



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

POSGRADO

MAESTRÍA EN HIDRAÚLICA

Tema: Análisis hidrológico e hidráulico para la identificación de zonas de inundaciones en el área urbana del cantón Ambato e integrar estrategias de mitigación.

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Magister en
Hidráulica con Mención en Obras Hidráulicas

PORTADA

Modalidad del Trabajo de Titulación: Artículos Profesionales de Alto Nivel

Autor: Ing. Jessica Beatriz Mestanza Orellana.

Director: Ing. Fidel Alberto Castro Solorzano.Mg.

Ambato – Ecuador

2025

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, presidido por Ing. Santiago Paul Cabrera Anda, e integrado por los señores: Ing. PhD. Milton Rodrigo Aldas Sánchez, Mg e Ing. Byron Genaro Cañizares Proaño, Mg., designados por la Unidad Académica de Titulación del Centro de Posgrados de la Universidad Técnica de Ambato, para receptar el Trabajo de Titulación con el tema: “Análisis hidrológico e hidráulico para la identificación de zonas de inundaciones en el área urbana del cantón Ambato e integrar estrategias de mitigación.” elaborado y presentado por la señora Ing. Jessica Beatriz Mestanza Orellana, para optar por el Título de cuarto nivel de Magíster en Hidráulica con Mención en Obras Hidráulicas; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación, el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.

Ing. Santiago Paul Cabrera Anda Mg.

Presidente y Miembro del Tribunal

Ing. PhD. Milton Rodrigo Aldas Sánchez, Mg

Miembro del Tribunal

Ing. Byron Genaro Cañizares Proaño, Mg.

Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

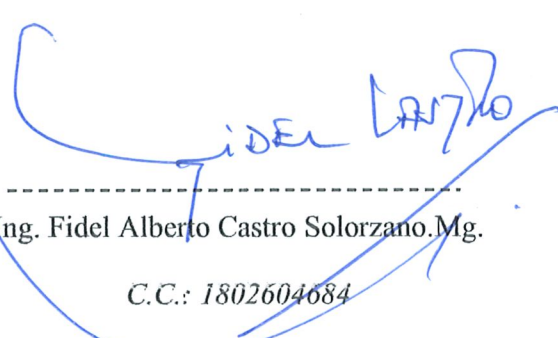
La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “Análisis hidrológico e hidráulico para la identificación de zonas de inundaciones en el área urbana del cantón Ambato e integrar estrategias de mitigación”, le corresponde exclusivamente a: Ing. Jessica Beatriz Mestanza Orellana, autora bajo la Dirección del Ing. Fidel Alberto Castro Solorzano.Mg. Director del Trabajo de Titulación, y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ing. Jessica Beatriz Mestanza Orellana.

C.C.: 0605773506

AUTORA



Ing. Fidel Alberto Castro Solorzano.Mg.

C.C.: 1802604684

DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.



Ing. Jessica Beatriz Mestanza Orellana.
C.C.: 0605773506

AGRADECIMIENTO

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad Técnica de Ambato, por brindar el entorno académico, los recursos y el respaldo institucional necesarios para el desarrollo de este trabajo.

Extiendo un especial agradecimiento a mi amada Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, por ser el espacio donde se forjó mi formación profesional, por su excelencia académica y por sembrar en mí los principios y el rigor que hoy sustentan este trabajo.

Mi sincero reconocimiento al Ing. Fidel Castro, director de este artículo, por su guía dedicada, sus orientaciones precisas y su compromiso permanente con la calidad académica. Su acompañamiento ha sido fundamental durante todo el proceso.

Agradezco también al Ing. Jimmy Reyes por sus aportes técnicos, su disponibilidad y su apoyo constante, que contribuyeron significativamente al fortalecimiento de esta investigación.

Asimismo, reconozco con gratitud a los docentes de la maestría, quienes, con su experiencia, pasión por la enseñanza y generosidad al compartir conocimientos impulsaron el desarrollo de mis capacidades y enriquecieron profundamente mi proceso formativo.

A todos, mi más sincera gratitud por ser parte esencial de este logro.

DEDICATORIA

A Dios, por caminar conmigo en silencio y en luz, por darme la fortaleza para avanzar aun cuando el camino parecía incierto, y por recordarme cada día que todo propósito tiene sentido bajo Su guía.

A mi hija, cuyo amor puro transforma mis días y me inspira a ser mejor. Ella es la razón que impulsa mis pasos y la esperanza que sostiene mis sueños.

A mi mamá, por su entrega incansable, sus oraciones, su fe en mí incluso en los momentos en que yo misma dudé. Su ejemplo es un faro que ilumina mi vida.

Y a toda mi familia, por ser el pilar que me sostuvo, por cada palabra de ánimo, por cada gesto de cariño, y por mostrarme que los logros se construyen también con el amor de quienes nos rodean.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
INDICE GENERAL DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
INDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN EJECUTIVO	xi
Introducción	1
Método	7
2.1 Diseño	7
2.2 Área de estudio	7
2.3 Instrumentos y procedimiento.....	8
Análisis de datos	10
3.1 Validación de modelos hidrológicos (HEC-HMS).....	10
3.2 Simulaciones hidráulicas (HEC-RAS 2D).....	11
3.3 Clasificación de peligrosidad.....	13
3.4 Exposición y vulnerabilidad urbana.....	14

3.5 Escenarios de mitigación	19
Discusión.....	21
Conclusiones	22
Referencias.....	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Categorías de desempeño en modelos hídricos (NSE y KGE).....	3
Tabla 2. Niveles de peligrosidad.....	4
Tabla 3. Estrategias de mitigación de inundaciones en zonas urbanas.....	5
Figura 1 Área de estudio	8
Figura 2. Hidrograma río Ambato Caudal observado vs simulación.....	10
Figura 3. Profundidad (h).....	11
Figura 4. Velocidad (v).....	12
Figura 5. Nivel de peligrosidad.....	13
Figura 6. Mapa de integración poblaciones e infraestructura.	14
Figura 7. Nivel de riesgos por tipo de estructura	15
Figura 8. Nivel de riesgo en infraestructura vial.....	17
Tabla 4. Medidas de mitigación para Ambato	19

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Área de estudio	8
Figura 2.	Hidrograma río Ambato Caudal observado vs simulación	10
Figura 3.	Profundidad (h)	11
Figura 4.	Velocidad (v)	12
Figura 5.	Nivel de peligrosidad	13
Figura 6.	Mapa de integración poblaciones e infraestructura.	14
Figura 7.	Nivel de riesgos por tipo de estructura	15
Figura 8.	Nivel de riesgo en infraestructura vial.	17

RESUMEN EJECUTIVO

El propósito de este estudio fue determinar las áreas inundables en la zona urbana de Ambato, Ecuador, y sugerir métodos de mitigación que se puedan implementar para disminuir el peligro. Se utilizó una metodología cuantitativa que combinó el modelo hidrológico HEC-HMS, ajustado con datos del Gobierno Provincial de Tungurahua (2013-2024), y el modelo hidráulico HEC-RAS 2D para replicar un suceso extremo con un periodo de retorno de 50 años, empleando la ponderación de 11 años de datos hidrometeorológicos. La investigación se fundamentó únicamente en el estudio de datos secundarios, sin incluir a personas como participantes. Con los resultados se pudo establecer una zona inundable de 72.77 hectáreas, y el 55.6% de esta área fue clasificada con niveles de peligro "Muy alto" o "Alto". Además, se evidenció una población expuesta de 13,098 ciudadanos y un caudal pico de 33.00 m³/s; por su parte, el análisis espacial detectó tramos viales e infraestructura crítica en riesgo elevado. Se determina que la combinación de modelos hidráulicos e hidrológicos correctamente calibrados es eficaz para identificar con exactitud áreas propensas a inundaciones, y que las estrategias híbridas, que integran infraestructura gris y verde, son la opción más factible y sólida para disminuir el riesgo total en el entorno urbano de Ambato.

Palabras clave: INUNDACIONES URBANAS, MODELACIÓN HEC-RAS, ZONAS DE RIESGO, MITIGACIÓN DE RIESGOS.

ABSTRACT

The purpose of this study was to identify flood-prone areas in the urban zone of Ambato, Ecuador, and to propose mitigation methods that could be implemented to reduce associated hazards. A quantitative methodology was employed, combining the HEC-HMS hydrological model, calibrated with Provincial Government of Tungurahua data (2013–2024), and the HEC-RAS 2D hydraulic model to simulate an extreme event with a 50-year return period, using an 11-year weighted series of hydrometeorological data. The research relied exclusively on secondary data and did not involve human participants. The results identified a flood-prone area of 72.77 hectares, 55.6% of which was classified with “Very High” or “High” hazard levels. Additionally, an exposed population of 13,098 inhabitants and a peak flow of 33.00 m³/s were observed; spatial analysis further revealed critical road segments and infrastructure at elevated risk. The study demonstrates that the combined use of properly calibrated hydraulic and hydrological models is effective for accurately identifying flood-prone areas, and that hybrid strategies integrating gray and green infrastructure represent the most feasible and robust approach to reducing overall risk in Ambato’s urban environment.

