



**UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y
ARTES DE CHIAPAS**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN
GESTIÓN DE RIESGOS Y CAMBIO
CLIMÁTICO**

**MAESTRÍA EN GESTIÓN DE RIESGOS Y
CAMBIO CLIMÁTICO**

TESIS

**“Vulnerabilidad urbana por inundaciones en el
arroyo 24 de junio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.”**

PRESENTA:

Ing. Daniel Alejandro Gutiérrez Velasco

DIRECTOR:

Dr. Marcelino García Benítez

CODIRECTOR

Dr. Ángel Emmanuel Zúñiga Tovar

ASESORES

Dr. Williams Vázquez Morales

Dr. Juan Carlos Fernández Alcántara

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, septiembre de 2025





UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

SECRETARÍA ACADÉMICA

DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 10 de septiembre de 2025

Oficio No. SA/DIP/1034/2025

Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

C. Daniel Alejandro Gutiérrez Velasco

CVU: 1246348

Candidato al Grado de Maestro en Gestión de Riesgos y Cambio Climático

Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático

UNICACH

Presente

Con fundamento en la opinión favorable emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado Vulnerabilidad urbana por inundaciones en el arroyo 24 de junio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas y como Director de tesis es el Dr. Marcelino García Benítez (CVU: 285884) quien avala el cumplimiento de los criterios metodológicos y de contenido; esta Dirección a mi cargo autoriza la impresión del documento en cita, para la defensa oral del mismo, en el examen que habrá de sustentar para obtener el Grado de Maestro en Gestión de Riesgos y Cambio Climático.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento, así como entregar en esta Dirección una copia de la *Constancia de Entrega de Documento Recepcional* que expide el Centro Universitario de Información y Documentación (CUID) de esta Casa de estudios, en sustitución al ejemplar empastado.

Atentamente
"Por la Cultura de mi Raza"

Dra. Dulce Karol Ramírez López
DIRECTORA



C.c.p. Dra. Sandra Urania Moreno Andrade, Directora del Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, UNICACH. Para su conocimiento.
Mtra. Ana Lucía López Pimentel, Coordinadora del Posgrado, Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, UNICACH. Para su conocimiento
Archivo/minutario.

EPL/DKRL/igp/gtr

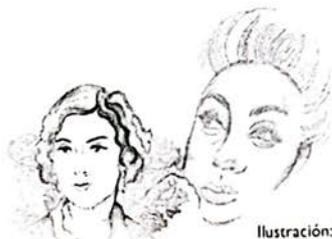


Ilustración: Noé Zenteno

2025, Año de la mujer indígena
Año de Rosario Castellanos



Ciudad Universitaria, libramiento norte
poniente 1150, col. Lajas Maciel C.P. 29039
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México
investigacionyposgrado@unicach.mx

Agradecimientos

Primero, quiero agradecer a Dios, por darme la salud, la claridad y el propósito para llegar hasta este momento. Su guía ha sido mi luz en los días de incertidumbre y mi fuerza para seguir adelante ante cualquier desafío. Sin Su presencia, este logro no habría sido posible.

Al Dr. Marcelino García Benítez, mi director de tesis, le debo mi más profundo reconocimiento. Su acompañamiento fue mucho más allá de la orientación académica; fue un apoyo constante y cercano, lleno de calidez y compromiso. Siempre estuvo dispuesto a guiarme y escucharme, aportando su experiencia y paciencia, incluso en los momentos en que más lo necesitaba.

Al Dr. Ángel Emmanuel Zuñiga Tovar, codirector de este trabajo, le agradezco por abrirme las puertas de su conocimiento y su instituto, por compartir generosamente sus metodologías de modelado hidráulico e hidrológico, y por brindarme siempre un espacio de aprendizaje y colaboración que fue fundamental para el desarrollo técnico de este proyecto.

Mi gratitud también va al Dr. Williams Vázquez Morales y al Dr. Juan Carlos Fernández Alcántara, cuyas valiosas aportaciones y orientación especializada enriquecieron de manera significativa este estudio, aportando claridad y rigor a cada etapa del trabajo.

A la empresa Tecnología Urbana y Ambiental de México S.A. de C.V. y a mi jefe, el Arq. Roberto Rádames Román Cadenas, por proporcionarme los equipos necesarios para realizar mis levantamientos de campo, por otorgarme el tiempo y la flexibilidad para cursar este posgrado, y por fomentar y alentar mi crecimiento profesional. Su confianza y apoyo hicieron posible que este proyecto se llevara a cabo con éxito.

Al Instituto de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático, por permitirme desarrollarme académica y profesionalmente, así como por el apoyo de sus profesores y administrativos, quienes contribuyeron de manera decisiva a mi formación.

Al Instituto de Geografía de la UNAM, por permitirme realizar mi estancia profesional en sus instalaciones, brindándome el acceso a laboratorios, equipos y recursos que fueron fundamentales para el desarrollo de este proyecto.

Dedicatoria

Dedico este trabajo, sobre todo, a mi esposa, Lizbeth, mi compañera incansable, mi guía y mi mayor fuente de fortaleza. Gracias por tu amor incondicional, por creer en mí incluso en los momentos de duda, y por acompañarme con paciencia, alegría y motivación en cada desafío de este camino. Gracias por tus palabras de aliento, por comprender mis ausencias, por celebrar mis pequeños avances y por recordarme siempre que cada esfuerzo vale la pena. Cada logro que hoy celebro lleva tu nombre, y sin tu apoyo constante, tu confianza y tu compañía, nada de esto habría sido igual. Tu amor ha sido mi refugio en los momentos difíciles y mi impulso en los momentos de entusiasmo; este triunfo es tan tuyo como mío, porque juntos hemos compartido cada paso, cada desafío y cada alegría de este proceso.

A mis padres, Bertha y Gilberto, quienes con su ejemplo me enseñaron la importancia de la responsabilidad, la perseverancia y la dedicación. Gracias por su amor incondicional, por sus consejos sabios y por brindarme siempre un respaldo firme en cada decisión que he tomado. Ustedes han sido el pilar que me sostiene en cada meta que emprendo y la inspiración constante para seguir creciendo, no solo como profesional, sino también como persona.

A mis compañeros y amigos de la maestría, Belisario y Jaciel, con quienes compartí este proceso académico, los retos y los aprendizajes que hicieron más enriquecedora esta experiencia. Gracias por su apoyo, sus palabras de aliento y por cada momento de colaboración y camaradería que hicieron que el camino de la maestría fuera más llevadero y memorable.

A mis compañeros de trabajo, Jordy y Sergio, que se han convertido en amigos y familia, por su apoyo, camaradería y ánimo constante durante este camino. Gracias por estar presentes en los días de esfuerzo, por compartir experiencias y risas, y por demostrar que la amistad puede encontrarse también en el ámbito profesional, haciendo que cada desafío sea más llevadero y significativo.

Resumen

La creciente exposición de las ciudades mexicanas a fenómenos hidrometeorológicos extremos ha puesto de manifiesto la necesidad de evaluar la vulnerabilidad urbana desde un enfoque integral que considere tanto los factores físicos como las condiciones sociales. En este contexto, la presente investigación analiza la vulnerabilidad socioambiental por inundaciones en la microcuenca del arroyo 24 de junio, específicamente en la calle Ricardo Flores Magón de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, un sector históricamente afectado por escurrimientos pluviales y deficiencias en infraestructura de drenaje.

El estudio empleó una metodología multidisciplinaria que incluyó la generación de un Modelo Digital de Elevación mediante levantamientos con dron, la modelación hidrológica con HEC-HMS y la hidráulica con HEC-RAS, con el fin de simular la velocidad y el tirante del flujo para distintos periodos de retorno (5, 25 y 50 años). A esta caracterización física se incorporó el Índice Multidimensional de Habitabilidad Urbana (IMHU), el cual permitió valorar la capacidad de adaptación de la población a partir de variables socioeconómicas, ambientales y de infraestructura. La combinación de estos elementos dio lugar al Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones (IVUI), que ofrece una representación espacial de la fragilidad de las manzanas urbanas frente a eventos de inundación.

Los resultados evidencian que las áreas cercanas al cauce del arroyo y aquellas con menores condiciones de habitabilidad presentan los niveles más altos de vulnerabilidad, reflejados en daños potenciales a la infraestructura, afectaciones a la movilidad y limitaciones en la capacidad de respuesta comunitaria.

La investigación aporta una herramienta metodológica innovadora que integra la dimensión física y social del riesgo, constituyendo un insumo valioso para la planificación urbana, el diseño de políticas públicas y la gestión integral del riesgo de desastres en contextos urbanos expuestos a fenómenos hidrometeorológicos.

Palabras clave: vulnerabilidad socioambiental, inundaciones urbanas, arroyo urbano, índice de habitabilidad, capacidad de adaptación urbana, evaluación.

Abstract

The growing exposure of Mexican cities to extreme hydrometeorological events has highlighted the need to assess urban vulnerability from a comprehensive perspective that considers both physical factors and social conditions. In this context, the present research analyzes the socio-environmental vulnerability to floods in the micro-basin of the Arroyo 24 de Junio, specifically along Ricardo Flores Magón Street in Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, an area historically affected by stormwater runoff and deficiencies in drainage infrastructure.

The study employed a multidisciplinary methodology that included the generation of a Digital Elevation Model through drone-based surveys, hydrological modeling with HEC-HMS, and hydraulic modeling with HEC-RAS to simulate flow velocity and water depth for different return periods (5, 25, and 50 years). This physical characterization was combined with the Multidimensional Urban Habitability Index (IMHU), which allowed for the assessment of the population's adaptive capacity based on socioeconomic, environmental, and infrastructure-related variables. The integration of these components led to the construction of the Urban Vulnerability to Flooding Index (IVUI), providing a spatial representation of the fragility of urban blocks in the face of flood events.

The results show that areas located near the stream channel and those with lower habitability conditions present the highest levels of vulnerability, reflected in potential infrastructure damage, mobility disruptions, and limitations in community response capacity. It is concluded that habitability constitutes a key factor in understanding inequalities in urban vulnerability, since its improvement can significantly reduce the impacts of floods.

This research contributes an innovative methodological tool that integrates the physical and social dimensions of risk, serving as a valuable input for urban planning, public policy design, and comprehensive disaster risk management in urban contexts exposed to hydrometeorological events.

Keywords: socio-environmental vulnerability, urban floods, urban stream, habitability index, urban adaptive capacity, assessment.

Indice

Contenido	
Introducción	11
Capítulo 1 Marco teórico conceptual de la vulnerabilidad urbana ante inundaciones	17
1.1. Riesgo	17
1.1.1. Criterios clasificación de los riesgos.....	18
1.2. Peligro por fenómenos naturales	18
1.3. Vulnerabilidad.....	20
1.3.1. Tipos de vulnerabilidad.....	20
1.3.2. La vulnerabilidad urbana.....	22
1.3.3. Vulnerabilidad socioambiental	23
1.4. Hidrología urbana.....	24
1.4.1. La cuenca hidrográfica.....	24
1.4.2. Arroyos urbanos	24
1.5. Inundaciones	24
1.5.1. Tipos de inundaciones de acuerdo con su causa.....	25
1.5.2. Tipos de inundaciones de acuerdo con su velocidad de respuesta.....	26
1.5.3. Factores asociados a las inundaciones urbanas	26
Capítulo 2 Marco de referencia	28
2.1. Los desastres y su impacto en la sociedad	28
2.2. Percepción del riesgo.....	30
2.3. Investigaciones sobre Vulnerabilidad en Contextos Urbanos	31
2.4. Hidrología y/o inundación urbanas.....	31
2.4.1. Estudios sobre Hidrología Urbana	31
2.5. Estudios sobre la Vulnerabilidad e Inundaciones	32
2.5.1. Vulnerabilidad Urbana por inundaciones.....	32
2.5.2. Métodos de Evaluación de la Vulnerabilidad Urbana.....	33
2.5.3. Geografía y uso de suelo	34
2.6. Investigaciones relacionadas con arroyos	35
2.6.1. Contexto geográfico y ambiental del arroyo 24 de junio	35
2.6.2. Estudios de Vulnerabilidad Urbana en el Área del Arroyo 24 de junio	38
2.7. Descripción de la Zona de Estudio: Calle Ricardo Flores Magón y Arroyo 24 de junio..	39

2.7.1.	Fundación y Toponimia	39
2.7.2.	Condiciones Climáticas.....	40
2.7.3.	Geografía y Uso del Suelo	40
Capítulo 3.....	Metodología para la Evaluación Integral de la Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones	42
3.1.	Levantamiento Topográfico y Generación del Modelo Digital de Elevación (MDE)	42
3.2.	Delimitación de la Microcuenca y modelación hidrológica.....	46
3.3.	Análisis Pluviométrico.....	50
3.4.	Modelación Hidrológica en HEC-HMS.....	54
3.5.	Modelación Hidráulica en HEC-RAS para Simulación de Inundaciones	55
3.6.	Análisis de Vulnerabilidad Urbana por Peligro Hidrodinámico.....	60
3.7.	Índice Multidimensional de Habitabilidad Urbana (IMHU)	61
3.8.	Integración del IMHU en el Proyecto.....	62
3.9.	Evaluar el Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones (IVUI)	62
Capítulo 4.....	Resultados	67
4.1.	Caracterización de la Cuenca y Unidades de Infiltración	67
4.2.	Hietograma Sintético por Bloque Alterno para Diferentes Períodos de Retorno	68
4.3.	Hidrograma de Caudales para Diferentes Períodos de Retorno	69
4.4.	Índice de Peligro por Velocidad y Tirante en el Cauce	71
4.5.	Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones	78
4.6.	Índices de Vulnerabilidad por Habitabilidad Urbana	85
4.7.	Índices de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones (IVUI)	87
4.8.	Índice general de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones	91
	Conclusiones.....	94
	Discusión.....	97
	Bibliografía.....	99

Índices de figuras

Figura 1. Número de desastres ocurridos en México durante el periodo 1970-2013 (Alcántara-Ayala, 2019).....	29
Figura 2. Microcuenca Hidrográfica 24 de junio con la ubicación de: ZHN4, Zona Hidrográfica Natural; ZHU4, Zona Hidrográfica Urbana; Zonas en peligro de inundación (A, B, C y D); sus respectivas áreas y las Colonias afectadas (24 de junio, Grijalva Infonavit y El Bosque) (Mora et al., 2023).	37
Figura 3. Microcuenca Hidrográfica 24 de junio con la ubicación de: ZHN4, Zona Hidrográfica Natural; ZHU4, Zona Hidrográfica Urbana; Zonas en peligro de inundación (A, B, C y D); sus respectivas áreas y las Colonias afectadas (24 de junio, Grijalva Infonavit y El Bosque) (Mora et al., 2023).	39
Figura 4. Urbanización y deforestación provocan inundaciones Chacón, 2024; Martínez, 2024). ..	41
Figura 5. Plan de vuelo de la zona de estudio. Fuente propia, 2025.	43
Figura 6. Ejecución del plan de vuelo de la zona de estudio. Fuente propia, 2025.	44
Figura 7. densificación de la nube de puntos. Fuente propia, 2025.	45
Figura 8. Modelo digital de superficie de la zona de estudio. Fuente propia, 2025.....	45
Figura 9. Modelo digital de terreno de la zona de estudio. Fuente propia, 2025.....	46
Figura 10. Modelo Digital de Elevación LiDAR de la zona nororiente del Municipio de Tuxtla Gutiérrez (INEGI, 2011)	47
Figura 11. Red hídrica de la microcuenca 24 de junio. Fuente propia, 2025.	49
Figura 12. Ubicación de la estación climatológica convencional ACALA 7003 (CONAGUA, 2020)	51
Figura 13. Isoyetas de Intensidad - Duración - Periodo de Retorno para la República Mexicana elaboradas por la SCT para el estado de Chiapas (SCT,1990).	53
Figura 14. interfaz del modelo hidrológico de escorrentía de la microcuenca 24 de junio para una lluvia con periodo de retorno de 5 años HEC-HMS(USACE, 2021). Fuente propia, 2025.	55
Figura 15. Diagrama de flujo – Modelación Hidráulica en HEC-RAS (USACE, 2023). Fuente propia, 2025.....	56
Figura 16. Interfase de la simulación Hidráulica en Régimen No Permanente del Arroyo 24 de junio mediante HEC-RAS (USACE, 2023). Fuente propia, 2025.....	57
Figura 17. Índice de peligro por velocidad para período de retorno 5 años (TR 5). Fuente propia, 2025.	72

Figura 18. Índice de peligro por tirante para período de retorno 5 años (TR 5). Fuente propia, 2025.	73
Figura 19. Índice de peligro por velocidad para período de retorno 25 años (TR 25). Fuente propia, 2025.	74
Figura 20. Índice de peligro por tirante para período de retorno 25 años (TR 25). Fuente propia, 2025.	75
Figura 21. Índice de peligro por velocidad para período de retorno 50 años (TR 50). Fuente propia, 2025.	76
Figura 22. Índice de peligro por tirante para período de retorno 50 años (TR 50). Fuente propia, 2025.	77
Figura 23. índice de vulnerabilidad por velocidad de flujo para período de retorno 5 años (TR 5). Fuente propia, 2025.	79
Figura 24. Índice de vulnerabilidad por tirante de flujo para período de retorno 5 años (TR 5). Fuente propia, 2025	80
Figura 25. Índice de vulnerabilidad por velocidad de flujo para período de retorno 25 años (TR 25). Fuente propia, 2025.	81
Figura 26. Índice de vulnerabilidad por tirante de flujo para período de retorno 25 años (TR 25). Fuente propia, 2025.	82
Figura 27. Índice de vulnerabilidad por velocidad de flujo para período de retorno 50 años (TR 50). Fuente propia, 2025.	83
Figura 28. Índice de vulnerabilidad por tirante de flujo para período de retorno 50 años (TR 50). Fuente propia, 2025.	84
Figura 29. Índice de vulnerabilidad por índice de habitabilidad urbana general. Fuente propia, 2025.	86
Figura 30. Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones TR 5. Fuente propia, 2025.....	88
Figura 31. Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones TR 25. Fuente propia, 2025.....	89
Figura 32. Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones TR 50. Fuente propia, 2025.....	90
Figura 33. Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones – Método de Promedio Temporal (Períodos de Retorno 5, 25 y 50 años). Fuente propia, 2025.....	92
Figura 34. Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones – Método Ponderado según Frecuencia de Eventos (Períodos de Retorno 5, 25 y 50 años). Fuente propia, 2025.	93

Índices de tablas

Tabla 1. Área del polígono que incluye el plan de vuelo de la zona de estudio. Fuente propia, 2025.	43
Tabla 2. Lámina de lluvia estimada para distintos periodos de retorno. Fuente propia, 2025.....	52
Tabla 3. Clasificación del Nivel de Peligro en Función del Tirante y la Velocidad del Flujo (Xia et al. (2014).....	59
Tabla 4. Clasificación de la Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones (IVUI). Fuente propia, 2025.	63
Tabla 5. Distribución de las unidades de infiltración en la microcuenca del Arroyo 24 de junio. Fuente propia, 2025.	68

Introducción

La vulnerabilidad y el riesgo de las zonas urbanas en México ante fenómenos hidrometeorológicos intensos/extremos parece haber aumentado en las últimas décadas, debido a un rápido crecimiento urbano no-controlado y, a la falta de una adecuada planificación territorial. La pérdida de capacidad de infiltración de los suelos debido al aumento de superficies impermeables, son factores que se asocian con cambios en los niveles de riesgo de inundaciones. En la Ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, la microcuenca del arroyo 24 de junio es un ejemplo de esta problemática, donde la calle Ricardo Flores Magón de la colonia Infonavit Grijalva, se considera una zona de alto riesgo de inundaciones urbanas, con impacto directo a la infraestructura y la población.

La ocurrencia de inundaciones en esta zona, generan daños materiales, problemas de movilidad y riesgos sanitarios. La falta de una infraestructura de drenaje adecuada agrava la situación, por ejemplo, en el cauce del arroyo 24 de junio la capacidad hidráulica del drenaje no permite manejar los volúmenes de agua que son generados durante episodios de lluvia intensa. Por esta razón, existe la necesidad de desarrollar estudios detallados que permitan evaluar y gestionar el riesgo de forma integral, considerando tanto el peligro por lluvias intensas como la vulnerabilidad de las zonas urbanas.

Para conocer el nivel de vulnerabilidad urbana en esta zona, se desarrollaron diferentes metodologías. A través de un mapeo urbano realizado con un dron, se obtuvo información detallada de las condiciones del terreno. El uso de modelos hidrológicos e hidráulicos permitieron estimar la velocidad del flujo y el tirante de agua, para periodos de retorno de 5, 25 y 50 años. Esta información se utilizó para definir niveles de riesgo de inundación, que permitieron analizar su efecto sobre infraestructura urbana.

La información generada de la modelación hidráulica se utilizó para determinar la vulnerabilidad urbana ante inundaciones y por capacidad de adaptación, al considerar la habitabilidad urbana como un factor clave en la capacidad de respuesta de la población. En conjunto, estos factores se utilizaron para desarrollar un Índice de Vulnerabilidad Urbana ante Inundaciones (IVUI). Este IVUI aporta información espacial sobre la distribución cuantitativa del nivel de impacto para la zona de estudio.

La hipótesis del presente estudio sostiene que la vulnerabilidad urbana en las manzanas adyacentes al arroyo 24 de junio está directamente relacionada con la habitabilidad y la proximidad al cauce. Se espera que las zonas con menor capacidad de adaptación presenten niveles más altos de vulnerabilidad, reflejándose en daños a la infraestructura urbana —como calles, puentes, redes de drenaje y servicios públicos— y en una menor capacidad de respuesta de la población ante eventos de inundación. Por el contrario, las áreas con mayor habitabilidad —definida como la combinación de condiciones sociales, ambientales, económicas y espaciales favorables— exhibirán menor susceptibilidad a los efectos negativos de las inundaciones, incluyendo interrupción de servicios, riesgos a la salud y seguridad de los habitantes, y deterioro de la infraestructura crítica.

Además, se plantea que la velocidad y el tirante del agua en las calles influyen proporcionalmente en la vulnerabilidad de las manzanas, intensificando el riesgo de daños materiales y afectación a la movilidad urbana.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar la vulnerabilidad urbana de la microcuenca del arroyo 24 de junio a nivel de manzanas, integrando indicadores de habitabilidad, cercanía al cauce, tirante y velocidad del flujo. Los objetivos específicos son: i) identificar y mapear las zonas de mayor riesgo mediante modelación hidráulica, ii) determinar los rangos de riesgo de inundación urbana, iii) calcular la vulnerabilidad considerando la capacidad de adaptación y el impacto en la infraestructura, y iv) desarrollar un índice de vulnerabilidad urbana que permita identificar zonas críticas y priorizar estrategias de mitigación y adaptación.

Este estudio se justifica por la necesidad de contar con herramientas analíticas que permitan tomar decisiones basadas en información precisa sobre la vulnerabilidad urbana y los impactos sociales de las inundaciones. A diferencia de otros enfoques que solo consideran la magnitud del evento, esta investigación incorpora la capacidad de adaptación urbana y la capacidad de adaptación de la población como factores determinantes para minimizar daños materiales, preservar la infraestructura y garantizar la continuidad de los servicios esenciales.

El Índice de Vulnerabilidad Urbana propuesto ofrece un marco metodológico sólido para evaluar el riesgo de inundaciones urbanas y sus efectos sobre la infraestructura y la población, contribuyendo al diseño de estrategias de mitigación y adaptación. Los resultados permitirán mejorar la planificación urbana, reducir el impacto de las inundaciones en la vida cotidiana y fortalecer la capacidad de respuesta de la comunidad.

El documento se estructura en cinco capítulos que abordan el problema desde una perspectiva técnica, territorial y socioambiental, permitiendo comprender cómo las características físicas del flujo, la infraestructura urbana y las condiciones de habitabilidad inciden en la vulnerabilidad frente a eventos de inundación, así como los efectos sociales que se busca mitigar mediante la propuesta de este estudio.

El Capítulo 1 establece las bases conceptuales y metodológicas del proyecto. Se presenta el planteamiento del problema, enfocado en la creciente exposición de zonas urbanas a eventos hidrometeorológicos extremos, particularmente inundaciones, debido al crecimiento desordenado de la ciudad y la transformación de sus cauces naturales. Se exponen los antecedentes relevantes a nivel local y nacional, se justifica la importancia del estudio en el contexto de la gestión del riesgo urbano, y se formula la hipótesis que guía la investigación. Asimismo, se definen los objetivos generales y específicos, orientados a evaluar la vulnerabilidad de las manzanas urbanas mediante el análisis conjunto del peligro hidráulico y la capacidad de adaptación del entorno urbano. Finalmente, se incluye el marco teórico y conceptual, con especial énfasis en los conceptos de vulnerabilidad, habitabilidad y riesgo.

El Capítulo 2 se dedica a describir las características del área de estudio. Se presentan los aspectos geográficos, topográficos, climáticos, hidrológicos y de ocupación del suelo en la microcuenca del arroyo 24 de junio. Esta sección resulta fundamental para entender el contexto físico en el que se desarrolla la dinámica del escurrimiento superficial y las posibles afectaciones en las zonas urbanizadas. Se analizan las unidades de uso de suelo, vegetación y tipos de suelo con base en información cartográfica, imágenes satelitales y análisis de infiltración, permitiendo identificar zonas de mayor o menor capacidad de retención de agua. Esta caracterización permite vincular el comportamiento del escurrimiento con el patrón de urbanización.

