos de evaluación multicriterio, ya que permite examinar la estabilidad y robustez de los resultados frente a variaciones en los parámetros de entrada, particularmente en las ponderaciones asignadas a los criterios. Su aplicación permite identificar aquellos criterios cuya modificación genera mayores cambios en el resultado final, proporcionando una medida de la confiabilidad del modelo y reduciendo la incertidumbre asociada al proceso de toma de decisiones (Malczewski, 1999; Saaty & Vargas, 2012; Więckowski & Sałabun, 2025).

En los modelos basados en el Analytic Hierarchy Process (AHP), el análisis de sensibilidad es ampliamente utilizado para evaluar la influencia de las ponderaciones derivadas de las comparaciones por pares, permitiendo comprobar si pequeñas variaciones en dichos pesos producen modificaciones significativas en los resultados (Saaty & Vargas, 2012).

Con el propósito de evaluar la robustez del modelo de riesgo potencial de inundación desarrollado en este estudio, se realizó un análisis de sensibilidad mediante la modificación individual de los pesos asignados a las capas que conforman los factores de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, siguiendo un procedimiento similar al empleado por Caglayan et al. (2020) y Àvila Callau et al. (2025).

Para ello se generaron distintos supuestos incrementando y disminuyendo en un 10 % el peso de cada capa de forma individual. La variación del ± 10 % constituye un rango de perturbación frecuentemente utilizado en estudios de evaluación multicriterio, al representar cambios moderados que permiten analizar la estabilidad del modelo sin alterar significativamente la estructura de ponderaciones (Caglayan et al., 2020; Saaty & Vargas, 2012). En cada supuesto, el incremento o disminución

aplicado a una capa implicó el ajuste proporcional de las ponderaciones restantes, garantizando que la suma total de los pesos permaneciera igual a 1.

4.7.1. Generación de escenarios

El análisis se estructuró en tres bloques independientes, evaluando por separado la sensibilidad de cada uno de los factores que integran el modelo de riesgo.

i. Sensibilidad de la peligrosidad

Se modificaron individualmente los pesos de las capas correspondientes a la peligrosidad (proximidad a la red hidrográfica, elevación derivada del MDE, pendiente del terreno derivada del MDE y zonas según susceptibilidad a inundación), generando diferentes supuestos de peligrosidad. En cada caso, el índice de riesgo fue recalculado manteniendo constante el componente de exposición-vulnerabilidad.

ii. Sensibilidad de la exposición

Se ajustaron los pesos de las capas de exposición (usos del suelo y coberturas vegetales expuestas, distribución espacial de la población total expuesta, infraestructura crítica expuesta y red de transporte terrestre y aéreo expuesta), obteniendo nuevos supuestos de exposición. Para cada uno de ellos se recalculó el índice de exposición-vulnerabilidad y, posteriormente, el índice de riesgo, manteniendo sin modificaciones el componente de peligrosidad.

iii. Sensibilidad de la vulnerabilidad

De forma análoga, se modificaron los pesos de las capas de vulnerabilidad (vulnerabilidad asociada a los usos del suelo y coberturas vegetales, vulnerabilidad demográfica de la población, vulnerabilidad de la infraestructura crítica y vulnerabilidad de la red vial y de transporte), generándose distintos supuestos de vulnerabilidad mientras el componente de peligrosidad permanecía constante.

4.7.2. Evaluación de cambios

Para cada supuesto generado se comparó el mapa de riesgo obtenido con el correspondiente al escenario base, definido como:

$$R=P \times [(E \times 0.5) + (V \times 0.5)]$$

La comparación se realizó mediante tablas de contingencia o matrices de cambio, las cuales permiten identificar las transiciones espaciales entre las diferentes clases de riesgo y cuantificar las modificaciones producidas por la variación de las ponderaciones.

Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados, el índice de riesgo fue reclasificado en tres categorías (bajo, medio y alto). Para garantizar la comparabilidad entre todos los supuestos, se emplearon los mismos umbrales obtenidos mediante la clasificación por cuantiles del escenario base, aplicándolos de forma consistente en todos los escenarios analizados.

Las matrices de cambio permitieron identificar las transiciones entre categorías de riesgo (bajo-medio, bajo-alto, medio-bajo, medio-alto, alto-bajo y alto-medio), así como cuantificar su magnitud espacial.

4.7.3. Cuantificación del impacto

La sensibilidad de cada criterio se evaluó mediante el número total de píxeles cuya categoría de riesgo cambió con respecto al escenario base.

Posteriormente, se calculó el porcentaje de cambio utilizando la siguiente expresión:

$$Cambio (\%) = \frac{N_{cambios}}{N_{total}} \times 100$$

donde $N_{cambios}$ corresponde al número de píxeles que modificaron su categoría de riesgo y N_{total} representa el número total de píxeles del escenario base.

Este indicador permitió comparar la sensibilidad relativa de cada criterio, identificando aquellos cuya variación produjo un mayor impacto sobre la distribución espacial del riesgo potencial de inundación.

4.8. Evaluación de la coherencia entre el modelo de riesgo potencial de inundación y la planificación territorial vigente

Con el fin de contextualizar los resultados obtenidos dentro del marco de la planificación territorial vigente, se realizó una revisión documental de los principales instrumentos de planificación del cantón Francisco de Orellana, incluyendo el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) y el Plan de Uso y Gestión del Suelo (PUGS). Paralelamente, se recopiló la cartografía institucional proporcionada por el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de Francisco de Orellana, identificando las capas geográficas relacionadas con la gestión del riesgo, el ordenamiento territorial y la expansión urbana. A partir de la geodatabase entregada, se realizó un proceso de depuración y selección de información para trabajar con las capas más relevantes.

Entre las capas seleccionadas se encuentra la Clasificación del Ordenamiento Territorial (COT), que incluye categorías de interés como producción agropecuaria sostenible, restauración para la recuperación de la cobertura vegetal, suelo urbano

consolidado, suelo urbano de protección y suelo urbano no consolidado. Asimismo, se incorporaron las capas de expansión urbana, riesgo de inundación y conflictos de uso del suelo. Esta última contempla categorías asociadas a procesos de sobreutilización y subutilización del suelo en intensidades ligera, moderada y severa, además de áreas clasificadas como sin conflicto de uso, no aplicable y sin intervención antrópica.

Por otra parte, las zonas de retención natural no formaban parte de la cartografía institucional disponible, por lo que fueron delimitadas mediante fotointerpretación y digitalización manual utilizando imágenes de Google Satellite en el entorno SIG de QGIS.

Para evaluar la coherencia entre los resultados obtenidos y la planificación territorial vigente, se realizó una comparación espacial mediante la visualización simultánea de los tres escenarios de riesgo potencial de inundación junto con las capas temáticas seleccionadas. Este procedimiento permitió analizar cualitativamente la correspondencia entre las zonas identificadas con mayor riesgo potencial y las categorías de ordenamiento territorial, expansión urbana, zonas de retención natural, áreas de riesgo de inundación delimitadas por la planificación local y los conflictos de uso del suelo.

En el caso específico de los conflictos de uso del suelo, además del análisis visual, se efectuó un análisis cuantitativo de superficies por categorías de riesgo para cada escenario. Este procedimiento permitió caracterizar con mayor detalle la distribución espacial de las áreas de riesgo, ya que la representación simultánea de los tres escenarios junto con las múltiples categorías de conflicto habría dificultado la interpretación cartográfica debido a la complejidad visual del resultado. Posteriormente, la información fue sintetizada mediante la identificación de la categoría de riesgo predominante dentro de cada clase de conflicto de uso del suelo, con el fin de resumir los resultados en una tabla de análisis comparativo.

5. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología propuesta para la evaluación multicriterio del riesgo potencial de inundación fluvial en el área urbana de Francisco de Orellana. En primer lugar, se muestran los mapas normalizados de los criterios utilizados en el análisis. Posteriormente, se presenta la ponderación de criterios e integración de factores, los mapas integrados de los factores, los escenarios de riesgo generados, el análisis cuantitativo de la superficie por categorías de riesgo, el análisis de sensibilidad

realizado para evaluar la estabilidad del modelo y, finalmente, la comparación de los resultados obtenidos con la planificación territorial vigente.

5.1. Mapas normalizados de los criterios de evaluación del riesgo

Como etapa previa a la integración multicriterio, las capas seleccionadas fueron normalizadas en una escala común de valores entre 0 y 1, con el fin de garantizar su comparabilidad y permitir su posterior combinación mediante las ponderaciones obtenidas a través del método AHP. En esta sección se presentan los mapas normalizados correspondientes a los doce criterios considerados en el estudio, agrupados de acuerdo con los factores de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad.

5.1.1. Factor de peligrosidad

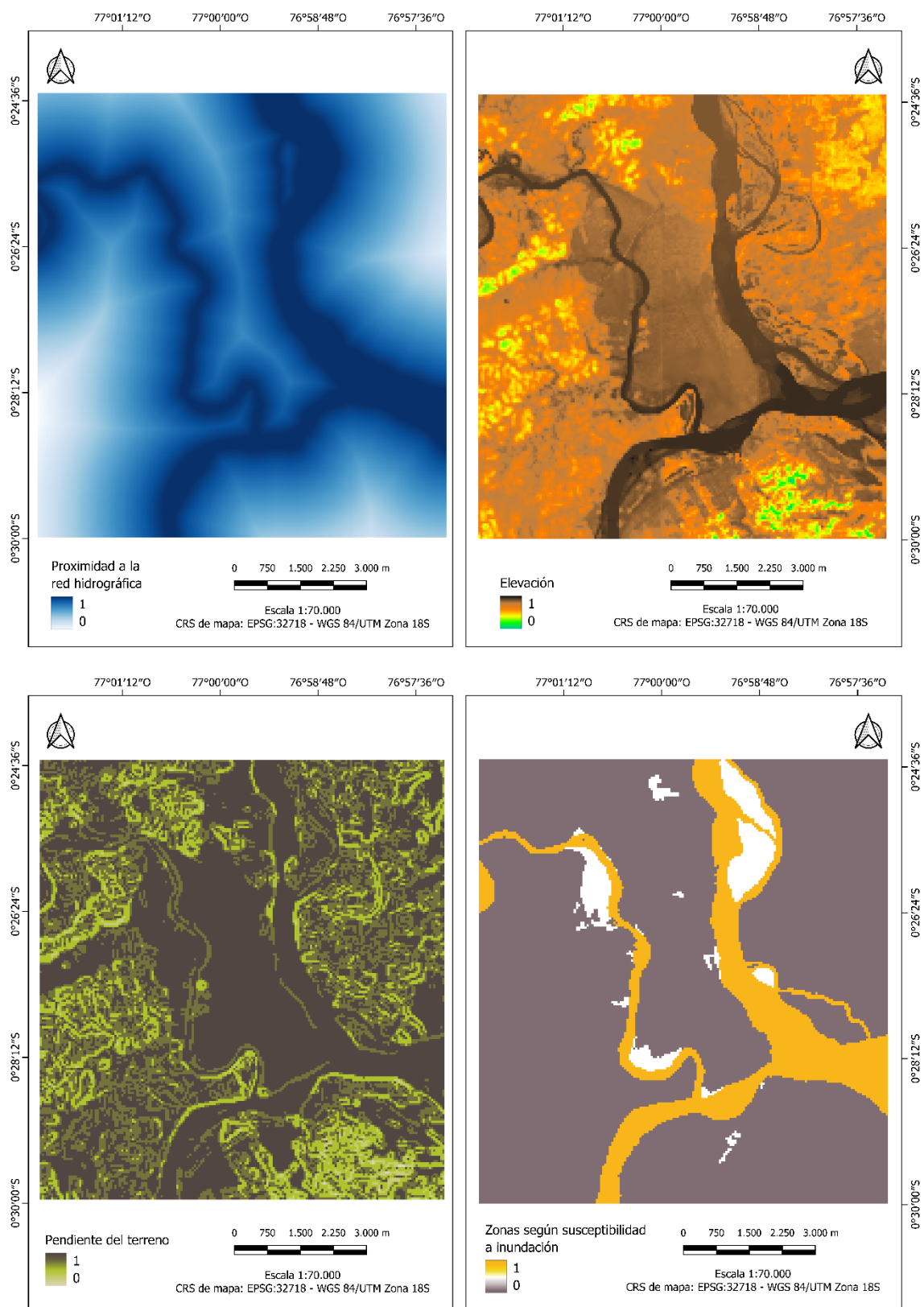
En la Figura 4 se presentan los mapas normalizados correspondientes al factor de peligrosidad, donde los valores próximos a 1 representan una mayor contribución al riesgo potencial de inundación y los valores cercanos a 0 una menor contribución.

En el mapa de proximidad a la red hidrográfica, las tonalidades de azul intenso identifican las áreas más próximas a los cauces, las cuales presentan una mayor susceptibilidad a inundaciones debido a su cercanía a los ríos. En contraste, las tonalidades de azul claro y blanco corresponden a sectores más alejados de la red hidrográfica y, por tanto, con una menor susceptibilidad.

En la capa de elevación, obtenida a partir del MDE, las tonalidades verdes y amarillas representan las zonas de mayor altitud, asociadas a una menor susceptibilidad frente a inundaciones. Por el contrario, las tonalidades que varían del anaranjado al café corresponden a las áreas de menor elevación, donde existe una mayor probabilidad de acumulación de agua y, en consecuencia, una mayor susceptibilidad a este fenómeno. En cuanto a la pendiente del terreno, se observa que gran parte del área de estudio presenta pendientes bajas, representadas por tonalidades café oscuro, lo que evidencia el predominio de superficies relativamente planas con mayor susceptibilidad a inundaciones. En contraste, las tonalidades verdes corresponden a las pendientes más pronunciadas, donde el drenaje superficial es más eficiente y, por tanto, la susceptibilidad es menor.

Finalmente, el mapa de zonas susceptibles a inundación muestra que las áreas clasificadas con mayor susceptibilidad se concentran principalmente en las proximidades de los ríos, representadas mediante tonalidades blancas y amarillas. En cambio, el resto del territorio, representado en color gris, corresponde a zonas con menor susceptibilidad de inundación.

Figura 4. Mapas normalizados correspondientes al factor de peligrosidad



Fuente: elaboración propia a partir de datos del IGM 2017, MAG-SIGTIERRAS 2014, MAG 2025

5.1.2. Factor de exposición

En la Figura 5 se presentan los mapas normalizados correspondientes al factor de exposición, los cuales representan la distribución espacial de los elementos potencialmente afectados por un evento de inundación.