Keywords: URBAN FLOODING, HEC-RAS MODELING, RISK ZONES, RISK MITIGATION.

Introducción

El aumento de la urbanización y las repercusiones del cambio climático han elevado los eventos de precipitación, lo que ha agravado las inundaciones en áreas urbanas vulnerables. Las pérdidas económicas y sociales causadas por este tipo de eventos han crecido de forma exponencial en años recientes. En este contexto, resulta indispensable disponer de instrumentos que faciliten entender y anticipar la reacción de las cuencas a las lluvias intensas.

Los modelos hidrológicos son representaciones matemáticas que explican cómo la lluvia se convierte en escorrentía en una cuenca. Su objetivo principal es calcular los caudales de crecida a partir de lluvias extremas, tomando en cuenta elementos como el coeficiente de escorrentía, el tiempo de concentración, las pérdidas iniciales y el retardo. En zonas urbanas, es común el uso de herramientas como HEC-HMS y SWMM para simular la pronta reacción de cuencas impermeabilizadas y elaborar hidrogramas de salida que se emplean en la modelación hidráulica (Snikitha et al., 2025).

Los modelos hidráulicos, por su parte, muestran el desplazamiento del agua a través de la superficie o en estructuras artificiales al resolver ecuaciones de flujo unidimensional (1D) o bidimensional (2D). Con programas como HEC-RAS 2D, InfoWorks ICM o Iber es posible simular avenidas y estimar variables como la profundidad, la velocidad y el alcance de las inundaciones. Los modelos 2D, que incorporan la interacción entre el uso del suelo, la topografía y el drenaje, son útiles en ambientes urbanos. Esto mejora la exactitud de los mapas de riesgo y permite evaluar las medidas de mitigación estructurales o naturales (Madhuri et al., 2021). Según Plata et al. (2025), la interacción entre procesos hidrológicos e hidráulicos es lo que hace que las inundaciones urbanas sean vulnerables, y esta interacción es la que determina qué tan grande es el peligro. En términos hidrológicos, modelos como SCS-CN y Snyder posibilitan que se calculen los hidrogramas de caudal que nutren a los ríos principales. Además, el método Rain-on-Grid en HEC-RAS 2D describe cómo estas contribuciones interactúan con la topografía, las calles urbanas y los cauces intermitentes.

En este contexto, las zonas urbanas propensas a inundaciones son aquellas partes del territorio que se inundan a causa de desbordes, un drenaje deficiente o lluvias intensas. Para describirlas,

es fundamental la profundidad, la velocidad y el alcance espacial del flujo, pues estos elementos posibilitan determinar los grados de peligro (alto, medio y bajo). La creación de mapas de riesgo urbano se fundamenta en estos niveles, junto con datos de exposición (como la población, las viviendas y la infraestructura crítica). La incorporación de simulaciones hidráulicas en 2D en Sistemas de Información Geográfica (SIG) favorece la representación cartográfica de estas amenazas, lo que simplifica el análisis y visualización a nivel espacial. La identificación apropiada de zonas vulnerables en ciudades de América Latina, según casos observados, no solamente disminuye la exposición de los habitantes, sino que además guía el desarrollo urbano hacia contextos más resilientes y contribuye a dar prioridad a las inversiones en infraestructura (Khatooni et al., 2025)

Por lo tanto, es esencial incluir métricas de rendimiento y criterios de comparación que garanticen la fiabilidad de las simulaciones, sobre todo en áreas urbanas con datos escasos o series hidrometeorológicas incompletas. Snikitha et al. (2025), han destacado en años recientes el requerimiento de adecuar los modelos a través de métricas sólidas, tales como la eficiencia Kling-Gupta (KGE) y el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), que son fundamentales en situaciones con información limitada o no estacionaria. Estos indicadores posibilitan categorizar la actuación del modelo en grados que oscilan entre deficiente y excelente, como se resume en la Tabla 1, cuyos límites de referencia se utilizan extensamente en la hidrología de lluvias y escorrentías.

A escala mundial, los modelos hidrológicos son evaluados usando NSE y KGE. Knoben et al. (2019), afirman que valores de $NSE \geq 0.5$ y $KGE > -0.41$ sobrepasan la capacidad predictiva del caudal medio; no obstante, estudios posteriores sugieren umbrales más rigurosos ($NSE \geq 0.65$, $KGE \geq 0.5$) para calificar un modelo como aceptable. En cuanto a Pinos & Quesada (2021), estos indican que en las dos últimas décadas ha aumentado considerablemente la cantidad de investigaciones acerca de inundaciones, observándose un predominio de aplicaciones hidráulicas 2D en zonas costeras y urbanas. La determinación de áreas de riesgo crítico se ha visto favorecida gracias a estos trabajos, que a menudo están respaldados en HEC-RAS, Iber e InfoWorks ICM incorporados a SIG. Sin embargo, la falta de series

hidrometeorológicas largas y de buena calidad sigue limitando la validación.

Del mismo modo, la modelación hidráulica se clasifica en función del grado de complejidad: modelos unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y enfoques Rain-on-Grid (RoG). Estos últimos son más apropiados para las zonas urbanas, ya que pueden simular la interacción entre el uso del suelo, la topografía y el drenaje (Madhuri et al., 2021). En el ámbito regional, varios estudios muestran un aumento en la utilización de modelos 2D en ciudades vulnerables; no obstante, todavía existen obstáculos para incluir en los análisis de riesgo variables socioeconómicas y escenarios climáticos de alta resolución (Khodadat et al., 2023).

Para asegurar la fiabilidad de las simulaciones en entornos con datos limitados, se presentan indicadores robustos (Tabla 1). Estos indicadores facilitan la creación de categorías de desempeño que orientan la elección y el uso de los modelos, sobre todo en investigaciones urbanas donde no hay muchas series hidrometeorológicas disponibles (Knoben et al., 2019; Snikitha et al., 2025).

Tabla 1. Categorías de desempeño en modelos hídricos (NSE y KGE)

Categoría	NSE	KGE	Interpretación
Excelente	≥ 0.75	≥ 0.65	Alta confiabilidad para eventos extremos
Bueno	0.65–0.74	0.50–0.64	Resultados consistentes y útiles
Aceptable	0.50–0.64	0.40–0.49	Puede aplicarse con precaución
Deficiente	< 0.50	< 0.40	Baja confiabilidad del modelo

Nota. Adaptado de Knoben et al. (2019). Se consideran umbrales de desempeño comúnmente aplicados en hidrología para la evaluación de modelos de lluvia–escorrentía.

La peligrosidad de inundación se determina a partir de parámetros hidráulicos como la velocidad del flujo (v), la profundidad del agua (h) y el producto de los dos, conocido como Damage Value o $h \cdot v$. Estos criterios se clasifican en niveles de peligrosidad (bajo, medio, alto y muy alto) que se combinan con índices de riesgo (Tabla 2) al incluir la exposición poblacional y la de infraestructuras cruciales (Serrano et al., 2016). De acuerdo con Arrighi et al. (2019),

estos límites han sido adoptados globalmente, con ajustes locales en función de la capacidad de drenaje y la topografía. En América Latina, por lo general se utilizan junto con métodos multicriterio (AHP/MCDA), lo cual posibilita incorporar factores relacionados a la vulnerabilidad y a la sociedad en el análisis (Khatooni et al., 2025).

Tabla 2. Niveles de peligrosidad

Categoría	Profundidad (h)	Velocidad (v)	DV = $h \cdot v$ (m ² /s)	Riesgo asociado
Baja	< 0.30 m	< 0.50 m/s	< 0.2	Tránsito peatonal seguro
Media	0.30–0.59 m	0.50–0.99 m/s	0.2–0.59	Riesgo a vehículos ligeros
Alta	≥ 0.60 m	≥ 1.00 m/s	0.6–3.9	Peligro a personas y viviendas
Muy alta	≥ 1.00 m	≥ 2.00 m/s	≥ 4.0	Riesgo extremo, colapso estructural

Nota. Adaptado de Arrighi et al. (2019) & Jonkman et al. (2008). Los umbrales de peligrosidad se utilizan de manera internacional en estudios de riesgo urbano.

Así, se pone de manifiesto que, aunque las referencias internacionales son aplicables, su implementación en Ecuador tiene que adaptarse a la disponibilidad de datos y a las circunstancias locales de vulnerabilidad. Desde este punto de vista, el caso de Ambato no solamente ilustra un esfuerzo por adaptar la metodología, sino que además aporta al diálogo acerca de cómo llevar marcos conceptuales globales a situaciones urbanas específicas.