En el Capítulo 3 se expone detalladamente la metodología utilizada. Se describen las etapas del análisis hidrológico e hidráulico, incluyendo la construcción del hietograma sintético por bloque alterno para distintos periodos de retorno (5, 25 y 50 años), la modelación hidrológica mediante HEC-HMS y la simulación hidráulica con HEC-RAS. Posteriormente, se explica la generación de cartografías de peligro por velocidad y tirante en la red vial, así como la conversión de esos resultados en índices de vulnerabilidad aplicados a las manzanas urbanas. Se introduce el Índice Multidimensional de Habitabilidad Urbana (IMHU), adaptado para el contexto local, como un insumo clave para evaluar la capacidad de adaptación urbana. Finalmente, se plantea el cálculo del IVUI integrando los índices de vulnerabilidad por velocidad, tirante y habitabilidad en tres enfoques: por período de retorno, promedio temporal y ponderado por frecuencia.

El Capítulo 4 presenta los resultados del estudio. Se muestra la distribución espacial de las distintas variables analizadas, destacando las zonas de mayor peligrosidad y vulnerabilidad. Se observa que los valores más altos del IVUI coinciden con sectores cercanos al cauce del arroyo, particularmente a lo largo de la calle Ricardo Flores Magón, donde se concentran manzanas con alta exposición al flujo y baja capacidad de respuesta. El análisis revela que la velocidad del agua es el principal factor físico que incrementa la vulnerabilidad, mientras que el tirante solo presenta niveles elevados al sur del área de estudio. Asimismo, se identifican zonas con baja habitabilidad urbana, donde las deficiencias en drenaje pluvial, infraestructura básica y servicios acentúan el riesgo, incluso en áreas con menor exposición hidráulica. Se demuestra que la habitabilidad es un componente clave para entender la vulnerabilidad urbana, ya que manzanas con buena infraestructura y servicios muestran menor IVUI, aun cuando se ubiquen en zonas de peligro. Los resultados obtenidos a partir del enfoque ponderado mostraron una mayor capacidad de reflejar la realidad urbana, al dar mayor peso a los eventos más frecuentes, lo que permite una mejor planificación de medidas preventivas.

Los resultados obtenidos se discuten críticamente en la última parte del documento, donde se realiza un análisis comparativo de los métodos empleados y se contextualizan los hallazgos dentro del marco teórico previamente desarrollado. En la discusión, se resalta cómo la combinación de factores físicos del flujo (velocidad y tirante) con indicadores sociales y de

habitabilidad brinda una visión más realista y precisa de la vulnerabilidad urbana. También se evalúa la pertinencia de las herramientas utilizadas, como HEC-HMS y HEC-RAS, y se señalan las ventajas de emplear metodologías ponderadas que priorizan la frecuencia e impacto de los eventos hidrometeorológicos recurrentes, frente a métodos promedio que suavizan estas diferencias.

Esta reflexión permite valorar la aplicabilidad de los resultados en la planificación urbana y la gestión del riesgo, así como identificar áreas de oportunidad para mejorar la precisión y utilidad de la metodología en futuras investigaciones. Se destaca que, si bien la modelación permitió representar de forma espacial la vulnerabilidad y orientar decisiones de mitigación, sería deseable incorporar variables complementarias como sistemas de alerta temprana, redes sociales de apoyo comunitario o indicadores de percepción del riesgo, con el fin de enriquecer la comprensión integral de la capacidad de adaptación urbana.

En el capítulo de conclusiones, se comprueba que la hipótesis inicial se cumple: la vulnerabilidad urbana por inundaciones no se explica únicamente por la intensidad del fenómeno hidrometeorológico, sino que está fuertemente condicionada por la calidad del entorno urbano y la habitabilidad de las zonas expuestas. Las manzanas más vulnerables se ubican predominantemente en los márgenes del arroyo, donde el flujo es más intenso y la infraestructura urbana más deficiente, pero también se identificaron otras áreas de alta vulnerabilidad alejadas del cauce, asociadas a precariedad urbana y baja capacidad de adaptación.

Las conclusiones reafirman la necesidad de integrar la gestión de riesgos en la planificación territorial, mejorando la infraestructura urbana y priorizando el desarrollo de políticas públicas que fortalezcan las condiciones de habitabilidad. Asimismo, se reconoce que los enfoques metodológicos utilizados presentan tanto ventajas como limitaciones. El enfoque promedio ofrece simplicidad y balance entre escenarios, mientras que el enfoque ponderado aporta mayor sensibilidad a eventos frecuentes que suelen tener un impacto acumulativo más significativo. Ambos métodos fueron útiles para interpretar el comportamiento espacial de la vulnerabilidad urbana, y su comparación permitió seleccionar el más apropiado según los objetivos del estudio.

En suma, este trabajo aporta una herramienta técnica y conceptual útil para autoridades, planificadores y tomadores de decisiones que buscan reducir el riesgo de inundaciones en zonas urbanas desde una perspectiva integral y basada en evidencia. Al mismo tiempo, ofrece una base metodológica replicable y adaptable a otros contextos urbanos con condiciones similares.

Capítulo 1. Marco teórico conceptual de la vulnerabilidad urbana ante inundaciones

1.1. Riesgo

El riesgo puede entenderse como la probabilidad en que un peligro de tipo natural pueda ocurrir en una región, que por sus características: sociales, económicas, geográficas, ambientales, sea vulnerable a un fenómeno natural, y con ello, a una mayor posibilidad de daños y pérdidas. En consecuencia, la definición del riesgo se basa principalmente en el cálculo de probabilidades, utilizando para ello, datos cuantitativos o cualitativos (Rojas & Martínez, 2011).

El riesgo, en términos cualitativos, se refiere a la posibilidad de daños o efectos no deseados causados por fenómenos naturales intensos que ocurren en sistemas donde las personas, comunidades o bienes se encuentra expuestos. Por otro lado, la amenaza se relaciona con la materialización de probabilidad de ocurrencia de estos eventos intensos. Desde una perspectiva cuantitativa, el riesgo resulta de la combinación de la probabilidad de que ocurra un evento intenso (peligro), la vulnerabilidad de los elementos expuestos (ver ecuación 1) (Zepeda et al., 2006)

$$Riesgo = f(Peligro, Vulnerabilidad, Exposición) \quad (1)$$

Donde:

Riesgo: probabilidad de que se presenten consecuencias negativas o daños derivados de un fenómeno natural.

Peligro: probabilidad de ocurrencia de un evento natural de determinada intensidad y duración.

Vulnerabilidad: grado de susceptibilidad o fragilidad de los elementos expuestos para ser afectados.

Exposición: presencia de personas, infraestructura, bienes o actividades en zonas susceptibles a impactos del fenómeno.

1.1.1. Criterios clasificación de los riesgos

De acuerdo con Ayala y Olcina (2002) el riesgo puede clasificarse en:

- *Riesgos Genéticos y Tipológicos*: Estos riesgos se relacionan con el entorno en el que se originan. Por ejemplo, un terremoto se genera en la litosfera, pero puede variar en su tipo según su causa subyacente, como tectónico, volcánico, por deslizamiento, por explosiones o por hundimientos. Además, estos riesgos pueden ser clasificados según su ambiente geotectónico, como interplaca o de borde de placa, y según su tipo de movimiento, como convergente, divergente o deslizante.
- *Riesgos Humanos o Naturales*: Estos riesgos se relacionan con su origen: naturales o antrópicos.

1.2. Peligro por fenómenos naturales

El peligro se define como la probabilidad de que un fenómeno físico de origen natural ocurra con la intensidad suficiente para provocar daños sobre un entorno determinado (UNDRR, 2023). Esta definición permite analizar el fenómeno desde su capacidad destructiva, independientemente del riesgo o de la vulnerabilidad del sistema afectado, los cuales no se abordarán en este trabajo.

Los fenómenos naturales son procesos físicos o biológicos de origen natural que se presentan en el entorno sin intervención humana directa. Entre ellos se encuentran los fenómenos geológicos, hidrometeorológicos, oceanográficos, y biológicos. En el caso de esta investigación, se abordará únicamente el fenómeno hidrometeorológico asociado a la precipitación pluvial intensa.

Para que un fenómeno natural sea considerado un peligro, no basta con su sola ocurrencia: debe tener la capacidad potencial de causar daño. Es decir, un peligro es un fenómeno físico o proceso natural que, debido a su intensidad, duración y frecuencia, puede generar impactos adversos sobre la población, la infraestructura o el medio ambiente (UNDRR, 2023).

Un fenómeno natural se convierte en peligro cuando tiene una probabilidad significativa de ocurrencia y puede provocar efectos negativos directos, como inundaciones, derrumbes, incendios forestales o sismos destructivos. La caracterización del peligro se basa en parámetros cuantificables, como la magnitud o la intensidad del evento. Estos parámetros

permiten definir el comportamiento físico del fenómeno y establecer umbrales críticos para su análisis (CENAPRED, 2020).

Esta clasificación ha sido adoptada por organismos internacionales como la UNDRR (2023) y por el Centro Nacional de Prevención de Desastres en México (CENAPRED, 2020), y se utiliza comúnmente en el diseño de políticas públicas de prevención y preparación ante emergencias.

En el caso mexicano, el Sistema Nacional de Protección Civil organiza los peligros o “fenómenos perturbadores” en cinco grupos principales como los señala (CENAPRED, 2020):

- Fenómenos geológicos
- Fenómenos hidrometeorológicos
- Fenómenos químico-tecnológicos
- Fenómenos sanitario-ambientales
- Fenómenos socio-organizativos

Dado que esta investigación se centra exclusivamente en fenómenos naturales, y en particular en el fenómeno hidrometeorológico de la lluvia intensa, únicamente se abordarán los peligros naturales, dejando fuera los peligros de origen humano o combinado.

La inundación es un resultado visible de un fenómeno hidrometeorológico extremo, como lluvias prolongadas o huracanes. Aunque suele tratarse como un fenómeno en sí mismo, técnicamente representa la consecuencia del exceso de agua que supera la capacidad de absorción del suelo o de los sistemas de drenaje (IPCC, 2022). Factores como la intensidad de la lluvia, la pendiente del terreno y el grado de urbanización son determinantes para su ocurrencia.

1.3. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad se entiende como la condición determinada por factores físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de una comunidad, sistema o territorio a sufrir daños ante la presencia de un fenómeno peligroso (UNDRR, 2017; PNUD, 2022). Esta condición no es estática ni natural, sino que responde a procesos estructurales que limitan o favorecen la capacidad de adaptación de los elementos expuestos.

Desde esta perspectiva, la vulnerabilidad se configura cuando un sistema tiene baja capacidad de adaptación frente a una amenaza; es decir, cuando carece de los medios, estructuras o condiciones necesarias para anticiparse, resistir o recuperarse ante un fenómeno perturbador. La capacidad de adaptación se relaciona directamente con aspectos como el acceso a servicios, la calidad del entorno construido, la cobertura institucional, y las condiciones socioeconómicas de la población.

Para reducir la vulnerabilidad —y, en consecuencia, el impacto de los fenómenos peligrosos— es indispensable identificar a qué se es vulnerable y por qué. De acuerdo con el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo (SNGR) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), la vulnerabilidad puede analizarse desde dos enfoques principales:

- Clasificación según el tipo de peligro: Este enfoque evalúa la vulnerabilidad frente a amenazas específicas (como inundaciones o movimientos en masa), permitiendo una mejor planificación de medidas de mitigación.
- Identificación de factores estructurales que generan vulnerabilidad: Este enfoque examina los elementos sociales, institucionales y territoriales que mantienen o agravan las condiciones de exposición y fragilidad en determinadas zonas.

Así, la vulnerabilidad no se reduce únicamente a la presencia de una amenaza, sino a la interacción entre dicha amenaza y la capacidad de adaptación de los elementos expuestos. Esto permite entender por qué dos territorios, aun enfrentando el mismo fenómeno, pueden experimentar impactos completamente diferentes.

1.3.1. Tipos de vulnerabilidad

En el contexto urbano, especialmente en zonas propensas a fenómenos hidrometeorológicos como las inundaciones, la vulnerabilidad no puede entenderse como un factor único, sino

como el resultado de múltiples dimensiones que interactúan entre sí. Reconocer y clasificar estas dimensiones permite identificar con mayor precisión las causas estructurales que limitan la capacidad de adaptación de las comunidades ante un evento peligroso.

De acuerdo con Pizarro y Rodríguez (2001), las principales dimensiones de la vulnerabilidad urbana son las siguientes:

- Vulnerabilidad sociodemográfica: Esta dimensión es clave para reconocer qué grupos sociales son más susceptibles ante una inundación. Por ejemplo, personas adultas mayores, niños, mujeres jefas de familia o personas con discapacidad pueden enfrentar mayores dificultades para evacuar o adaptarse ante un evento súbito.
- Vulnerabilidad socioeconómica: La capacidad de adaptación ante inundaciones está estrechamente relacionada con el nivel de ingreso, la estabilidad laboral y el acceso a recursos económicos. Las familias con menores recursos tienden a asentarse en zonas de alto riesgo por ser más accesibles económicamente, y además enfrentan mayores obstáculos para implementar medidas de prevención o recuperación. Este patrón es visible en varios tramos urbanos adyacentes al arroyo.
- Vulnerabilidad territorial o espacial: Hace referencia a las condiciones físicas del entorno urbano que incrementan la exposición y dificultan la adaptación. En el caso del arroyo 24 de junio, la ocupación irregular de cauces, la urbanización no planificada, la insuficiencia de drenaje pluvial y la falta de infraestructura de contención aumentan significativamente el impacto potencial de una avenida súbita. Esta dimensión también considera la accesibilidad a rutas de evacuación, la calidad de las viviendas y la conectividad con servicios urbanos esenciales.

Estas dimensiones de la vulnerabilidad se superponen y se refuerzan mutuamente, configurando un sistema urbano con limitada capacidad de respuesta. Comprenderlas permite no solo identificar las zonas más frágiles en términos sociales y espaciales, sino también diseñar estrategias orientadas a fortalecer la capacidad de adaptación de los sectores urbanos más expuestos.

1.3.2. La vulnerabilidad urbana

La vulnerabilidad urbana se refiere a la capacidad de adaptación limitada de los sistemas urbanos frente a fenómenos peligrosos, en particular las inundaciones.

De acuerdo con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR, 2015), la vulnerabilidad urbana comprende varias dimensiones:

1. **Vulnerabilidad física o estructural:** Incluye la calidad y resistencia de la infraestructura urbana, como edificaciones, redes de drenaje y caminos. En zonas inundables cercanas a los arroyos urbanos, la construcción informal y los sistemas de drenaje deficientes incrementan la exposición a riesgos (UNDRR, 2015; Pollution Sustainability Directory, 2023).
2. **Vulnerabilidad socioeconómica:** Se refiere a la capacidad limitada de grupos con bajos ingresos o condiciones precarias para prepararse, resistir y recuperarse de inundaciones. Esta condición influye en la ubicación de los asentamientos en áreas de alto riesgo (Pollution Sustainability Directory, 2023; Global Disaster Risk Centre, 2023).
3. **Vulnerabilidad ambiental:** Engloba la degradación del entorno urbano, como la pérdida de infraestructura verde y la impermeabilización del suelo, que incrementan la escorrentía y la susceptibilidad a inundaciones (Pollution Sustainability Directory, 2023).
4. **Vulnerabilidad institucional y de gobernanza:** La falta de planificación territorial adecuada, la débil aplicación de normativas y la insuficiente gestión del riesgo urbanístico aumentan la fragilidad ante eventos de inundación (Global Disaster Risk Centre, 2023).

Estas dimensiones interactúan de forma compleja y dinámica. Por ejemplo, la ausencia de drenaje adecuado se agrava cuando las viviendas están ubicadas informalmente en zonas bajas y existe una gobernanza insuficiente para regular el uso del suelo.

Entender esta multiplicidad de factores es fundamental para evaluar la vulnerabilidad urbana de manera integral y orientar estrategias que fortalezcan la capacidad de adaptación en zonas expuestas a riesgos hidrometeorológicos.

1.3.3. Vulnerabilidad socioambiental

La vulnerabilidad socioambiental se entiende como la condición de exposición y susceptibilidad que presentan las comunidades y los ecosistemas frente a amenazas naturales o inducidas por el hombre, derivadas de la interacción entre factores sociales, económicos, culturales y ambientales (Adger, 2006; Füssel, 2007). En este enfoque, la vulnerabilidad no solo depende de la presencia del peligro, sino también de la capacidad de adaptación y respuesta de las sociedades, es decir, de su habilidad para anticipar, resistir, absorber y recuperarse de los impactos ambientales.

En el contexto urbano, la vulnerabilidad socioambiental refleja cómo las desigualdades sociales —como la pobreza, la marginalización o el acceso limitado a servicios básicos— se combinan con la degradación ambiental, como la contaminación, la pérdida de cobertura vegetal o la mala gestión del territorio, para aumentar el riesgo frente a fenómenos como las inundaciones (Cutter et al., 2008; Samaniego, 2020). La capacidad de adaptación social se manifiesta en la disponibilidad de redes comunitarias, sistemas de alerta temprana, infraestructura resiliente y acceso a recursos y servicios que permiten a las comunidades enfrentar y recuperarse más eficazmente ante eventos extremos.

Esta perspectiva destaca la importancia de considerar tanto las condiciones ambientales como las dinámicas sociales, políticas y económicas que generan o amplifican la exposición y sensibilidad de las comunidades. Por ejemplo, en zonas cercanas a arroyos urbanos, la expansión urbana no planificada, la deficiencia en la infraestructura de drenaje y la ocupación de zonas de riesgo incrementan la vulnerabilidad socioambiental. Sin embargo, una comunidad con alta capacidad de adaptación social puede reducir significativamente los impactos de las inundaciones, mediante la organización comunitaria, la educación ambiental y la implementación de medidas de mitigación.

Por ello, el análisis de la vulnerabilidad socioambiental es clave para diseñar estrategias integrales que no solo mitiguen los impactos físicos de las inundaciones, sino que también fortalezcan la capacidad de adaptación, promoviendo un desarrollo urbano sostenible y capaz de responder de manera efectiva a los riesgos ambientales (Folke, 2006; IPCC, 2022). En este sentido, la capacidad de adaptación social se convierte en un factor determinante para

disminuir la exposición y los daños a la población, así como para garantizar la continuidad de los servicios esenciales y la seguridad de las comunidades urbanas.

1.4. Hidrología urbana

1.4.1. La cuenca hidrográfica

Una cuenca hidrográfica es un área de terreno delimitada por divisorias naturales, donde toda el agua de lluvia o escurrimiento superficial converge hacia un mismo cuerpo de agua, como un río, lago o arroyo (Gleick, 1993; Maidment, 1993). Es decir, es una unidad espacial en la que el agua que cae dentro de sus límites se canaliza y concentra hacia un punto de salida común, normalmente un río o arroyo principal.

La delimitación de una cuenca se realiza identificando las divisorias de aguas, que son las elevaciones del terreno (como cerros o montañas) que separan las áreas de escurrimiento hacia diferentes corrientes. Esta comprensión es fundamental para estudiar el comportamiento hidrológico y el manejo del agua, ya que permite analizar cómo el agua se mueve y se acumula en una región específica (Chow, Maidment, & Mays, 1988).

1.4.2. Arroyos urbanos

Un arroyo urbano es un cauce natural de agua que atraviesa zonas urbanizadas, caracterizado por la influencia directa de las actividades humanas y el desarrollo urbano en su dinámica y calidad ambiental (Novelo-Casanova, 2018). Estos arroyos funcionan como canales de drenaje pluvial que colectan y conducen las aguas de lluvia y escurrimiento superficial en la ciudad, pero debido a la urbanización suelen presentar alteraciones significativas en su caudal, calidad del agua y estructura, lo que puede generar problemas de inundación, contaminación y pérdida de hábitats naturales.

La gestión de los arroyos urbanos implica reconocer su rol en el sistema hidrológico local y en la infraestructura de control de inundaciones, así como la necesidad de proteger su capacidad ecológica para favorecer la sostenibilidad urbana y la adaptación ante eventos hidrometeorológicos extremos (Berger et al., 2020).

1.5. Inundaciones

Las inundaciones se definen como eventos hidrológicos en los que un área de terreno queda temporalmente cubierta por agua, generalmente debido a un aumento excesivo del

nivel de agua en ríos, arroyos, lagos o sistemas pluviales, superando la capacidad natural o artificial de drenaje y causando impactos negativos en el entorno (Smith, 2013). En el contexto urbano, las inundaciones ocurren cuando las redes de drenaje y los cauces naturales no pueden manejar el volumen de escurrimiento pluvial generado por eventos de lluvia intensos, provocando acumulaciones de agua en zonas habitadas que pueden afectar viviendas, infraestructura, salud pública y actividades económicas (Chang, 2016).

Esta definición amplía el concepto tradicional del Glosario Hidrológico Internacional (OMM/UNESCO, 1974), al incorporar la dimensión social y ambiental de las inundaciones, destacando que no solo el desbordamiento de un cauce natural, sino también la incapacidad del sistema urbano para evacuar agua, constituyen situaciones de inundación.

1.5.1. Tipos de inundaciones de acuerdo con su causa

Las inundaciones se clasifican según su origen y dinámica en diferentes tipos, los cuales permiten comprender mejor su comportamiento y diseñar estrategias de gestión adecuadas (Salas et al., 2004; Kundzewicz et al., 2017):

- Inundaciones pluviales: Son causadas por precipitaciones intensas en cortos períodos que saturan el terreno y superan la capacidad de infiltración y drenaje, generando acumulaciones de agua en zonas urbanas o rurales. Estas inundaciones pueden durar desde horas hasta días, y son particularmente comunes en áreas con sistemas de drenaje insuficientes o deteriorados (Kundzewicz et al., 2017).
- Inundaciones fluviales: Ocurren cuando los ríos o arroyos desbordan sus cauces debido a lluvias prolongadas o intensas en la cuenca hidrográfica. El agua se extiende hacia áreas adyacentes, afectando comunidades y tierras agrícolas. La inundación puede tener origen en precipitaciones localizadas o en cualquier parte de la cuenca que contribuya al aumento del caudal (Salas et al., 2004).
- Inundaciones costeras: Se producen por el aumento del nivel del mar debido a mareas, tormentas o eventos meteorológicos extremos, como huracanes, que provocan la penetración del agua marina tierra adentro. Este tipo de inundaciones afecta principalmente zonas bajas costeras y puede combinarse con oleajes y tormentas que agravan el impacto (Vousdoukas et al., 2020).

- Inundaciones por fallo de infraestructura hidráulica: Estas inundaciones resultan de la ruptura o mal funcionamiento de estructuras diseñadas para controlar el agua, como presas, diques o sistemas de drenaje. La falla puede causar inundaciones repentinas y de gran magnitud, que a menudo superan en daño a las inundaciones naturales, debido a la falta de tiempo para alertas y evacuaciones (Huang et al., 2018).

1.5.2. Tipos de inundaciones de acuerdo con su velocidad de respuesta

Las inundaciones pueden clasificarse según la rapidez con la que se manifiestan y el tiempo que tardan en desarrollarse, dividiéndose principalmente en dos categorías: inundaciones lentas y súbitas (rápidas) (Salas, Marco, Jiménez & Martín, 2004; Kundzewicz et al., 2017).

- Inundaciones lentas: Se desarrollan gradualmente, a lo largo de varias horas o incluso días. Suceden cuando la precipitación prolongada satura el suelo y la capacidad de absorción se agota, lo que provoca que el exceso de agua se desplace por ríos y arroyos hacia zonas bajas. El aumento progresivo del caudal en el cauce puede superar su capacidad, causando desbordamientos y la acumulación de agua en áreas inundables por periodos prolongados. Este tipo de inundación genera principalmente daños materiales y económicos (Salas et al., 2004).
- Inundaciones súbitas (rápidas o flash floods): Se producen en lapsos muy cortos, desde minutos hasta pocas horas, generalmente por lluvias intensas y localizadas. La rapidez con que el agua se acumula en la superficie impide la infiltración, especialmente en áreas urbanas con gran porcentaje de superficies impermeables. Esto ocasiona que pequeñas cuencas o arroyos se conviertan en torrentes violentos, representando un alto riesgo para la vida humana y con potencial de causar daños severos en infraestructura y personas. La deforestación y la urbanización acelerada agravan este fenómeno (Salas et al., 2004; Chang, 2003).

1.5.3. Factores asociados a las inundaciones urbanas

Las inundaciones en zonas urbanas son fenómenos complejos que resultan principalmente de la interacción entre factores naturales y las modificaciones provocadas por la actividad humana. Uno de los principales factores es el aumento de superficies impermeables como pavimentos, calles y edificaciones, que reduce la capacidad de infiltración del agua en el suelo. Esto genera un incremento en el volumen de escorrentía superficial, la cual se desplaza

rápidamente sobre estas superficies, aumentando tanto la cantidad como la velocidad del agua que llega a los sistemas de drenaje y cauces urbanos (Li, Zhang, & Jiang, 2019).

La transformación del paisaje urbano modifica la hidrología natural, transformándola en una hidrología urbana caracterizada por un rápido escurrimiento y menor retención del agua. La infraestructura urbana, incluidas las redes de drenaje y el diseño del inmobiliario, condiciona el flujo del agua, concentrando los escurrimientos en ciertos puntos bajos, lo que puede provocar saturación y desbordamientos en zonas específicas de la ciudad (Wong & Brown, 2019).