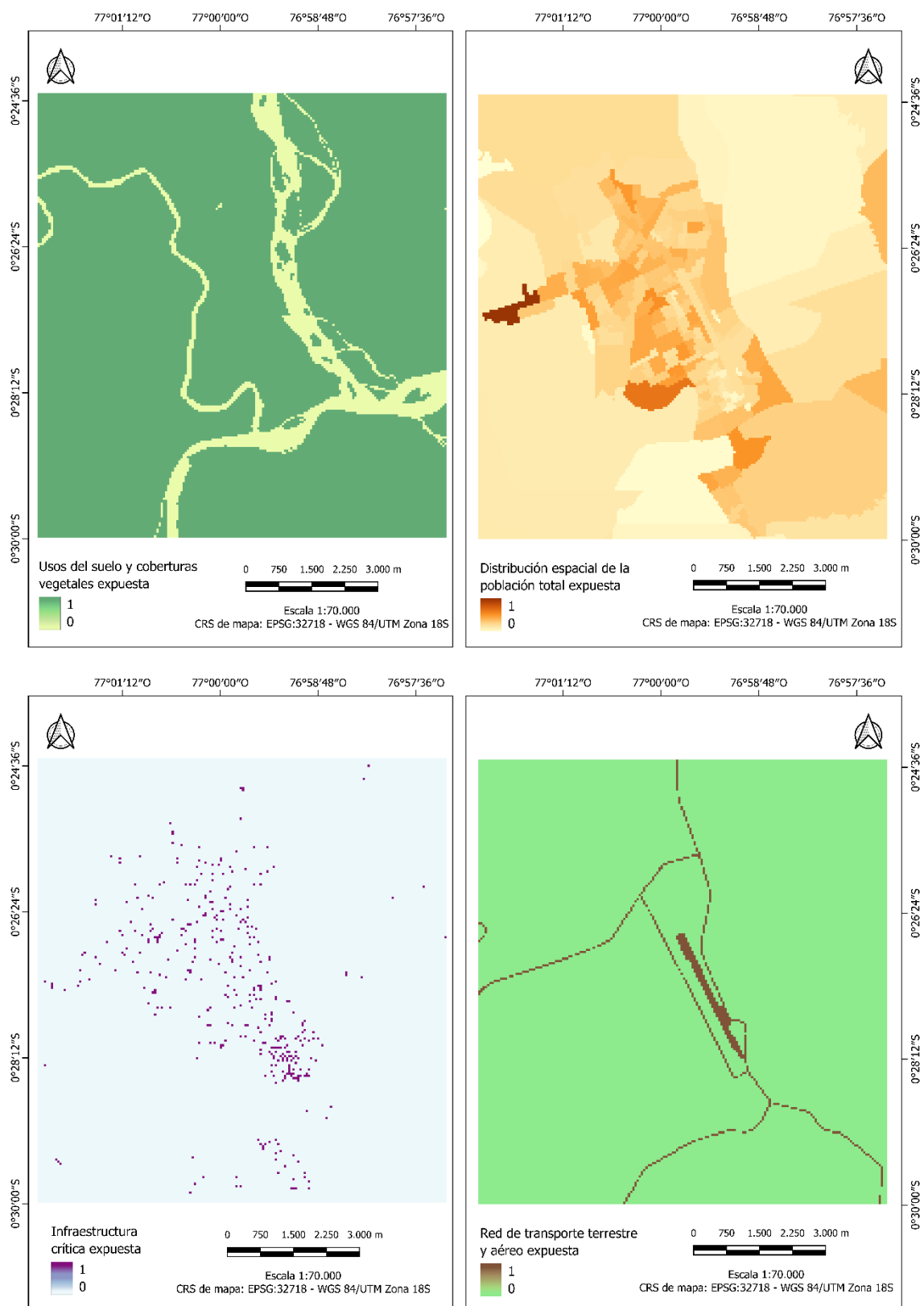
El mapa de usos del suelo y coberturas vegetales expuestas muestra que el color amarillo pastel corresponde a la red hidrográfica, la cual no se considera un elemento expuesto, ya que constituye la fuente de la amenaza de inundación. En contraste, las áreas representadas en tonalidades verdes corresponden a los diferentes usos del suelo y coberturas vegetales susceptibles de verse afectados por un evento de inundación.

En el mapa de distribución espacial de la población total expuesta, las tonalidades que varían del anaranjado intenso al café indican las zonas con mayor concentración de población y, por tanto, con un nivel de exposición más elevado. Por el contrario, las áreas representadas en color anaranjado claro corresponden a sectores con menor densidad poblacional y, en consecuencia, menor exposición.

El mapa de infraestructura crítica expuesta identifica la localización de equipamientos e infraestructuras susceptibles de resultar afectados por una inundación, entre los que se incluyen establecimientos de salud, centros educativos, edificios de importancia institucional, gasolineras, centros deportivos, parques y plazas. Estos elementos se representan en color morado, mientras que las zonas sin presencia de este tipo de infraestructuras se muestran en azul claro.

Finalmente, el mapa de la red de transporte terrestre y aéreo expuesta representa en color café la infraestructura vial y aeroportuaria susceptible de verse afectada por un evento de inundación. En contraste, las áreas donde no existe infraestructura de transporte se muestran en color verde.

Figura 5. Mapas normalizados correspondientes al factor de exposición



Fuente: elaboración propia a partir de datos del IGM 2017, INEC 2022, INEC 2023,

MAG 2024

5.1.3. Factor de vulnerabilidad

En la Figura 6 se presentan los mapas normalizados correspondientes al factor de vulnerabilidad, los cuales representan la susceptibilidad de los elementos expuestos a sufrir mayores impactos ante la ocurrencia de un evento de inundación.

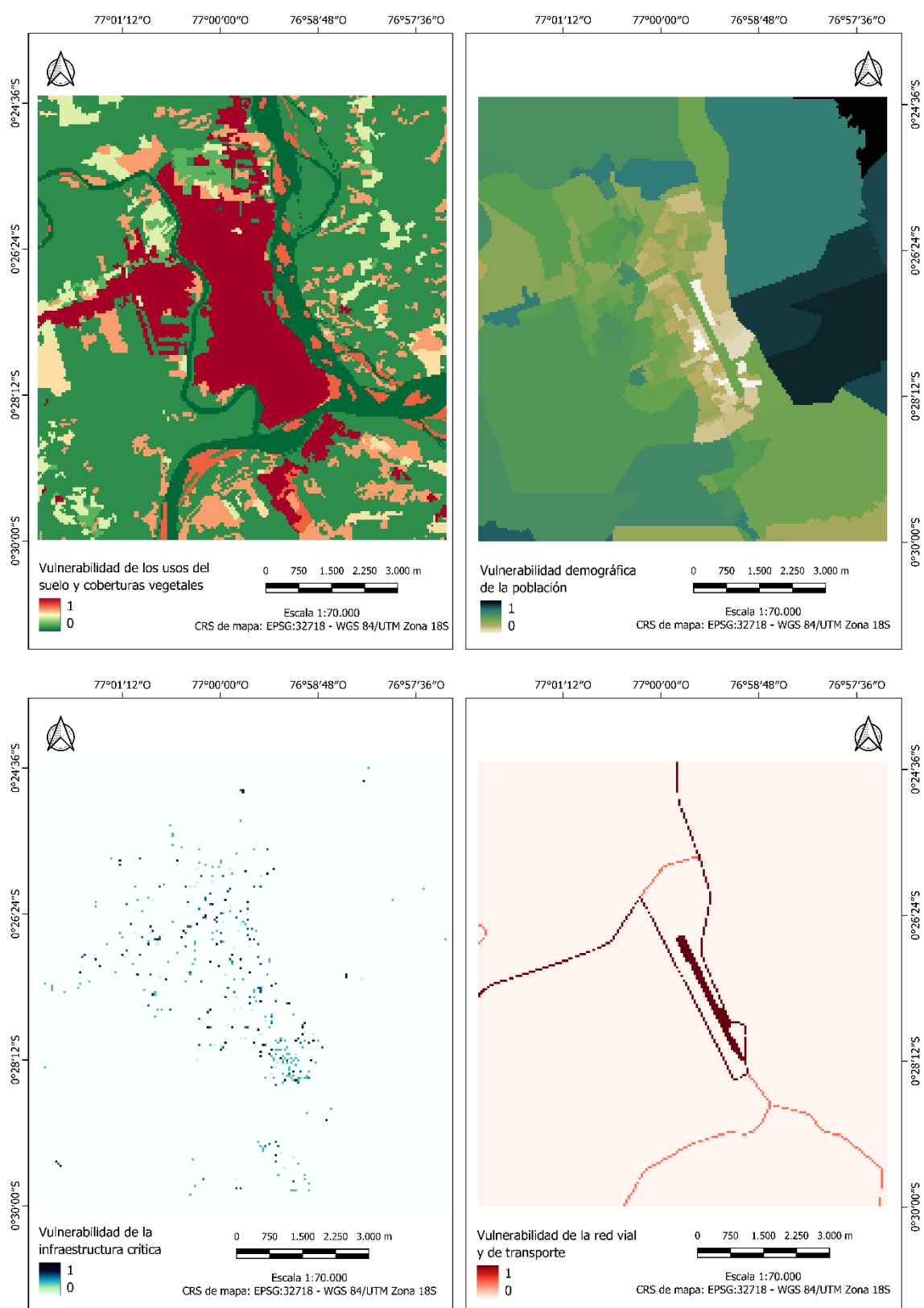
El mapa de vulnerabilidad asociada a los usos del suelo y coberturas vegetales muestra que las áreas representadas en tonalidades que van del anaranjado al rojo corresponden a los usos del suelo con mayor nivel de vulnerabilidad frente a las inundaciones. En contraste, las zonas de color verde representan los usos y coberturas con menor vulnerabilidad.

En el mapa de vulnerabilidad demográfica se observa que las tonalidades que varían del gris al negro corresponden a los sectores con una mayor concentración de población vulnerable, conformada por los grupos de edad entre 0 y 19 años y de 65 años o más. Por el contrario, las tonalidades más claras representan sectores con una menor proporción de población perteneciente a estos grupos etarios.

El mapa de vulnerabilidad de la infraestructura crítica muestra la localización de los diferentes equipamientos clasificados según su nivel de vulnerabilidad. Las distintas tonalidades de azul representan la jerarquización establecida para cada tipo de infraestructura, de acuerdo con el grado de afectación que su interrupción podría ocasionar durante un evento de inundación.

Finalmente, el mapa de vulnerabilidad de la red vial y de transporte identifica en color rojo oscuro las carreteras principales y la infraestructura aeroportuaria, consideradas los elementos con mayor nivel de vulnerabilidad debido a que su interrupción tendría un impacto significativo sobre la conectividad territorial y la capacidad de respuesta ante situaciones de emergencia. Por su parte, las carreteras secundarias, representadas en color rojo, también presentan vulnerabilidad frente a las inundaciones; sin embargo, su afectación genera un impacto comparativamente menor al no constituir los principales ejes de conexión interprovincial.

Figura 6. Mapas normalizados correspondientes al factor de vulnerabilidad



Fuente: elaboración propia a partir de datos del IGM 2017, INEC 2022, INEC 2023, MAG 2024

5.2. Ponderación de criterios e integración de factores

Las ponderaciones obtenidas mediante el método AHP para los criterios que conforman cada uno de los factores del riesgo de inundación se presentan en las tablas: Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19. En ellas se muestran los pesos finales asignados a cada criterio, así como las ponderaciones individuales proporcionadas por cada participante durante el proceso de comparación por pares.

Tabla 17. Ponderaciones de criterios para el factor de peligrosidad

Factor Peligrosidad					
Criterio	Participante 1 (%)	Participante 2 (%)	Participante 3 (%)	Participante 4 (%)	Peso promedio (%)
PRH	24,8%	27,5%	29,1%	47,1%	32,1%
EDMDE	10,8%	3,9%	6,7%	17,1%	9,6%
PTDMDE	4,0%	35,1%	15,1%	28,4%	20,6%
ZSI	60,4%	33,6%	49,1%	7,4%	37,6%

Fuente: elaboración propia

Nota: PRH (Proximidad a la red hidrográfica), EDMDE (Elevación derivada del Modelo Digital de Elevaciones), PTDMDE (Pendiente del terreno derivada del Modelo Digital de Elevaciones), ZSI (Zonas según susceptibilidad a inundación)

Tabla 18. Ponderaciones de criterios para el factor de exposición

Factor Exposición					
Criterio	Participante 1 (%)	Participante 2 (%)	Participante 3 (%)	Participante 4 (%)	Peso promedio (%)
USCVE	7,6%	3,9%	5,7%	11,9%	7,3%
DEPTE	54,3%	25,0%	55,8%	50,8%	46,5%
ICE	24,5%	10,3%	26,3%	30,8%	23,0%
RTTAE	13,6%	60,8%	12,2%	6,4%	23,2%

Fuente: elaboración propia

Nota: USCVE (Usos del suelo y coberturas vegetales expuestas), DEPTE (Distribución espacial de la población total expuesta), ICE (Infraestructura crítica expuesta), RTTAE (Red de transporte terrestre y aéreo expuesta)

Tabla 19. Ponderaciones de criterios para el factor de vulnerabilidad

Factor Vulnerabilidad					
Criterio	Participante 1 (%)	Participante 2 (%)	Participante 3 (%)	Participante 4 (%)	Peso promedio (%)
VUSCV	6,0	5,3	6,4	11,0	7,2
VDP	55,5	26,8	62,8	52,5	49,4
VIC	26,3	52,3	15,4	30,1	31,0
VRVT	12,2	15,7	15,4	6,3	12,4

Fuente: elaboración propia

Nota: VUSCV (Vulnerabilidad asociada a los usos del suelo y coberturas vegetales), VDP (Vulnerabilidad demográfica de la población), VIC (Vulnerabilidad de la infraestructura crítica), VRVT (Vulnerabilidad de la red vial y de transporte)

Los pesos obtenidos fueron incorporados posteriormente al proceso de integración de criterios mediante la técnica de suma lineal ponderada (SLP), con la finalidad de generar los mapas correspondientes a los factores de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. Para ello, cada criterio fue multiplicado por su respectivo peso AHP y posteriormente se realizó la suma de los valores ponderados de acuerdo con las ecuaciones (1), (2) y (3).

Donde: FP corresponde al factor de peligrosidad; PRH, proximidad a la red hidrográfica; EDMDE, elevación derivada del modelo digital de elevaciones; PTDMDE, pendiente del terreno derivada del modelo digital de elevaciones; ZSI, zonas según susceptibilidad a inundación; FE, factor de exposición; USCVE, usos del suelo y coberturas vegetales expuestas; DEPTE, distribución espacial de la población total expuesta; ICE, infraestructura crítica expuesta; RTTAE, red de transporte terrestre y aéreo expuesta; FV, factor de vulnerabilidad; VUSCV, vulnerabilidad asociada a los usos del suelo y coberturas vegetales; VDP, vulnerabilidad demográfica de la población; VIC, vulnerabilidad de la infraestructura crítica; y VRVT, vulnerabilidad de la red vial y de transporte.