Por último, para la gestión del riesgo de inundaciones urbanas es necesario un enfoque híbrido que mezcle soluciones basadas en la naturaleza (SUDS) con infraestructura gris (tanques de retención, alcantarillado y bombeos). A pesar de que la infraestructura gris no es suficiente para aliviar problemas como los desbordamientos de sistemas combinados (CSO) y su impacto en el medio ambiente, los SUDS, ayudan a disminuir tanto la escorrentía como los picos de caudal, lo cual mejora la capacidad urbana para adaptarse (Riechel et al., 2020).

Estas tácticas se pueden ser entendidas en tres ejes primordiales considerando los criterios de varios autores: soluciones fundadas en la naturaleza (SUDS) (como techos verdes, pavimentos

permeables o zanjas de infiltración), infraestructura gris (embalses, canales, tanques de retención) y estrategias híbridas que fusionan los dos anteriores como se puede apreciar en la Tabla 3.

Tabla 3. Estrategias de mitigación de inundaciones en zonas urbanas

Estrategia / enfoque	Medidas específicas	Efectos documentados
Estrategia híbrida (gris + verde)	Combinación de infraestructura gris (canales subterráneos, tanques de retención) con técnicas de infraestructura verde (GI: pavimentos permeables, zanjas de retención, reducción de áreas impermeables)	Reducción de caudal pico, volumen y área inundada (hasta reducción del 37.3 % pico, 93.6 % área inundada en combinación)
Sistemas de drenaje sostenible / Green Infrastructure (GI / SUDS)	Techos verdes, pavimentos permeables, zanjas de infiltración, bioretenciones, recolección de agua de lluvia	Ayuda a reducir volúmenes de escorrentía, atenuar picos de caudal y aumentar resiliencia urbana
Implementación combinada de infraestructura tradicional + Drenaje convencional + zonas permeables + SUDS en ciudades (“build flood-resilient cities”)	absorción local	Mejora la resiliencia urbana; integra soluciones prácticas y robustas
Evaluación integrada / atribución del efecto de mitigación	Modelación combinada para evaluar la capacidad de mitigación urbana, cuantificando aportes de diferentes medidas	Identificación de medidas con mayor rendimiento marginal en contexto urbano
Revisión comparativa de técnicas de mitigación urbana	Comparativa sistemática de técnicas (retenedores, GI, LID etc.) para su efectividad	Clarifica ventajas / desventajas relativas y contextos de aplicación

Fuente. Adaptado de (Dai et al., 2023; Khodadat et al., 2023; Moon et al., 2024; Ortega et al., 2023; Qin, 2020)

Por otro lado, la estimación del riesgo de inundaciones en las ciudades se realiza mediante el uso de métodos hidráulicos e hidrológicos, los cuales posibilitan calcular los caudales de crecida y simular cómo estos se difunden por el territorio urbano. HEC-HMS y HEC-RAS son ejemplos de modelos que se consideran internacionales en este ámbito, pues permiten que las

lluvias extremas se conviertan en escenarios de riesgo, los cuales están representados en mapas temáticos. Dado que la disponibilidad de series hidrometeorológicas es escasa en Ecuador, su implementación requiere procesos estrictos de validación y calibración, pues esto afecta tanto la efectividad de las acciones de mitigación en ciudades como Ambato como la precisión de los resultados.

En síntesis, la integración de los enfoques hidrológico e hidráulico al presente estudio permite estimar la magnitud de las avenidas, el segundo traduce estos caudales en indicadores espaciales de peligrosidad, lo que asegura una valoración coherente del riesgo. Esta complementariedad, sustentada en procesos de calibración y validación, garantiza que los resultados obtenidos sean técnicamente sólidos y útiles para orientar decisiones de gestión y mitigación de inundaciones urbanas.

Un modelo que no se calibra ni valida puede producir errores sistemáticos, como estimaciones por encima o por debajo de la realidad, que lleven a medidas de mitigación ineficaces o incluso contraproducentes. En el campo hidráulico, se llevaron a cabo investigaciones en Ecuador que compararon varios modelos bidimensionales (como Flood Modeller, HEC-RAS 2D e Iber) con el fin de calcular la altura de la superficie y el alcance de las inundaciones en ríos andinos. Las discrepancias fueron notables con respecto a las referencias hidrodinámicas: por ejemplo, Iber 2D tuvo los errores más bajos en ciertas situaciones de área inundada y elevaciones de superficie. Esto confirma que escoger el modelo correcto y calibrarlo/validarlo apropiadamente son factores clave para conseguir resultados precisos (Pinos & Timbe, 2019). De igual manera, la escasa disponibilidad de series hidrometeorológicas de calidad en Ecuador vuelve este periodo aún más crucial. En la cuenca del río Cañar, un modelo HEC-HMS calibrado con acontecimientos históricos solamente fue capaz de reproducir dos de cuatro sucesos posteriores de manera satisfactoria, lo que demuestra la debilidad de los resultados cuando la validación no es robusta (Arteaga, 2017; Moon et al., 2024).

En este escenario de vulnerabilidad urbana en aumento y restricciones en la disponibilidad de información hidrometeorológica, el presente estudio se propone como una colaboración científica y práctica para el manejo del riesgo en Ecuador. Para analizar las inundaciones en

Ambato, es preciso no solamente describir la conducta hidrológica de la cuenca, sino también entender cómo se expanden los caudales en el espacio urbano y cuáles son las zonas que sufren más daños. Por lo tanto, el propósito principal de este estudio es determinar y acotar las áreas con mayor peligro de inundación en la ciudad de Ambato utilizando modelos hidráulicos (HEC-RAS 2D) e hidrológicos (HEC-HMS). Esta integración tiene como objetivo asegurar resultados más sólidos, utilizando las capacidades de cada modelo: el primero para convertir la precipitación en caudales de crecida y el segundo para ilustrar la dinámica espacial del flujo dentro del entramado urbano.

Además, el análisis sostiene la hipótesis de que, al combinar ambos métodos, siempre y cuando estén calibrados y validados correctamente, se logra detectar con más exactitud las zonas vulnerables y se pueden sugerir medidas de mitigación más eficaces. Conforme a esta premisa, se anticipa que los hallazgos proporcionen pruebas científicas que puedan ser utilizadas para la planificación urbana y para el diseño de estrategias de adaptación que integren soluciones basadas en la naturaleza e infraestructura gris.

Método

2.1 Diseño

La investigación se desarrolla dentro de un diseño cuantitativo, descriptivo y aplicado, con el objetivo de incorporar modelos hidráulicos e hidrológicos para localizar áreas urbanas en Ambato que sean propensas a inundaciones. La perspectiva es analítico-correlacional, ya que se analiza la conexión entre las precipitaciones extremas, los caudales producidos y la difusión del flujo en el área urbana. Además, es un estudio con fines de predicción, ya que los modelos calibrados posibilitan la simulación de situaciones de riesgo y, en función de eso, se sugiere tomar medidas estructurales y naturales para mitigar.

2.2 Área de estudio

El estudio tiene lugar en Ambato, una ciudad situada en la provincia de Tungurahua, Ecuador, que se encuentra en la zona interandina. Es una zona urbana con un crecimiento demográfico acelerado, que está cruzada por cauces de respuesta torrencial, los cuales aumentan la

vulnerabilidad a inundaciones durante las lluvias extremas. La media de la altitud en el área es de 2.577 m s. n. m., con una topografía irregular que afecta la concentración de escorrentía y la propagación de avenidas fluviales. La zona escogida parte desde la cabecera cantonal (Vía a Aguaján) hasta la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), todo el tramo incluye sectores urbanos con mayor concentración de infraestructura crítica y densidad poblacional. Esto asegura que se pueda calibrar y validar los modelos utilizados.

Figura 1 Área de estudio



Fuente: Elaboración propia en QGIS.

2.3 Instrumentos y procedimiento

Los instrumentos utilizados en el desarrollo metodológico del presente estudio son los siguientes:

- **Modelación hidrológica:** se empleó el software HEC-HMS, que posibilita la conversión de precipitaciones de diseño en hidrogramas de caudal. A través de las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia), coeficientes de escorrentía y tiempos de concentración, los parámetros se calcularon utilizando datos topográficos y pluviométricos provistos por el Gobierno Provincial de Tungurahua.

- **Modelación hidráulica:** Para simular la propagación de caudales en el área urbana, se utilizó el programa HEC-RAS 2D. Este instrumento resolvió las ecuaciones del flujo poco profundo, lo que posibilitó la obtención de mapas de profundidad (h), velocidad (v) y el producto $h \cdot v$; indicadores que se usan para categorizar los grados de peligrosidad.
- **Sistemas de Información Geográfica (SIG):** Se emplearon instrumentos SIG para crear modelos digitales de elevación (MDE), fusionar información hidráulica e hidrológica, y elaborar mapas que muestren la amenaza y la vulnerabilidad.