Adicionalmente, la disminución de áreas verdes y espacios permeables reduce la capacidad natural del suelo para absorber el agua de lluvia. En ciudades con abundancia de vegetación y terrenos sin pavimentar, el agua tiene mayor oportunidad de infiltrarse, mitigando los efectos de las lluvias intensas. Sin embargo, en áreas altamente urbanizadas, donde predominan superficies impermeables, la escorrentía aumenta significativamente, elevando la frecuencia e intensidad de las inundaciones. Esto, junto con sistemas de drenaje insuficientes o mal diseñados, hace que el agua se acumule y provoque daños materiales y riesgos para la población (Li et al., 2019; Wong & Brown, 2019).

Finalmente, la contaminación de los cuerpos de agua urbanos también puede agravar las inundaciones, ya que los desechos sólidos y sedimentos obstruyen las vías de drenaje, reduciendo su capacidad y facilitando el desbordamiento durante eventos lluviosos.

La vulnerabilidad urbana por inundaciones en el arroyo 24 de junio se define como el grado de susceptibilidad que presentan las áreas urbanas a sufrir daños o afectaciones ante la ocurrencia de eventos de inundación. Este concepto integra tanto los factores físicos del peligro, representados por parámetros como la velocidad y el tirante del agua, como los factores sociales, ambientales, económicos y espaciales que determinan la habitabilidad y, en consecuencia, la capacidad de adaptación de la población. En este sentido, una manzana urbana es más vulnerable cuando presenta altos valores de velocidad y tirante combinados con una baja habitabilidad, lo que refleja limitaciones en infraestructura, servicios y condiciones socioeconómicas. Por el contrario, aquellas manzanas con mayor habitabilidad logran reducir su nivel de vulnerabilidad, ya que cuentan con mejores condiciones para enfrentar y adaptarse a los impactos de la inundación.

Capítulo 2. Marco de referencia

2.1. Los desastres y su impacto en la sociedad

El estudio de los desastres y su impacto en la sociedad se aborda desde múltiples perspectivas que integran tanto las ciencias naturales como las sociales. Por un lado, las ciencias exactas analizan los fenómenos naturales —como huracanes, sismos, inundaciones y tsunamis— que representan las amenazas físicas. Por otro lado, las ciencias sociales examinan cómo estos eventos afectan a las comunidades urbanas, considerando factores como la vulnerabilidad social, las condiciones económicas y la capacidad de respuesta y adaptación ante los desastres (Cutter et al., 2015).

La vulnerabilidad social en contextos urbanos se refiere a la susceptibilidad de la población a sufrir daños por desastres, determinada por factores como densidad poblacional, acceso limitado a servicios básicos, infraestructura deficiente, niveles de pobreza y marginalización, y falta de organización comunitaria. Comunidades urbanas con estas características son más propensas a experimentar pérdidas humanas, daños materiales y alteraciones en los servicios esenciales durante eventos extremos (Wisner et al., 2022).

El concepto de desastre no depende únicamente del fenómeno natural, sino de la interacción entre el evento y la vulnerabilidad social de las personas y bienes en riesgo. Por ejemplo, barrios urbanos ubicados cerca de arroyos o zonas inundables, con drenaje insuficiente y escasa planificación urbana, presentan mayor exposición y sensibilidad frente a inundaciones y huracanes.

En México, el impacto de desastres naturales está influenciado por la variabilidad climática y fenómenos como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), que modifican la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos. Históricamente, años con episodios fuertes de ENOS, como 1983 y 1998, registraron lluvias intensas que provocaron inundaciones y afectaciones significativas, particularmente en comunidades urbanas con alta vulnerabilidad social, donde la infraestructura y los servicios básicos son insuficientes (CNA, 2019).

De acuerdo con EM-DAT, el sismo del 19 de septiembre de 1985 tuvo el mayor número de víctimas fatales, seguido por inundaciones en 1959 y la erupción del volcán Parícutín en 1949. La sequía de 2011 afectó a 2.5 millones de personas, mientras que el sismo de 1985

involucró más de 2.1 millones de damnificados. El huracán Stan en 2005 afectó aproximadamente a 2 millones de habitantes. En términos económicos, el sismo de 2017 generó pérdidas estimadas en 6 000 millones de dólares, seguido por los huracanes Wilma, Manuel e Ingrid con 5 000 y 4 200 millones de dólares, respectivamente (Alcántara-Ayala, 2019).

Los registros de DesInventar para el periodo 1970–2013 contabilizaron 1 159 eventos en México. De estos, 567 (48.92%) estuvieron asociados a inundaciones, 408 (35.20%) a lluvias, 91 (7.85%) a sismos, 50 (4.31%) a tormentas, 23 (1.98%) a actividad volcánica, 19 (1.63%) a procesos de remoción en masa y 1 (0.08%) a tornado. Las entidades más afectadas fueron Veracruz, Oaxaca y Chiapas, con comunidades urbanas que presentan alta densidad poblacional, ocupación de zonas de riesgo y deficiente infraestructura de drenaje, lo que incrementa su vulnerabilidad social frente a desastres (ver figura 1) (Alcántara-Ayala, 2019).

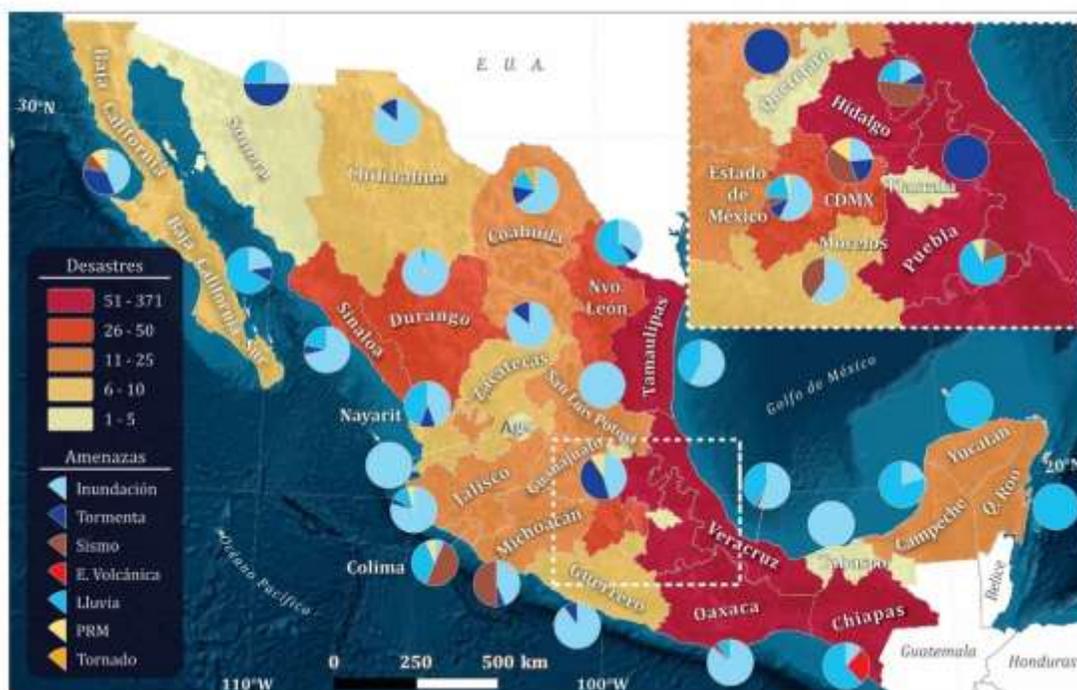


Figura 1. Número de desastres ocurridos en México durante el periodo 1970-2013 (Alcántara-Ayala, 2019)

2.2. Percepción del riesgo

La percepción del riesgo es el proceso mediante el cual los individuos o comunidades interpretan, evalúan y asignan significado a las amenazas a las que están expuestos, considerando tanto la probabilidad de ocurrencia como las posibles consecuencias de un evento peligroso (Slovic, 2000). Esta percepción no depende únicamente del peligro objetivo, sino que está fuertemente influenciada por factores sociales, culturales, económicos y psicológicos, que varían entre grupos sociales y regiones geográficas. Por ejemplo, la experiencia previa con desastres, el nivel de educación, la confianza en las instituciones y el acceso a información confiable modifican significativamente cómo se percibe el riesgo (Bubeck, Botzen & Aerts, 2012).

En el contexto urbano, y particularmente frente a inundaciones, la percepción del riesgo está estrechamente vinculada con la vulnerabilidad social de las comunidades. Aquellas poblaciones con bajos ingresos, infraestructura deficiente, servicios básicos insuficientes y limitada organización comunitaria suelen percibir el riesgo de manera diferente a las comunidades con mayor capacidad de adaptación. Esta percepción influye directamente en la disposición de los habitantes para tomar medidas preventivas y participar en programas de gestión de riesgos, así como en su capacidad para reaccionar eficazmente durante un desastre.

Una percepción del riesgo adecuada y realista puede motivar acciones preventivas como la mejora de la infraestructura, la modificación de hábitos de uso del espacio urbano y la participación en estrategias comunitarias de mitigación. Por el contrario, la subestimación o exageración del peligro puede derivar en falta de preparación, decisiones ineficaces o comportamientos contraproducentes (Bubeck et al., 2012).

Además, la percepción del riesgo es un fenómeno dinámico, que cambia con nuevas experiencias, información y transformaciones en el entorno social, económico y ambiental. Por ello, las estrategias de gestión de riesgos deben incluir educación, comunicación y participación comunitaria, enfocadas en fortalecer una percepción informada y responsable del riesgo, adaptada a las características de cada comunidad urbana y su nivel de vulnerabilidad social (Slovic, 2000).

2.3. Investigaciones sobre Vulnerabilidad en Contextos Urbanos

La vulnerabilidad en contextos urbanos ha cobrado creciente relevancia ante el aumento de eventos hidrometeorológicos extremos, como inundaciones, exacerbados por el cambio climático, el crecimiento urbano desordenado y la degradación ambiental. En ciudades como Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, la expansión urbana ha transformado el paisaje natural, reduciendo la capacidad de los suelos para infiltrar agua y aumentando el riesgo de acumulación superficial durante lluvias intensas.

El paisaje urbano se refiere a la infraestructura construida por la sociedad —calles, viviendas, redes de drenaje, servicios públicos y equipamiento urbano— que influye en la forma en que las ciudades responden a las amenazas. El paisaje social comprende las dinámicas humanas, incluyendo la distribución de la población, niveles de ingreso, educación, organización comunitaria y acceso a recursos y servicios. La interacción entre estos tres paisajes determina la vulnerabilidad social urbana, entendida como la susceptibilidad de las comunidades a sufrir daños frente a desastres, y su capacidad de adaptación y recuperación ante eventos extremos (Fernández, 2014).

En zonas con alta exposición a lluvias intensas y escasa planeación urbana, la vulnerabilidad urbana se concentra en sectores donde la infraestructura es deficiente, los servicios básicos son limitados y la población tiene menor capacidad de adaptación. La ocupación de laderas, márgenes de ríos o áreas sin drenaje adecuado aumenta la exposición y la sensibilidad de la población, elevando el riesgo de impactos recurrentes por inundación (Martínez et al., 2017).

Abordar la vulnerabilidad desde esta perspectiva integral permite identificar los factores físicos, sociales y ambientales que condicionan la exposición y sensibilidad del territorio, facilitando la planificación urbana, la inversión pública, la toma de decisiones comunitarias y el diseño de políticas públicas orientadas a reducir el riesgo y fortalecer la capacidad de adaptación de las comunidades urbanas.

2.4. Hidrología y/o inundaciones urbanas

2.4.1. Estudios sobre Hidrología Urbana

La hidrología urbana es una rama de la hidrología que estudia el comportamiento del agua en entornos urbanos, con especial atención al ciclo hidrológico alterado por las actividades humanas. Su enfoque principal es el análisis del escurrimiento superficial generado por la

precipitación en áreas urbanizadas, considerando factores como la impermeabilización del suelo, la modificación de cauces naturales y la implementación de infraestructura pluvial y sanitaria (Bertrand-Krajewski et al., 2008).

En estos entornos, el aumento de superficies impermeables como pavimentos y techos reduce significativamente la infiltración del agua al subsuelo y acelera el escurrimiento, lo que genera mayores caudales en menor tiempo. Este fenómeno incrementa el riesgo de inundaciones, erosión, contaminación del agua y fallas en los sistemas de drenaje. Por ello, la hidrología urbana emplea herramientas como modelos lluvia-escurrimiento, análisis de cuencas urbanas y simulaciones hidrodinámicas para evaluar el comportamiento del agua y proponer medidas de mitigación.

Un principio fundamental en esta disciplina es el de Impacto Hidrológico Cero, el cual establece que el desarrollo urbano no debe aumentar el caudal pico de escurrimiento respecto a las condiciones naturales previas a la urbanización. Según Angulo y Álvarez (2018), este principio implica la adopción de soluciones como pavimentos permeables, techos verdes, sistemas de infiltración local o almacenamiento temporal mediante vasos reguladores, con el fin de conservar el equilibrio hidrológico del sitio.

En México, algunas entidades han comenzado a integrar este enfoque en sus marcos normativos. Por ejemplo, el estado de Jalisco incorporó en 2014 el artículo 86-Bis a su Ley Estatal de Aguas, estableciendo la obligación de implementar el Impacto Hidrológico Cero en desarrollos urbanos. No obstante, a nivel nacional aún es limitada la incorporación sistemática de estos principios en la planificación territorial. Esto es particularmente crítico en estados como Chiapas, donde ciudades como Tuxtla Gutiérrez enfrentan un crecimiento urbano acelerado y una alta exposición a fenómenos hidrometeorológicos extremos sin contar con la infraestructura adecuada.

2.5. Estudios sobre la Vulnerabilidad e Inundaciones

2.5.1. Vulnerabilidad Urbana por inundaciones

Dentro del estudio de la vulnerabilidad urbana por inundaciones, se encuentran diversos enfoques y definiciones, tal como sugieren investigadores como Cutter (1993), quienes destacan la importancia de analizar cómo distintos factores contribuyen a la vulnerabilidad en contextos específicos. Al observar el caso de las áreas urbanas, se evidencia que la alta

densidad de población incrementa los riesgos, y que la urbanización acelerada amplifica los daños asociados a las lluvias intensas. Como lo menciona Dauphiné (2001), las ciudades concentran grandes cantidades de personas y estructuras en espacios reducidos, lo que intensifica el impacto de los eventos de inundación al reducir la capacidad de absorción del suelo. Esta impermeabilización provoca un aumento en el volumen de agua acumulada y la velocidad del flujo, lo cual es particularmente problemático en áreas donde las antiguas ramblas y barrancos han sido pavimentados y transformados en cauces urbanos.

A estos factores físicos se suma la falta de infraestructura adecuada de drenaje y saneamiento en áreas urbanas, especialmente en aquellas donde el crecimiento se ha dado de manera espontánea o sin una planificación adecuada. En áreas periféricas, como se observa en ciertos asentamientos de España, los barrios se establecen en terrenos económicos, muchas veces sin contar con sistemas de drenaje que puedan manejar las precipitaciones intensas. Como señala Lozano (2008), estas urbanizaciones suelen estar en desventaja al no disponer de infraestructuras de drenaje o saneamiento eficientes, lo cual obstruye los cauces naturales y genera una alta vulnerabilidad en las zonas donde habitan los sectores de menores ingresos, acentuando las disparidades sociales y económicas.

Así, la vulnerabilidad urbana por inundaciones es el resultado de una interacción compleja entre factores ambientales y sociales, en la que las condiciones de infraestructura, las desigualdades económicas y las dinámicas de urbanización sin planificación aumentan la susceptibilidad de ciertos sectores de la población. Esta combinación de factores da como resultado áreas urbanas altamente expuestas a las inundaciones y limitadas en su capacidad de respuesta y recuperación, especialmente en barrios con condiciones económicas desfavorables.

2.5.2. Métodos de Evaluación de la Vulnerabilidad Urbana

La evaluación de la vulnerabilidad urbana es un proceso fundamental para comprender los factores que condicionan el impacto potencial de amenazas hidrometeorológicas en los entornos urbanos. Este enfoque permite identificar las zonas con mayores niveles de exposición, fragilidad estructural y baja capacidad adaptativa, elementos que en conjunto definen la vulnerabilidad de una población ante fenómenos como las inundaciones.

Existen múltiples métodos para cuantificar esta vulnerabilidad, entre los que destacan los enfoques multicriterio, que combinan variables físicas, sociales, económicas y ambientales. Estas metodologías permiten construir índices compuestos que reflejan el grado de afectación potencial. Uno de los modelos más comunes considera tres componentes principales:

- **Exposición:** se refiere a la localización espacial de la población, la infraestructura y los bienes respecto al área afectada por la amenaza.
- **Fragilidad o sensibilidad:** indica la susceptibilidad de los elementos expuestos a sufrir daños, considerando la calidad de las viviendas, la condición de los servicios urbanos, o la estabilidad económica de la población.
- **Capacidad de adaptación:** representa la habilidad de la población y las instituciones para responder, recuperarse y adaptarse frente a eventos adversos. En este componente, un mayor valor implica menor vulnerabilidad.

En estos métodos, es común asignar valores en una escala ordinal (por ejemplo, de 1 a 3) para cada componente, y luego realizar un análisis ponderado o promedio para determinar el nivel global de vulnerabilidad por unidad espacial (manzanas, colonias, polígonos urbanos, etc.). El componente de capacidad de adaptación se suele considerar de manera inversa, dado que su incremento disminuye la vulnerabilidad total (Cardona et al., 2012).

Estos métodos permiten generar mapas de vulnerabilidad, útiles para la toma de decisiones, planificación urbana y priorización de intervenciones en zonas críticas. En el caso de Chiapas, dada su alta exposición a fenómenos hidrometeorológicos y su diversidad topográfica, el uso de evaluaciones integrales de vulnerabilidad resulta esencial para orientar políticas públicas de gestión de riesgos y ordenamiento territorial.

2.5.3. Geografía y uso de suelo

La geografía y el uso de suelo son factores determinantes en la vulnerabilidad urbana por inundaciones, ya que condicionan tanto la exposición de las comunidades como la capacidad de respuesta frente a eventos extremos. En este sentido, el paisaje urbano —entendido como la infraestructura construida, las redes de transporte, drenaje y servicios, así como la densidad y distribución de la población— interactúa directamente con las condiciones físicas del

territorio, modificando la manera en que el agua se desplaza y se acumula durante lluvias intensas.

En la microcuenca del arroyo 24 de junio, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, la expansión urbana ha transformado áreas que originalmente presentaban paisaje natural, caracterizado por suelos permeables y cobertura vegetal, hacia un paisaje construido con impermeabilización significativa y deficiente infraestructura pluvial. Esta transformación incrementa la acumulación superficial de agua y la exposición de las manzanas urbanas a inundaciones (García Benítez et al., 2022).

Asimismo, el paisaje social del territorio, comprendido por la distribución de la población, niveles de ingreso, acceso a servicios básicos y organización comunitaria, determina la vulnerabilidad social urbana. Sectores con mayor densidad poblacional, asentamientos irregulares o escasa planificación presentan menor capacidad de adaptación, lo que amplifica los impactos de las inundaciones sobre la infraestructura, los servicios y la seguridad de la población (Álvarez Trinidad, 2023).

Integrar la perspectiva del paisaje urbano en el análisis del uso de suelo permite comprender no solo dónde se producen las inundaciones, sino también cómo la configuración del territorio y las características socioespaciales potencian la vulnerabilidad urbana. Esta aproximación es esencial para diseñar estrategias de mitigación y planificación del territorio que reduzcan los riesgos y fortalezcan la capacidad de adaptación urbana en el área de estudio.

2.6. Investigaciones relacionadas con arroyos

2.6.1. Contexto geográfico y ambiental del arroyo 24 de junio

El arroyo 24 de junio forma parte de una microcuenca urbana ubicada en la zona norponiente de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. De acuerdo con el Instituto Ciudadano de Planeación Municipal de Tuxtla Gutiérrez (IC IPLAM, 2020), esta microcuenca abarca 58 colonias, lo que refleja una alta densidad de asentamientos humanos en su área de influencia.

El crecimiento urbano acelerado en esta zona ha modificado sustancialmente las condiciones naturales del terreno. La expansión de viviendas, vialidades y otras infraestructuras ha alterado la red de escurrimientos superficiales, reduciendo la infiltración y aumentando el

volumen de escurrimiento superficial. Estos cambios han generado afectaciones tanto en el comportamiento hidrológico del arroyo como en su capacidad de conducción, incrementando la probabilidad de inundaciones en temporadas de lluvias.

Para comprender de forma integral la problemática ambiental y de riesgo en la zona, se ha realizado la delimitación de la red hidrográfica principal, incluyendo sus afluentes urbanos. Este análisis permite evaluar cómo la urbanización ha interferido con los procesos hidrológicos naturales y cómo estas modificaciones influyen en la generación de vulnerabilidad urbana frente a eventos hidrometeorológicos.

La microcuenca presenta una orografía accidentada, caracterizada por la presencia de cañadas y pendientes pronunciadas que condicionan fuertemente los procesos de escurrimiento superficial. En cuanto a las características edáficas, el suelo predominante es de tipo calizo, con una cobertura delgada, escasa y con abundante material pedregoso. Estas condiciones se deben principalmente a la morfología del terreno y al alto grado de inclinación, lo que limita su capacidad de retención hídrica e infiltración, favoreciendo así la generación de esorrentía durante eventos de precipitación intensa.

La parte norte de la microcuenca 24 de junio está representada por las mayores elevaciones, donde aún es posible encontrar remanente de bosque y pastizales que ha quedado aislados de la zona urbana, la tala de árboles y la construcción de vías de comunicación. Hidrológicamente, los escurrimientos en esta microcuenca superan a la infiltración, por lo que se considera como una Zona Hidrográfica Natural (ZHN), con un área de 496612.80 m² y un perímetro de 3.78km (IC IPLAM, 2020).

Hacia el oeste, la microcuenca está delimitada por dos importantes vialidades urbanas: la Calzada al Sumidero y la 3^a Avenida Sur Oriente, las cuales actúan como divisorias naturales de aguas debido a su orientación y pendiente. Ambas vialidades presentan una dirección general de norte a sur y desembocan en el Libramiento Norte, lo que influye en el patrón de escurrimiento superficial. En cuanto al límite oriental, éste coincide parcialmente con los resultados del análisis morfométrico de pendientes, aunque presenta algunas modificaciones que amplían el área de estudio originalmente definida (IC IPLAM, 2020).

De acuerdo con registros de protección civil de Tuxtla Gutiérrez (Atlas, 2015; PDUCP, 2015) son diversas las colonias que son afectadas por inundaciones en esta microcuenca. Por ejemplo, la colonia 24 de junio, la colonia El Bosque, la colonia Grijalva Infonavit, donde el número de viviendas afectadas fue de aproximadamente 138, 40 y 212, respectivamente (ver figura 2) (Mora et al., 2023).

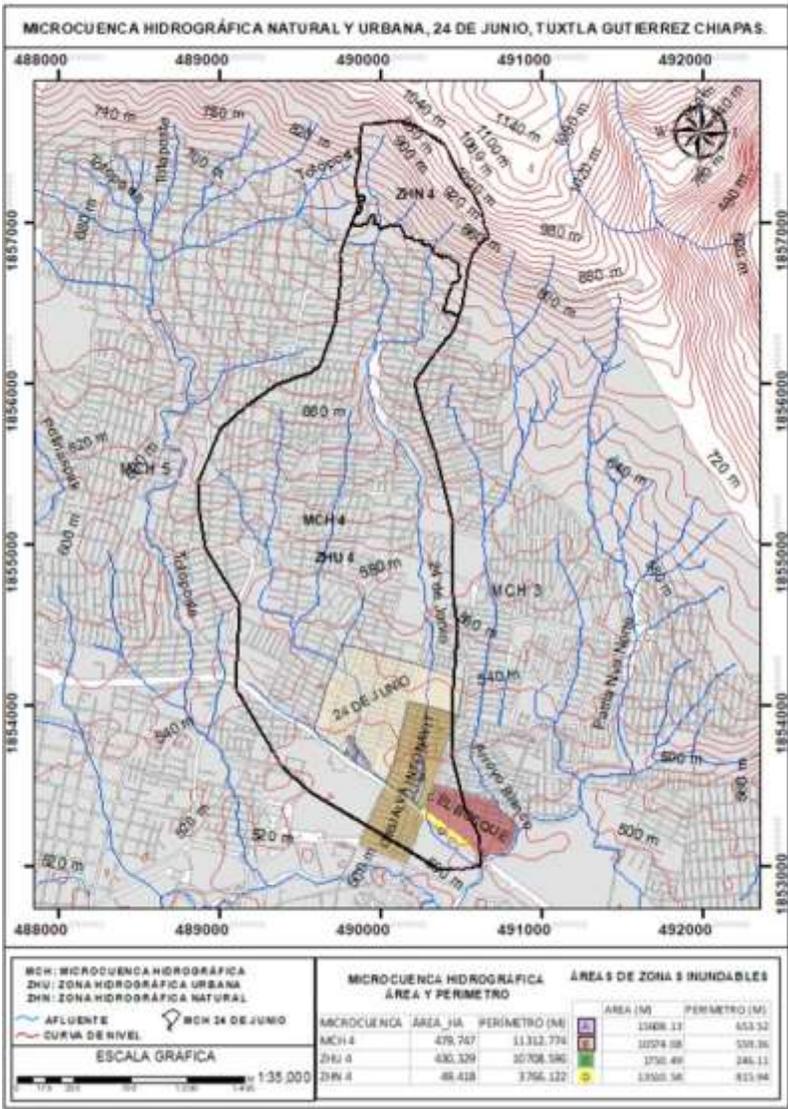


Figura 2. Microcuenca Hidrográfica 24 de junio con la ubicación de: ZHN4, Zona Hidrográfica Natural; ZHU4, Zona Hidrográfica Urbana; Zonas en peligro de inundación (A, B, C y D); sus respectivas áreas y las Colonias afectadas (24 de junio, Grijalva Infonavit y El Bosque) (Mora et al., 2023).