En el factor de peligrosidad, el criterio con mayor peso correspondió a las zonas susceptibles a inundación (0,376), seguido de la proximidad a la red hidrográfica (0,321), lo que evidencia que ambos criterios ejercen la mayor influencia en la estimación de la peligrosidad. En el factor de exposición, la distribución espacial de la población total expuesta obtuvo la mayor ponderación (0,465), mientras que en el factor de vulnerabilidad destacó la vulnerabilidad demográfica de la población (0,494), reflejando la importancia atribuida por los expertos a los componentes sociales en la evaluación del riesgo.

$$FP = PRH \times 0.321 + EDMDE \times 0.096 + PTDMDE \times 0.206 + ZSI \times 0.376 \quad (1)$$

$$FE = USCVE \times 0.073 + DEPTE \times 0.465 + ICE \times 0.230 + RTTAE \times 0.232 \quad (2)$$

$$FV = VUSCV \times 0.072 + VDP \times 0.494 + VIC \times 0.310 + VRVT \times 0.124 \quad (3)$$

Las ecuaciones reflejan la contribución relativa de cada criterio en la construcción de los factores de riesgo, de acuerdo con las ponderaciones obtenidas mediante el método AHP.

5.3. Mapas integrados de los factores de riesgo

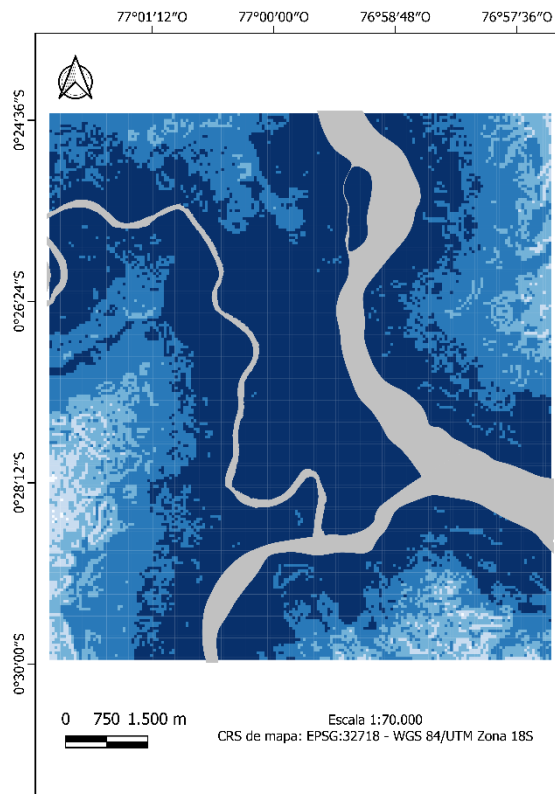
La Figura 7 presenta los mapas integrados de los factores de riesgo obtenidos mediante la aplicación de la suma lineal ponderada a los criterios previamente ponderados con el método AHP: (a) peligrosidad, (b) exposición y (c) vulnerabilidad. Los valores obtenidos fueron clasificados en cinco categorías (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto), con el propósito de facilitar la interpretación espacial de la contribución de cada factor al riesgo potencial de inundación.

El mapa del factor de peligrosidad (Figura 7(a)) evidencia que los niveles más altos se concentran en las áreas próximas a la red hidrográfica, especialmente a lo largo del cauce principal y en las zonas identificadas con mayor susceptibilidad a inundaciones. Este comportamiento responde a la elevada influencia que ejercen los criterios de las zonas susceptibles a inundación y la proximidad a la red hidrográfica, los cuales obtuvieron las mayores ponderaciones mediante el método AHP. En contraste, las áreas más alejadas de los cauces presentan niveles de peligrosidad predominantemente bajos y muy bajos.

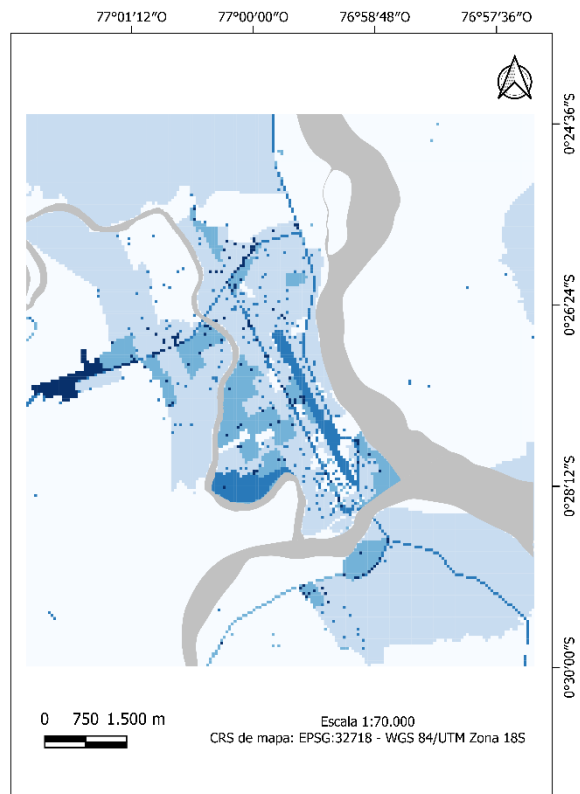
En el factor de exposición (Figura 7(b)), las categorías de mayor intensidad se localizan principalmente en el área urbana consolidada, donde se concentra la mayor parte de la población, la infraestructura y la red de transporte. La distribución espacial observada refleja la influencia del criterio de distribución espacial de la población expuesta, que obtuvo el mayor peso dentro de este factor, seguido por la infraestructura crítica y la red de transporte, generando una exposición más elevada en los sectores con mayor concentración de elementos susceptibles de ser afectados.

Por su parte, el mapa del factor de vulnerabilidad (Figura 7(c)) muestra una distribución espacial similar a la del factor de exposición, aunque con una mayor influencia de la vulnerabilidad demográfica. Las categorías alta y muy alta se concentran en sectores urbanos donde coinciden una mayor presencia de población vulnerable con infraestructura susceptible de sufrir afectaciones durante eventos de inundación. En cambio, las áreas periféricas presentan predominantemente niveles bajos de vulnerabilidad debido a la menor concentración de población e infraestructura.

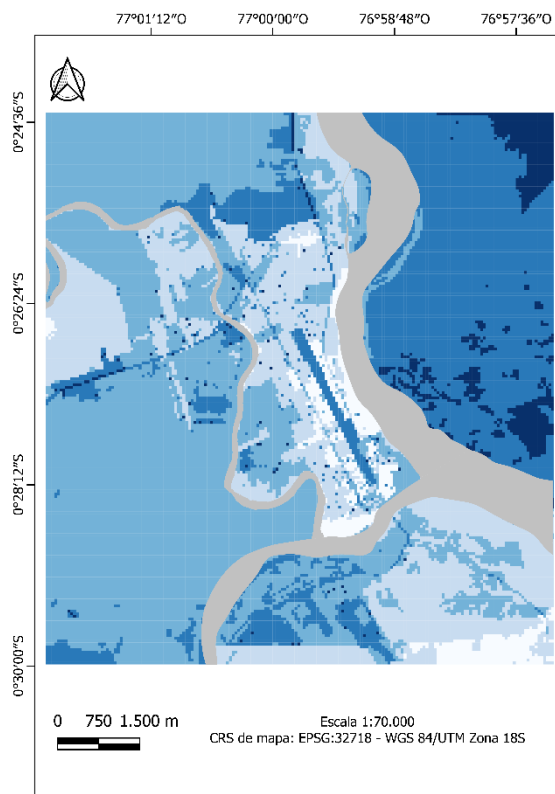
Figura 7. Distribución espacial de los factores de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad



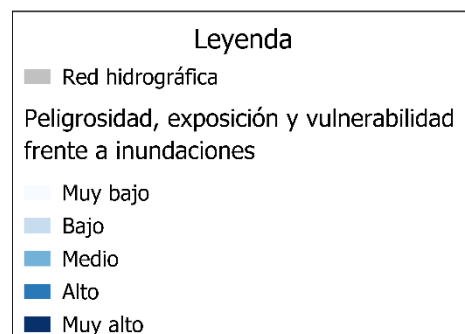
(a)



(b)



(c)



(a) factor de peligrosidad, (b) factor de exposición y (c) factor de vulnerabilidad

Fuente: elaboración propia

Los mapas obtenidos constituyen la base para la construcción de los escenarios de riesgo potencial de inundación, al representar de forma integrada la distribución espacial de los factores de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad que intervienen en la evaluación multicriterio.

5.4. Escenarios de riesgo potencial de inundación

Los mapas de riesgo potencial de inundación se obtuvieron mediante la integración de los factores de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, considerando tres escenarios de ponderación. Con el propósito de facilitar la comparación visual entre ellos, los resultados se representaron mediante una clasificación por cuantiles con cinco intervalos, correspondientes a las categorías de riesgo muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto.

En el escenario 1, ambos factores, exposición y vulnerabilidad, recibieron una ponderación equivalente del 50 %, obteniéndose el mapa representado en la Figura 8(a). En este caso, las zonas clasificadas con riesgo alto (color morado) y muy alto (color negro) se concentran principalmente en las proximidades de los ríos Coca y Payamino, donde la elevada peligrosidad asociada a la cercanía de los cauces coincide con sectores urbanos que presentan condiciones de exposición y vulnerabilidad similares. Este escenario representa una condición de equilibrio entre ambos factores, por lo que la distribución espacial del riesgo responde a la influencia conjunta de estos.

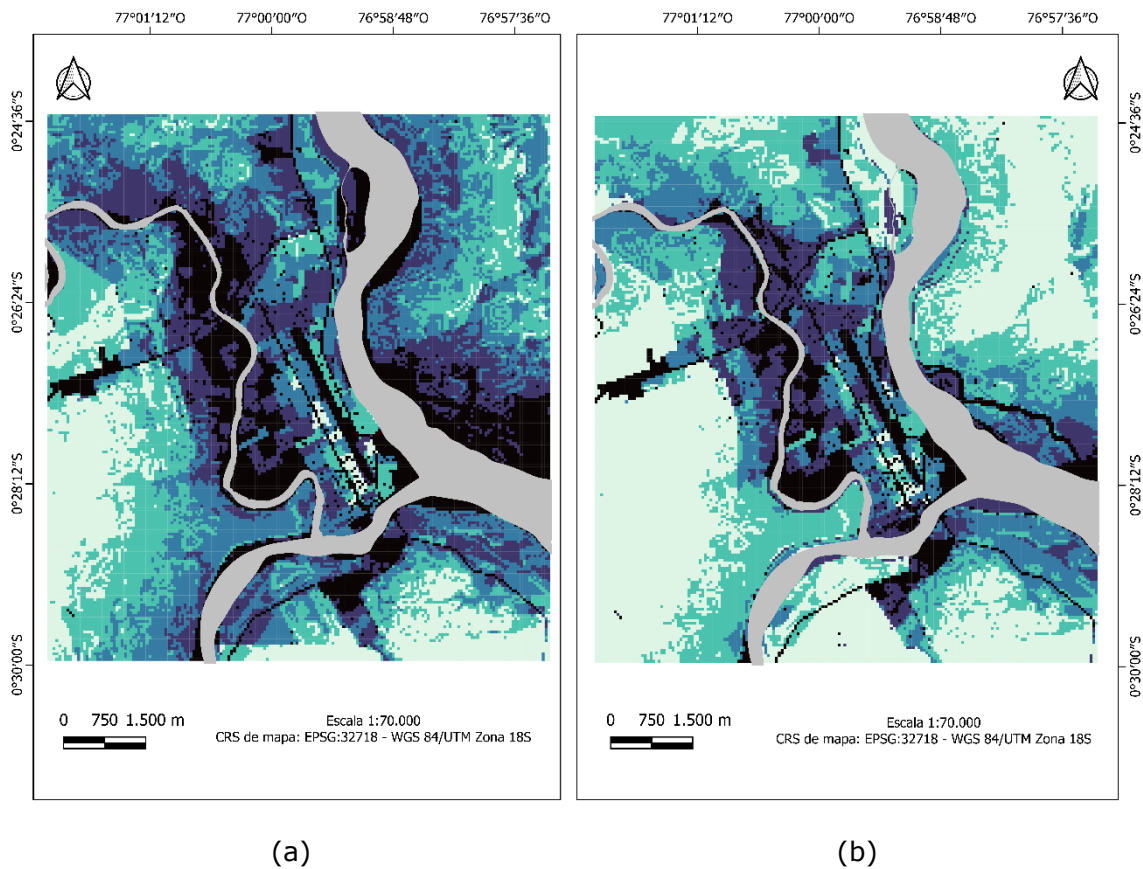
En el escenario 2, el factor de exposición recibió una mayor ponderación (80 %), mientras que la vulnerabilidad se redujo al 20 %. Como se observa en la Figura 8(b), las áreas de riesgo alto se concentran principalmente en el entorno del río Payamino, donde existe una mayor presencia de población e infraestructura expuesta. En comparación con el escenario anterior, la superficie clasificada con riesgo alto y muy alto disminuye ligeramente, lo que indica que el incremento del peso de la exposición favorece la identificación de los sectores con mayor concentración de elementos expuestos, restringiendo espacialmente las áreas de mayor riesgo.

Por su parte, en el escenario 3 se otorgó una ponderación del 80 % al factor de vulnerabilidad y del 20 % a la exposición. Como resultado (Figura 8(c)), las categorías de riesgo alto y muy alto presentan una distribución más amplia, extendiéndose a lo largo de los ríos Coca, Payamino y Napo. Este comportamiento se debe a que los criterios de vulnerabilidad, especialmente aquellos relacionados con la población vulnerable y los usos del suelo, adquieren una mayor influencia en el cálculo del índice, permitiendo identificar áreas que, aun sin concentrar la mayor

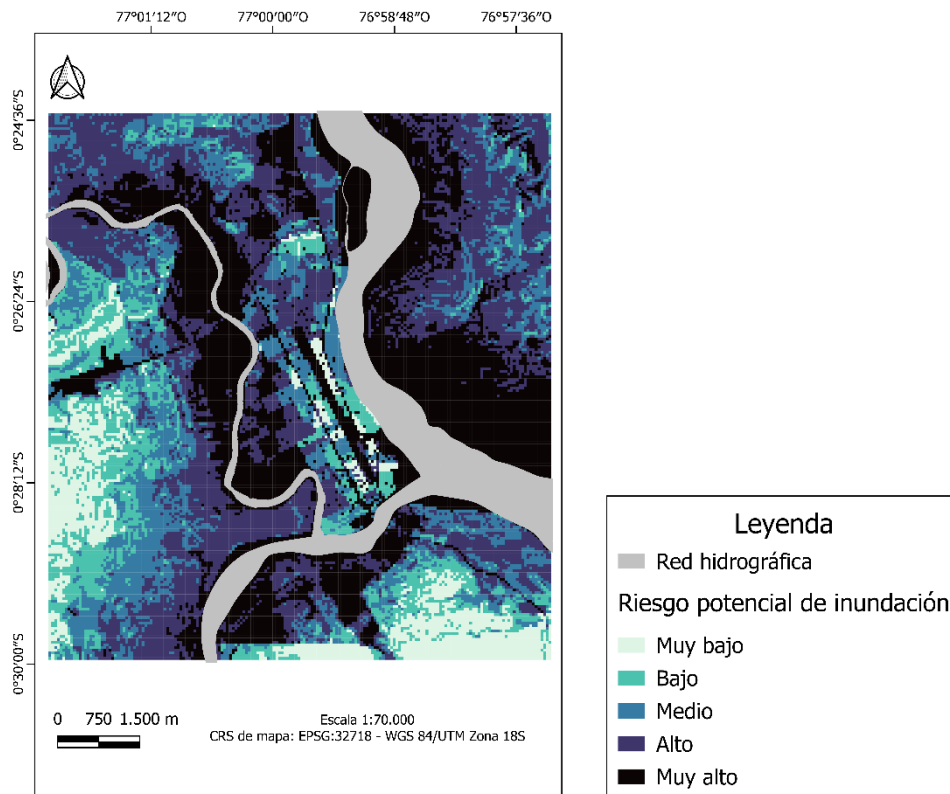
exposición, presentan condiciones más susceptibles frente a un evento de inundación.