El procedimiento metodológico comenzó con el preprocesamiento de datos, que incluyó la recopilación de series hidrometeorológicas del período 2013-2024, la eliminación de registros incompletos y el cálculo de lluvias de diseño a través la modelación hidrológica en HEC-HMS, calibrando y parametrizando el modelo con datos observados. La eficacia de este proceso se validó utilizando indicadores de ajuste, tales como el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) y la eficiencia Kling-Gupta (KGE). Se utilizó HEC-RAS 2D para realizar la modelación hidráulica con los valores ponderados de los 11 años de datos, en los cuales estos caudales fueron incluidos como condición de frontera para simular un periodo de retorno de 50 años. Los resultados posibilitaron una categorización de peligrosidad, fundamentada en los parámetros de profundidad, velocidad y el producto $h \cdot v$, adecuando los límites internacionales a las condiciones urbanas de Ambato. Después, se realizó un estudio espacial a través de la creación de mapas que determinaron las zonas propensas a inundaciones y su coincidencia con variables de exposición, como viviendas, avenidas y la infraestructura crítica. Estos datos fueron obtenidos de los recursos geospaciales del Marco Geoestadístico Nacional (INEC, 2020). Por último, con base en estos resultados se elaboró una propuesta de mitigación que contiene tanto soluciones estructurales para la infraestructura gris como medidas basadas en la naturaleza (SUDS), cuyo objetivo es disminuir la vulnerabilidad urbana ante posibles inundaciones en el futuro.

La investigación cumple con las normas éticas de la producción científica, asegurando que los datos se manejen con transparencia, empleando fuentes oficiales (GAD Ambato, Gobierno Provincial de Tungurahua e IGM) y citando de manera rigurosa la literatura científica. No se llevaron a cabo manipulaciones de datos para propósitos no académicos ni se realizaron

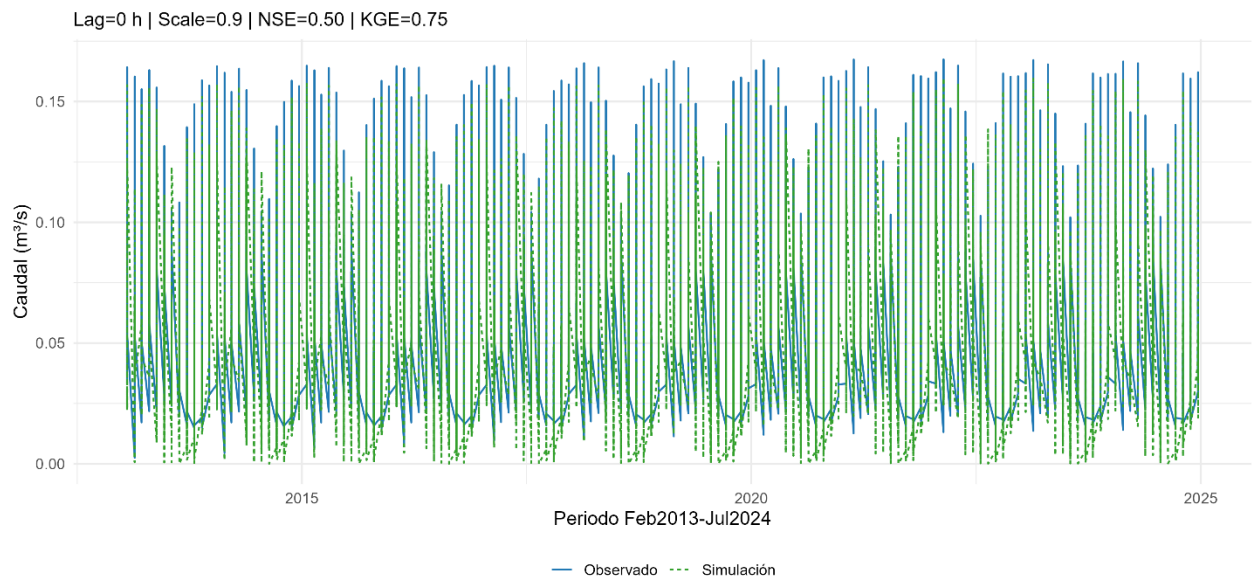
intervenciones sobre los habitantes. Además, los resultados se exponen de una manera que las autoridades locales puedan utilizarlos en la planificación urbana y en la toma de decisiones para disminuir riesgos, lo cual favorece al bienestar común y a un desarrollo sostenible.

Análisis de datos

3.1 Validación de modelos hidrológicos (HEC-HMS)

La confiabilidad de las simulaciones de escorrentía es un prerequisite fundamental para una evaluación precisa del riesgo de inundación. Para garantizar esto, el modelo hidrológico HEC-HMS fue calibrado y validado utilizando datos hidrométricos observados en el sector urbano del río Ambato para el período 2013-2024, como se puede observar en la figura 2.

Figura 2. Hidrograma río Ambato Caudal observado vs *simulación*



Nota. Comparativa entre el caudal simulado y el observado (2013-2024) en la sección urbana del río Ambato. Con un NSE de 0.50 y un KGE de 0.75, el modelo muestra un sólido ajuste, lo que demuestra un rendimiento hidrológico satisfactorio.

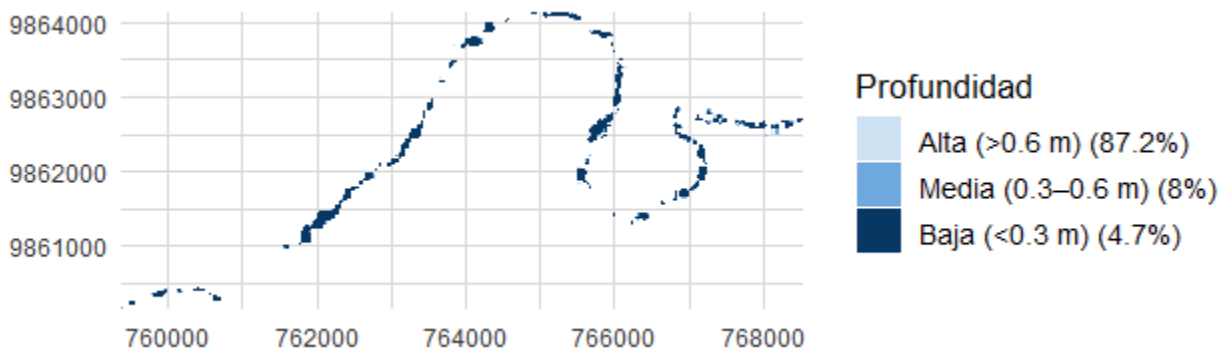
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados depurados de HEC-HMS y Rstudio

Se demuestra un rendimiento sólido del modelo calibrado HEC-HMS a través de la validación hidrológica del sector urbano del río Ambato, ejecutada para el intervalo de 11 años. Los hidrogramas simulados reflejan con exactitud la dinámica observada, consiguiendo un ajuste satisfactorio no solo en cuanto a la magnitud de los caudales, sino también en términos de la sincronización temporal de los eventos. La calidad de la simulación es corroborada por las métricas estadísticas: se logró un Kling–Gupta Efficiency (KGE) de 0.75 y un Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE) de 0.50, los cuales son considerados valores aceptable y excelente, respectivamente, según los estándares para validar procesos hidrológicos. Como se aprecia, el modelo es capaz de replicar apropiadamente tanto la forma como la escala de los hidrogramas durante todo el periodo analizado.

3.2 Simulaciones hidráulicas (HEC-RAS 2D)

Los resultados, expresados en mapas de profundidad máxima (h), revelan la intensidad y extensión del peligro hidráulico en el área urbana de estudio (Figura 3).

Figura 3. Profundidad (h)



Fuente: elaboración propia mediante el uso de Software HEC-RAS y Rstudio.

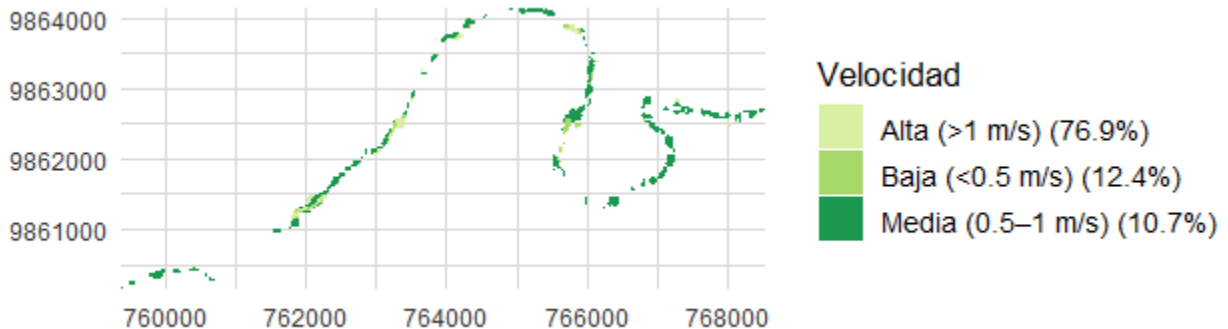
La condición hidrodinámica en la zona estudiada es crítica, como demuestra la distribución espacial de la profundidad máxima. El análisis cuantitativo muestra que los flujos profundos son predominantes, ya que el 87.2% del área inundable tiene valores superiores a 0.6 metros, lo cual la clasifica como de alta profundidad. Esta prevalencia señala que la mayor parte de la inundación no está compuesta por capas de agua poco profundas, sino por corrientes con una

capacidad de impacto significativa en infraestructuras viales, edificaciones y redes de servicios. Geomorfológicamente, los cauces principales y las áreas donde confluyen los tributarios son donde se encuentran las profundidades más grandes, funcionando como recolectores naturales de escorrentía superficial.