2.6.2. Estudios de Vulnerabilidad Urbana en el Área del Arroyo 24 de junio

El área del Arroyo 24 de junio está dividida en tres zonas hidrográficas urbanas denominadas Zona Hidrográfica Urbana 1 (ZHU1), Zona Hidrográfica Urbana 2 (ZHU2) y Zona Hidrográfica Urbana 3 (ZHU3). Estas zonas representan las diferentes rutas por las cuales el agua pluvial se desplaza a través de cauces naturales y vialidades urbanas, conduciéndose finalmente hacia las áreas más bajas del territorio. Todas estas zonas descargan en el libramiento norte de Tuxtla Gutiérrez, un punto donde se acumula el agua, generando zonas identificadas como en peligro de inundación, clasificadas como A, B, C y D. En este punto, el flujo de agua cambia su dirección hacia el oeste debido a una estructura que actúa como barrera, facilitando que el agua se distribuya hacia otras áreas susceptibles de inundación (Mora et al., 2023).

La Zona Hidrográfica Urbana 1 está vinculada principalmente con la inundación en la Zona A, en la que se ha determinado una vulnerabilidad social que afecta a 425 personas y una vulnerabilidad física relacionada con 138 viviendas ubicadas en la colonia 24 de junio. Además, el agua que recorre esta zona continúa su flujo por el libramiento, contribuyendo a la inundación en la Zona B (Mora et al., 2023).

Por otro lado, la Zona Hidrográfica Urbana 2 descarga sus aguas en la Zona B, donde la vulnerabilidad social afecta a aproximadamente 649 personas y la vulnerabilidad física involucra alrededor de 212 viviendas (Mora et al., 2023).

Finalmente, la Zona Hidrográfica Urbana 3 desemboca en las Zonas C y D. En la Zona C, la vulnerabilidad social alcanza a 139 personas y la vulnerabilidad física a 40 viviendas correspondientes a la colonia El Bosque. En la Zona D, la vulnerabilidad física se refiere principalmente a los vehículos que circulan o permanecen estacionados en la lateral y el libramiento norte, mientras que la vulnerabilidad social incluye a las personas que viajan en dichos vehículos o que transitan a pie por estas áreas urbanas (ver figura 3) (Mora et al., 2023).

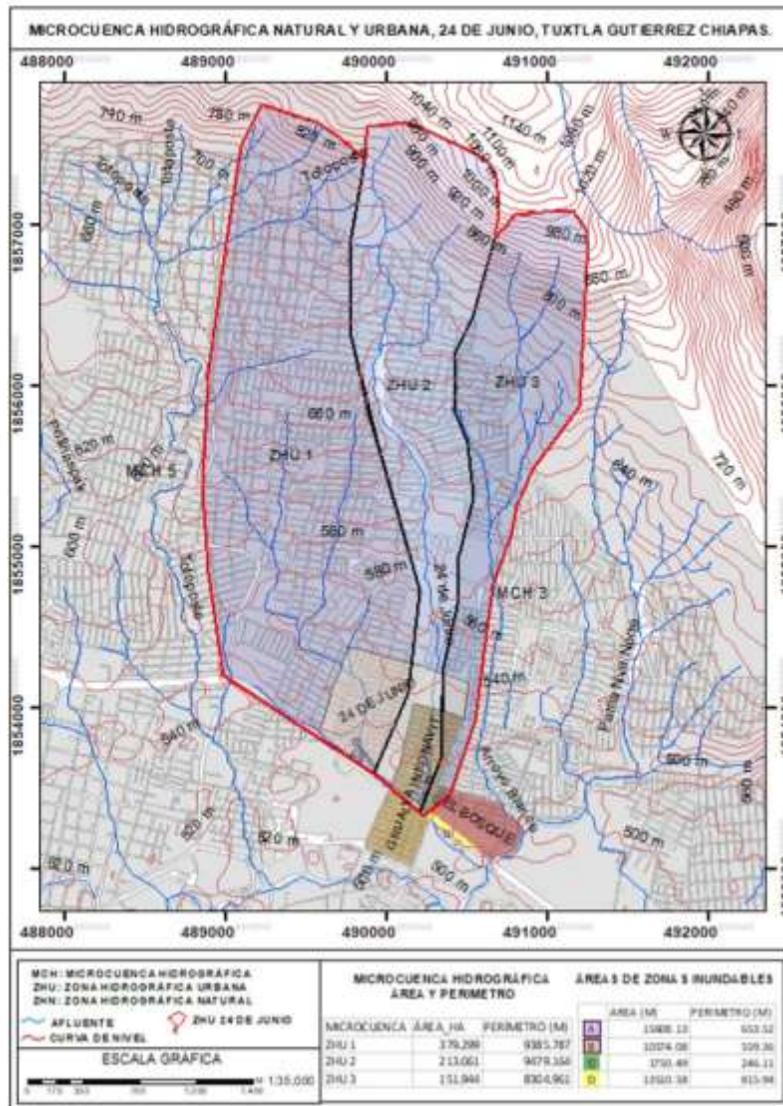


Figura 3. Microcuenca Hidrográfica 24 de junio con la ubicación de: ZHN4, Zona Hidrográfica Natural; ZHU4, Zona Hidrográfica Urbana; Zonas en peligro de inundación (A, B, C y D); sus respectivas áreas y las Colonias afectadas (24 de junio, Grijalva Infonavit y El Bosque) (Mora et al., 2023).

2.7. Descripción de la Zona de Estudio: Calle Ricardo Flores Magón y Arroyo 24 de junio

2.7.1. Fundación y Toponimia

Tuxtla Gutiérrez, la capital del estado de Chiapas, tiene sus raíces en la época prehispánica, cuando los aztecas invadieron la región en 1486 y 1505, destruyendo la ciudad de Coyatoc y renombrándola Tochtlán, que significa "lugar de conejos". Posteriormente, los españoles adaptaron este nombre a Tuxtla. Los indígenas zoques fueron los primeros fundadores, y la

actual denominación de Tuxtla Gutiérrez incluye el apellido de Joaquín Miguel Gutiérrez, un ilustre federalista que desempeñó un papel importante en la historia de la región (INEGI, 2020).

2.7.2. Condiciones Climáticas

Tuxtla Gutiérrez tiene un clima cálido subhúmedo, caracterizado por lluvias de verano. Durante los meses de mayo a octubre, las temperaturas mínimas promedio oscilan entre 15 y 18 °C, mientras que las máximas fluctúan entre 27 y 30 °C. La precipitación media en este periodo varía entre 900 y 1,000 mm. En los meses de noviembre a abril, las temperaturas mínimas se mantienen por encima de los 12 °C, y las precipitaciones son considerablemente menores, con promedios de 25 a 50 mm (INEGI, 2020).

2.7.3. Geografía y Uso del Suelo

La microcuenca del Arroyo 24 de junio se encuentra en una zona caracterizada por un relieve accidentado, marcado por cañadas profundas y pendientes pronunciadas que condicionan el escurrimiento natural del agua. La orografía juega un papel fundamental en la dinámica hidrológica local, ya que las pendientes aceleran el flujo superficial, aumentando la velocidad del agua y su capacidad erosiva en ciertos puntos críticos.

El tipo de suelo predominante en esta zona es calizo, con una capa superficial delgada, escasa y pedregosa, resultado tanto de la composición geológica como de la continua erosión causada por el agua y la inclinación del terreno. Esta característica limita la capacidad del suelo para infiltrar el agua, lo que favorece la escorrentía rápida y la concentración de flujos hacia los cauces urbanos.

En cuanto al uso del suelo, la microcuenca ha experimentado un proceso acelerado de urbanización, donde áreas originalmente naturales o agrícolas han sido transformadas en zonas residenciales, comerciales y vialidades. Esta expansión ha provocado la reducción de zonas verdes y la impermeabilización de la superficie, lo que disminuye aún más la infiltración natural y aumenta el volumen y velocidad del agua que llega al arroyo durante eventos lluviosos.

Además, la fragmentación del territorio por infraestructuras urbanas como calles y viviendas ha modificado el curso original del arroyo, canalizando el agua por zonas no previstas y

generando cuellos de botella en su recorrido. Esto contribuye directamente a la ocurrencia de inundaciones en las colonias aledañas, afectando tanto a la infraestructura como a la población.

La combinación de estas condiciones geográficas con el cambio en el uso del suelo resalta la importancia de implementar estrategias de ordenamiento territorial y manejo sustentable de la microcuenca para mitigar los riesgos asociados a las inundaciones (IC IPLAM, 2020; Mora et al., 2023).



Figura 4. Urbanización y deforestación provocan inundaciones Chacón, 2024; Martínez, 2024).

Capítulo 3. Metodología para la Evaluación Integral de la Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones

3.1. Levantamiento Topográfico y Generación del Modelo Digital de Elevación (MDE)

Para generar una representación precisa del relieve y las estructuras de la microcuenca, se realizó un levantamiento topográfico mediante un vehículo aéreo no tripulado (UAV, por sus siglas en inglés) DJI Mavic 3 Enterprise, complementado con una estación de referencia DRTK 2. Este equipo registra información del terreno con alta precisión, que son esenciales para modelar la distribución y comportamiento del flujo durante eventos de escorrentía e inundación.

La planificación del vuelo fue un paso crítico en el levantamiento topográfico, ya que determinó las áreas que debían capturarse para obtener una visualización completa y detallada del área de estudio. Con el objetivo de evaluar la vulnerabilidad en las zonas más expuestas, se delimitaron las manzanas de interés con una extensión de 150 metros a la izquierda y 150 metros a la derecha del cauce del arroyo 24 de junio (ver tabla 1), tomando como eje la calle Ricardo Flores Magón. Esta delimitación fue diseñada para incluir tanto el cauce del arroyo como las manzanas adyacentes, asegurando que todas las zonas potencialmente afectadas por una crecida estuvieran representadas en el levantamiento (ver figura 5).

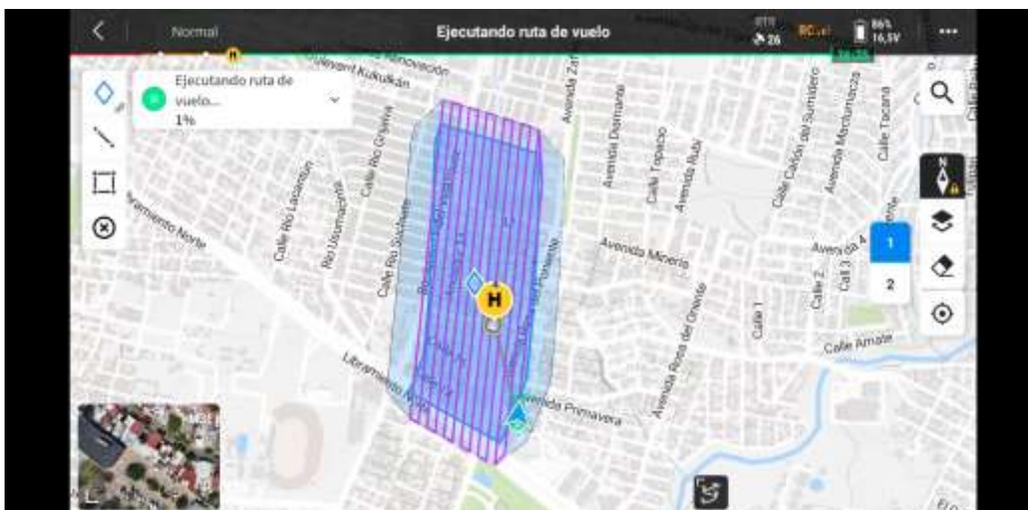


Figura 5. Plan de vuelo de la zona de estudio. Fuente propia, 2025.

Tabla 1. Área del polígono que incluye el plan de vuelo de la zona de estudio. Fuente propia, 2025.

V	Coordenadas	
	X	Y
1	1,853,988.48	490,433.27
2	1,853,667.02	490,412.63
3	1,853,509.29	490,396.46
4	1,853,377.02	490,345.88
5	1,853,331.20	490,320.66
6	1,853,475.85	490,057.84
7	1,853,503.52	490,073.07
8	1,853,579.36	490,102.07
9	1,853,691.94	490,113.61
10	1,853,992.60	490,132.91
11	1,854,057.21	490,130.54
12	1,854,184.59	490,135.75
13	1,854,237.00	490,151.58
14	1,854,150.29	490,438.77
15	1,854,134.31	490,433.95
16	1,854,056.58	490,430.77
1	1,853,988.48	490,433.27
SUPERFICIE = 241,699.68 m²		

El dron fue pilotado a una altura de 60 metros con el fin de capturar imágenes aéreas con una resolución espacial de 2.4 cm por píxel. Esta resolución fue cuidadosamente seleccionada considerando un balance entre el nivel de detalle requerido y la cobertura del área de estudio; una resolución de 2.4 cm por píxel permite registrar con precisión características del relieve, edificaciones, vegetación y demás estructuras urbanas, lo cual es fundamental para generar un Modelo Digital de Elevación (MDE) detallado y confiable (ver figura 6). Esta calidad de resolución facilita la identificación de elementos pequeños y la representación fiel del terreno, aspectos clave para el análisis geomorfológico y urbano.



Figura 6. Ejecución del plan de vuelo de la zona de estudio. Fuente propia, 2025.

El procesamiento de las imágenes capturadas con el dron se llevó a cabo utilizando el software Pix4D, con el cual se generó una nube de puntos tridimensional (ver figura 7) que sirvió como base para la creación tanto del Modelo Digital de Elevación (MDE) como del Modelo Digital de Superficie (MDS) (ver figura 8). Para mejorar la precisión y utilidad del modelo, se aplicaron técnicas de filtrado y limpieza de la nube de puntos, eliminando datos que correspondían a objetos no permanentes del entorno urbano, como vegetación y vehículos, con el fin de obtener una representación más fiel del terreno y las estructuras permanentes.

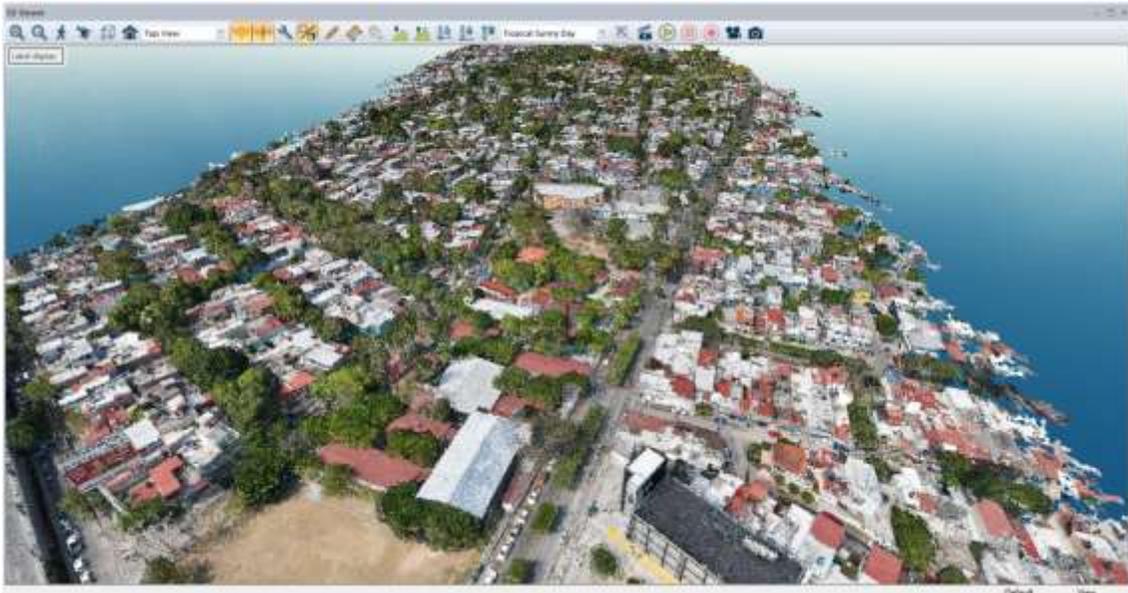


Figura 7. densificación de la nube de puntos. Fuente propia, 2025.

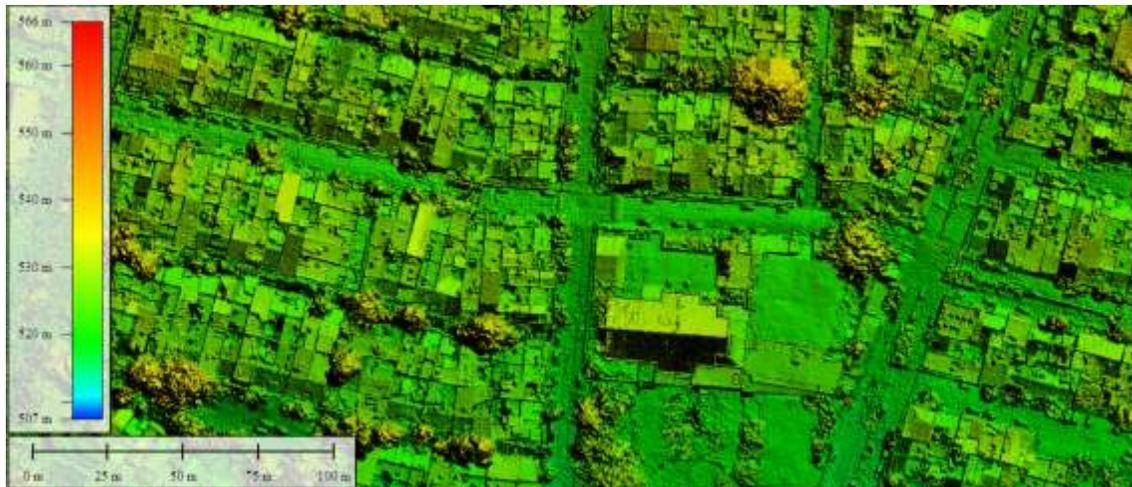


Figura 8. Modelo digital de superficie de la zona de estudio. Fuente propia, 2025.

Para garantizar la precisión del modelo digital de superficie de la zona de estudio, fue necesario realizar la limpieza de la nube de puntos. Este proceso consistió en eliminar todos los puntos que no representaban elementos permanentes del terreno, tales como vegetación alta y objetos móviles. La limpieza se llevó a cabo de forma manual y automatizada mediante filtros de eliminación de ruido (ver figura 9). Esta fase fue crucial para obtener un modelo libre de interferencias, que reflejara de forma adecuada las características del terreno.

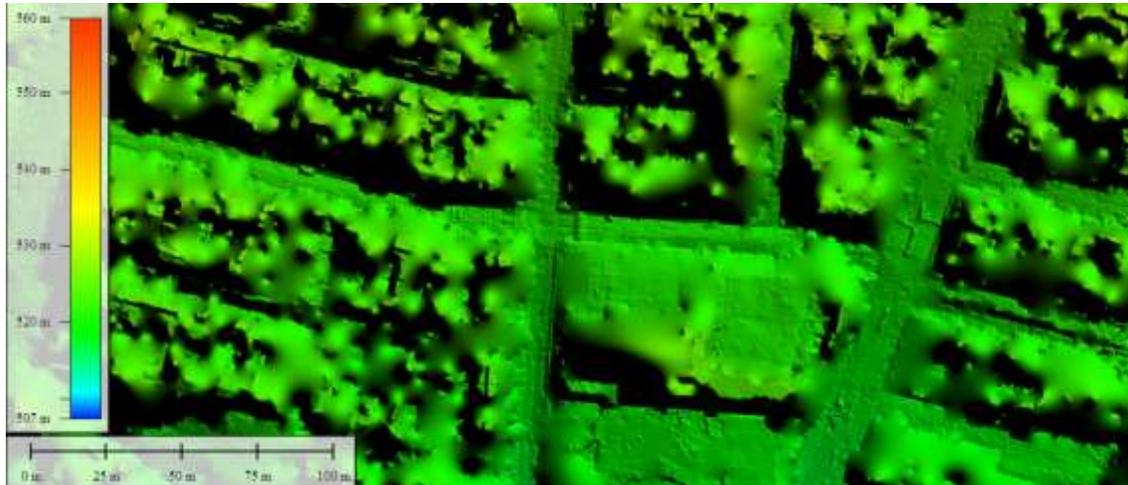


Figura 9. Modelo digital de terreno de la zona de estudio. Fuente propia, 2025.

La validación del MDE se llevó a cabo mediante la recolección de puntos de control en el terreno utilizando equipos GNSS de alta precisión, con capacidad para obtener coordenadas tridimensionales (X, Y, Z) con un margen de error centimétrico. Estos puntos de control se seleccionaron estratégicamente en diferentes zonas representativas del área de estudio, incluyendo áreas planas, pendientes pronunciadas y zonas urbanas con diversas coberturas.

Posteriormente, las coordenadas de elevación obtenidas en campo fueron comparadas con las elevaciones correspondientes extraídas del MDE en las mismas ubicaciones. Para esta comparación se utilizó un análisis estadístico que incluyó el cálculo del error medio absoluto (EMA), la desviación estándar y el error máximo, con el objetivo de cuantificar la precisión y confiabilidad del modelo digital.

La validación mostró que las diferencias entre las elevaciones de campo y las del MDE se encontraban dentro de un rango aceptable para los fines del estudio, garantizando que el modelo reflejaba con precisión la topografía real del terreno. Este MDE validado se integró posteriormente en las fases de modelación hidrológica e hidráulica para simular la dinámica de la escorrentía y el comportamiento del flujo bajo distintos escenarios de inundación.

3.2. Delimitación de la Microcuenca y modelación hidrológica

Para cubrir la totalidad del área de estudio, fue necesario utilizar el Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR a escala 1:10,000, identificado con la clave E15C59F3

y correspondiente al municipio de Tuxtla Gutiérrez (ver figura 10). Este MDE, se encuentra disponible en la plataforma del INEGI (<https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/>) (INEGI, 2011).

El procesamiento del MDE y la información LIDAR dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG) permitió delimitar la microcuenca del área de estudio, así como obtener diferentes parámetros hidrológicos.

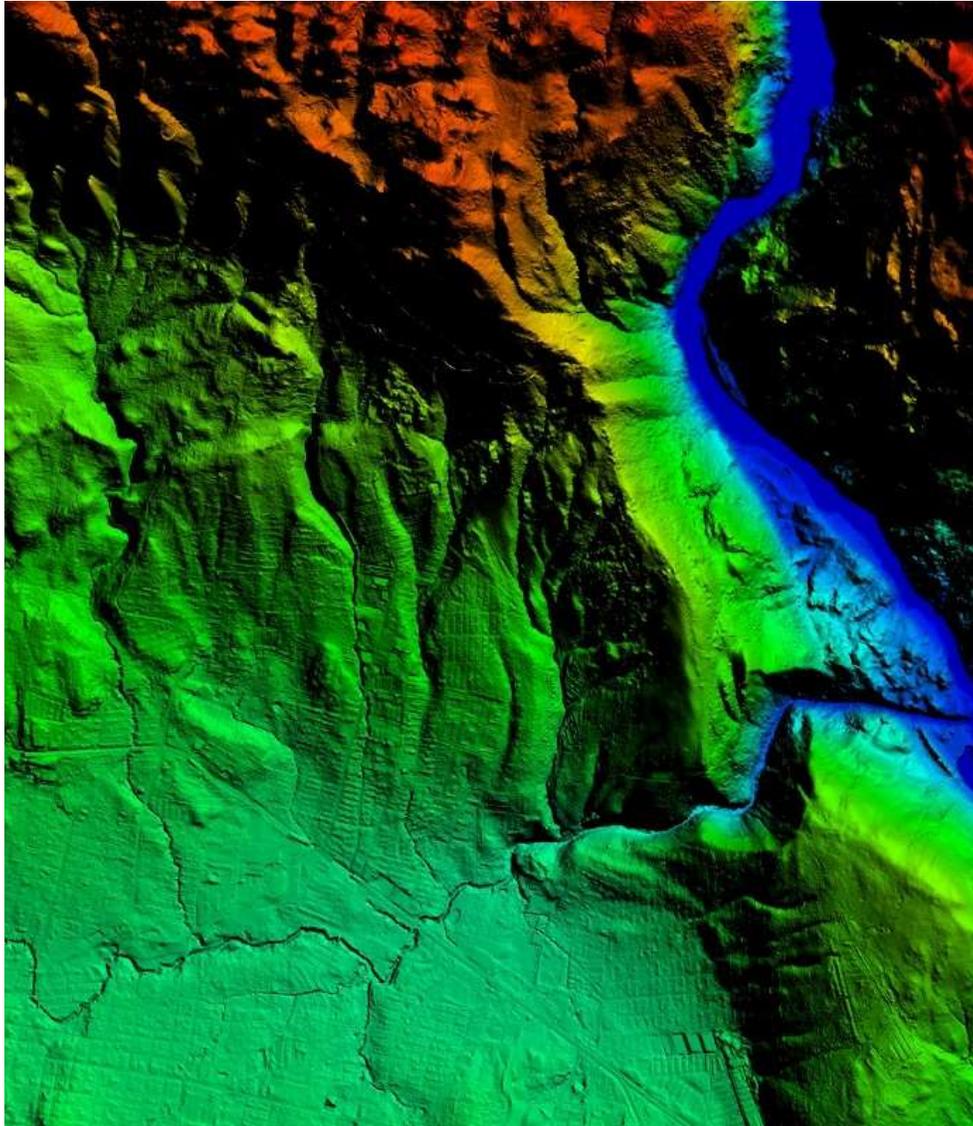


Figura 10. Modelo Digital de Elevación LiDAR de la zona nororiente del Municipio de Tuxtla Gutiérrez (INEGI, 2011)

Con base en la delimitación del área de captación (cuenca), se estableció un radio de análisis que incluyó las manzanas aledañas en 150 metros a ambos lados del arroyo 24 de junio. Esta extensión garantizó que se incluyeran todas las áreas residenciales potencialmente afectadas, permitiendo modelar cómo el flujo de agua podría impactar las construcciones en ambos márgenes del cauce.