En conjunto, los tres escenarios muestran que las zonas de mayor riesgo potencial se localizan de forma consistente en las inmediaciones de la red hidrográfica, confirmando el papel predominante de la peligrosidad en la configuración espacial del riesgo. No obstante, las diferencias observadas entre los escenarios evidencian que la modificación de las ponderaciones de exposición y vulnerabilidad altera la extensión y localización de las áreas clasificadas con riesgo alto y muy alto, lo que demuestra la sensibilidad del modelo a la importancia relativa asignada a cada uno de estos factores.

Figura 8. Escenarios de riesgo potencial de inundación



Continúa



(c)

(a) escenario 1 (50 % exposición – 50 % vulnerabilidad), (b) escenario 2 (80 % exposición – 20 % vulnerabilidad) y (c) escenario 3 (20 % exposición – 80 % vulnerabilidad).

Fuente: elaboración propia

Aunque visualmente pueden apreciarse diferencias en la distribución espacial del riesgo entre los tres escenarios, estas se analizan con mayor detalle mediante el cálculo de la superficie ocupada por cada categoría de riesgo.

5.5. Análisis cuantitativo de la superficie por categorías de riesgo

Con el fin de complementar la interpretación visual de los mapas de riesgo potencial de inundación, se realizó un análisis cuantitativo de la superficie ocupada por cada categoría de riesgo en los tres escenarios evaluados. La cuantificación de superficies se efectuó utilizando los valores numéricos originales del índice de riesgo de los tres escenarios. Este procedimiento permitió cuantificar la superficie correspondiente a cada categoría de riesgo y evaluar las variaciones derivadas de las diferentes ponderaciones asignadas a los factores de exposición y vulnerabilidad.

La clasificación de los valores del índice de riesgo se realizó mediante los mismos umbrales establecidos a partir de los percentiles 20, 40, 60 y 80 de la distribución conjunta de los tres escenarios. De este modo, se aplicaron criterios de clasificación

comunes a E1, E2 y E3, permitiendo comparar de manera consistente la superficie correspondiente a cada categoría de riesgo.

Los resultados presentados en la Tabla 20 muestran diferencias importantes en la distribución de la superficie entre las categorías de riesgo de los tres escenarios. El escenario 3 concentra la mayor proporción de superficie en las categorías de riesgo alto y muy alto, que en conjunto representan el 60,57 % del área de estudio. En contraste, el escenario 2 presenta la mayor proporción acumulada en las categorías muy bajo y bajo, con un 64,55 % de la superficie. Esto evidencia que la modificación de las ponderaciones asignadas a los factores de exposición y vulnerabilidad genera cambios en la distribución espacial del índice de riesgo entre las diferentes categorías.

Tabla 20. Superficie y porcentaje por categoría de riesgo potencial de inundación en los tres escenarios

Clase	E1 (km ²)	E1 (%)	E2 (km ²)	E2 (%)	E3 (km ²)	E3 (%)
Muy bajo	11,410	14,02	31,372	38,54	6,936	8,52
Bajo	18,715	22,99	21,172	26,01	9,732	11,96
Medio	21,412	26,31	12,620	15,50	15,427	18,95
Alto	16,323	20,05	8,474	10,41	24,296	29,85
Muy alto	13,538	16,63	7,761	9,53	25,008	30,72
Total	81,398	100,00	81,399	100,00	81,399	100,00

Fuente: elaboración propia

Nota: La superficie total cuantificada corresponde al área resultante del procesamiento vectorial de los escenarios, sin considerar la superficie ocupada por la red hidrográfica

El escenario 2, en el que la exposición recibe una ponderación del 80 %, presenta la mayor superficie clasificada como riesgo muy bajo, con el 38,54 % del área total, seguido de la categoría bajo, con el 26,01 %. En conjunto, estas dos categorías representan casi dos tercios del área de estudio. Por su parte, el escenario 3, caracterizado por una ponderación del 80 % para la vulnerabilidad, presenta una distribución desplazada hacia las categorías superiores, alcanzando el 29,85 % en riesgo alto y el 30,72 % en riesgo muy alto. En este escenario, las categorías alto y muy alto reúnen el 60,57 % de la superficie, constituyendo la mayor proporción conjunta entre los tres escenarios.

El escenario 1, que asigna una ponderación equivalente a la exposición y la vulnerabilidad, presenta una distribución más equilibrada entre las categorías. La mayor superficie corresponde a la categoría de riesgo medio, con el 26,31 %, seguida de bajo (22,99 %), alto (20,05 %), muy alto (16,63 %) y muy bajo (14,02 %). Esta

distribución intermedia es consistente con la ponderación equivalente de ambos factores y permite considerar al escenario 1 como una situación de referencia entre los escenarios con mayor peso de la exposición y de la vulnerabilidad.

En conjunto, los resultados evidencian que una mayor ponderación del factor de vulnerabilidad desplaza una mayor proporción de la superficie hacia las categorías superiores del índice de riesgo, mientras que una mayor ponderación de la exposición produce una mayor concentración en las categorías inferiores. Este comportamiento confirma la influencia de las ponderaciones sobre la distribución final del riesgo y es coherente con los patrones espaciales identificados en la representación cartográfica de los escenarios. La utilización de los mismos cinco intervalos absolutos en los tres escenarios permite, además, realizar una comparación directa de la superficie ocupada por cada categoría y facilita la identificación de las diferencias producidas por la variación de las ponderaciones.

5.6. Análisis de sensibilidad

La variación de las ponderaciones aplicada a cada criterio (± 10 % respecto al peso obtenido mediante el AHP) y sus resultados se presentan en las tablas del Anexo. En términos generales, el análisis muestra porcentajes reducidos de cambio en la clasificación del riesgo, que en la mayoría de los casos se sitúan alrededor del 5 % del total de celdas clasificadas. Estos resultados indican que pequeñas modificaciones en las ponderaciones de los criterios producen alteraciones limitadas en la distribución espacial del riesgo, lo que evidencia un comportamiento estable del modelo.

Los mayores porcentajes de cambio se registraron en las capas zonas según susceptibilidad a inundación (11,98 %) y vulnerabilidad demográfica de la población (9,91 %). Estos resultados indican que el modelo es relativamente más sensible a variaciones en la ponderación de estas dos capas respecto al resto de criterios, aunque los cambios observados continúan siendo moderados.

Asimismo, la mayor parte de las transiciones se produjo entre categorías de riesgo contiguas (bajo-medio y medio-alto), mientras que los cambios directos entre categorías extremas (bajo-alto o alto-bajo) fueron prácticamente inexistentes. Este comportamiento indica que las variaciones introducidas en las ponderaciones generan ajustes graduales en la clasificación del riesgo, sin modificar de forma drástica el patrón espacial obtenido.

En conjunto, los resultados del análisis de sensibilidad muestran que el modelo mantiene una respuesta consistente frente a variaciones razonables en las ponderaciones de los criterios. Por ello, puede considerarse que la metodología

empleada presenta un adecuado nivel de robustez para la evaluación del riesgo potencial de inundación. Un mayor detalle de los resultados se incluyen en las tablas Tabla A.22, Tabla A.23, Tabla A.24 y Tabla A.25 del Anexo.

5.7. Evaluación de la coherencia entre el modelo de riesgo potencial de inundación y la planificación territorial vigente

Con el propósito de complementar e interpretar los resultados obtenidos mediante el modelo multicriterio, se realizó un análisis de coherencia entre la distribución espacial del riesgo potencial de inundación y la planificación territorial vigente del cantón Francisco de Orellana. Este análisis no constituye una etapa de la modelización del riesgo, sino una evaluación complementaria orientada a contrastar los resultados del modelo con los instrumentos de ordenamiento territorial y a identificar posibles coincidencias o discrepancias entre las categorías de planificación y las zonas con diferentes niveles de riesgo potencial.

La comparación espacial mediante la visualización simultánea de los tres escenarios de riesgo potencial de inundación y la Clasificación del Ordenamiento Territorial (COT) permitió identificar el grado de coincidencia entre las categorías de planificación y la distribución espacial del riesgo. En términos generales, se observa una correspondencia espacial entre las áreas de protección y retención natural con los sectores de mayor riesgo, mientras que determinadas áreas de expansión urbana y de suelo urbano no consolidado coinciden con zonas de riesgo medio y alto (Figura 9).

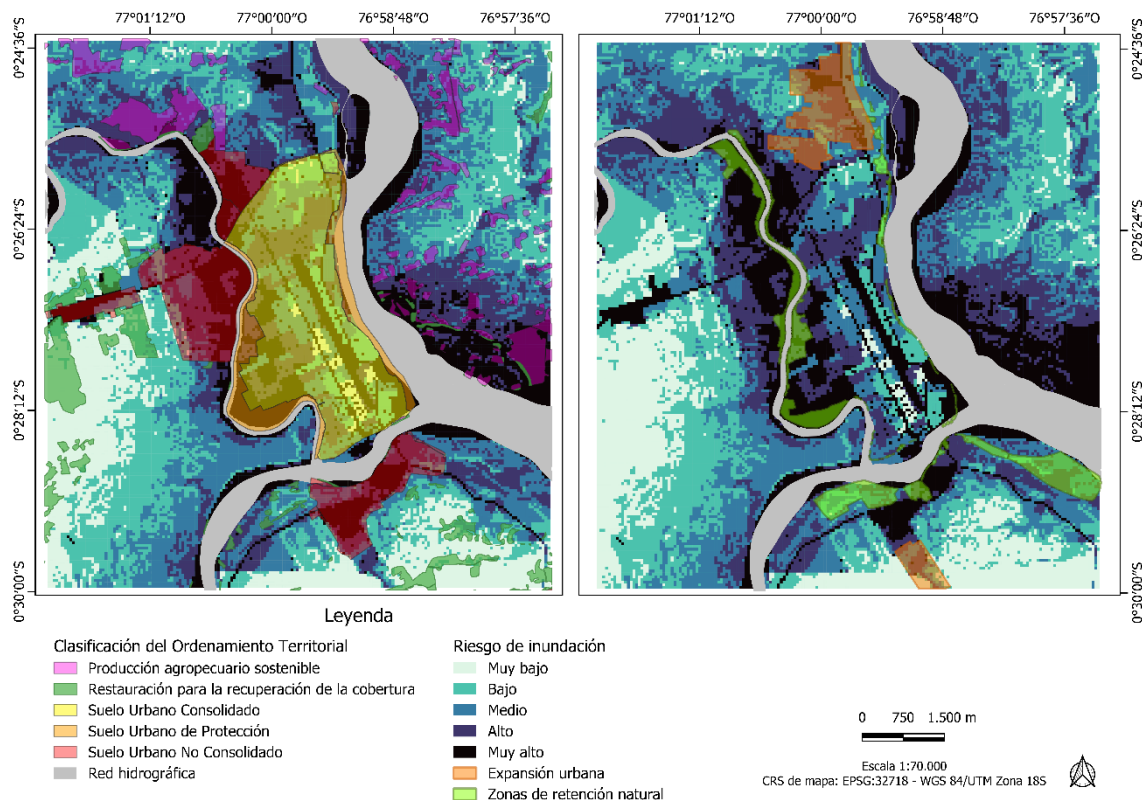
5.7.1. Clasificación del Ordenamiento Territorial (COT)

El suelo urbano consolidado presenta una distribución heterogénea respecto a las categorías de riesgo identificadas en los tres escenarios analizados. Aunque una proporción importante de estas áreas se localiza en zonas clasificadas con riesgo muy bajo y bajo, también existen sectores consolidados ubicados sobre áreas con riesgo medio e incluso alto. La situación difiere en el caso del suelo urbano no consolidado, donde presenta una mayor presencia relativa dentro de las clases de riesgo más elevadas representadas en el mapa, lo que evidencia una mayor exposición potencial frente a futuros procesos de urbanización (Figura 9 (a)).

Las áreas clasificadas como suelo urbano de protección presentan una elevada correspondencia con las zonas de mayor riesgo identificadas por el modelo multicriterio, particularmente a lo largo de las márgenes del río Coca. Las áreas destinadas a restauración y recuperación de la cobertura vegetal se concentran principalmente en sectores clasificados con riesgo muy bajo y bajo. Mientras que las

áreas destinadas a actividades agropecuarias presentan una presencia significativa dentro de sectores con riesgo medio y alto, lo que pone de manifiesto la necesidad de incorporar criterios de gestión del riesgo en las actividades productivas desarrolladas en estos sectores (Figura 9 (a)).

Figura 9. Superposición de las zonas de riesgo potencial de los escenarios evaluados con la Clasificación del Ordenamiento Territorial (COT), las áreas de expansión urbana y las zonas de retención natural



(a)

(b)

Fuente: elaboración propia a partir de datos del GAD Municipal de Francisco de Orellana

5.7.2. Áreas de expansión urbana

Uno de los resultados más relevantes corresponde a las áreas destinadas a expansión urbana, las cuales muestran una tendencia a localizarse sobre sectores con niveles de riesgo superiores a los observados en gran parte del suelo urbano consolidado (Figura 9 (b)). Esta situación evidencia una posible incoherencia entre la planificación del crecimiento urbano y la distribución espacial del riesgo potencial, ya que la incorporación de nuevas áreas urbanizables en sectores relativamente más

expuestos podría incrementar la vulnerabilidad futura si no se establecen medidas de mitigación.