La geometría de los canales y la topografía de la hoya conducen y limitan el flujo, lo cual incrementa su energía potencial. En cambio, solamente un 4.7% de la superficie está en el nivel de baja profundidad (<0.3 m), lo que generalmente se relaciona con los bordes laterales más altos o con zonas donde el flujo se expande secundariamente. Desde el punto de vista de la gestión del riesgo, la gran área con profundidades elevadas destaca la urgente necesidad de poner en marcha una zonificación urbana que limite los usos del suelo delicados en estos lugares y de elaborar planes para evacuar y alertar anticipadamente que tengan en cuenta la imposibilidad del tránsito a pie y vehicular bajo circunstancias tan desfavorables.

Además de la profundidad, la velocidad del flujo es un indicador esencial de la energía cinética de la avenida. Esta determina su capacidad erosiva, su potencial para transportar vehículos y escombros, así como el peligro directo de arrastre para las personas. En la figura 4 se puede apreciar el mapa de velocidad máxima, que es fundamental para entender a fondo la peligrosidad hidrodinámica.

Figura 4. Velocidad (v)



Fuente: elaboración propia mediante el uso de Software HEC-RAS y Rstudio.

Los hallazgos esbozan un panorama de gran energía en el flujo de inundación. El 76.9% del

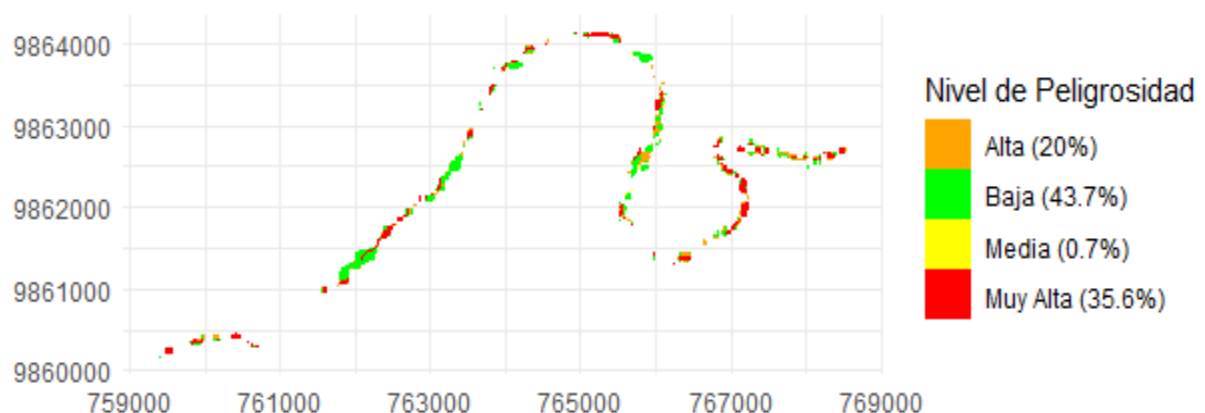
área inundable tiene velocidades de más de 1 m/s, lo que se clasifica como alta velocidad. Un riesgo hidrodinámico alto está asociado con este dominio de flujos veloces, pues velocidades que superan este límite ponen en peligro la estabilidad de un adulto y empiezan a suponer un peligro para la integridad de estructuras convencionales. La concentración de las velocidades más altas se corresponde con las áreas de mayor pendiente y los tramos angostos de la llanura de inundación, en los que el flujo se acelera debido al efecto de confinamiento.

Este patrón indica una alta capacidad erosiva en terraplenes y márgenes, lo que podría empeorar los daños al socavar las cimentaciones y obstruir los drenajes con sedimentos. Las velocidades bajas (<0.5 m/s) solo representan el 12.4% del área, ubicándose mayormente en las llanuras de inundación laterales y zonas periféricas donde el flujo se expande y pierde energía. Los núcleos de máximo riesgo, en los que el producto $h \cdot v$ obtiene valores críticos, se definen por la combinación espacial de profundidades elevadas con velocidades altas, lo cual se determina al superponer ambos mapas.

3.3 Clasificación de peligrosidad

Se determinó el índice de daño $DV = h \cdot v$, que unifica en un solo indicador las variables de velocidad y profundidad, los cuales se pueden observar en la figura 5, para llevar a cabo una valoración completa del peligro.

Figura 5. Nivel de peligrosidad



Fuente: elaboración propia mediante el uso de Software HEC-RAS y Rstudio

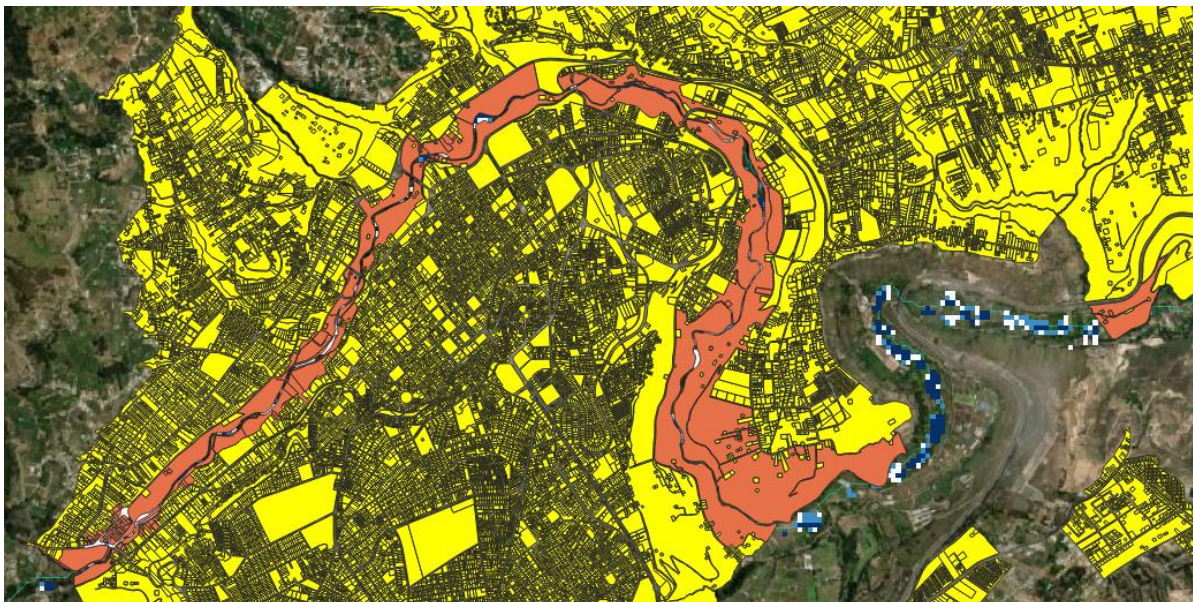
La distribución de las categorías de peligrosidad muestra un perfil de riesgo muy grave para la zona urbana de Ambato. De forma alarmante, los niveles de "Muy Alta" y "Alta" peligrosidad representan en conjunto el 55.6% del área inundable modelada. Esto señala que más de la mitad del área propensa a inundaciones tiene condiciones hidrodinámicas que pueden provocar el derrumbe de estructuras y representar un peligro extremo para la vida humana, según los estándares internacionales.

Por otro lado, a pesar de que la categoría "Baja" es la que tiene el porcentaje más alto en términos de área (43.7%), asociada a áreas con profundidades menores a 0.3 m y velocidades inferiores a 0.5 m/s que son seguras para el tránsito peatonal, su distribución periférica no reduce la seriedad del peligro concentrado en las zonas centrales. La categoría "Media" tiene un tamaño casi insignificante (0.7%), lo que refuerza la bimodalidad del riesgo en el campo de estudio: se pasa prácticamente de condiciones seguras a condiciones de peligro elevado o muy alto, con una transición mínima.