Algunos parámetros morfológicos obtenidos con software especializados se utilizaron para describir los componentes físicos de la microcuenca de estudio y para su modelación hidrológica. De acuerdo con Chow et al. (1994), estos parámetros se pueden definir como:

- **Área de la Cuenca:** Corresponde a la superficie total de captación que aporta flujo al cauce. Su determinación es esencial para estimar el volumen de agua generado por la escorrentía (ver figura 11).
- **Pendiente Media de la Cuenca:** Representa los cambios en la elevación del terreno. Este parámetro influye directamente en la velocidad de escorrentía. En pendientes pronunciadas, la velocidad de los escurrimientos será mayor que en pendientes suaves.
- **Longitud del Cauce Principal:** Representa la distancia que recorre un flujo de agua, desde el punto más alejado de la cuenca hasta su salida. Este valor es clave para calcular el tiempo de concentración, el cual determina la rapidez con la que el agua podría recorrer la longitud de un río.
- **Dirección y Sentido del Flujo:** Define la dirección natural de los escurrimientos de acuerdo con la orografía, permitiendo analizar la distribución espacial de los escurrimientos y los posibles puntos críticos por acumulación.

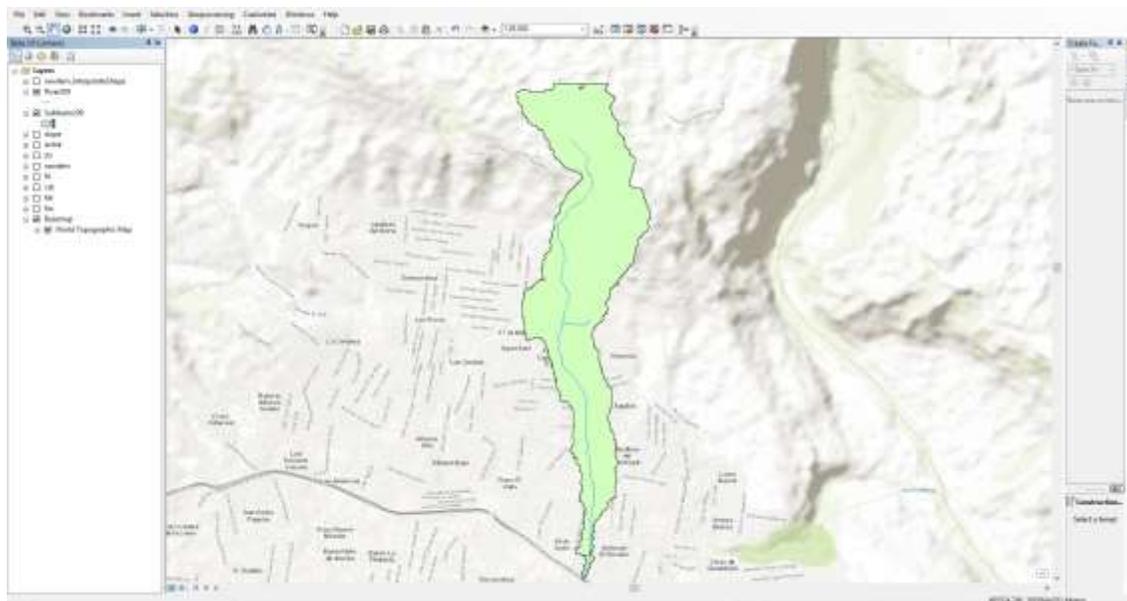


Figura 11. Red hídrica de la microcuenca 24 de junio. Fuente propia, 2025.

Para determinar niveles de infiltración y escurrimiento, se analiza cómo influyen las coberturas de suelo y sus características física (edafología) en la capacidad de infiltrar/escurrir el agua de lluvia. La información de cobertura se obtuvo del Conjunto de Datos de Uso de Suelo y Vegetación (Serie VII) a una escala de 1:250,000, disponible en el portal de metadatos del INEGI (<http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos>). Este conjunto de datos permitió identificar y clasificar tipos de vegetación y uso del suelo para evaluar su capacidad de infiltración y retención de agua.

Adicionalmente, se utilizó información del Conjunto de Datos Vectorial Edafológico Serie II a escala 1:250,000 disponible en el portal de INEGI (<https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>). Esta capa proporcionó información sobre las características físicas de los suelos (capacidad de infiltración).

Aunque, existen diferencias en la escala y resolución de los datos utilizados, ante la ausencia de información se utilizaron los conjuntos de datos disponibles para caracterizar la microcuenca.

Tipos de coberturas de suelo identificados para la microcuenca de estudio

- Bosque de coníferas (pino y táscate): Localizados principalmente en la zona norte, donde se conservan terrenos naturales y pendientes pronunciadas. Esta cobertura tiene una alta capacidad de infiltración debido a la densa vegetación y suelos bien estructurados, que favorecen la absorción y retención del agua.
- Bosque de encino y bosque de galería: También situados en el norte, especialmente en áreas cercanas a los cauces naturales. Presentan una capacidad moderada a alta de infiltración, gracias a la protección que brinda la vegetación y la humedad constante del suelo.
- Selva baja caducifolia, subcaducifolia y matorral subtropical: Se ubican en transiciones entre el norte natural y el sur urbano, con capacidad moderada de infiltración, influenciada por la cobertura vegetal y la condición del suelo.
- Suelo desnudo: Predomina en áreas específicas con erosión o degradación, principalmente en zonas intermedias hacia el sur. La infiltración es baja debido a la falta de cobertura vegetal, aumentando el escurrimiento superficial.
- Tierras agrícolas: Se encuentran mayormente en las áreas periféricas del norte, adyacentes a las zonas naturales. La capacidad de infiltración varía según las prácticas agrícolas, aunque en general es moderada a baja si el suelo está compactado o sin cobertura protectora.
- Área urbana y construida: Se concentra al sur de la microcuenca, donde predominan pavimento y edificaciones. Estas superficies impermeables presentan una capacidad casi nula de infiltración, incrementando el escurrimiento y potencialmente agravando las inundaciones en las zonas bajas.

3.3. Análisis Pluviométrico

Realizar el análisis pluviométrico en la zona de estudio, permitirá identificar cambios en la distribución espacial y temporal de la lluvia. Esta información es útil para la caracterización de eventos intensos asociados con inundaciones. Los registros históricos de lluvia diaria se obtuvieron de la estación climatológica Tuxtla Gutiérrez (CFE) 7176 (ver figura 12), localizada a 2.5 km del área de estudio monitoreada por el Servicio Meteorológico Nacional. Esta estación proporciona registros de un período de 47 años (1970-2017). Los registros se obtuvieron de la base de datos de CLICOM:

https://smn.conagua.gob.mx/tools/RECURSOS/Normales_Climatologicas/EstacionesClimatologicas.kmz (SMN, 2025).

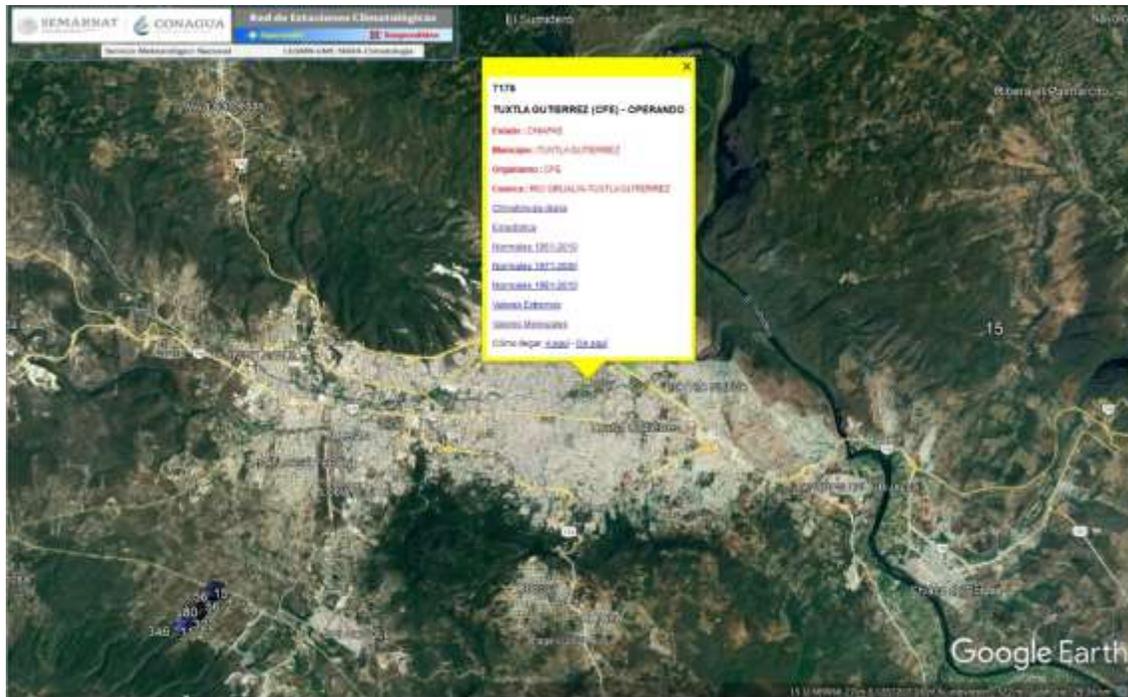


Figura 12. Ubicación de la estación climatológica convencional ACALA 7003 (CONAGUA, 2020)

Para extrapolar los registros de lluvia máxima a distintos periodos de retorno, se utilizó la función de distribución de probabilidad tipo Gumbel. Esta función es comúnmente empleada en hidrología para el análisis de eventos extremos, debido a su capacidad para modelar adecuadamente la distribución estadística de máximos anuales de precipitación (Chow et al., 1994). La elección de la distribución de Gumbel responde a que facilita la estimación confiable de eventos raros, es decir, precipitaciones que ocurren con baja frecuencia, pero con alta intensidad, aspectos fundamentales para el diseño y evaluación de infraestructura hidráulica y para la gestión de riesgos de inundación en zonas urbanas.

El ajuste con la función de Gumbel permitió estimar las láminas de lluvia correspondientes a periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años (ver tabla 2). Estos periodos de retorno se seleccionaron porque representan rangos comúnmente utilizados en estudios hidrológicos y de gestión de riesgos para evaluar la recurrencia de eventos extremos, equilibrando la probabilidad de ocurrencia con la planificación de medidas de mitigación. Por ejemplo,

eventos de 2 y 5 años reflejan lluvias frecuentes que pueden afectar la operatividad cotidiana, mientras que eventos de 50 o 100 años representan eventos extremos poco frecuentes, pero de alto impacto, cruciales para el diseño estructural y la protección urbana.

Tabla 2. Lámina de lluvia estimada para distintos periodos de retorno. Fuente propia, 2025.

Periodo de Retorno (años)	Lámina de Lluvia (mm)
2	70.27
5	92.04
10	106.45
20	120.28
50	138.17
100	151.58

Posteriormente, estos valores de lámina de precipitación ajustados mediante la aplicación de factores de reducción por área (FRA). Esta corrección es necesaria porque la intensidad de la precipitación tiende a disminuir a medida que se incrementa el área de la cuenca considerada, debido a la dispersión espacial y temporal de los eventos de lluvia. La utilización del FRA permite adaptar las láminas estimadas a la escala específica de la microcuenca estudiada, logrando una representación más precisa del evento hidrológico real que afecta dicha área.

A partir de los valores de lluvia ajustada, se diseñan hietogramas sintéticos utilizando el método del bloque alterno. Esta técnica permite organizar las intensidades de lluvia de forma descendente desde el centro del evento hacia los extremos. Este método es ideal para simular tormentas de diseño que reflejan las condiciones de precipitación más críticas para una cuenca.

Para integrar los datos pluviométricos a un modelo hidrológico, es necesario realizar la transformación los valores de la lámina de lluvia a intensidad. Para realizar este procedimiento, se utilizó la fórmula de Aparicio (ver ecuación 2) (1992):

$$I = \frac{h_p}{d} \quad (2)$$

Donde:

- I es la intensidad de lluvia (mm/h).
- h_p es la altura de precipitación (mm).
- d es la duración de la lluvia (horas).

Para evaluar la eficiencia del proceso de transformación de unidades, el resultado que se obtenga, se comparará con los valores de las isoyetas de intensidad-duración-periodo de retorno publicadas por la SCT (1990) para el estado de Chiapas (ver figura 13).

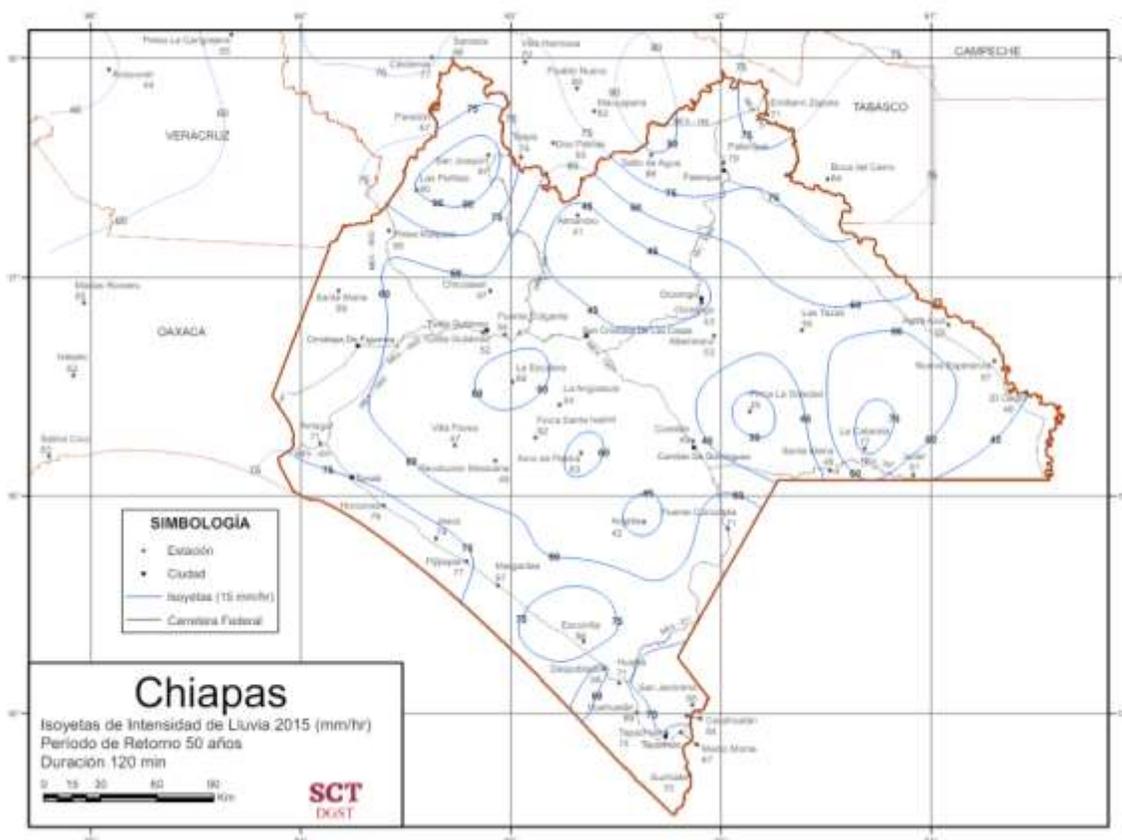


Figura 13. Isoyetas de Intensidad - Duración - Periodo de Retorno para la República Mexicana elaboradas por la SCT para el estado de Chiapas (SCT,1990).

Los datos pluviométricos obtenidos alimentaron el modelo hidrológico en HEC-HMS, permitiendo simular los volúmenes de escurrimiento superficial y los caudales generados para diferentes escenarios de periodos de retorno. Esta modelación hidrológica constituyó la

base para la siguiente etapa de análisis hidráulico con HEC-RAS, en la que se evaluó el comportamiento del flujo dentro del cauce y las zonas urbanas adyacentes, lo cual fue fundamental para el análisis integral de la vulnerabilidad urbana ante inundaciones.

3.4. Modelación Hidrológica en HEC-HMS

En este estudio se utilizó el software HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del USACE, debido a su amplia aplicación en el modelado de cuencas urbanas, su compatibilidad con herramientas GIS y su capacidad para simular eventos extremos de precipitación.

El objetivo de esta modelación fue estimar los caudales generados ante distintos escenarios de lluvia, previamente ajustados a periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años. Para ello, se integraron distintos insumos geospaciales y climáticos, entre los que destacan:

- Modelo Digital de Elevación (MDE) limpio y corregido, para delimitar la cuenca y definir el flujo superficial.
- Datos de precipitación máximas diarias y sus ajustes probabilísticos por Gumbel.
- Información de coberturas de suelo y características edafológicas, utilizadas para asignar parámetros de infiltración y escurrimiento.
- Curvas Número (CN) derivadas del método del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del USDA, asignadas en función del tipo de uso de suelo y características del suelo.
- Tiempo de concentración y pendiente media, calculados mediante herramientas GIS.

Se configuró un modelo compuesto por subcuencas, nodos de flujo y reaches (tramos de escurrimiento), representando fielmente la morfología de la microcuenca. Posteriormente, se definieron eventos de lluvia sintéticos para cada periodo de retorno, simulando los hidrogramas de escurrimiento en los puntos críticos de salida del sistema como es el caso del hidrograma de escurrimiento para una lluvia con periodo de retorno de 5 años (ver figura 14).

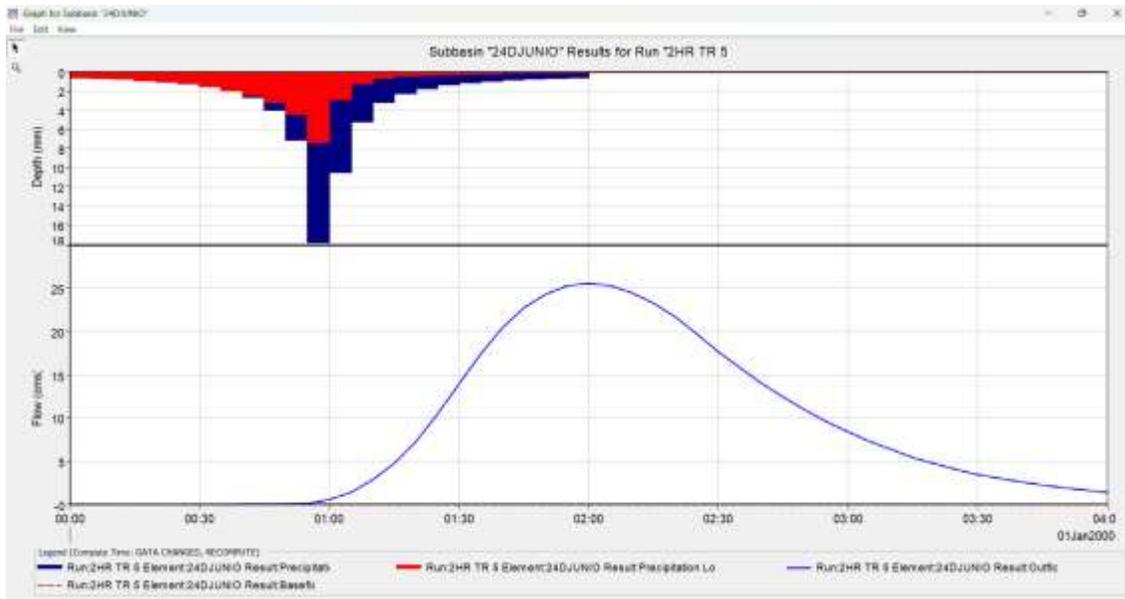


Figura 14. interfaz del modelo hidrológico de escorrentía de la microcuenca 24 de junio para una lluvia con periodo de retorno de 5 años HEC-HMS(USACE, 2021). Fuente propia, 2025.

3.5. Modelación Hidráulica en HEC-RAS para Simulación de Inundaciones

Una vez obtenidos los hidrogramas de escurrimiento en HEC-HMS se procedió a la modelación hidráulica utilizando el software HEC-RAS en su versión 6.0 desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del USACE el cual permite simular el comportamiento del flujo a través de canales naturales o artificiales empleando ecuaciones unidimensionales o bidimensionales de flujo de Saint-Venant y es ampliamente utilizado en estudios de inundabilidad. El propósito fue representar la propagación del flujo en la red de drenaje del arroyo 24 de junio simulando las condiciones hidráulicas generadas por lluvias con distintos periodos de retorno de 2 5 10 20 50 y 100 años. Para ello se integraron diversos insumos técnicos como el Modelo Digital de Elevación corregido que permitió generar la grilla de cálculo del terreno los hidrogramas de entrada generados previamente la geometría del cauce obtenida del levantamiento topográfico con dron y complementada con imágenes satelitales así como los coeficientes de rugosidad de Manning asignados según el tipo de cobertura de suelo y las condiciones físicas del cauce y sus márgenes y las condiciones de frontera aguas abajo consideradas como flujo normal o cota fija dependiendo del relieve. La simulación se ejecutó bajo un enfoque hidrodinámico bidimensional lo cual permitió modelar tanto la dirección como la velocidad del flujo en superficie aspecto clave para identificar zonas de

desbordamiento expansión lateral del agua profundidad del tirante y vectores de velocidad. Los resultados obtenidos permitieron caracterizar la respuesta hidráulica de la microcuenca ante eventos extremos y evaluar espacial y temporalmente los patrones de inundación generando cartografía útil para el análisis de vulnerabilidad urbana y para la identificación de escenarios de riesgo diferenciados a nivel de manzana.

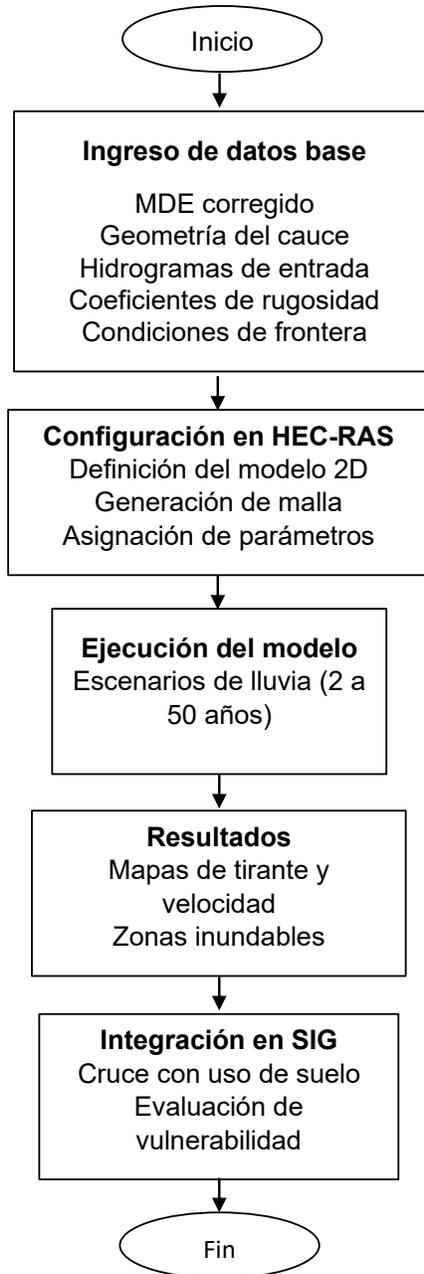


Figura 15. Diagrama de flujo – Modelación Hidráulica en HEC-RAS (USACE, 2023). Fuente propia, 2025.