5.7.3. Zonas de retención natural

Las zonas de retención natural muestran una elevada coincidencia con los sectores clasificados con mayor riesgo potencial de inundación (Figura 9 (b)).

También la superposición cartográfica permite identificar sectores donde las áreas urbanizadas se encuentran próximas u ocupan espacios que actualmente presentan menor presencia de coberturas naturales. La pérdida de estas áreas puede reducir la capacidad natural de amortiguamiento frente a inundaciones y favorecer el incremento de la escorrentía superficial, aumentando la exposición del territorio frente a eventos extremos.

5.7.4. Comparación con la cartografía institucional

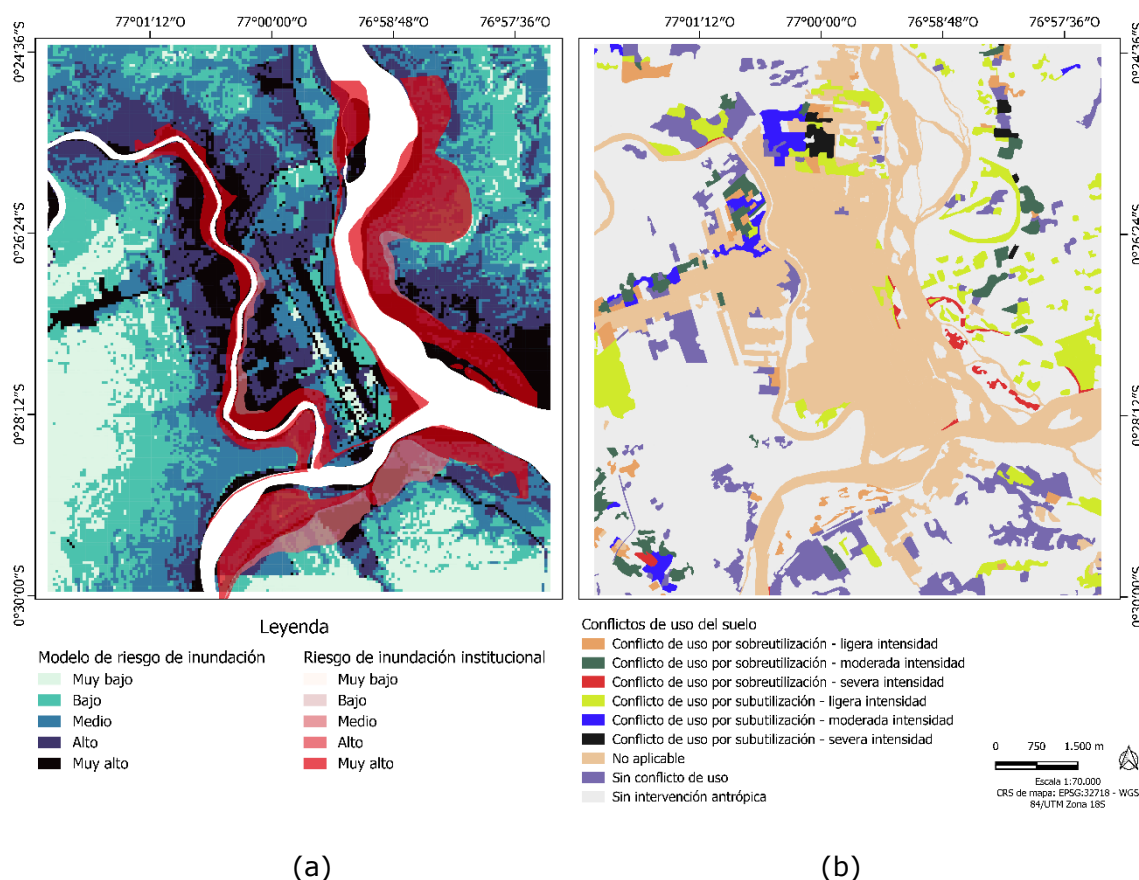
La comparación entre el modelo multicriterio desarrollado y la cartografía oficial de amenazas evidencia diferencias importantes en el nivel de detalle y en el enfoque metodológico.

Mientras la cartografía institucional delimita principalmente las áreas susceptibles a inundación asociadas a la dinámica de los ríos Coca, Napo y Payamino (Figura 10 (a)), el modelo propuesto incorpora simultáneamente criterios de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad mediante técnicas de evaluación multicriterio. Como resultado, el modelo genera una representación espacial más completa del riesgo potencial, permitiendo diferenciar sectores que presentan niveles similares de amenaza física, pero distinta vulnerabilidad o exposición.

En este sentido, ambos productos deben considerarse complementarios. La cartografía institucional constituye una referencia fundamental para identificar las zonas expuestas al fenómeno hidrológico, mientras que el modelo multicriterio aporta información adicional orientada a la priorización de intervenciones, la planificación urbana y la gestión integral del riesgo.

En consecuencia, la integración de ambas fuentes de información puede fortalecer los procesos de planificación territorial y priorización de medidas de reducción del riesgo.

Figura 10. Superposición de las zonas de riesgo potencial de los escenarios evaluados con la cartografía institucional y los conflictos de uso del suelo



Fuente: elaboración propia a partir de datos del GAD Municipal de Francisco de Orellana

5.7.5. Relación entre el riesgo potencial y los conflictos de uso del suelo

La Tabla 21 resume la relación entre las categorías de conflicto de uso del suelo y las clases de riesgo de los tres escenarios. En términos generales, la comparación entre el modelo de riesgo potencial y los conflictos de uso del suelo (Figura 10 (b)) evidencia que las categorías de sobreutilización severa presentan una coincidencia consistente con las clases de mayor riesgo en los tres escenarios analizados, aunque ocupan superficies reducidas. Por otra parte, las áreas sin intervención antrópica presentan una distribución heterogénea entre escenarios, concentrando superficies importantes tanto en clases de riesgo muy bajo como alto, debido a su amplia extensión territorial. Asimismo, la categoría "no aplicable"¹ muestra una presencia relevante de áreas clasificadas con riesgo muy alto, mientras que las categorías de subutilización presentan un comportamiento variable entre escenarios, sin alterar la

¹ La categoría 'no aplicable' corresponde a áreas donde la metodología institucional de conflictos de uso no asigna una clasificación específica.

tendencia general, caracterizada por la concentración de los mayores niveles de riesgo en categorías asociadas a conflictos de uso más intensos.

Tabla 21. Relación entre las categorías de conflicto de uso del suelo y las clases de riesgo de los escenarios

Conflicto de uso del suelo	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Patrón observado
Sin intervención antrópica	Bajo (14,13 km ²)	Muy bajo (24,07 km ²)	Alto (14,98 km ²)	Predominan clases bajas, aunque existen sectores puntuales con riesgo elevado.
No aplicable	Muy alto (6,86 km ²)	Muy alto (4,84 km ²)	Muy alto (8,90 km ²)	Mayor representación en las clases altas de riesgo.
Conflicto de uso por sobreutilización - ligera intensidad	Alto (0,42 km ²)	Muy bajo (0,54 km ²)	Muy alto (0,53 km ²)	Comportamiento variable entre escenarios.
Conflicto de uso por sobreutilización - moderada intensidad	Bajo (0,59 km ²)	Muy bajo (1,04 km ²)	Muy alto (0,62 km ²)	Tendencia creciente hacia clases altas en E3.
Conflicto de uso por sobreutilización - severa intensidad	Muy alto (0,14 km ²)	Muy alto (0,13 km ²)	Muy alto (0,14 km ²)	Asociación consistente con las clases más altas de riesgo.
Conflicto de uso por subutilización - ligera intensidad	Alto (1,35 km ²)	Muy bajo (1,80 km ²)	Muy alto (2,50 km ²)	Mayor superficie dentro de las categorías de subutilización.
Conflicto de uso por subutilización - moderada intensidad	Medio (0,37 km ²)	Muy bajo (0,39 km ²)	Alto (0,44 km ²)	Variabilidad moderada entre escenarios.
Conflicto de uso por subutilización - severa intensidad	Medio (0,20 km ²)	Bajo (0,26 km ²)	Alto (0,24 km ²)	Superficie reducida sin modificar el patrón general.
Sin conflicto de uso	Alto (2,06 km ²)	Muy bajo (2,15 km ²)	Muy alto (2,29 km ²)	Presencia de riesgo incluso en ausencia de conflictos de uso.

Fuente: elaboración propia

6. Discusión

En este apartado se analizan e interpretan los principales resultados obtenidos en la investigación, considerando su significado en relación con los objetivos planteados y el contexto territorial del área de estudio. Asimismo, se examinan las fortalezas y limitaciones metodológicas del modelo desarrollado, así como las implicaciones de los resultados para la planificación territorial y la gestión del riesgo de inundación.

Finalmente, se plantean posibles líneas de investigación futuras orientadas a profundizar y complementar los hallazgos alcanzados.

6.1. Interpretación general del modelo

Uno de los principales aportes de esta investigación consiste en la integración de los componentes de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad mediante el método Analytic Hierarchy Process (AHP), permitiendo representar espacialmente el riesgo potencial de inundación fluvial en la ciudad de Francisco de Orellana mediante un enfoque de evaluación multicriterio. A diferencia de los modelos exclusivamente hidrológicos o hidráulicos, orientados principalmente a representar el comportamiento físico del flujo, el enfoque empleado en este estudio permite integrar simultáneamente variables ambientales, territoriales y socioeconómicas. Esta característica constituye una ventaja para contextos en los que la disponibilidad de información hidrológica e hidráulica detallada es limitada, ya que permite generar una representación espacial del riesgo potencial a partir de información geoespacial disponible y del conocimiento experto. En este sentido, estudios desarrollados en la ciudad de Chone, Ecuador, por Delgado Moreira y Reyna Bowen (2024), así como en el municipio de Ananindeua, en la Amazonía brasileña, por Pimenta et al (2025) coinciden en destacar la utilidad de la integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y AHP para combinar múltiples criterios y representar espacialmente fenómenos complejos relacionados con el riesgo de inundación.

El análisis cuantitativo de la superficie clasificada muestra que la distribución de las categorías de riesgo potencial varía en función de la ponderación asignada a los componentes de exposición y vulnerabilidad. Aunque los tres escenarios fueron clasificados mediante los mismos umbrales, establecidos a partir de los percentiles 20, 40, 60 y 80 de la distribución conjunta, E1 presenta una distribución relativamente equilibrada entre las cinco categorías, mientras que E2 concentra una mayor proporción de superficie en las categorías inferiores y E3 en las superiores. En particular, E2 concentra el 64,55 % de la superficie en las categorías muy bajo y bajo, mientras que E3 reúne el 60,57 % en las categorías alto y muy alto. Este comportamiento evidencia que la distribución espacial del índice de riesgo potencial es sensible al esquema de ponderación adoptado.

La comparación entre E2 y E3 permite identificar con mayor claridad el efecto de modificar la importancia relativa de la exposición y la vulnerabilidad. En E2, donde la exposición recibe mayor ponderación, existe una mayor concentración de superficie en las categorías inferiores, mientras que en E3, donde la vulnerabilidad adquiere mayor peso, aumenta la representación de las categorías superiores. Este resultado no implica que la vulnerabilidad, por sí sola, determine un mayor riesgo de

inundación, sino que refleja la respuesta del índice ante la modificación de los pesos asignados a los componentes que intervienen en su cálculo. Por tanto, los resultados ponen de manifiesto que la elección de las ponderaciones constituye un elemento relevante en la distribución espacial del resultado del modelo multicriterio.

Desde una perspectiva territorial, esta sensibilidad resulta relevante para la interpretación y aplicación del modelo en la planificación urbana, ya que permite reconocer que la clasificación del riesgo potencial depende de la interacción entre la peligrosidad y las condiciones de exposición y vulnerabilidad consideradas. En consecuencia, la evaluación mediante diferentes escenarios aporta una visión más completa que la utilización de una única combinación de ponderaciones, al permitir identificar cómo cambia la representación territorial del riesgo ante distintas prioridades de análisis. No obstante, los resultados deben interpretarse como una estimación del riesgo potencial derivada de los criterios y ponderaciones incorporados al modelo, y no como una estimación directa de la probabilidad o severidad física de una inundación.

Las ponderaciones obtenidas mediante el AHP muestran que las zonas susceptibles a inundación, la distribución espacial de la población total expuesta y la población vulnerable constituyen, respectivamente, los criterios de mayor influencia dentro de los componentes de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. Desde una perspectiva conceptual, esta distribución de pesos resulta coherente con la estructura del modelo, debido a que dichos criterios representan elementos centrales para caracterizar cada componente del riesgo. La elevada ponderación asignada a la susceptibilidad a inundación indica que las condiciones espaciales asociadas al peligro físico tienen una influencia determinante en la distribución final del índice, mientras que la población total expuesta y la población vulnerable permiten incorporar la concentración de elementos expuestos y las diferencias en la capacidad potencial de determinados grupos para afrontar los efectos de una inundación.

La influencia de estos criterios también se refleja en el análisis de sensibilidad. Las zonas susceptibles a inundación y la población vulnerable fueron los criterios que presentaron una mayor sensibilidad ante las modificaciones de las ponderaciones, con variaciones superiores a las observadas en la mayoría de los demás criterios. Esta correspondencia entre la importancia de determinados criterios en el AHP y su respuesta ante modificaciones de los pesos constituye un elemento relevante para interpretar la estabilidad del modelo. Al mismo tiempo, evidencia que los resultados deben ser interpretados considerando la influencia diferencial de las capas que conforman cada componente.

La importancia de la susceptibilidad a inundación coincide con investigaciones desarrolladas en diferentes contextos geográficos. Gün y Yılmaz (2026), Hagos et al. (2022) y Khan et al. (2025), por ejemplo, identifican este criterio como uno de los elementos con mayor influencia en la evaluación espacial de la susceptibilidad o riesgo de inundación. Esta coincidencia puede explicarse porque la susceptibilidad integra condiciones físicas del territorio relacionadas con la topografía, la proximidad y comportamiento de la red hidrográfica y otros factores que condicionan la ocurrencia y distribución espacial de las inundaciones.

En el caso de Francisco de Orellana, la importancia de este criterio adquiere especial relevancia debido a las características físicas y geomorfológicas del área de estudio. La ciudad se localiza en la confluencia de los ríos Coca, Napo y Payamino, en un contexto amazónico caracterizado por pendientes reducidas y una elevada disponibilidad hídrica. A estas condiciones se añade la transformación de la dinámica del río Coca asociada al colapso de la cascada San Rafael en 2020 y a los procesos de erosión regresiva y transporte de sedimentos desarrollados posteriormente. Aunque estos procesos geomorfológicos no fueron incorporados explícitamente como criterios independientes dentro del modelo, constituyen un elemento contextual relevante para interpretar la elevada importancia de las variables relacionadas con la susceptibilidad a inundación.