3.4 Exposición y vulnerabilidad urbana

Dentro del análisis de la exposición y vulnerabilidad urbana superponiendo espacialmente los mapas de riesgo de inundación con las capas que muestran la densidad poblacional, las viviendas y la infraestructura crítica en el área urbana de Ambato. Esta integración facilitó la identificación de las áreas en las que la combinación de alta peligrosidad y exposición representa un riesgo importante para los sistemas urbanos esenciales y para la población tal como se aprecia en la figura 6.

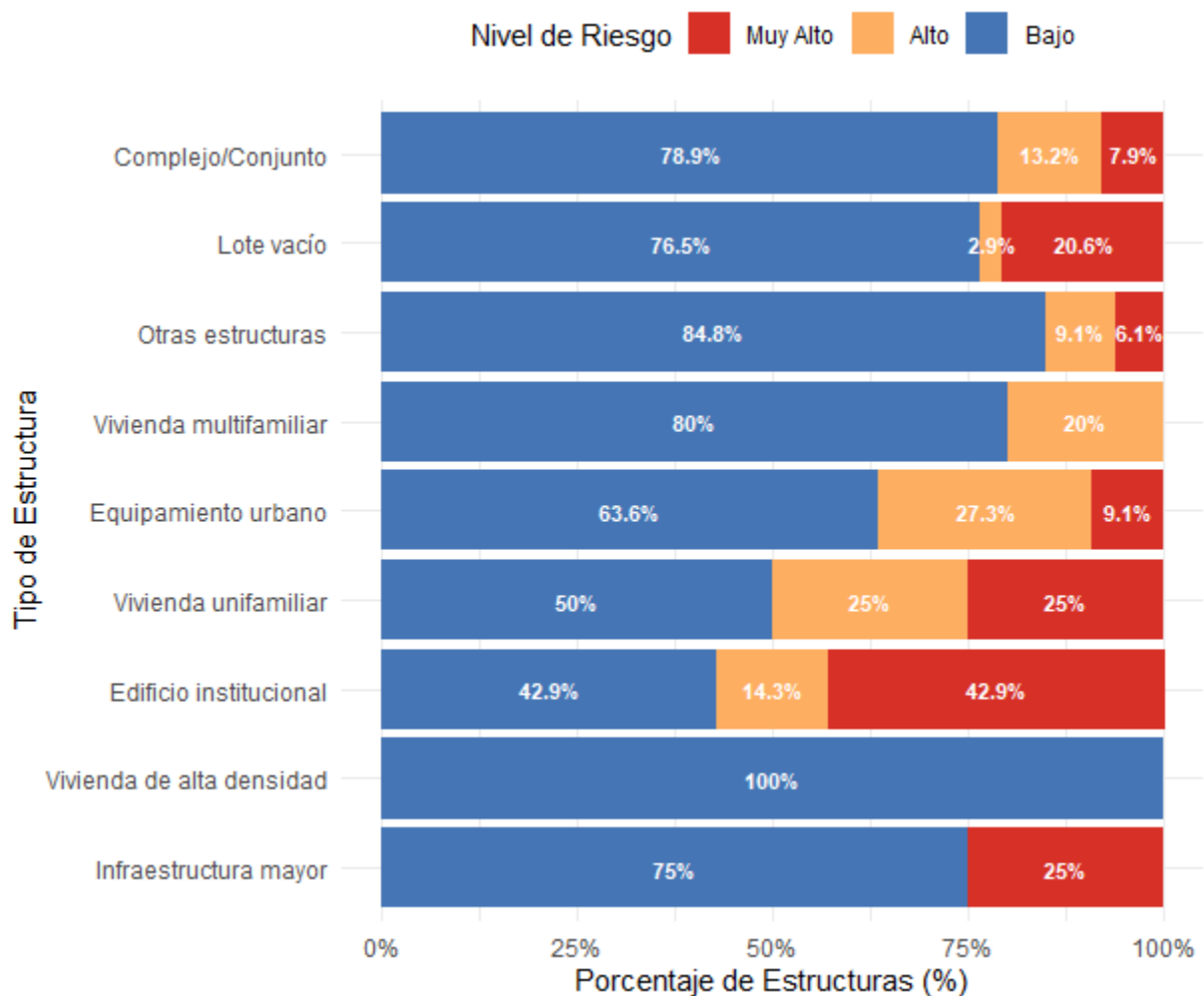
Figura 6. Mapa de integración poblaciones e infraestructura.



Fuente: elaboración propia mediante el uso de QGIS.

La evaluación del peligro de inundación va más allá de simplemente reconocer el riesgo físico. La identificación de los sectores y activos más vulnerables a impactos, a través de la caracterización de la vulnerabilidad en función del tipo de construcción y uso del suelo, posibilita que las estrategias de mitigación y respuesta sean eficientes y adecuadas al contexto. De tal manera en la figura 7 se presenta el nivel de riesgo por tipo de estructura dentro del área analizada.

Figura 7. Nivel de riesgos por tipo de estructura



Fuente: elaboración propia mediante el uso de QGIS y RStudio.

El análisis de la exposición por tipo de estructura evidencia que, aunque se registran porcentajes en los niveles de riesgo Alto y Muy Alto, el comportamiento dominante en la mayoría de las categorías corresponde al riesgo Bajo, lo cual sugiere que el tejido urbano, en términos generales, se encuentra asentado en zonas con menor susceptibilidad hidrodinámica. Esta tendencia global representa una condición favorable para la estabilidad territorial; sin embargo, no elimina la presencia de focos puntuales de alta vulnerabilidad.

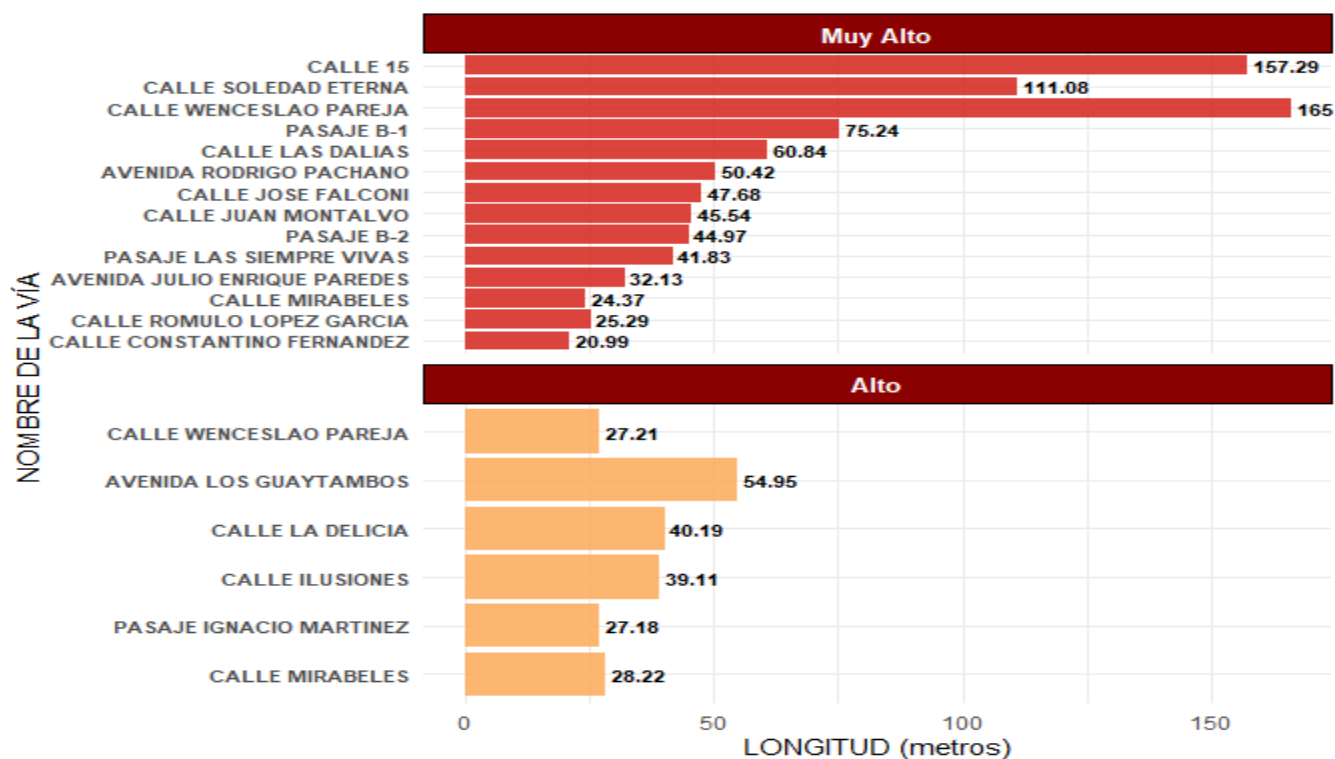
Al examinar las categorías con mayor exposición, se observa que “Edificio institucional”, “Vivienda unifamiliar” e “Infraestructura mayor” concentran proporciones relevantes en los

niveles superiores de riesgo, lo que evidencia áreas específicas donde los impactos potenciales por inundación podrían ser significativos tanto en términos sociales como funcionales. La “Vivienda de alta densidad” constituye un caso crítico, ya que se encuentra completamente asociada al nivel de riesgo más severo, reflejando una situación de vulnerabilidad extrema y una evidente necesidad de intervención prioritaria.