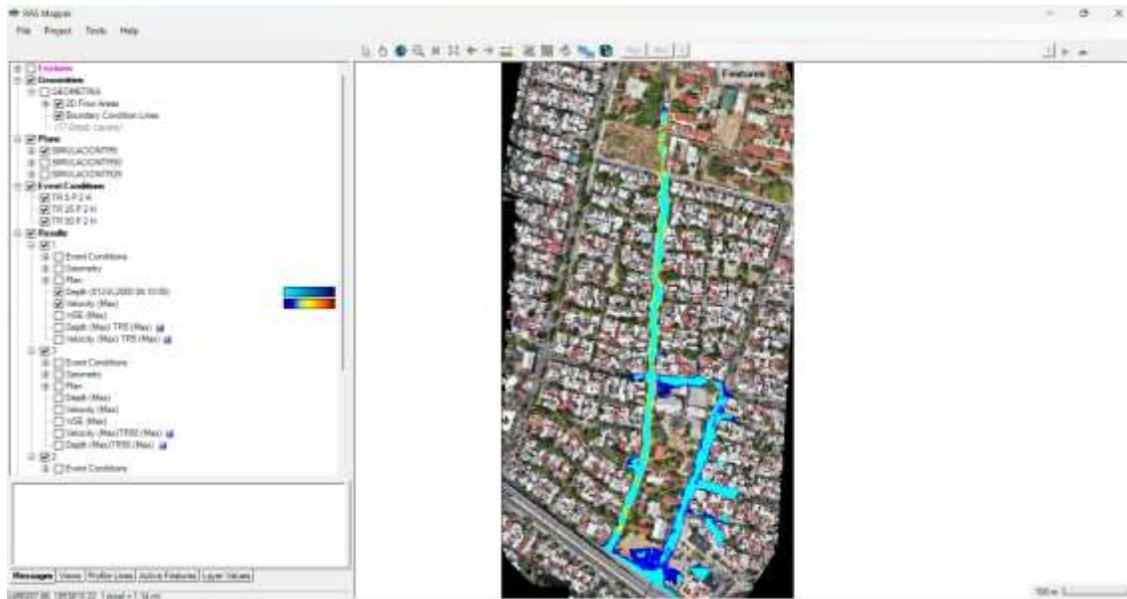


Figura 16. Interfase de la simulación Hidráulica en Régimen No Permanente del Arroyo 24 de junio mediante HEC-RAS (USACE, 2023). Fuente propia, 2025.

El resultado de la modelación hidráulica para los tiempos de retorno de 5, 25 y 50 años se clasificaron con base en la información del tirante (altura de la lámina de agua) y su velocidad promedio (ver figura 16). Para llevar a cabo este procedimiento, se utilizaron los criterios propuestos por Xia, Falconer, Wang y Xiao (2014). Esta clasificación permitió asignar niveles de peligro a cada celda (píxel) del archivo ráster correspondiente a cada tiempo de retorno. Para un mejor análisis e interpretación de resultados, los valores clasificados de peligro se categorizaron en: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. Cada valor cualitativo está representado por número que van del 1 al 5, donde 1 representa peligro muy bajo y 5 peligro muy alto.

La clasificación de los valores de tirante y velocidad se basó en la posibilidad de pérdida de estabilidad o arrastre de personas debido a la corriente. Se definieron cinco niveles de peligro: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, donde 1 representa un peligro muy bajo y 5 un peligro muy alto.

La clasificación de velocidad del flujo considera que, a partir de 0.8 m/s, el riesgo de desestabilización aumenta significativamente, mientras que valores superiores a 1.0 m/s pueden arrastrar a una persona con facilidad. En cuanto al tirante, profundidades superiores

a 0.6 m comienzan a representar un riesgo para personas de baja estatura o niños, mientras que niveles mayores a 1.5 m requieren habilidades de natación para evitar ahogamientos.

En la tabla 3 se observa que los valores más altos de velocidad y tirante corresponden a los niveles de peligro más elevados. Por ejemplo, cuando la velocidad del flujo supera los 2.0 m/s y el tirante es mayor a 1.50 m, se considera un peligro muy alto (valor 5), ya que incluso nadadores experimentados pueden tener dificultades para mantenerse a flote y el riesgo de arrastre y golpe contra obstáculos es severo. Por otro lado, cuando la velocidad es menor a 0.3 m/s y el tirante está por debajo de 0.3 m, el nivel de peligro es muy bajo (valor 1), ya que el agua fluye lentamente y permite caminar de manera segura.

Además, los valores intermedios de tirante y velocidad reflejan escenarios con riesgo moderado. Por ejemplo, con velocidades entre 0.8 y 1.0 m/s y tirantes entre 0.6 y 1.0 m, el flujo es lo suficientemente fuerte para desestabilizar a una persona promedio en superficies irregulares o pendientes, lo que se clasifica como peligro medio (valor 3).

Los valores de intervalo de peligro de tirante y velocidad están calculados bajo condiciones estándar de densidad del agua y considerando un peso promedio de 70 kg para un adulto. A partir de una profundidad de 0.6 m, el riesgo de inestabilidad aumenta para personas de menor estatura o niños, mientras que profundidades superiores a 1.5 m requieren habilidades de natación para evitar el riesgo de ahogamiento.

La estabilidad de una persona en una corriente de agua está directamente influenciada por la velocidad del flujo. Valores superiores a 0.8 m/s representan un riesgo elevado de desestabilización, dificultando la capacidad de una persona para mantenerse en pie. Cuando la velocidad del flujo alcanza o supera los 1.0 m/s, la fuerza del agua es suficiente para arrastrar a una persona con facilidad, incrementando significativamente el peligro de ser desplazado por la corriente (Xia et al., 2014).

Tabla 3. Clasificación del Nivel de Peligro en Función del Tirante y la Velocidad del Flujo (Xia et al. (2014))

Peligro	Valor numérico de peligro	Intervalo de Velocidad (m/s)	Descripción de la velocidad	Intervalo de Tirante (m)	Descripción del tirante	Evaluación
Muy alto	5	> 2	La fuerza del flujo hace casi imposible que una persona permanezca de pie. El riesgo de ser arrastrado y golpeado por obstáculos es muy alto. Incluso nadadores experimentados pueden tener dificultades para mantenerse a flote.	> 1.50	Se requiere saber nadar para mantenerse a flote.	Velocidades y tirantes altos generan daños severos. Son letales para peatones atrapados en la corriente.
Alto	4	1 - 2	La corriente puede arrastrar fácilmente a una persona. Es difícil mantener el equilibrio incluso en aguas poco profundas. Se recomienda evitar el cruce sin equipo de seguridad.	1 - 1.5	Riesgo de flotabilidad involuntaria, pérdida de control en caso de desnivel.	Puede afectar vehículos y estructuras débiles. Genera inestabilidad en vehículos y dificulta el rescate de personas.
Medio	3	0.8 - 1	La corriente es suficientemente fuerte como para desestabilizar a una persona promedio en superficies irregulares o con pendientes. Se recomienda extrema precaución.	0.6 - 0.1	Para adultos, el equilibrio se vuelve más difícil; niños pueden ser sumergidos.	Riesgo moderado para peatones y vehículos pequeños. Puede arrastrar personas y afectar parcialmente estructuras.
Bajo	2	0.3 - 0.8	Se puede caminar con precaución, pero la corriente comienza a ejercer resistencia. Personas de menor peso (niños, adultos pequeños) pueden tener dificultades	0.3 - 0.6	Se puede caminar con precaución; niños pueden tener dificultades.	Problemas de movilidad, sin daños estructurales. Puede desestabilizar peatones y generar

			para mantener el equilibrio en ciertas condiciones.			dificultades de movilidad.
Muy bajo	1	0 - 0.3	El agua fluye lentamente y no representa una amenaza para la estabilidad de una persona. Es seguro caminar, incluso en terrenos inclinados o irregulares.	0 - 0.3	Una persona adulta promedio puede caminar sin problemas.	Representa condiciones de encharcamiento sin riesgo significativo. Asociado con bajos riesgos y acumulación de agua.

3.6. Análisis de Vulnerabilidad Urbana por Peligro Hidrodinámico

El peligro por inundación, definido por la interacción entre tirante (profundidad del agua) y velocidad del flujo, fue aplicado a las manzanas urbanas de la microcuenca del arroyo 24 de junio con base en el análisis del peligro en la red vial. Dado que las calles canalizan el flujo de agua durante eventos de inundación, aquellas que presentaban niveles altos de peligro afectaban directamente a las manzanas colindantes, incrementando su vulnerabilidad. Se consideró que las manzanas expuestas a tramos viales con peligros altos eran altamente vulnerables, ya que la accesibilidad y la seguridad de los habitantes se veían comprometidas.

El análisis se realizó a partir de los resultados obtenidos en HEC-RAS, los cuales fueron procesados y convertidos a formato vectorial para su integración en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Una vez representado el peligro en la red vial, se asignaron los valores de vulnerabilidad a las manzanas colindantes, considerando la exposición al peligro en su entorno inmediato. La reclasificación se realizó en una escala de 1 a 5, donde 1 representa una vulnerabilidad muy baja y 5 una vulnerabilidad muy alta.

Las manzanas con valores de vulnerabilidad más altos correspondían a aquellas ubicadas en zonas con mayor peligro por tirantes o velocidades elevadas, lo que incrementaba significativamente su susceptibilidad ante eventos de inundación. En estos sectores, la profundidad del agua superaba los umbrales críticos para la estabilidad de una persona,

mientras que la velocidad del flujo alcanzaba valores capaces de generar arrastre o pérdida de equilibrio.

Las áreas con tirantes superiores a 0.6 m representaban un riesgo mayor para personas de baja estatura o niños, y en profundidades superiores a 1.5 m, la flotabilidad involuntaria hacía que el cruce sin habilidades de natación fuese prácticamente imposible. De manera similar, las zonas donde la velocidad del flujo superaba 0.8 m/s implicaban una alta probabilidad de desestabilización, y cuando esta excedía 1.0 m/s, el peligro de ser arrastrado por la corriente aumentaba drásticamente.

3.7. Índice Multidimensional de Habitabilidad Urbana (IMHU)

El Índice Multidimensional de Habitabilidad Urbana (IMHU) (García Benítez et al.,2023), es una herramienta integral que permite evaluar la calidad de habitabilidad en áreas urbanas, considerando factores sociales, económicos, de infraestructura y de entorno. Este índice se basa en un análisis multidimensional que integra distintas variables clave para comprender las condiciones de vida en una ciudad y su relación con la capacidad de adaptación de la población ante riesgos hidrometeorológicos, como las inundaciones.

La capacidad de adaptación es un elemento central en la evaluación de la vulnerabilidad urbana, ya que determina el grado en que una comunidad puede enfrentar y recuperarse de eventos adversos. En este sentido, el IMHU permite identificar zonas con alta habitabilidad, que generalmente cuentan con mejor infraestructura, acceso a servicios y mayor organización comunitaria, favoreciendo una respuesta más efectiva ante inundaciones. Por el contrario, las áreas con baja habitabilidad presentan condiciones que limitan la capacidad de adaptación, como deficiencias en drenaje pluvial, precariedad en las viviendas y menor acceso a recursos para mitigar los impactos de los fenómenos hidrometeorológicos.

En el contexto de este estudio, el IMHU fue adaptado y aplicado a las manzanas urbanas dentro de la microcuenca del arroyo 24 de junio en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Su implementación se integró con los resultados obtenidos en las modelaciones hidráulicas e hidrológicas, permitiendo no solo evaluar la vulnerabilidad urbana por inundaciones, sino también identificar qué tan preparada está la población para afrontar estos eventos. De esta

manera, el análisis combinó la exposición física a las inundaciones con las condiciones de habitabilidad, proporcionando una perspectiva más completa sobre la vulnerabilidad y la capacidad de adaptación en el área de estudio.

3.8. Integración del IMHU en el Proyecto

La metodología utilizada para implementar el Índice Multidimensional de Habitabilidad Urbana (IMHU) se fundamentó en el modelo teórico desarrollado por García Benítez et al. (2023), quienes diseñaron un esquema de evaluación de habitabilidad aplicado a la totalidad de Tuxtla Gutiérrez. Este modelo, estructurado a partir de una matriz multidimensional, permite clasificar la habitabilidad en cinco niveles: muy baja, baja, media, alta y muy alta, con base en criterios que incluyen el acceso a servicios básicos, las condiciones socioeconómicas, la calidad de la infraestructura urbana y las características del entorno físico.

Para su aplicación en este estudio, el IMHU fue calculado a nivel de manzana urbana, combinando información sobre infraestructura, equipamiento, accesibilidad y entorno ambiental. Posteriormente, estos valores fueron cruzados con los niveles de vulnerabilidad asignados a cada manzana, derivadas de la exposición al peligro por inundación, permitiendo una clasificación más precisa de las zonas con mayor riesgo.

El proceso de integración consistió en superponer los valores del IMHU con los resultados del análisis de vulnerabilidad por inundación en un Sistema de Información Geográfica (SIG). De esta manera, se identificaron zonas donde la baja habitabilidad coincidía con altos niveles de vulnerabilidad, lo que evidenciaba una mayor necesidad de intervención en términos de infraestructura y planeación urbana.

3.9. Evaluar el Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones (IVUI)

El Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones (IVUI) se evaluó considerando los valores de vulnerabilidad por velocidad, tirante y habitabilidad, los cuales ya estaban categorizados en una escala de 1 a 5. Para garantizar una evaluación homogénea y

equilibrada, se optó por un promedio simple, lo que permitió integrar los tres factores de manera equitativa y sin favorecer uno sobre otro.

El cálculo de la IVUI se realizó mediante la siguiente expresión descrita en la ecuación 3:

$$IVUI = \frac{IV_v + IV_t + IV_h}{3} \quad (3)$$

donde:

- IV_v Es el índice de vulnerabilidad por velocidad del flujo. Representa el grado de exposición de una manzana a altas velocidades del agua, lo que puede generar desestabilización y arrastre de personas.
- IV_t Es el índice de vulnerabilidad por tirante. Indica el impacto del nivel de agua acumulado en una manzana, considerando que profundidades mayores dificultan la movilidad y aumentan el riesgo de flotabilidad involuntaria.
- IV_h Es el índice de vulnerabilidad por habitabilidad. Evalúa la calidad del entorno urbano y la capacidad de una manzana para afrontar eventos de inundación en función de su infraestructura y acceso a servicios básicos.

Este método permitió obtener una clasificación clara y objetiva, en la que valores altos reflejan una mayor vulnerabilidad, mientras que valores bajos indican una menor susceptibilidad ante inundaciones.

Para interpretar los valores obtenidos, se estableció la siguiente categorización (ver figura 4):

Tabla 4. Clasificación de la Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones (IVUI). Fuente propia, 2025.

Rango de IVUI	Clasificación de Vulnerabilidad Urbana
1.0 - 1.8	Muy Baja
1.9 - 2.6	Baja
2.7 - 3.4	Media
3.5 - 4.2	Alta
4.3 - 5.0	Muy Alta

La evaluación del índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones (IVUI) debe considerar los distintos escenarios hidrológicos asociados a diferentes períodos de retorno (5, 25 y 50 años). Cada uno de estos períodos representa una probabilidad distinta de ocurrencia de eventos de inundación, lo que implica que su impacto en la vulnerabilidad de las manzanas urbanas varía con el tiempo. Para integrar esta variabilidad, se proponen dos enfoques metodológicos que permiten obtener una visión dinámica y realista de la vulnerabilidad, considerando tanto la frecuencia como la magnitud de los eventos de inundación.

El primer enfoque, denominado Método del Promedio Temporal (IVUI Promedio), asume que la vulnerabilidad de una manzana es el resultado del comportamiento medio de los tres períodos de retorno. En este método, los valores del IVUI para cada uno de los períodos de retorno se combinan en un promedio simple, asegurando una evaluación balanceada a lo largo del tiempo (ver ecuación 4):

$$IVUI_{Prom} = \frac{IVUI5 + IVUI25 + IVUI50}{3} \quad (4)$$

donde:

- *IVUI5* representa la vulnerabilidad urbana para el período de retorno de 5 años, reflejando eventos frecuentes de menor magnitud.
- *IVUI25* representa la vulnerabilidad para el período de retorno de 25 años, considerando eventos intermedios en intensidad y frecuencia.
- *IVUI50* representa la vulnerabilidad para el período de retorno de 50 años, reflejando eventos más extremos, pero menos frecuentes.

Este método tiene la ventaja de proporcionar una visión general de la vulnerabilidad sin favorecer un solo período de retorno. Es fácilmente interpretable y permite comparar valores en una misma escala, facilitando la identificación de áreas donde la vulnerabilidad se mantiene constante en distintos escenarios de inundación. Sin embargo, una desventaja es que no captura la evolución diferencial de la vulnerabilidad ante eventos más extremos, ya que los trata con la misma importancia que los más frecuentes.

El segundo enfoque, denominado Método del Índice Vulnerabilidad Ponderada por Frecuencia (IVUI Ponderado), considera la recurrencia de los eventos de inundación y su impacto en la vulnerabilidad urbana. En este caso, se asignan pesos diferenciados a los períodos de retorno, priorizando los eventos más frecuentes, ya que afectan con mayor regularidad la infraestructura y la habitabilidad de las manzanas urbanas (ver ecuación 5):

$$IVUI_{Pond} = (0.5 \times IVUI5) + (0.3 \times IVUI25) + (0.2 \times IVUI50) \quad (5)$$

En esta metodología:

- Se asigna un peso mayor (0.5) al período de retorno de 5 años, ya que estos eventos son más recurrentes y tienen un impacto más frecuente en la población y la infraestructura.
- Se otorga un peso medio (0.3) al período de retorno de 25 años, debido a que ocurre ocasionalmente y puede generar afectaciones considerables.
- Se asigna un peso menor (0.2) al período de retorno de 50 años, ya que representa eventos de menor probabilidad de ocurrencia, aunque con un impacto potencialmente mayor.

La justificación de esta ponderación se basa en tres principios fundamentales. Primero, la frecuencia de ocurrencia de los eventos: las inundaciones con un período de retorno de 5 años tienen una probabilidad anual del 20%, mientras que las de 25 años ocurren con un 4% de probabilidad y las de 50 años solo con un 2%, lo que justifica dar más peso a los eventos más frecuentes. Segundo, el impacto en la habitabilidad y capacidad de adaptación: las inundaciones recurrentes afectan la infraestructura y las condiciones de vida de manera constante, mientras que las más extremas, aunque destructivas, pueden no requerir la misma preparación en el día a día. Tercero, la coherencia con metodologías de gestión de riesgo hidrometeorológico: estudios en infraestructura urbana suelen diseñar los sistemas de drenaje considerando eventos de 5 años, mientras que los de 25 años se usan en infraestructura crítica como puentes o canales, y los de 50 años en análisis de riesgo extremo.

La elección de esta ponderación equilibra la frecuencia y la magnitud de los eventos, permitiendo reflejar un escenario más realista de la vulnerabilidad urbana. En caso de que

futuros estudios justifiquen una modificación en estos coeficientes, la metodología permite ajustes sin alterar su estructura general.

Capítulo 4. Resultados

4.1. Caracterización de la Cuenca y Unidades de Infiltración

El análisis reveló que las unidades de bosque de coníferas, bosque de encino, suelo desnudo y tierras agrícolas representan una proporción menor dentro de la cuenca, en comparación con la selva baja caducifolia, el matorral subtropical y las áreas urbanas y construidas. La interpretación visual de imágenes satelitales mostró que las primeras cuatro unidades están siendo progresivamente absorbidas por la expansión de la selva baja caducifolia y las áreas urbanas, lo cual reduce las zonas de alta infiltración y contribuye a una mayor generación de escorrentía.

La carta edafológica identificó que la unidad de suelo dominante en la microcuenca es el leptosol, caracterizado por ser somero sobre roca continua y tener una textura gravillosa o pedregosa, debido a su origen en formaciones de rocas calizas. Este tipo de suelo, con limitada capacidad de retención de agua, incrementa la velocidad de la escorrentía superficial, lo que aumenta la vulnerabilidad ante inundaciones en eventos de precipitación elevada.

Con base en el análisis de uso de suelo, vegetación y tipo de suelo, se definieron dos combinaciones de unidades de infiltración para la microcuenca, consideradas en el modelo hidrológico (ver figura 5):

1. Áreas de alta infiltración: Compuestas por zonas de vegetación natural, como selva baja caducifolia, subcaducifolia y matorral subtropical, con presencia menor de suelos leptosol. Aunque tienen cierta capacidad de retención, su extensión limitada y la presencia de suelos someros no permiten controlar completamente el volumen de escorrentía.
2. Áreas de baja infiltración: Incluyen áreas urbanas y construidas, así como suelos desnudos y tierras agrícolas. Estas zonas contribuyen significativamente a la generación de escorrentía debido a su alta impermeabilidad y limitada capacidad de infiltración, aumentando la probabilidad de inundación durante eventos lluviosos.

Tabla 5. Distribución de las unidades de infiltración en la microcuenca del Arroyo 24 de junio. Fuente propia, 2025.

Unidad de infiltración	Superficie en Ha
1. Selva baja caducifolia, subcaducifolia y matorral subtropical – leptosol	187.24
2. Urbano y construido – leptosol	169.51

4.2. Hietograma Sintético por Bloque Alterno para Diferentes Períodos de Retorno

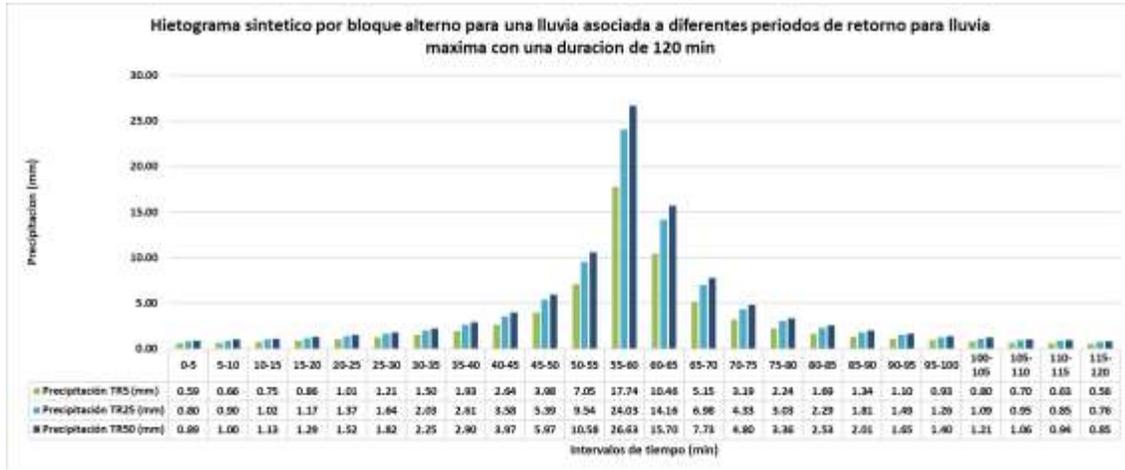
Uno de los primeros resultados obtenidos en el análisis hidrológico fue la construcción del hietograma sintético por bloque alternativo para una lluvia máxima con una duración de 120 minutos, considerando diferentes períodos de retorno (TR) de 5, 25 y 50 años. El hietograma representa la distribución temporal de la precipitación acumulada, lo que permite evaluar la intensidad de la lluvia a lo largo del evento y su impacto en la generación de escorrentía (ver grafica 1).

El método de bloques alternos se utilizó para organizar la precipitación acumulada en intervalos de tiempo de 5 minutos, reordenando los valores para que el mayor bloque de precipitación se ubique en el centro del evento. Este procedimiento simula una distribución más realista de la precipitación extrema, concentrando la mayor intensidad en la fase media del evento y reduciendo progresivamente los valores hacia los extremos.

Los resultados muestran que la precipitación acumulada varía según el período de retorno. Para eventos de 5 años, la mayor intensidad de precipitación se registró en el intervalo de 55-60 minutos, alcanzando 17.74 mm, mientras que para eventos de 25 y 50 años los valores máximos fueron 24.03 mm y 26.63 mm, respectivamente, en el mismo intervalo. Estos valores indican que la intensidad de la precipitación aumenta significativamente en eventos menos frecuentes, pero más severos, lo cual afecta directamente la capacidad de infiltración del suelo y la generación de escorrentía superficial.

El análisis del hietograma también revela que, tras alcanzar el pico de precipitación a la mitad del evento, los valores disminuyen progresivamente, con acumulaciones menores en los

últimos intervalos. Por ejemplo, en los últimos 5 minutos (115-120 minutos), los valores de precipitación se reducen a 0.56 mm para TR5, 0.76 mm para TR25 y 0.85 mm para TR50, reflejando una tendencia a la estabilización del evento pluvial.



Gráfica 1. Hietograma sintético por bloque alterno para una lluvia asociada a diferentes periodos de retorno para lluvia máxima con una duración de 120 min. Fuente propia, 2025.