En este sentido, la coincidencia espacial observada entre sectores afectados por procesos de erosión y áreas que presentan valores relativamente elevados del índice de riesgo constituye un indicio de relación espacial entre ambos procesos, pero no permite establecer una relación causal directa a partir del modelo desarrollado. Esta consideración resulta importante porque la erosión regresiva representa una dinámica geomorfológica que puede modificar las condiciones del cauce y, potencialmente, las condiciones de peligrosidad en el territorio. Por ello, su incorporación explícita como variable o mediante escenarios geomorfológicos constituye una línea de investigación relevante para futuros estudios de riesgo en el área de Francisco de Orellana.

Asimismo, los resultados pueden interpretarse a la luz de estudios que han incorporado criterios adicionales para representar la susceptibilidad a inundaciones. Diriba & Karuppannan (2024), por ejemplo, combinaron Sistemas de Información Geográfica, evaluación multicriterio y teledetección para elaborar un mapa de susceptibilidad a inundaciones en el distrito de Melka Soda, Etiopía. La comparación con este tipo de investigaciones evidencia que existen variables adicionales, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) o la densidad de drenaje, que podrían complementar el modelo desarrollado para Francisco de Orellana. No

obstante, su incorporación debería estar condicionada por la disponibilidad, calidad y pertinencia de la información para la escala de análisis utilizada.

La incorporación de criterios de vulnerabilidad demográfica constituye igualmente un elemento relevante del modelo. Hoque et al. (2019) utilizaron diversos indicadores sociales, entre ellos densidad de población, población dependiente, población con discapacidad, población femenina, características de las viviendas, condiciones de saneamiento y dependencia de la agricultura. En el presente estudio, la vulnerabilidad demográfica se representó principalmente mediante la distribución espacial de niños, personas adultas mayores y mujeres. Esta selección permitió incorporar diferencias demográficas que pueden estar relacionadas con una mayor necesidad de asistencia durante situaciones de emergencia. Sin embargo, la comparación con Hoque et al. (2019) evidencia que la vulnerabilidad social constituye un componente multidimensional que puede ser ampliado mediante indicadores socioeconómicos, condiciones de vivienda, acceso a servicios básicos, discapacidad y capacidad de respuesta, entre otros.

La selección y ponderación de los criterios estuvo basada en el juicio de cuatro especialistas con experiencia relacionada con SIG, evaluación multicriterio y gestión territorial. La participación de varios evaluadores permite contrastar los juicios individuales y reducir parcialmente la dependencia del modelo respecto de una única valoración experta. Sin embargo, no elimina completamente la subjetividad inherente al AHP. En este contexto, el análisis de sensibilidad adquiere especial importancia, debido a que permite evaluar hasta qué punto modificaciones en las ponderaciones pueden alterar los resultados espaciales.

Caglayan et al. (2020), señalan igualmente la utilidad del análisis de sensibilidad para evaluar la robustez de los modelos basados en AHP. Por otra parte, Więckowski y Sałabun (2025) plantean metodologías de análisis de sensibilidad capaces de considerar modificaciones simultáneas de múltiples parámetros, lo que representa una alternativa metodológica para profundizar en el análisis de incertidumbre en futuras investigaciones.

Desde la perspectiva territorial, la comparación espacial del modelo de riesgo potencial con las categorías de suelo urbano permite identificar diferentes situaciones de planificación. El suelo urbano consolidado presenta sectores coincidentes con valores relativamente elevados del modelo, lo que refleja una condición territorial ya existente. En estos sectores, el resultado no implica necesariamente que la ocupación urbana pueda revertirse, sino que evidencia la necesidad de fortalecer medidas

orientadas a la reducción de la vulnerabilidad, preparación, adaptación y gestión del riesgo.

Por su parte, la coincidencia espacial entre áreas de suelo urbano no consolidado y sectores con valores relativamente elevados del índice adquiere una mayor relevancia desde una perspectiva preventiva, debido a que se trata de espacios donde todavía existen posibilidades de orientar el proceso de ocupación. Esta situación constituye una oportunidad para incorporar criterios de riesgo antes de que nuevas edificaciones y actividades consoliden la exposición existente. En consecuencia, los resultados pueden utilizarse como referencia para revisar las condiciones de ocupación de estas áreas, establecer medidas de mitigación y orientar la realización de estudios de mayor detalle cuando sea necesario.

La coincidencia entre las áreas de expansión urbana y las categorías superiores del modelo tampoco demuestra por sí misma la existencia de una contradicción normativa del Plan de Uso y Gestión del Suelo (PUGS). Sin embargo, sí evidencia una condición de incompatibilidad espacial potencial que justifica una revisión más detallada de las condiciones previstas para su ocupación. La relevancia de esta coincidencia dependerá de factores como la superficie afectada, el grado de consolidación de las áreas de expansión, las restricciones normativas aplicables y la existencia de medidas de reducción del riesgo. Por esta razón, el modelo desarrollado debe entenderse como una herramienta de cribado y priorización territorial, y no como un sustituto de estudios hidráulicos o de las zonificaciones oficiales de amenaza y riesgo.

La superposición con las áreas de retención natural presenta, por otra parte, un patrón espacial compatible con la función de regulación hidrológica que pueden desempeñar estos espacios. La presencia de estas áreas en sectores con valores relativamente elevados del índice resulta relevante debido a que la conservación de espacios naturales puede contribuir al almacenamiento temporal de agua, la infiltración y la regulación de escorrentías. Sin embargo, la coincidencia cartográfica no permite determinar por sí misma la eficacia hidráulica de estas áreas, para lo cual sería necesario disponer de información específica sobre cobertura vegetal, continuidad espacial, capacidad de almacenamiento y comportamiento durante eventos de crecida.

La comparación espacial realizada evidencia, por tanto, varios elementos de coherencia como posibles áreas de mejora en la planificación territorial. Por un lado, la existencia de áreas de retención natural en sectores asociados a mayores niveles relativos de riesgo es compatible con una estrategia de conservación de espacios con

función ambiental e hidrológica. Por otro, la presencia de áreas de expansión y suelo urbano no consolidado coincidentes con sectores de mayor riesgo potencial evidencia la necesidad de incorporar de manera más explícita criterios de riesgo en las decisiones relacionadas con la futura ocupación del territorio.

Estos resultados coinciden con investigaciones que han señalado que la expansión urbana sobre planicies de inundación constituye un factor que puede incrementar la exposición futura frente a inundaciones (Merz et al., 2010; Prashar et al., 2023; Xu et al., 2026). En el caso de Francisco de Orellana, esta problemática adquiere especial relevancia debido a la dinámica de crecimiento urbano y a la presencia de sistemas fluviales que condicionan la ocupación del territorio. Por ello, desde una perspectiva de gestión prospectiva del riesgo, los resultados obtenidos pueden contribuir a identificar sectores donde resulta conveniente priorizar medidas preventivas antes de que se consoliden nuevos procesos de ocupación.

En este contexto, el modelo propuesto no pretende sustituir la cartografía institucional ni los instrumentos oficiales de planificación, sino complementarlos mediante la incorporación conjunta de factores de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad. La comparación espacial realizada evidencia oportunidades para fortalecer la incorporación explícita del componente de riesgo en la planificación territorial, particularmente en relación con las áreas de expansión urbana y suelo urbano no consolidado. En consecuencia, la cartografía desarrollada puede constituir una herramienta de apoyo para priorizar sectores de intervención, orientar estudios hidráulicos posteriores, apoyar procesos de actualización del PUGS y fortalecer la planificación preventiva y la reducción del riesgo de inundación.

6.2. Limitaciones

La ausencia de estudios comparables desarrollados específicamente en Francisco de Orellana mediante metodologías de evaluación multicriterio basadas en AHP limita la posibilidad de contrastar directamente los resultados obtenidos con investigaciones realizadas en el mismo contexto territorial. Si bien existen estudios que aplican metodologías similares en otros contextos geográficos, las diferencias en las características físicas, sociales, territoriales y en la disponibilidad de información dificultan una comparación directa de los valores obtenidos. En este sentido, los resultados de la presente investigación deben considerarse como una aproximación espacial específica para el área urbana de Francisco de Orellana y como una base para futuras investigaciones que permitan contrastar y mejorar el modelo.

Una primera limitación metodológica corresponde a la representación estática del sistema hidrográfico utilizado. La capa de la red hidrográfica representa la

configuración espacial de los cauces disponible para el periodo de análisis, sin incorporar explícitamente las modificaciones que pueden producirse como consecuencia de procesos geomorfológicos. En particular, la dinámica asociada a la erosión regresiva del río Coca, el transporte de sedimentos y las modificaciones progresivas del cauce pueden alterar las condiciones de drenaje y, potencialmente, la distribución espacial de la peligrosidad. Por tanto, el modelo representa las condiciones hidrográficas disponibles durante el periodo de estudio y no una configuración dinámica del sistema fluvial.

Una segunda limitación está relacionada con la ausencia de información suficiente para realizar una validación cuantitativa independiente del modelo. La investigación no contó con una base histórica georreferenciada y suficientemente detallada de eventos de inundación, ni con información hidrológica e hidráulica que permitiera contrastar los valores obtenidos con diferentes periodos de retorno, profundidades o velocidades del flujo. En consecuencia, aunque el modelo permite identificar espacialmente sectores con una mayor combinación relativa de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, no es posible determinar mediante una validación independiente el grado de correspondencia entre las categorías obtenidas y la ocurrencia, intensidad o extensión real de eventos de inundación. Esta limitación debe considerarse especialmente al interpretar los resultados como una evaluación de riesgo potencial y no como una predicción del comportamiento hidráulico de futuras crecidas.

Una tercera limitación corresponde al carácter estático de las variables de exposición y vulnerabilidad. La información utilizada representa las condiciones territoriales, demográficas y de infraestructura correspondientes al periodo de estudio y, por tanto, no incorpora transformaciones futuras asociadas al crecimiento urbano, cambios en la distribución de la población, modificaciones en los usos del suelo o nuevas infraestructuras. Esta característica implica que el modelo representa una situación territorial determinada y que sus resultados pueden perder capacidad de representación a medida que se produzcan cambios significativos en el área urbana. Por ello, la actualización periódica de las variables constituye un aspecto necesario para mantener la vigencia del modelo como herramienta de apoyo a la planificación territorial.

Otra limitación se relaciona con la disponibilidad y el nivel de detalle de la información geoespacial empleada. La selección de criterios estuvo condicionada por la información disponible para el área de estudio, lo que impidió incorporar algunas variables que podrían contribuir a una caracterización más completa de determinados componentes del riesgo. Entre ellas se encuentran indicadores socioeconómicos de

mayor resolución espacial, características constructivas de las edificaciones, información histórica georreferenciada sobre daños y pérdidas y otras variables ambientales que han sido utilizadas en investigaciones de susceptibilidad y riesgo de inundación. Esta limitación no invalida el modelo desarrollado, pero establece un alcance definido respecto a los factores que pueden ser representados espacialmente mediante la información disponible.

La disponibilidad de información también condicionó la posibilidad de representar con mayor detalle la peligrosidad física. El modelo desarrollado integra variables espaciales relacionadas con las condiciones del territorio, pero no incorpora una simulación hidrológica o hidráulica capaz de representar parámetros como profundidad, velocidad o duración de la inundación. En consecuencia, los resultados permiten identificar sectores con mayor riesgo potencial relativo, pero no proporcionan información sobre la magnitud hidráulica que podría alcanzar una inundación en cada localización. La incorporación de información hidrológica e hidráulica permitiría complementar el enfoque multicriterio y reducir esta fuente de incertidumbre.

Otra consideración metodológica corresponde a la selección y ponderación de los criterios mediante AHP. Aunque la participación de cuatro especialistas y el análisis de sensibilidad contribuyeron a evaluar la estabilidad de los resultados, las ponderaciones continúan dependiendo del juicio experto y, por tanto, incorporan un componente de subjetividad. Además, la modificación de las ponderaciones puede producir variaciones en la distribución espacial del índice, especialmente en aquellos criterios que presentaron mayor sensibilidad. Por ello, los resultados deben interpretarse teniendo en cuenta que las ponderaciones representan una decisión metodológica fundamentada en el conocimiento experto disponible y no una relación causal directamente observable entre las variables.

Finalmente, la resolución espacial de 50 m constituye un compromiso entre el nivel de detalle de la representación territorial y la capacidad de procesamiento de las diferentes capas utilizadas. Esta resolución permite realizar una representación homogénea del área de estudio, pero puede limitar la identificación de variaciones espaciales de menor escala, especialmente en sectores urbanos donde existen diferencias locales en topografía, infraestructura, ocupación del suelo o distribución de la población. Por tanto, algunos patrones identificados por el modelo pueden requerir análisis de mayor resolución para su aplicación a escala predial o para la toma de decisiones específicas sobre proyectos urbanísticos.

En conjunto, estas limitaciones establecen el alcance de los resultados obtenidos. La cartografía desarrollada constituye una herramienta de apoyo para la identificación y priorización espacial de sectores con mayor riesgo potencial de inundación, pero no debe interpretarse como una representación determinística de la ocurrencia futura de inundaciones ni como sustituto de estudios hidrológicos, hidráulicos o de detalle requeridos para la toma de decisiones específicas.

6.3. Futuras líneas de investigación

A partir de las limitaciones identificadas y de los resultados obtenidos, se plantean diversas líneas de investigación orientadas a mejorar la caracterización del riesgo potencial de inundación en Francisco de Orellana y fortalecer la utilidad del modelo como herramienta de apoyo a la planificación territorial.

Una primera línea prioritaria consiste en desarrollar procesos de validación independiente del modelo mediante la incorporación de registros históricos georreferenciados de inundaciones e información hidrológica e hidráulica. La disponibilidad de datos sobre precipitación, caudales, periodos de retorno, extensión de las áreas inundadas, profundidad, velocidad y duración del flujo permitiría contrastar los resultados obtenidos mediante la evaluación multicriterio con evidencias observadas y modelos físicos. En este sentido, la integración de modelos hidrológicos e hidráulicos con el enfoque multicriterio desarrollado permitiría complementar la representación espacial del riesgo potencial con una caracterización más detallada de la peligrosidad y reducir la incertidumbre asociada al modelo.

Una segunda línea de investigación se relaciona con la incorporación explícita de la dinámica geomorfológica del río Coca. Los procesos de erosión regresiva, transporte de sedimentos, sedimentación y modificación de la configuración del cauce pueden generar cambios espaciales y temporales en las condiciones del sistema fluvial. Por ello, futuros estudios podrían incorporar información multitemporal obtenida mediante teledetección, análisis de cambios en la posición del cauce y modelos digitales de elevación de mayor resolución para evaluar la evolución geomorfológica del sistema. La generación de escenarios de evolución del cauce permitiría analizar cómo estas transformaciones podrían modificar las condiciones de peligrosidad y, consecuentemente, la distribución espacial del riesgo potencial en el área urbana.