En contraste, categorías como “Complejo/Conjunto”, “Lote vacío”, “Otras estructuras” y “Equipamiento urbano” mantienen una distribución marcadamente dominada por el riesgo Bajo. Esta condición sugiere que dichos usos del suelo se desarrollan en áreas con mayor estabilidad topográfica e hidráulica, lo que representa un aporte positivo al equilibrio general del riesgo en el área de estudio. Los lotes vacíos, en particular, ofrecen un potencial estratégico para la aplicación de medidas preventivas, ya que su ubicación favorece la incorporación de infraestructura verde o sistemas de drenaje sostenible antes de futuros procesos de ocupación.

La identificación de segmentos viales y estructuras estratégicas en niveles altos de riesgo subraya la necesidad de integrar la infraestructura crítica dentro de los planes de gestión urbana y de adaptación. En conjunto, la gráfica permite concluir que, aunque la mayor parte del territorio presenta condiciones de riesgo moderadas o bajas, conviven con zonas específicas donde la exposición es considerable, lo que exige medidas diferenciadas y focalizadas de intervención.

Figura 8. Nivel de riesgo en infraestructura vial.



Fuente: elaboración propia mediante el uso de QGIS y RStudio.

El estudio de la exposición de la infraestructura vial muestra un patrón concentrado y crítico de vulnerabilidad. La categoría de riesgo "Muy Alto" incluye los segmentos más extensos y, por ende, aquellos que podrían causar una mayor disrupción al sistema de movilidad urbana. La Calle 15 (157.29 m) le sigue a la Calle Wenceslao Pareja, que tiene 165 metros afectados y es la más crítica.

La longitud de estas secciones comprometidas indica que una inundación podría causar interrupciones significativas y duraderas en la conectividad de estos corredores. Dado que su extensión se encuentra en áreas de peligro elevado, las condiciones serían intransitables debido a profundidades y velocidades de flujo que obstaculizarían el tránsito vehicular y peatonal, además de poner en riesgo la integridad estructural del pavimento y las obras de arte circundantes.

La existencia de vías principales, como la Av. Julio Enrique Paredes (32.13 m) y la Av. Rodrigo Pachano (50.42 m), en esta categoría de mayor riesgo aumenta el impacto posible,

puesto que su bloqueo perjudicaría no únicamente al tráfico local, sino también a flujos más extensos a nivel metropolitano, lo cual complicaría la logística para responder ante emergencias.

Por otra parte, aunque la categoría de riesgo "Alto" implica un leve descenso del peligro hidrodinámico, continúa siendo esencial para el funcionamiento urbano. La vía más importante es la Av. Los Guaytambos, con una longitud de 54.95 metros en esta categoría. El hecho de que algunas vías, como la Calle Mirabeles, estén presentes en las dos categorías de riesgo (24.37 m en "Muy Alto" y 28.22 m en "Alto") sugiere una variabilidad espacial en la peligrosidad a lo largo de su recorrido, lo cual requiere un análisis detallado para crear soluciones particulares por segmento.

3.5 Escenarios de mitigación

En esta investigación se propusieron tres situaciones de referencia: (i) la infraestructura gris, que incluye la ampliación de los alcantarillados y la construcción de tanques de retención; (ii) las soluciones naturales (SUDS), que consisten en techos verdes, pavimentos permeables y zanjas de infiltración; y (iii) un contexto mixto, en el cual ambas categorías se combinan para optimizar sostenibilidad y eficiencia.

La integración de los resultados de la modelación hidráulica con HEC-RAS 2D en la exposición socioespacial juntamente con la literatura posibilitan plantear posibles estrategias de mitigación de riesgos, en términos relativos, el caudal pico, la superficie inundada y la población expuesta en cada circunstancia (Tabla 4).

Tabla 4. Medidas de mitigación para Ambato

Estrategia	Medidas Específicas	Efectividad Esperada en Ambato	Aporte a la Resiliencia Urbana
Infraestructura Verde (SUDS)	Techos verdes, pavimentos permeables, zanjas de infiltración, bioretenciones, jardines de	Reducción del 25-35% en el área inundada. Reducción del 20-30% en el caudal pico.	Mejora de la infiltración, reducción de la escorrentía, mejora micro climática, beneficios socioambientales.

Estrategia	Medidas Específicas	Efectividad Esperada en Ambato	Aporte a la Resiliencia Urbana
	lluvia.		
Infraestructura Gris	Tanques de retención, ampliación de alcantarillado, canalizaciones, estaciones de bombeo.	Reducción del 15-25% en el área inundada. Reducción del 10-20% en el caudal pico.	Control directo de flujos, capacidad de almacenamiento, reducción puntual de inundaciones.
Estrategia Híbrida	Combinación de SUDS + infraestructura gris (ej.: tanques con pavimentos permeables).	Reducción del 35-45% en el área inundada. Reducción del 30-40% en el caudal pico.	Máxima eficiencia, sostenibilidad, adaptabilidad a condiciones topográficas y urbanas de Ambato.
Medidas No Estructurales	Sistemas de alerta temprana, zonificación de riesgo, planes de evacuación, educación comunitaria.	No reducen caudal, pero disminuyen población expuesta en hasta 30-40%.	Reducción de la vulnerabilidad social, fortalecimiento de la gobernanza local, bajo costo relativo.

Nota. Los resultados se pueden contextualizar gracias a los valores de referencia que ha proporcionado el modelo hidrodinámico HEC-RAS 2D: caudal pico modelado de 33.00 cfs, población expuesta estimada de 13,098 individuos y área inundada base de 72.77 hectáreas.

Fuente: elaboración propia mediante el análisis de la revisión bibliográfica y resultados obtenidos.

Proponer estrategias de mitigación fundamentadas científicamente es posible gracias a la identificación de áreas críticas de inundación en Ambato usando modelos hidráulicos e hidrológicos calibrados (HEC-RAS 2D y HEC-HMS). Las estrategias que se pueden aplicar están sintetizadas en la Tabla 4 y se agrupan en cuatro enfoques principales: infraestructura gris, infraestructura verde (SUDS), estrategias híbridas y medidas no estructurales. Se ha realizado una evaluación de cada una de estas estrategias, tomando como base la bibliografía internacional para ciudades con características parecidas a las de Ambato, en cuanto a su eficacia prevista para disminuir el área afectada por inundaciones, el caudal máximo y la población expuesta.

Es importante señalar que la estrategia híbrida, que combina infraestructura verde y gris, tiene el mayor potencial de mitigación, con reducciones anticipadas del 45% en la zona inundada y del 40% en el caudal pico. Esta perspectiva no solamente mejora la eficacia técnica, sino que además incluye pautas de sostenibilidad y adaptación al cambio climático, en concordancia con las directrices del Marco de Sendai y ONU-Hábitat. Además, aunque las medidas no estructurales (como la zonificación de riesgo y los sistemas de alerta temprana) no cambian los caudales, son fundamentales para disminuir la exposición de las personas y reforzar la habilidad de respuesta tanto comunitaria como institucional. Su implementación es indispensable y complementaria para administrar el riesgo de manera integral. Estas sugerencias son un plan de acción técnico para la planificación urbana resiliente en Ambato, que da prioridad a las inversiones en infraestructura y a las políticas públicas fundamentadas en evidencia científica.

Discusión

Los resultados que se han conseguido evidencian que, mediante la modelación hidráulica con HEC-RAS 2D, respaldada por series de caudales calibrados, fue posible detectar con exactitud las áreas de inundación crítica en Ambato. Este descubrimiento concuerda con lo que Arrighi et al. (2019), han informado, en el sentido de que los modelos bidimensionales son instrumentos fundamentales para representar dinámicas de flujo en zonas urbanas complejas. La confiabilidad del modelo se respalda, con actuaciones apropiadas en KGE y NSE, al colocarlo dentro de los límites que a nivel internacional son admitidos para las investigaciones hidrológicas aplicadas.

La valoración de los escenarios de mitigación confirma que las soluciones basadas en la naturaleza (SUDS) tienen un rendimiento más alto que la infraestructura gris, con disminuciones del 33.5 % en el área inundada y del 27.8 % en la población expuesta. Este resultado concuerda con lo que Khodadad et al. (2023), han indicado en investigaciones realizadas en áreas urbanas de alta densidad, donde los pavimentos permeables y techos verdes mostraron una notable capacidad para controlar la escorrentía. No obstante, se admite que la eficacia de estas acciones está sujeta a elementos propios de cada localidad, como la

permeabilidad del terreno y la aceptación social. Esto genera incertidumbres en los métodos empleados.