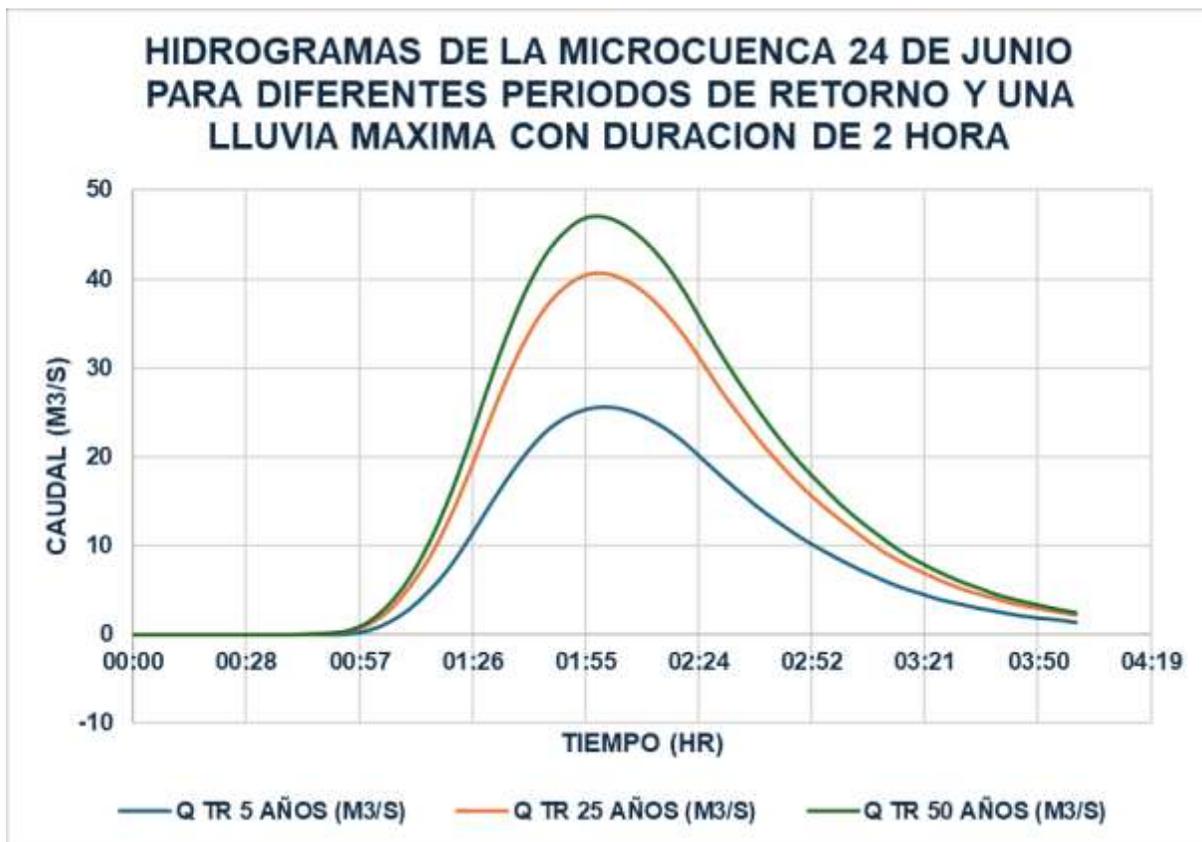
4.3. Hidrograma de Caudales para Diferentes Períodos de Retorno

El hidrograma de caudales representa la evolución temporal del caudal en la microcuenca del arroyo 24 de junio, considerando los escenarios de precipitación máxima para los periodos de retorno de 5, 25 y 50 años. Este resultado permite analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca ante eventos de diferente magnitud, identificando la respuesta del escurrimiento en términos de tiempo de concentración, caudal pico y duración de la escurrimiento superficial.

Los hidrogramas muestran que el caudal comienza a incrementarse aproximadamente a los 45-50 minutos después del inicio del evento de lluvia, reflejando el tiempo que toma el agua en concentrarse y generar escurrimiento significativo en la cuenca. Para el período de retorno de 5 años, el caudal máximo alcanzado fue de aproximadamente 25.6 m³/s a las 02:00 horas, mientras que para los períodos de 25 y 50 años, los valores máximos fueron de 40.6 m³/s y 47.0 m³/s, respectivamente, en el mismo intervalo.

El análisis del hidrograma también evidencia que el tiempo de ascenso (intervalo en el que el caudal aumenta desde valores bajos hasta su pico máximo) es similar en los tres escenarios, ocurriendo en un lapso de aproximadamente 1 hora y 45 minutos. Posterior al pico máximo, los caudales comienzan a disminuir progresivamente, con una reducción más marcada después de 02:30 horas, hasta alcanzar valores cercanos a 0 m³/s alrededor de 04:00 horas.

En términos comparativos, se observa que, a mayor período de retorno, los caudales son significativamente más elevados, lo que indica una mayor capacidad de generación de escurrimiento ante eventos más extremos. Este comportamiento es consecuencia del aumento en la intensidad y acumulación de precipitación, lo que reduce la capacidad de infiltración del suelo y provoca un mayor volumen de escorrentía superficial.



Gráfica 2. Hidrograma de Caudales para Diferentes Períodos de Retorno en la Microcuenca del Arroyo 24 de junio. Fuente propia, 2025.

4.4. Índice de Peligro por Velocidad y Tirante en el Cauce

Como parte del análisis hidráulico, se generaron cartografías de los índices de peligro asociados a los valores de velocidad y tirante en el cauce del arroyo 24 de junio (ver figuras de la 17 a la 22). Estas cartografías permiten visualizar la distribución espacial de las condiciones de flujo en diferentes escenarios de inundación, identificando zonas con mayor riesgo de arrastre, pérdida de estabilidad y flotabilidad involuntaria para la población y la infraestructura urbana.

Los mapas fueron elaborados a partir de los resultados de la modelación en HEC-RAS, considerando los períodos de retorno de 5, 25 y 50 años. Se aplicó un esquema de clasificación del peligro en una escala de 1 a 5 (de muy bajo a muy alto), basado en criterios de estabilidad humana en flujos de inundación.

Los resultados evidencian que las zonas con mayor peligro por velocidad del flujo se encuentran en tramos donde el cauce se estrecha o presenta pendientes pronunciadas, alcanzando velocidades superiores a 2 m/s en algunos sectores durante eventos con periodo de retorno de 50 años. En estos puntos, el riesgo de arrastre de personas y objetos flotantes es considerable, incrementando la vulnerabilidad en áreas cercanas a cruces viales y accesos peatonales.

Por otro lado, la cartografía del peligro por tirante muestra que las zonas con mayores profundidades de flujo (tirantes superiores a 1.5 m) coinciden con áreas de baja pendiente y secciones más anchas del cauce, donde el agua se acumula con mayor facilidad. Estos sectores representan un riesgo alto de flotabilidad involuntaria, dificultando la movilidad y aumentando la posibilidad de afectaciones en estructuras bajas y vialidades cercanas.

El análisis conjunto de ambas cartografías permite identificar zonas críticas donde altas velocidades y grandes profundidades de agua coinciden, generando condiciones extremas de peligro en eventos de mayor magnitud. Esta información es fundamental para la gestión del riesgo de inundaciones, pues proporciona una base para implementar medidas de prevención y mitigación, como la adecuación de cruces viales, la instalación de barreras de protección o la mejora del sistema de drenaje urbano en las zonas más expuestas.



Figura 17. Índice de peligro por velocidad para período de retorno 5 años (TR 5). Fuente propia, 2025.



Figura 18. Índice de peligro por tirante para período de retorno 5 años (TR 5). Fuente propia, 2025.



Figura 19. Índice de peligro por velocidad para período de retorno 25 años (TR 25). Fuente propia, 2025.



Figura 20. Índice de peligro por tirante para período de retorno 25 años (TR 25). Fuente propia, 2025.



Figura 21. Índice de peligro por velocidad para período de retorno 50 años (TR 50). Fuente propia, 2025.



Figura 22. Índice de peligro por tirante para período de retorno 50 años (TR 50). Fuente propia, 2025.

4.5. Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones

Como parte del análisis de riesgo en la microcuenca del arroyo 24 de junio, se generaron cartografías de la Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones (VUI), integrando los índices de peligro por velocidad, tirante y habitabilidad urbana (ver figuras de la 23 a la 28). Estos mapas permiten identificar las manzanas más susceptibles a los efectos de las inundaciones, proporcionando una representación espacial detallada de la interacción entre el peligro hidrológico y las condiciones urbanas.

Las cartografías fueron elaboradas en un Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando los valores previamente calculados de VUI promedio y VUI ponderado. Los resultados muestran una distribución heterogénea de la vulnerabilidad, donde las zonas con valores más altos (rojo y naranja en la clasificación) coinciden con áreas expuestas a flujos rápidos y profundos, mientras que las zonas con baja vulnerabilidad (verde) se localizan en sectores con menor afectación y una mejor capacidad de adaptación.

Las manzanas con alta vulnerabilidad se ubican principalmente en áreas cercanas al cauce, donde la combinación de altos valores de tirante y velocidad genera condiciones de riesgo severo. En estos sectores, la accesibilidad y la seguridad de los habitantes pueden verse comprometidas durante eventos de inundación, especialmente en los escenarios asociados a períodos de retorno de 25 y 50 años.

Por otro lado, las manzanas con baja vulnerabilidad corresponden a sectores donde la infraestructura urbana permite una mejor respuesta ante eventos hidrometeorológicos, reduciendo la exposición y facilitando la recuperación tras una inundación. Sin embargo, algunas áreas con vulnerabilidad media podrían requerir intervenciones específicas para mejorar su capacidad de adaptación.



Figura 23. índice de vulnerabilidad por velocidad de flujo para período de retorno 5 años (TR 5).

Fuente propia, 2025.

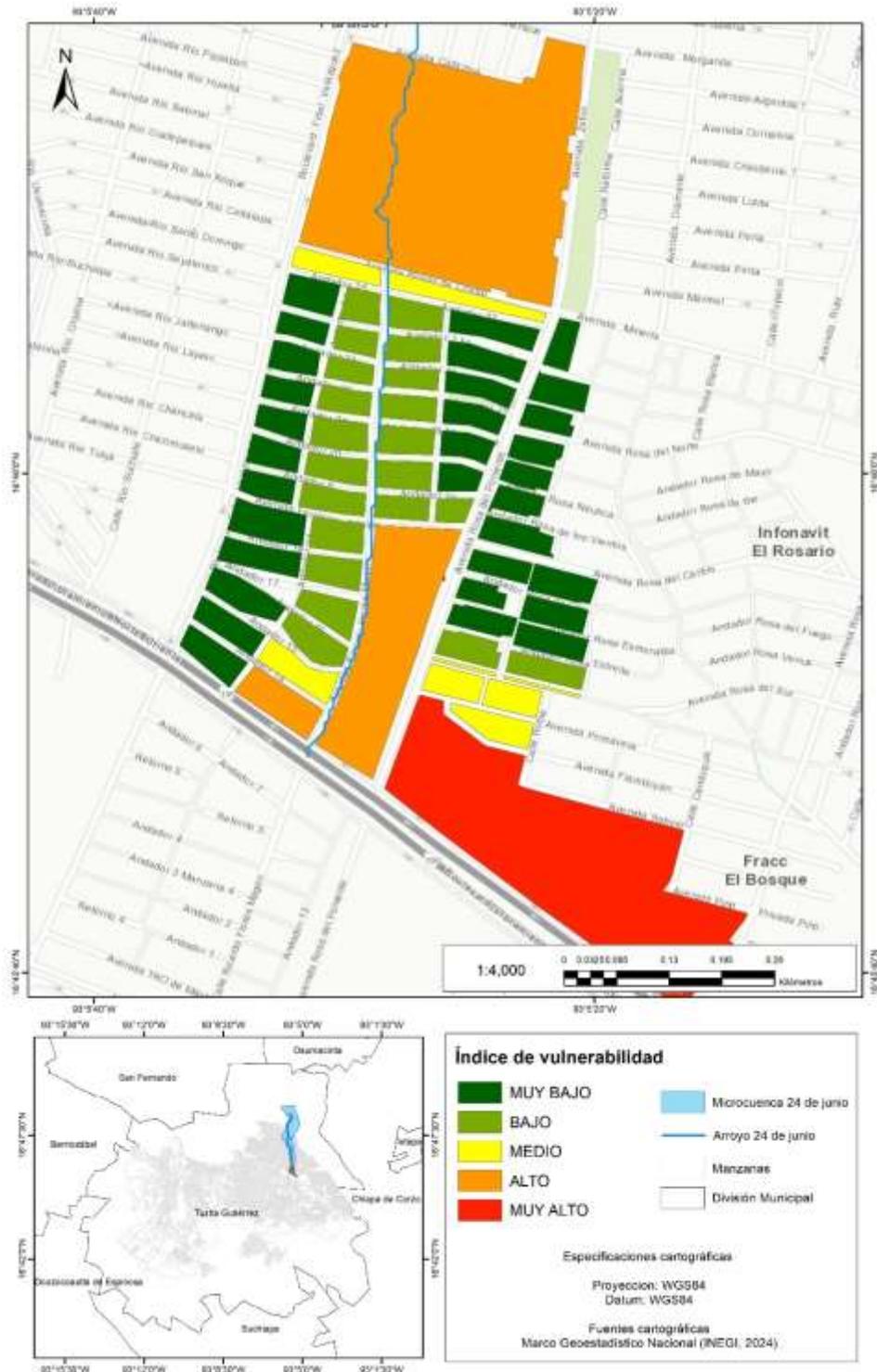


Figura 24. Índice de vulnerabilidad por tirante de flujo para período de retorno 5 años (TR 5). Fuente propia, 2025



Figura 25. Índice de vulnerabilidad por velocidad de flujo para período de retorno 25 años (TR 25).

Fuente propia, 2025.

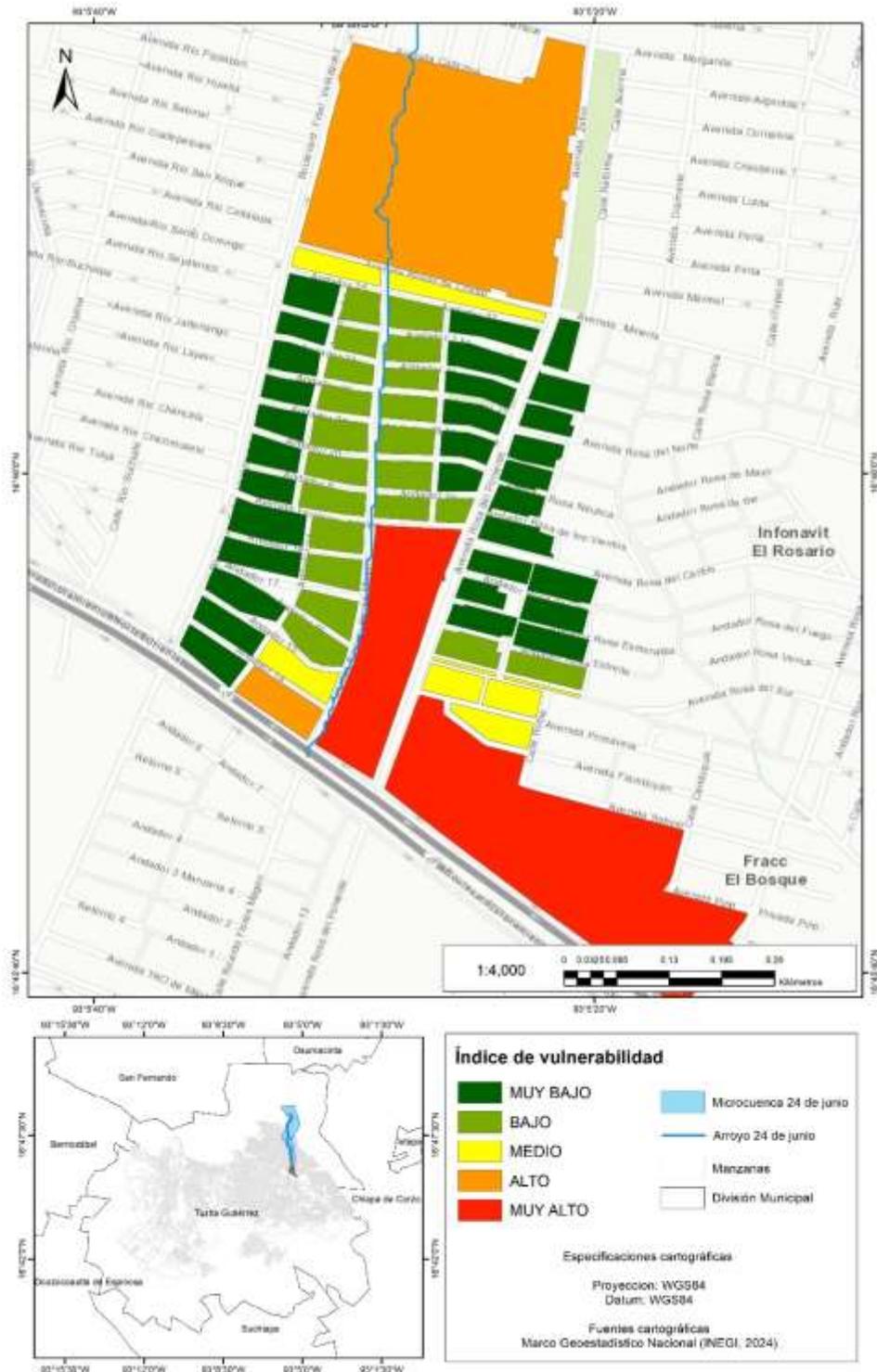


Figura 26. Índice de vulnerabilidad por tirante de flujo para período de retorno 25 años (TR 25).

Fuente propia, 2025.



Figura 27. Índice de vulnerabilidad por velocidad de flujo para período de retorno 50 años (TR 50).

Fuente propia, 2025.

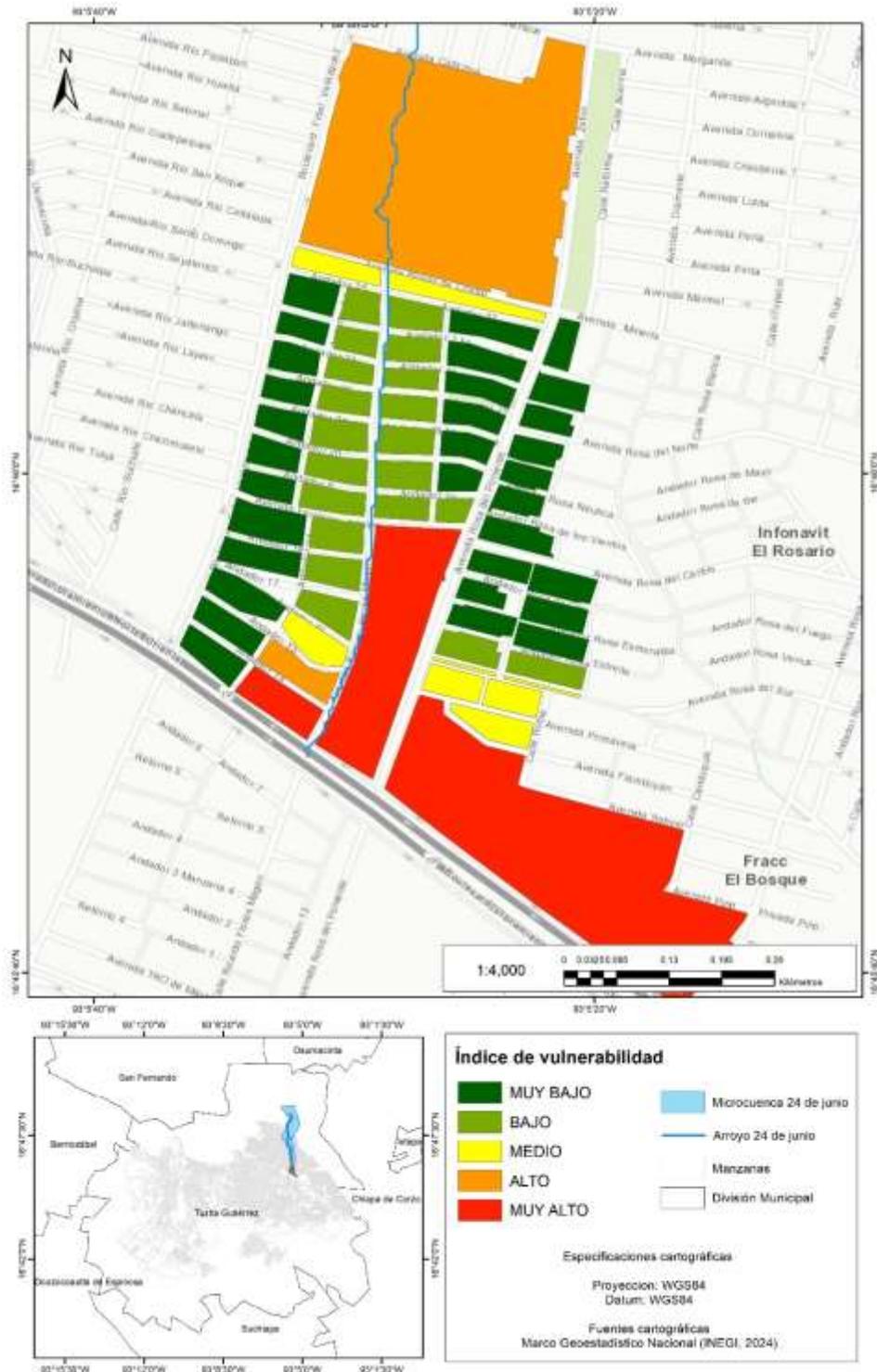


Figura 28. Índice de vulnerabilidad por tirante de flujo para período de retorno 50 años (TR 50).

Fuente propia, 2025.

4.6. Índices de Vulnerabilidad por Habitabilidad Urbana

La cartografía del Índice de Vulnerabilidad por Habitabilidad Urbana General representa un resultado clave en la integración del análisis físico-hidráulico con el componente social de la vulnerabilidad (ver figura 29).

En el análisis espacial, se observa que las manzanas con vulnerabilidad alta y muy alta se localizan principalmente en zonas con habitabilidad baja, particularmente en áreas cercanas al cauce del arroyo 24 de junio, así como en colonias que presentan condiciones de urbanización informal. Estas zonas carecen de infraestructura adecuada, muestran deficiencias en la cobertura de servicios públicos y presentan viviendas en condiciones precarias. Todo ello limita considerablemente las posibilidades de mitigación, preparación y recuperación ante eventos de inundación.

En contraste, las manzanas clasificadas con vulnerabilidad baja o muy baja coinciden con zonas donde la habitabilidad es alta. Estas áreas cuentan con redes de drenaje pluvial funcionales, vialidades pavimentadas, acceso estable a servicios como agua potable, electricidad y recolección de residuos, además de una mayor organización comunitaria. Estas características fortalecen la capacidad de adaptación de la población, disminuyendo así su vulnerabilidad urbana por inundaciones, aun en presencia de escenarios de peligro físico significativos.

La incorporación de este índice en el análisis integral permite identificar zonas críticas donde la vulnerabilidad no solo se debe a la exposición al flujo del agua, sino también a la debilidad estructural y social de la comunidad.

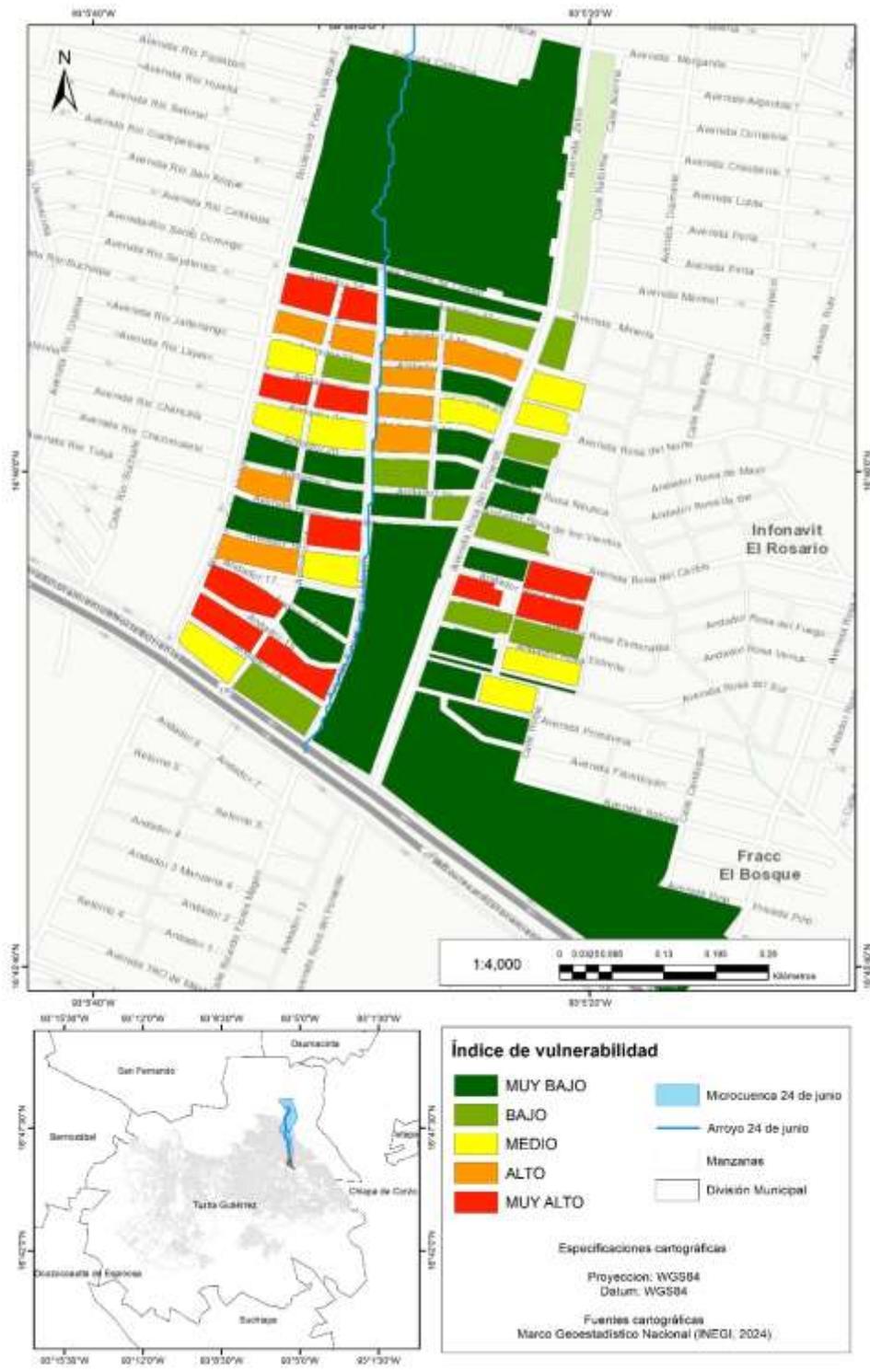


Figura 29. Índice de vulnerabilidad por índice de habitabilidad urbana general. Fuente propia, 2025.