Una tercera línea consiste en ampliar la representación de la vulnerabilidad mediante la incorporación de indicadores sociales y económicos con mayor resolución espacial. Además de las variables demográficas utilizadas en el presente estudio, podrían considerarse condiciones de las viviendas, acceso a servicios básicos, discapacidad, características socioeconómicas, dependencia económica, capacidad de respuesta y

accesibilidad a servicios de emergencia. La incorporación de estos indicadores permitiría aproximarse de manera más integral a la vulnerabilidad de la población y evaluar con mayor detalle las diferencias territoriales en la capacidad potencial para afrontar y recuperarse de eventos de inundación.

Otra línea de investigación consiste en desarrollar escenarios prospectivos que permitan evaluar la evolución futura del riesgo bajo diferentes condiciones de crecimiento urbano y transformación territorial. La integración del modelo multicriterio con escenarios de expansión urbana, crecimiento demográfico y cambios de uso y cobertura del suelo permitiría analizar cómo podrían modificarse la exposición y vulnerabilidad en el tiempo. Esta aproximación resultaría especialmente útil para la planificación territorial, debido a que permitiría identificar sectores donde determinadas decisiones de ocupación podrían generar incrementos futuros del riesgo potencial y, por tanto, orientar medidas preventivas antes de la consolidación de nuevos procesos urbanos.

Asimismo, sería conveniente evaluar la sensibilidad de los resultados frente a diferentes metodologías de evaluación multicriterio y ponderación. La aplicación comparativa de métodos como Fuzzy-AHP, Analytic Network Process (ANP), TOPSIS u otros enfoques híbridos permitiría determinar en qué medida la elección del método y la forma de asignar las ponderaciones modifican la distribución espacial del riesgo. Esta comparación contribuiría a caracterizar de manera más explícita la incertidumbre asociada al proceso de decisión y permitiría identificar aquellos resultados espaciales que se mantienen estables independientemente del método empleado.

Otra línea de investigación consiste en ampliar progresivamente la aplicación del modelo hacia otros sectores urbanos y territorios de la región amazónica ecuatoriana. La aplicación de una metodología común en diferentes ciudades permitiría comparar las condiciones de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, identificar patrones territoriales comunes y evaluar la transferibilidad del modelo. En una escala regional, este enfoque podría contribuir a generar herramientas comparables para apoyar la planificación y gestión del riesgo de inundación en otros territorios de la provincia de Orellana.

Finalmente, se considera relevante fortalecer la validación y apropiación institucional de los resultados mediante procesos participativos que involucren a instituciones públicas, organismos responsables de la gestión del riesgo y comunidades locales. La incorporación del conocimiento local permitiría contrastar los patrones espaciales obtenidos con la experiencia de la población respecto a eventos históricos, zonas

recurrentemente afectadas y cambios territoriales observados. Asimismo, la participación de las instituciones responsables de la planificación territorial podría contribuir a evaluar la aplicabilidad de la cartografía generada en procesos de actualización del Plan de Uso y Gestión del Suelo (PUGS), priorización de actuaciones y definición de estudios de mayor detalle.

7. Conclusiones

La presente investigación permitió evaluar el riesgo potencial de inundación fluvial en el área urbana de Francisco de Orellana (El Coca) mediante la integración de los componentes de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad a través de un modelo de evaluación multicriterio basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el método Analytic Hierarchy Process (AHP). Los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones.

1. La aplicación de un modelo multicriterio permitió representar espacialmente el riesgo potencial de inundación fluvial en el área urbana de Francisco de Orellana. La integración de los componentes de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad permitió superar una aproximación basada exclusivamente en las condiciones físicas del territorio e incorporar simultáneamente la presencia de población, infraestructura y grupos demográficos potencialmente vulnerables. De esta manera, el modelo permitió identificar espacialmente los sectores donde la combinación de estos componentes genera valores relativamente superiores de riesgo potencial, constituyéndose en un insumo complementario para la planificación urbana y la gestión territorial del riesgo.
2. La selección y ponderación de los criterios permitió identificar los factores con mayor influencia dentro del modelo. Las zonas susceptibles a inundación, la distribución espacial de la población total expuesta y la población vulnerable constituyeron los criterios con mayor peso dentro de los componentes de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad, respectivamente. Esta distribución de ponderaciones evidencia la importancia de integrar tanto las condiciones físicas que favorecen la ocurrencia de inundaciones como la concentración de población y las características demográficas que pueden condicionar los efectos de un evento. Asimismo, la utilización de cuatro especialistas permitió incorporar diferentes juicios expertos en la construcción de las ponderaciones, reduciendo parcialmente la dependencia del modelo respecto de una única valoración.
3. Los tres escenarios evaluados evidenciaron que la distribución espacial del riesgo potencial es sensible a las ponderaciones asignadas a los componentes de exposición y vulnerabilidad. El escenario con mayor peso de la exposición

(E2) concentró la mayor proporción de superficie en las categorías muy baja y baja, con un 64,55% del área de estudio, mientras que el escenario con mayor peso de la vulnerabilidad (E3) presentó la mayor representación conjunta de las categorías alta y muy alta, alcanzando el 60,57%. Estos resultados ponen de manifiesto la influencia de las ponderaciones en la distribución espacial del índice y demuestran la utilidad de incorporar escenarios alternativos para comprender la variabilidad de los resultados e identificar áreas cuya clasificación puede verse influenciada por la importancia relativa asignada a cada componente.

4. El análisis de sensibilidad evidenció una estabilidad general del modelo frente a modificaciones de las ponderaciones. La variación de los pesos en $\pm 10\%$ produjo cambios relativamente reducidos en los resultados generales, lo que indica que las modificaciones de las ponderaciones no alteraron sustancialmente el comportamiento global de los escenarios. Sin embargo, las zonas susceptibles a inundación y la vulnerabilidad demográfica de la población presentaron una mayor sensibilidad frente a las variaciones de peso. Este resultado permite identificar cuáles son las variables que requieren especial atención en futuras actualizaciones del modelo y, al mismo tiempo, aporta evidencia sobre la robustez de los resultados obtenidos frente a cambios moderados en los parámetros de ponderación.
5. La comparación espacial con la planificación territorial permitió identificar tanto elementos de coherencia como posibles oportunidades de mejora en la incorporación del riesgo. La coincidencia de áreas de retención natural con sectores de valores relativamente elevados del modelo es compatible con la función de conservación y regulación hidrológica que desempeñan estos espacios. En contraste, la presencia de áreas de expansión urbana y suelo urbano no consolidado coincidentes espacialmente con sectores de mayor riesgo potencial evidencia la necesidad de revisar con mayor detalle las condiciones de ocupación previstas y de considerar medidas preventivas antes de la consolidación de nuevos procesos urbanos. Esta coincidencia espacial no demuestra por sí misma una contradicción normativa del PUGS, pero constituye un elemento técnico relevante para orientar revisiones posteriores y priorizar estudios de mayor detalle.
6. Los resultados obtenidos permiten formular recomendaciones orientadas a fortalecer la planificación urbana y la gestión prospectiva del riesgo en Francisco de Orellana. La cartografía generada puede utilizarse como insumo para identificar sectores prioritarios, orientar estudios hidrológicos e hidráulicos posteriores, apoyar procesos de actualización del Plan de Uso y

Gestión del Suelo y favorecer la incorporación del componente de riesgo en las decisiones relacionadas con la expansión urbana. En particular, los sectores de suelo urbano no consolidado y expansión urbana que presentan valores elevados de riesgo potencial deberían considerarse prioritarios para evaluaciones complementarias antes de promover nuevos procesos de ocupación.

7. El modelo desarrollado constituye una herramienta de apoyo para la planificación territorial, pero no sustituye los estudios oficiales de amenaza y riesgo ni los modelos hidrológicos e hidráulicos. Debido a la ausencia de una validación independiente mediante registros históricos georreferenciados, periodos de retorno y parámetros hidráulicos como profundidad y velocidad del flujo, los resultados deben interpretarse como una aproximación espacial del riesgo potencial. Su principal utilidad radica en facilitar la identificación y priorización de sectores que requieren análisis posteriores, permitiendo orientar los recursos técnicos hacia áreas donde la combinación de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad presenta valores relativamente superiores.

En términos generales, la investigación demuestra que la integración de SIG, evaluación multicriterio y AHP constituye una alternativa metodológica útil para generar una representación espacial del riesgo potencial de inundación en contextos donde la información hidrológica e hidráulica disponible es limitada. Para Francisco de Orellana, los resultados evidencian la importancia de considerar conjuntamente las condiciones físicas del territorio y la distribución de la población y de los grupos vulnerables, especialmente ante un contexto urbano condicionado por la presencia de los ríos Coca, Napo y Payamino y por una dinámica territorial susceptible de generar cambios en la exposición futura. En este sentido, los insumos generados por la investigación pueden contribuir a fortalecer una planificación urbana orientada no únicamente a responder ante eventos de inundación, sino también a prevenir la generación de nuevas condiciones de riesgo.

8. Referencias bibliográficas

- Abajo, B., Navarro, D., García, G., Zorita, S., Feliu, E., Klett, P., Sánchez, M., & Heras, F. (2023). Guía para la evaluación de riesgos asociados al cambio climático 2023 (p. 84).
- Abdo, H. G., Vishwakarma, D. K., Alsafadi, K., Bindajam, A. A., Mallick, J., Mallick, S. K., Kumar, K. C. A., Albanai, J. A., Kuriqi, A., & Hysa, A. (2024). GIS-based multi-criteria decision making for delineation of potential groundwater recharge zones for sustainable resource management in the Eastern Mediterranean: A case study. *Applied Water Science*, 14(7), 160. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02217-z>
- Apel, H., Aronica, G. T., Kreibich, H., & Thielen, A. H. (2009). Flood risk analyses—How detailed do we need to be? *Natural Hazards*, 49(1), 79-98. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9277-8>
- Arnell, N. W., & Gosling, S. N. (2016). The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134(3), 387-401. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1084-5>
- Àvila Callau, A., Erdozain, M., Farías-Torbidoni, E. I., & de-Miguel, S. (2025). Linking Forest Planning and Recreational Trail Design: A GIS Approach for Enhancing the Social Use of Forests. *Environmental Management*, 75(8), 2150-2168. <https://doi.org/10.1007/s00267-025-02199-x>
- Barneveld, H. J., Frings, R. M., Mosselman, E., Venditti, J. G., Kleinhans, M. G., Blom, A., Schielen, R. M. J., Toonen, W. H. J., Meijer, D., Paarlberg, A. J., Van Denderen, R. P., De Jong, J. S., Beemster, J. G. W., Melsen, L. A., & Hoitink, A. J. F. (2025). Extreme river flood exposes latent erosion risk. *Nature*, 644(8076), 391-397. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-09305-3>
- Barragán, J. C. (2023). Escenarios de Riesgo Climático Asociados al Caudal del Río Coca en la Provincia de Orellana: Recomendaciones de Política para los Gobiernos Nacional y Local. FLACSO.
- Barrera Crespo, P. D., Espinoza Girón, P., Bedoya, R., Gibson, S., East, A. E., Langendoen, E. J., & Boyd, P. (2024). Major fluvial erosion and a 500-Mt sediment pulse triggered by lava-dam failure, Río Coca, Ecuador. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(3), 1058-1080. <https://doi.org/10.1002/esp.5751>
- Bin, L., Xu, K., Pan, H., Zhuang, Y., & Shen, R. (2023). Urban flood risk assessment characterizing the relationship among hazard, exposure, and vulnerability. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(36), 86463-86477. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28578-7>

- Caglayan, İ., Yeşil, A., Cieszewski, C., Gül, F. K., & Kabak, Ö. (2020). Mapping of recreation suitability in the Belgrad Forest Stands. *Applied Geography*, 116, 102153. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102153>
- De Moel, H., Van Alphen, J., & Aerts, J. C. J. H. (2009). Flood maps in Europe – methods, availability and use. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 289-301. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-289-2009>
- de Brito, M. M., & Evers, M. (2016). Multi-criteria decision-making for flood risk management: A survey of the current state of the art. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(4), 1019-1033. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1019-2016>
- Delgado Moreira, M. I., & Reyna Bowen, J. L. (2024). Adaptation and mitigation actions for flood management. *Visions for Sustainability*, 22, 10345, 1-18 Pages. <https://doi.org/10.13135/2384-8677/10345>
- Diriba, D., & Karuppannan, S. (2024). An integrated approach to identify flood hazard and risk areas in Melka Soda district, Southern Ethiopia. *Quaternary Science Advances*, 15, 100211. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2024.100211>
- European Council. (2007). Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks (pp. 27-34). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32007L0060>
- Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., & Dahe, Q. (Eds.). (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (1.a ed.)*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245>
- GAD Municipal de Francisco de Orellana. (2025). Informe técnico de la Dirección de Riesgos (p. 55) [Contestación de preguntas de la Asamblea Local ACL]. Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal Francisco de Orellana.
- GADMFO. (2024). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (p. 747). GADMFO.
- GADPO. (2023). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) (p. 653). Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Orellana.
- Grupo de Evaluación de Riesgo de la Agencia de Medio Ambiente (AMA). (2014). Metodologías para la determinación de riesgos de desastres a nivel territorial. En Metodología para la realización de los estudios de peligro, vulnerabilidad y riesgos de desastres de inundación por intensas lluvias (pp. 11-32).
- Guerrero Calero, J. M., Mieles Giler, J. W., Navarro Saltos, G. E., & Merchán Nieto, L. C. (2025). Análisis de la vulnerabilidad y susceptibilidad a inundaciones en el área urbana del cantón Francisco de Orellana (El Coca), Orellana, Ecuador. *Arandu UTIC*, 12(1), 660-674. <https://doi.org/10.69639/arandu.v12i1.632>

- Gün, R., & Yilmaz, M. (2026). A New Framework for Comprehensive Flood Risk Assessment Under Non-Stationary Conditions Using GIS-Based MCDM Modeling. *Atmosphere*, 17(1), 62. <https://doi.org/10.3390/atmos17010062>
- Hagos, Y. G., Andualem, T. G., Yibeltal, M., & Mengie, M. A. (2022). Flood hazard assessment and mapping using GIS integrated with multi-criteria decision analysis in upper Awash River basin, Ethiopia. *Applied Water Science*, 12(7), 148. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01674-8>
- Hoque, M. A.-A., Tasfia, S., Ahmed, N., & Pradhan, B. (2019). Assessing Spatial Flood Vulnerability at Kalapara Upazila in Bangladesh Using an Analytic Hierarchy Process. *Sensors*, 19(6), 1302. <https://doi.org/10.3390/s19061302>
- Hussain, M., Tayyab, M., Zhang, J., Shah, A. A., Ullah, K., Mehmood, U., & Al-Shaibah, B. (2021). GIS-Based Multi-Criteria Approach for Flood Vulnerability Assessment and Mapping in District Shangla: Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Sustainability*, 13(6), 3126. <https://doi.org/10.3390/su13063126>
- Idrees, M. O., Yusuf, A., Mokhtar, E. S., & Yao, K. (2022). Urban flood susceptibility mapping in Ilorin, Nigeria, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4), 5779-5791. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01479-3>
- INEC. (2022). Censo Ecuador. Instituto Nacional de Estadística y Censos. <https://www.censoecuador.gob.ec/resultados-censo/>
- Instituto Geográfico Militar (IGM). (2017). Visor geográfico. Infraestructura de Datos Espaciales para Instituto Geográfico Militar. <https://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2023). Geografía estadística. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Geografia_Estadistica/Micrositio_geoportal/index.html
- Islam, T., Zeleke, E. B., Afroz, M., & Melesse, A. M. (2025). A Systematic Review of Urban Flood Susceptibility Mapping: Remote Sensing, Machine Learning, and Other Modeling Approaches. *Remote Sensing*, 17(3), 524. <https://doi.org/10.3390/rs17030524>
- Jayawardane, P., Rajapakse, L., & Siriwardana, C. (2026). Comparative urban flood hazard mapping using GIS-integrated multi-criteria decision analysis: A remote sensing approach for Colombo, Auckland, and Valencia. *Environmental Earth Sciences*, 85(7), 187. <https://doi.org/10.1007/s12665-026-12888-3>
- Kappal, S. (2019). Data Normalization using Median & Median Absolute Deviation (MMAD) based Z-Score for Robust Predictions vs. Min – Max Normalization. *London Journal of Research in Science: Natural and Formal*, 19(4), 39-44.