El escenario híbrido se establece como la opción más sólida, con disminuciones de más del 37 % en el caudal pico y de más del 41% en el área afectada por inundaciones. Estos hallazgos son consistentes con lo que Riechel et al. (2020), en Europa y Moon et al. (2024), en las ciudades de Asia afirmaron: la combinación de infraestructura verde y gris tuvo como resultado una mayor capacidad de recuperación ante sucesos extremos. Así, los resultados de Ambato brindan prueba nueva en el escenario de ciudades andinas, que históricamente han quedado atrás en la puesta en marcha de estrategias mixtas.

Sin embargo, este estudio tiene limitaciones reconocidas: (i) la resolución espacial de la topografía que se empleó puede limitar el detalle microhidráulico; (ii) no tener escenarios climáticos futuros limita la posibilidad de prever cambios en los caudales máximos a largo plazo; y (iii) si no hay participación por parte de la comunidad al validar los escenarios de mitigación, se restringe su aplicabilidad a nivel social e institucional. Según Ortega et al. (2023) y Dai et al. (2023), estas restricciones son frecuentes en investigaciones de urbes intermedias en América Latina, por lo que deben ser tomadas en cuenta para estudios futuros.

Conclusiones

Este estudio demuestra que la integración de modelos hidráulicos e hidrológicos con alta resolución es una herramienta esencial para entender el comportamiento de las inundaciones urbanas en áreas andinas como Ambato. Este descubrimiento no solo tiene implicaciones a nivel local, sino que también se relaciona directamente con la evidencia internacional, corroborando el patrón indicado en investigaciones efectuadas en Europa y Asia sobre la primacía de los enfoques integrados. En este sentido, el caso de Ambato contribuye al debate internacional al mostrar que es factible implementar metodologías avanzadas y obtener resultados que se pueden comparar con contextos urbanos más grandes, incluso en ciudades intermedias que tienen restricciones de información y recursos.

Sin embargo, es crucial admitir que la falta de escenarios climáticos a futuro y la escasa

participación de la comunidad en el proceso de validación de medidas son limitaciones que deben ser abordadas en investigaciones futuras. La precisión y la legitimidad de los análisis se verán incrementadas al integrar modelos climáticos, incorporar procesos participativos y utilizar insumos topográficos más detallados.

En términos generales, esta investigación constituye una contribución esencial para comprender la administración de inundaciones en ciudades andinas. Proporciona datos científicos que refuerzan los marcos internacionales de adaptación y disminución de riesgos, incluyendo el Marco de Sendai y las directrices de ONU-Hábitat. Los resultados subrayan la necesidad de implementar políticas públicas que prioricen perspectivas híbridas, más allá de la evaluación técnica, ya que se ha reconocido que solo mediante la combinación de infraestructura verde y gris se podrán obtener soluciones sostenibles y efectivas en la región.

La investigación, a través de la incorporación de modelos hidráulicos (HEC-RAS 2D) e hidrológicos (HEC-HMS), consiguió identificar y delimitar las zonas con el riesgo más alto de inundación en Ambato. Se descubrió que alrededor del 55.6% de la superficie modelada con riesgo de inundación tiene niveles de peligrosidad "alta" y "muy alta", lo que se encuentra sobre todo en los cauces principales y sus áreas de confluencia. La integración de metodologías permitió que estas zonas críticas fueran delimitadas de manera explícita en términos espaciales y con base técnica.

Finalmente, se valida la hipótesis de que la combinación de modelos hidráulicos e hidrológicos, calibrados y validados de manera adecuada, hace posible identificar con mayor exactitud las áreas vulnerables y proponer medidas de mitigación más eficaces, se confirma. La calibración con métricas sólidas (KGE, NSE) confirmó que los insumos hidrológicos eran confiables para la modelación hidráulica 2D. Como se adelantó, los resultados aportan una base científica robusta que demuestra la preeminencia de las estrategias híbridas de mitigación. Estas representan la alternativa más factible para disminuir el riesgo de manera integral en Ambato. De este modo, orientan tanto la planificación urbana como el ordenamiento de inversiones en infraestructura resiliente.

Referencias

- Arrighi, C., Pregnotato, M., Dawson, R. J., & Castelli, F. (2019). Preparedness against mobility disruption by floods. *Science of The Total Environment*, 654, 1010–1022. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.11.191>
- Arteaga, M. O. N. (2017). *Evaluación del modelo hidrológico HEC-HMS para la predicción hidrológica y de crecidas, en la cuenca baja del río Cañar* [Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18365>
- Dai, K., Shen, S., Cheng, C., & Song, Y. (2023). Integrated evaluation and attribution of urban flood risk mitigation capacity: A case of Zhengzhou, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 50, 101567. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2023.101567>
- INEC. (2020). *Marco Geoestadístico Cantonal*. Ecuador En Cifras. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Geografia_Estadistica/Micrositio_geoportal/descargas.html#marco_cantonal
- Jonkman, S. N., Vrijling, J. K., & Vrouwenvelder, A. C. W. M. (2008). Methods for the estimation of loss of life due to floods: A literature review and a proposal for a new method. *Natural Hazards*, 46(3), 353–389. <https://doi.org/10.1007/S11069-008-9227-5/FIGURES/16>
- Khatooni, K., Hooshyaripor, F., Malek Mohammadi, B., & Noori, R. (2025). A new approach for urban flood risk assessment using coupled SWMM–HEC-RAS-2D model. *Journal of Environmental Management*, 374, 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.123849>
- Khodadad, M., Aguilar, I. B., & Khan, A. Z. (2023). Green Infrastructure for Urban Flood Resilience: A Review of Recent Literature on Bibliometrics, Methodologies, and Typologies. *Water* 2023, Vol. 15, Page 523, 15(3), 523. <https://doi.org/10.3390/W15030523>
- Knoben, W. J. M., Freer, J. E., & Woods, R. A. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323–4331. <https://doi.org/10.5194/HESS-23-4323-2019>
- Madhuri, R., Raja, Y. S. L. S., Raju, K. S., Punith, B. S., & Manoj, K. (2021). Urban flood risk

- analysis of buildings using HEC-RAS 2D in climate change framework. *H2Open Journal*, 4(1), 262–275. <https://doi.org/10.2166/H2OJ.2021.111>
- Moon, H. T., Kim, J. S., Chen, J., Yoon, S. K., & Moon, Y. Il. (2024). Mitigating urban flood Hazards: Hybrid strategy of structural measures. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 108, 104542. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2024.104542>
- Ortega, A. D., Rodríguez, J. P., & Bharati, L. (2023). Building flood-resilient cities by promoting SUDS adoption: A multi-sector analysis of barriers and benefits in Bogotá, Colombia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 88, 103621. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2023.103621>
- Pinos, J., & Quesada, A. R. (2021). Flood Risk-Related Research Trends in Latin America and the Caribbean. *Water* 2022, Vol. 14, Page 10, 14(1), 10. <https://doi.org/10.3390/W14010010>
- Pinos, J., & Timbe, L. (2019). Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering*, 12(1), 11–18. <https://doi.org/10.1016/J.WSE.2019.03.001>
- Plata, W. R., Avila, E. A., Monjardin, S. A. A., Pérez, L. Y. A., Rangel, J. G. P., & Zambrano, Y. G. M. (2025). Urban flood modeling using hydrograph and Rain-on-Grid approaches with HEC-HMS and HEC-RAS: A case study of the Culiacán River. *Journal of South American Earth Sciences*, 165, 1–15. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2025.105694>
- Qin, Y. (2020). Urban Flooding Mitigation Techniques: A Systematic Review and Future Studies. *Water* 2020, Vol. 12, Page 3579, 12(12), 3579. <https://doi.org/10.3390/W12123579>
- Riechel, M., Matzinger, A., Pallasch, M., Joswig, K., Pawlowsky, E. R., Hinkelmann, R., & Rouault, P. (2020). Sustainable urban drainage systems in established city developments: Modelling the potential for CSO reduction and river impact mitigation. *Journal of Environmental Management*, 274, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.111207>
- Serrano, V. S., Reisancho, A. P., Borbor, M. J. C., & Stewart, A. M. I. (2016). Análisis de inundaciones costeras por precipitaciones intensas, cambio climático y fenómeno de El Niño. Caso de estudio: Machala. *La Granja*, 24(2), 53–68.

<https://doi.org/10.17163/LGR.N24.2016.05>

Snikitha, S., Kumar, G. P., & Dwarakish, G. S. (2025). A Comprehensive Review of Cutting-Edge Flood Modelling Approaches for Urban Flood Resilience Enhancement. *Water Conservation Science and Engineering*, 10(1), 1–32. <https://doi.org/10.1007/S41101-024-00327-Y>/METRICS