- Khan, N. A., Alzahrani, H., Bai, S., Hussain, M., Tayyab, M., Ullah, S., Ullah, K., & Khalid, S. (2025). Flood risk assessment in the Swat river catchment through GIS-based multi-criteria decision analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1567796. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1567796>
- Kron, W. (2005). Flood Risk = Hazard • Values • Vulnerability. *Water International*, 30(1), 58-68. <https://doi.org/10.1080/02508060508691837>
- MAG-SIGTIERRAS. (2014). Ministerio de Agricultura y Ganadería. Geoportal del Agro Ecuatoriano. <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>
- Malczewski, J. (1999). GIS and multicriteria decision analysis. John Wiley & sons.
- Mancero, H. G., Toctaguano, D. S., Tacuri, C. A., Kirby, E. P., & Tierra, A. R. (2015). Evaluación de Modelos Digitales de Elevación obtenidos por diferentes sensores remotos. X Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE.
- Maranzoni, A., D'Oria, M., & Rizzo, C. (2023). Quantitative flood hazard assessment methods: A review. *Journal of Flood Risk Management*, 16(1), e12855. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12855>
- Mazarakis, V., Tsanakas, K., Greenbaum, N., Batzakis, D.-V., Sorrentino, A., Tsodoulos, I., Valkanou, K., & Karymbalis, E. (2025). Flood-Hazard Assessment in the Messapios River Catchment (Central Evia Island, Greece) by Integrating GIS-Based Multi-Criteria Decision Analysis and Analytic Hierarchy Process. *Land*, 14(3), 658. <https://doi.org/10.3390/land14030658>
- Merz, B., Hall, J., Disse, M., & Schumann, A. (2010). Fluvial flood risk management in a changing world. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(3), 509-527. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-509-2010>
- Merz, B., Thielen, A. H., & Gocht, M. (2007). Flood Risk Mapping At The Local Scale: Concepts and Challenges. En S. Begum, M. J. F. Stive, & J. W. Hall (Eds.), *Flood Risk Management in Europe* (Vol. 25, pp. 231-251). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4200-3_13
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2024). Geoportal del Agro Ecuatoriano. <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). (2025). Geoportal del Agro Ecuatoriano. <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>
- Ministerio de Gobierno. (2025). Datos abiertos. <https://www.datosabiertos.gob.ec/>
- Mishra, K., & Sinha, R. (2020). Flood risk assessment in the Kosi megafan using multi-criteria decision analysis: A hydro-geomorphic approach. *Geomorphology*, 350, 106861. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106861>
- Parsian, S., Amani, M., Moghimi, A., Ghorbanian, A., & Mahdavi, S. (2021). Flood Hazard Mapping Using Fuzzy Logic, Analytical Hierarchy Process, and Multi-

- Source Geospatial Datasets. *Remote Sensing*, 13(23), 4761.
<https://doi.org/10.3390/rs13234761>
- Peng, J., & Zhang, J. (2022). Urban flooding risk assessment based on GIS- game theory combination weight: A case study of Zhengzhou City. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 77, 103080.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103080>
- Pimenta, L., Duarte, L., Teodoro, A. C., Beltrão, N., Gomes, D., & Oliveira, R. (2025). GIS-Based Flood Susceptibility Mapping Using AHP in the Urban Amazon: A Case Study of Ananindeua, Brazil. *Land*, 14(8), 1543.
<https://doi.org/10.3390/land14081543>
- Poddar, I., Alam, J., Basak, A., Mitra, R., & Das, J. (2023). Application of a Geospatial-Based Subjective MCDM Method for Flood Susceptibility Modeling in Teesta River Basin, West Bengal, India. En J. Das & S. K. Bhattacharya (Eds.), *Monitoring and Managing Multi-hazards* (pp. 135-152). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15377-8_10
- Prashar, N., Lakra, H. S., Shaw, R., & Kaur, H. (2023). Urban Flood Resilience: A comprehensive review of assessment methods, tools, and techniques to manage disaster. *Progress in Disaster Science*, 20, 100299.
<https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2023.100299>
- Rincón, D., Khan, U. T., & Armenakis, C. (2018). Flood Risk Mapping Using GIS and Multi-Criteria Analysis: A Greater Toronto Area Case Study. *Geosciences*, 8(8), 275. <https://doi.org/10.3390/geosciences8080275>
- Saaty, T. L. (1990a). An Exposition of the AHP in Reply to the Paper "Remarks on the Analytic Hierarchy Process". *Management Science*, 36(3), 259-268.
<https://doi.org/10.1287/mnsc.36.3.259>
- Saaty, T. L. (1990b). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26.
[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-1)
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). The Seven Pillars of the Analytic Hierarchy Process. En T. L. Saaty & L. G. Vargas, *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process* (Vol. 175, pp. 23-40). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6_2
- Sayers, P., Li, Y., Galloway, G., Penning-Rowsell, E., Shen, F., Wen, K., Chen, Y., & Le Quesne, T. (2013). *Flood Risk Management: A Strategic Approach*. Philippine Institute for Development Studies.
- Secretaría de Gestión de Riesgos. (2019). *Propuesta metodológica para el análisis de amenaza ante inundaciones en Ecuador Continental* (p. 28). Secretaría de Gestión de Riesgos y Emergencias.

- Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Sustentable, Ordenamiento Territorial, & Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2025). La resiliencia y la gestión del riesgo de desastres. En Estrategia estatal de resiliencia. Estado de puebla (p. 93).
- Sorooshian, S., & Parsia, Y. (2019). Modified Weighted Sum Method for Decisions with Altered Sources of Information. *Mathematics and Statistics*, 7(3), 57-60. <https://doi.org/10.13189/ms.2019.070301>
- Tariq, A., Yan, J., Ghaffar, B., Qin, S., Mousa, B. G., Sharifi, A., Huq, Md. E., & Aslam, M. (2022). Flash Flood Susceptibility Assessment and Zonation by Integrating Analytic Hierarchy Process and Frequency Ratio Model with Diverse Spatial Data. *Water*, 14(19), 3069. <https://doi.org/10.3390/w14193069>
- ThinkHazard. (2024). Inundación fluvial. ThinkHazard! <https://thinkhazard.org/es/report/1151-ecuador-orellana>
- Tikuye, B. G., Ray, R. L., Abeysingha, N. S., & Gurau, S. (2025). Integrating multi-criteria decision analysis and geospatial data for flood susceptibility mapping in Texas, USA. *Progress in Disaster Science*, 28, 100462. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2025.100462>
- Więckowski, J., & Sałabun, W. (2025). Comparative Sensitivity Analysis in Composite Material Selection: Evaluating OAT and COMSAM Methods in Multi-criteria Decision-making. *Spectrum of Mechanical Engineering and Operational Research*, 2(1), 1-12. <https://doi.org/10.31181/smeor21202524>
- Wijesinghe, D. C., Mishra, P. K., Withanage, N. C., Abdelrahman, K., Mishra, V., Tripathi, S., & Fnais, M. S. (2023). Application of GIS, Multi-Criteria Decision-Making Techniques for Mapping Groundwater Potential Zones: A Case Study of Thalawa Division, Sri Lanka. *Water*, 15(19), 3462. <https://doi.org/10.3390/w15193462>
- Xu, W., Guo, X., Proverbs, D. G., & Han, P. (2026). A GIS-based multi-criteria decision analysis of urban flood risk. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 44(3), 638-657. <https://doi.org/10.1108/IJBPA-11-2024-0233>
- Zhang, J., & Convertino, M. (2026). Global mapping of potential coastal compound flood risk at 0.1° resolution. *Communications Earth & Environment*, 7(1), 83. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-03155-7>

9. Anexos

Lista de abreviaciones

Abreviación	Nombre
PRH	Proximidad a la red hidrográfica
EDMDE	Elevación derivada del Modelo Digital de Elevaciones (MDE)
PTDMDE	Pendiente del terreno derivada del MDE
ZSI	Zonas según susceptibilidad a inundación
USCVE	Usos del suelo y coberturas vegetales expuestas
DEPTE	Distribución espacial de la población total expuesta
ICE	Infraestructura crítica expuesta
RTTAE	Red de transporte terrestre y aéreo expuesta
VUSCV	Vulnerabilidad asociada a los usos del suelo y coberturas vegetales
VDP	Vulnerabilidad demográfica de la población
VIC	Vulnerabilidad de la infraestructura crítica
VRVT	Vulnerabilidad de la red vial y de transporte

Tabla A.22. Variación de las ponderaciones de cada criterio del factor peligrosidad utilizada en el análisis de sensibilidad.

Criterio	PRH	EDMDE	PTDMDE	ZSI
PRH	0,353	0,086	0,196	0,365
EDMDE	0,324	0,087	0,210	0,379
PTDMDE	0,314	0,090	0,227	0,369
ZSI	0,334	0,109	0,219	0,338

Fuente: elaboración propia

Tabla A.23. Variación de las ponderaciones de cada criterio del factor exposición utilizada en el análisis de sensibilidad.

Criterio	USCVE	DEPTE	ICE	RTTAE
USCVE	0,080	0,462	0,227	0,230
DEPTE	0,088	0,418	0,245	0,248
ICE	0,065	0,457	0,253	0,225
RTTAE	0,081	0,473	0,238	0,209

Fuente: elaboración propia

Tabla A.24. Variación de las ponderaciones de cada criterio del factor vulnerabilidad utilizada en el análisis de sensibilidad.

Criterio	VUSCV	VDP	VIC	VRVT
VUSCV	0,079	0,492	0,308	0,122
VDP	0,088	0,445	0,327	0,140
VIC	0,061	0,484	0,341	0,114
VRVT	0,076	0,498	0,314	0,112

Fuente: elaboración propia

Tabla A.25. Número de píxeles del escenario 1 que cambian de categoría de riesgo tras la variación de $\pm 10\%$ en la ponderación de cada criterio durante el análisis de sensibilidad.

Factores	Criterios		B $\rightarrow$ M	B $\rightarrow$ A	M $\rightarrow$ B	M $\rightarrow$ A	A $\rightarrow$ B	A $\rightarrow$ M	Cambio total	Cambio total (%)
Peligrosidad	Proximidad a la red hidrográfica	Incrementa 10%	594	0	320	558	2	342	1816	4,83
	Elevación derivada del Modelo Digital de Elevaciones (MDE)	Disminuye 10%	194	0	576	147	3	505	1425	3,79
	Pendiente del terreno derivada del MDE	Incrementa 10%	710	0	348	561	3	358	1980	5,27
	Zonas según susceptibilidad a inundación	Disminuye 10%	2300	0	126	1838	1	238	4503	11,98
Exposición	Usos del suelo y coberturas vegetales expuestas	Incrementa 10%	579	0	188	437	2	295	1501	3,99
	Distribución espacial de la población total expuesta	Disminuye 10%	681	0	199	396	2	354	1632	4,34
	Infraestructura crítica expuesta	Incrementa 10%	17	0	1002	30	2	781	1832	4,88
	Red de transporte terrestre y aéreo expuesta	Disminuye 10%	846	0	152	631	1	282	1912	5,09
Vulnerabilidad	Vulnerabilidad asociada a los usos del suelo y coberturas vegetales	Incrementa 10%	144	0	241	266	2	318	971	2,58
	Vulnerabilidad demográfica de la población	Disminuye 10%	49	0	2381	39	2	1253	3724	9,91
	Vulnerabilidad de la infraestructura crítica	Incrementa 10%	24	0	1002	19	2	889	1936	5,15
	Vulnerabilidad de la red vial y de transporte	Disminuye 10%	325	0	199	348	2	296	1170	3,11

Fuente: elaboración propia

Nota: B = riesgo bajo; M = riesgo medio; A = riesgo alto. El cambio total (%) se calcula respecto al total de 37572 píxeles del escenario 1.

Las columnas B $\rightarrow$ M, B $\rightarrow$ A, M $\rightarrow$ B, M $\rightarrow$ A, A $\rightarrow$ B y A $\rightarrow$ M representan las transiciones entre categorías de riesgo.

Declaración de uso de herramientas de inteligencia artificial generativa

En la elaboración del presente Trabajo de Fin de Máster se utilizó la herramienta de inteligencia artificial generativa ChatGPT como apoyo en tareas de revisión y mejora de la redacción. Su uso se centró en la generación de contenidos de nivel 1, orientados a la corrección gramatical, mejora del estilo de escritura, reformulación de textos y adaptación de ideas de autoría propia, con el fin de lograr una mayor claridad, coherencia y calidad expositiva.

Asimismo, se emplearon contenidos de nivel 2 para la elaboración de la Figura 1, generada a partir de información previamente definida y específica, con el propósito de facilitar la visualización y comprensión de los conceptos presentados. De igual manera, la herramienta fue utilizada para la elaboración de resúmenes basados exclusivamente en ideas originales de mi autoría, contribuyendo a mejorar la fluidez y legibilidad del documento.

En todos los casos, la revisión crítica, validación y responsabilidad final sobre el contenido, los resultados y las conclusiones presentadas en este trabajo corresponden exclusivamente a la autora.