4.7. Índices de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones (IVUI)

Los resultados del Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones (IVUI) revelan una distribución claramente asociada a la cercanía con el cauce del arroyo 24 de junio. Las manzanas con mayores valores de IVUI se localizan principalmente en las proximidades del arroyo, donde la combinación de altas velocidades de flujo y baja calidad de habitabilidad intensifica la vulnerabilidad urbana (ver figuras de la 30 a la 32). Estas zonas, además de recibir mayor impacto hidráulico, presentan carencias en infraestructura, servicios básicos y condiciones físicas del entorno construido.

Se identificó que los valores del tirante, aunque incluidos en la evaluación, tienen menor peso en el resultado general del IVUI, ya que la mayoría de los tirantes modelados son bajos, salvo por algunas concentraciones más significativas al sur de la microcuenca. Por lo tanto, el índice de habitabilidad y la velocidad del flujo son los factores predominantes en la configuración del riesgo urbano, y su coincidencia espacial genera un patrón claro de vulnerabilidad elevada cerca del cauce.

En contraste, las manzanas alejadas del arroyo o con mejor infraestructura urbana presentan valores bajos o muy bajos de IVUI, evidenciando condiciones más seguras ante eventos de inundación. También se identificaron zonas con vulnerabilidad media, ubicadas en transiciones entre áreas consolidadas y sectores de mayor exposición, las cuales podrían evolucionar hacia mayores niveles de riesgo si no se fortalecen sus capacidades adaptativas.

En conjunto, los resultados del IVUI permiten establecer una priorización territorial para la gestión del riesgo por inundaciones, donde las áreas más próximas al arroyo deben ser atendidas con urgencia, tanto en medidas estructurales como en acciones de planeación urbana orientadas a reducir la exposición y mejorar la habitabilidad.

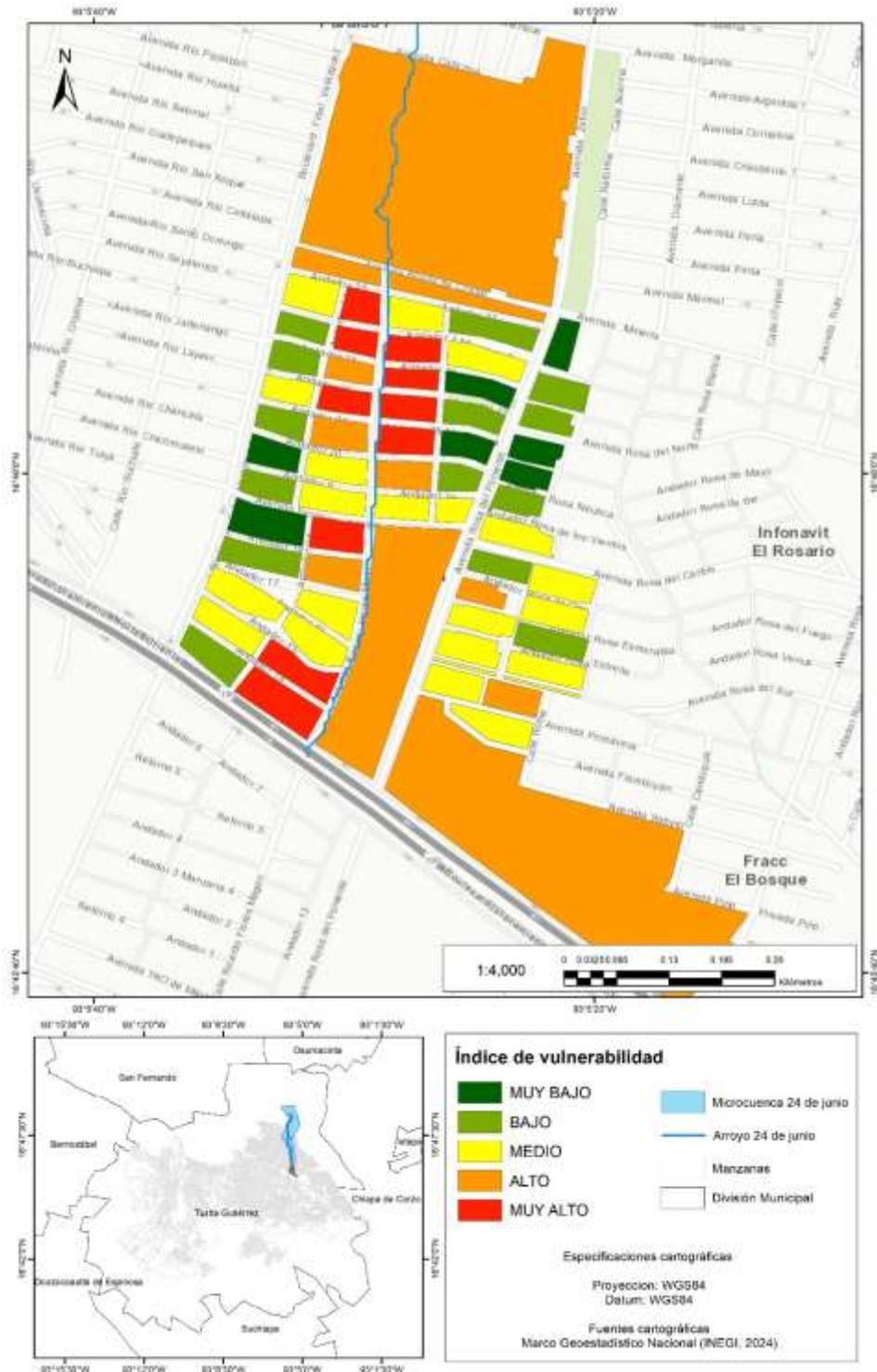


Figura 30. Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones TR 5. Fuente propia, 2025.

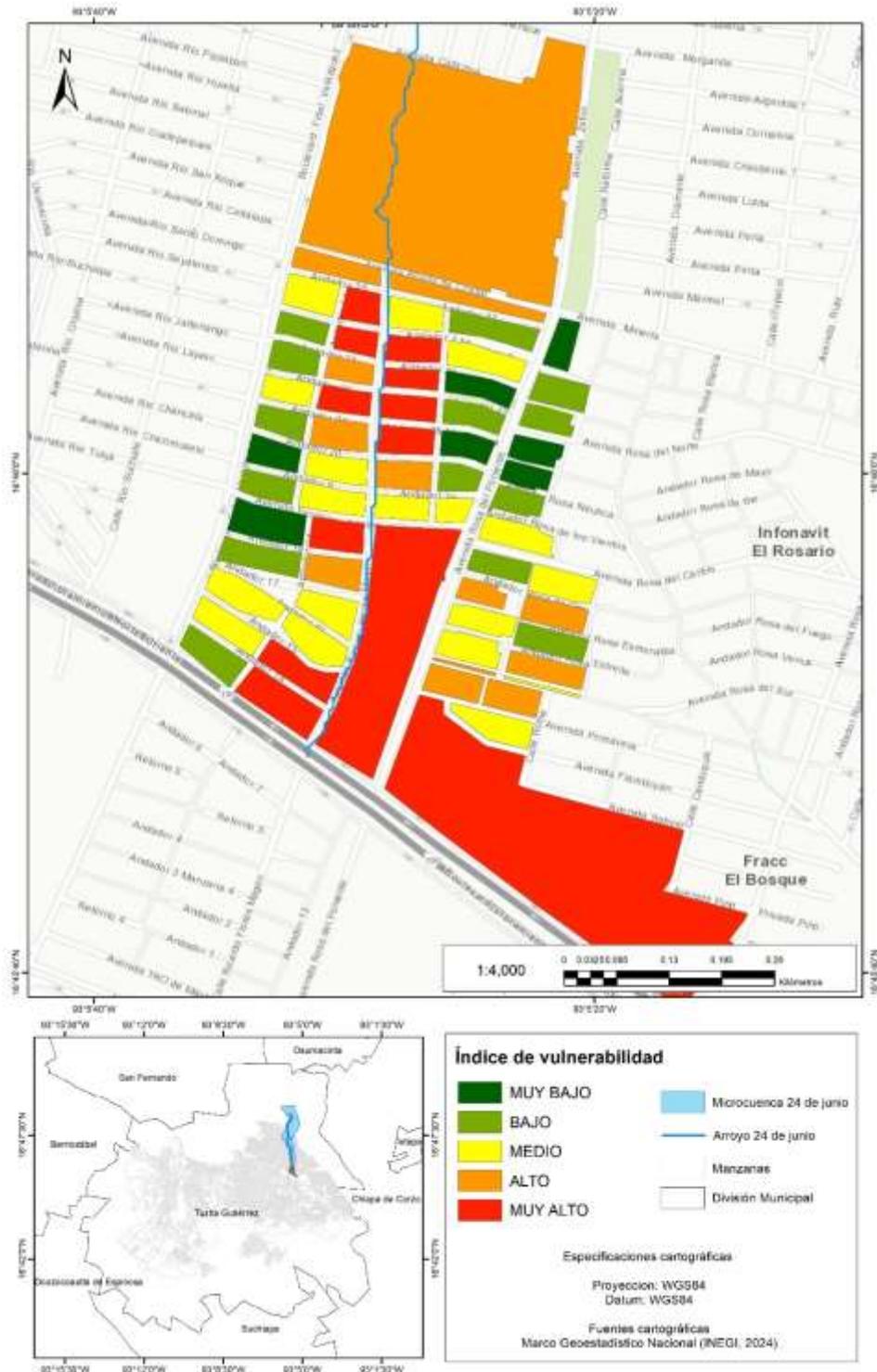


Figura 31. Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones TR 25. Fuente propia, 2025.

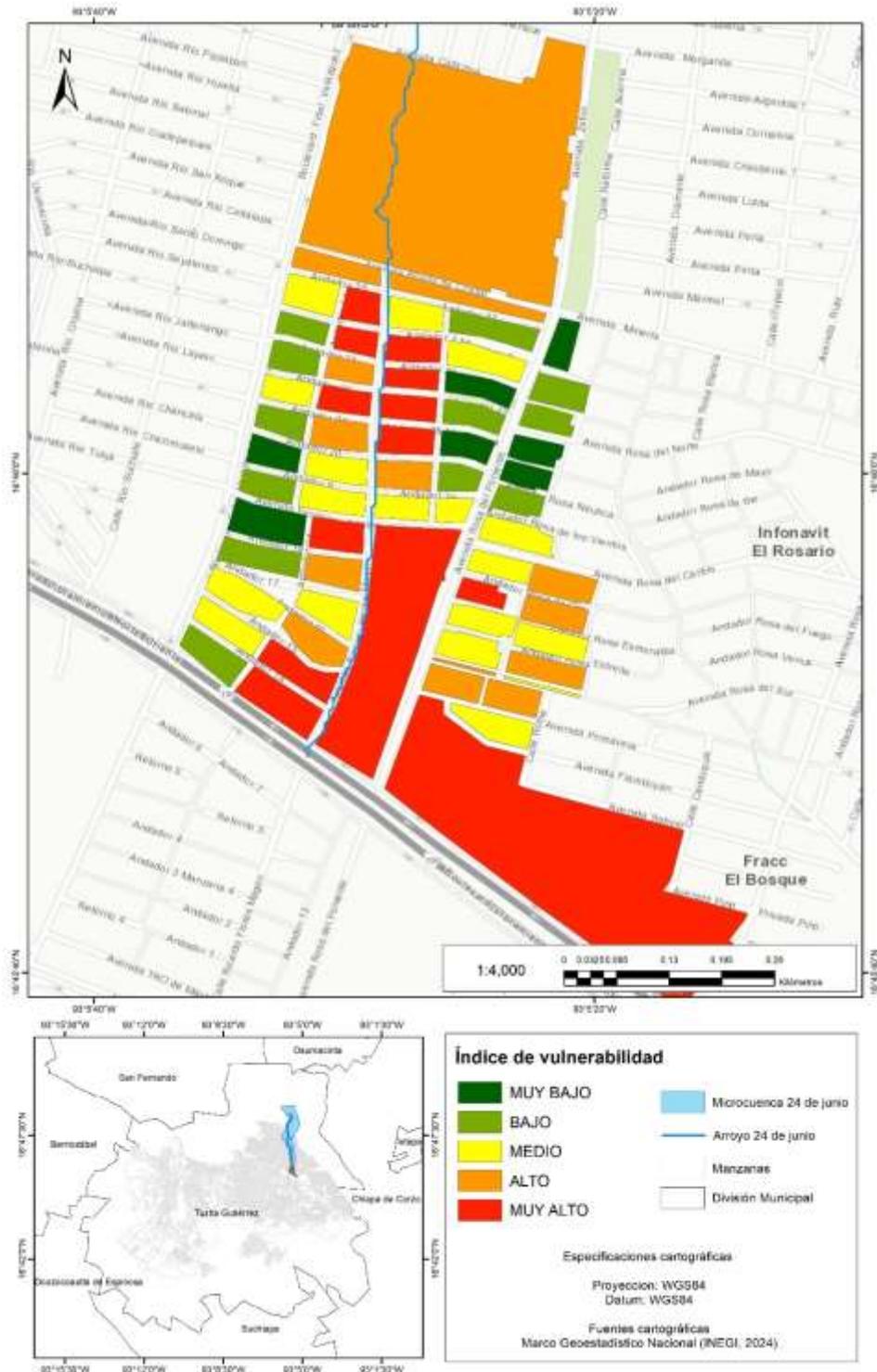


Figura 32. Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones TR 50. Fuente propia, 2025.

4.8. Índice general de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones

Los resultados del Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones (IVUI) calculado mediante el método del promedio temporal muestran que el escurrimiento del agua se desplaza de norte a sur siguiendo la calle Ricardo Flores Magón, concentrándose en esta vía y sus costados los índices más altos de vulnerabilidad (ver figura 33). En estas zonas cercanas al arroyo y a la calle, se registran valores clasificados como muy altos, altos y medianos, lo que indica una mayor exposición a las condiciones adversas causadas por la inundación. Las manzanas con vulnerabilidad muy alta y alta corresponden a aquellas donde la combinación de velocidades elevadas del flujo y tirantes significativos de agua se suma a condiciones urbanas con menor calidad de habitabilidad, limitando la capacidad de adaptación ante eventos de inundación. Hacia áreas más alejadas del escurrimiento principal, los índices disminuyen gradualmente a niveles medianos y bajos, reflejando una menor exposición física y mejores condiciones urbanas que contribuyen a una mayor capacidad de adaptación frente a inundaciones.

Cuando se analiza el IVUI mediante el método ponderado por frecuencia, que da mayor peso a los eventos de menor periodo de retorno (5 años), se observa una distribución espacial similar, pero con énfasis en la recurrencia de inundaciones frecuentes (ver figura 34). En este caso, las manzanas adyacentes a la calle Ricardo Flores Magón presentan los valores más elevados de vulnerabilidad, destacando la importancia de los eventos recurrentes como principal factor de afectación constante sobre la infraestructura y la habitabilidad urbana. Esta ponderación refleja un escenario más realista de vulnerabilidad, donde la frecuencia de los eventos es determinante para la afectación continua de las zonas más expuestas, principalmente aquellas situadas en el recorrido del escurrimiento y cercanas al arroyo 24 de junio.

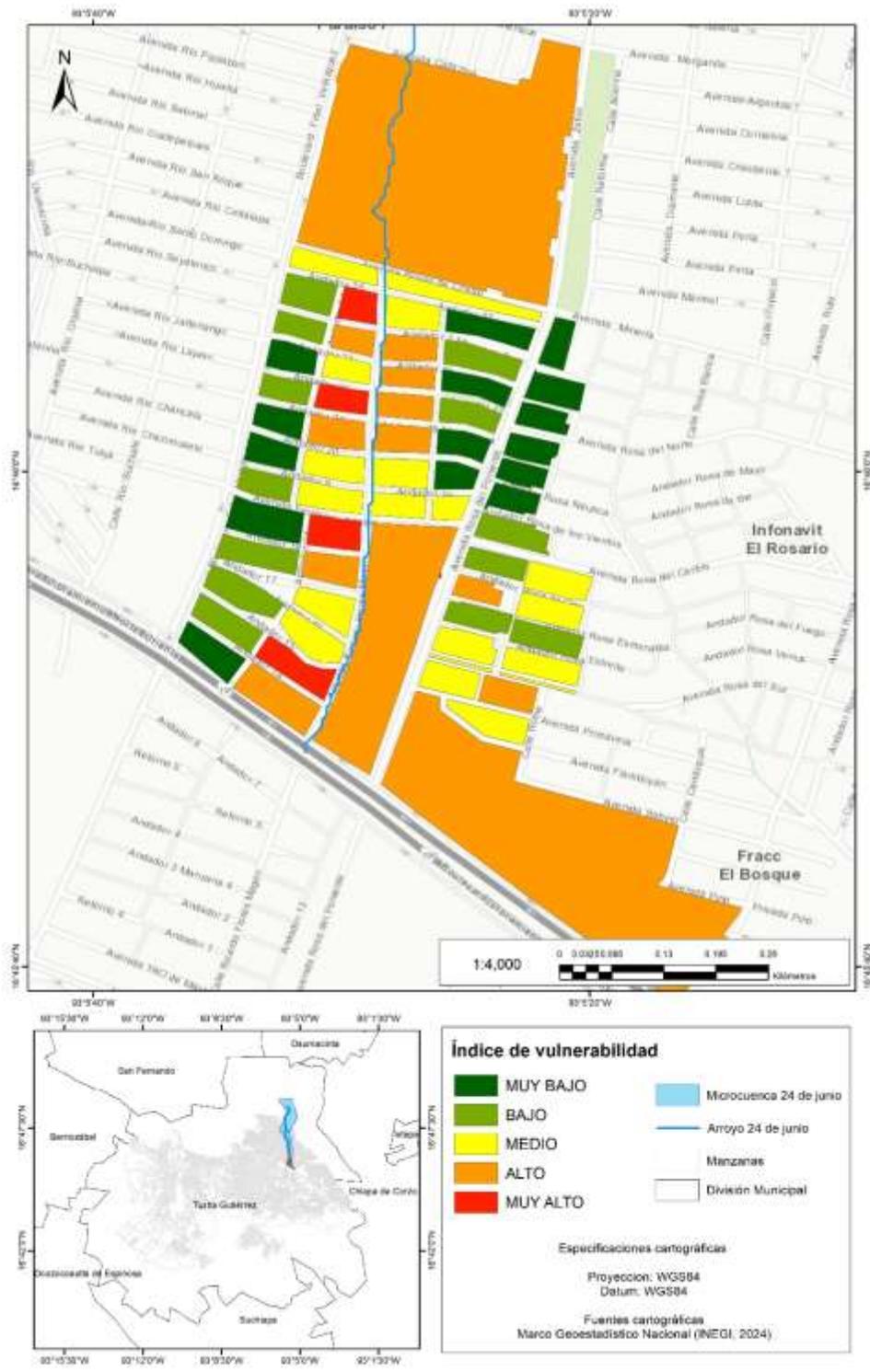


Figura 33. Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones – Método de Promedio Temporal (Períodos de Retorno 5, 25 y 50 años). Fuente propia, 2025.

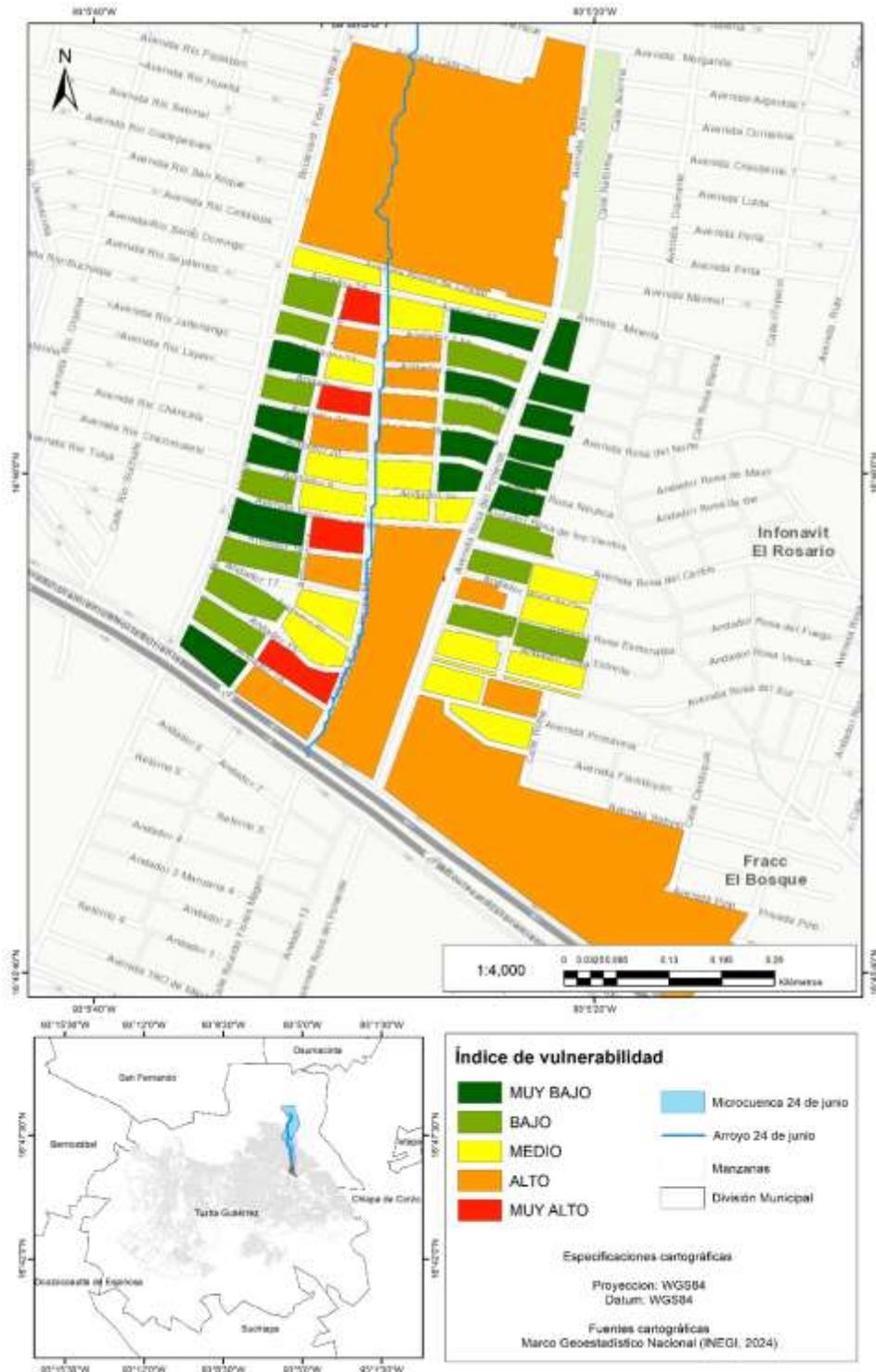


Figura 34. Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones – Método Ponderado según Frecuencia de Eventos (Períodos de Retorno 5, 25 y 50 años). Fuente propia, 2025.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio han permitido evaluar de manera integral los Índices de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones (IVUI) en la microcuenca del arroyo 24 de junio, considerando la interacción entre la peligrosidad del flujo, representada por la velocidad y el tirante del agua, y la capacidad de adaptación de las manzanas urbanas. El Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones se consolidó como una herramienta eficaz para medir el impacto de las inundaciones en entornos urbanos, al integrar factores tanto físicos como socioeconómicos. Gracias a su aplicación, fue posible identificar con precisión las zonas más afectadas, distinguiendo claramente entre aquellas donde la vulnerabilidad se deriva de la intensidad del fenómeno hidrológico y aquellas donde la falta de infraestructura y servicios urbanos aumenta la susceptibilidad de la población. Este análisis permitió observar que la vulnerabilidad urbana no depende únicamente de la magnitud de los eventos de inundación, sino que está estrechamente vinculada con la habitabilidad de las áreas urbanas, que incluye la disponibilidad y calidad de la infraestructura, los servicios básicos y las condiciones de vivienda, así como la capacidad de adaptación de la población residente.

El estudio evidenció que las manzanas urbanas con mayor habitabilidad presentaban un menor índice de vulnerabilidad, incluso cuando estaban expuestas a niveles altos de inundación, lo que resalta la importancia de contar con infraestructura adecuada y acceso a servicios como condiciones esenciales para reducir significativamente los riesgos asociados a eventos hidrometeorológicos. Asimismo, la evaluación comparativa de las metodologías empleadas para calcular la vulnerabilidad mostró que, aunque tanto el método simple como el ponderado permiten identificar zonas vulnerables, el método ponderado ofreció una representación más precisa. Esto se debe a que considera la relación entre frecuencia y severidad de las inundaciones, siendo más adecuado para evaluar la vulnerabilidad a largo plazo y priorizar la mitigación de eventos recurrentes, sin dejar de lado los impactos ocasionados por eventos extremos de baja frecuencia. En contraste, el método simple resulta más accesible y fácil de aplicar, pero no discrimina adecuadamente entre frecuencia y severidad, lo que puede conducir a estimaciones menos precisas en contextos urbanos con características complejas.

Además, se identificó una fuerte correlación entre la habitabilidad y la vulnerabilidad urbana, confirmando que la capacidad de adaptación de las comunidades es fundamental para mitigar los riesgos de inundación. Las zonas con infraestructura deficiente y servicios básicos insuficientes presentaron impactos mucho más severos, evidenciando la necesidad de incorporar criterios de planificación urbana y gestión del riesgo para disminuir la vulnerabilidad en estas áreas. Particularmente, las manzanas cercanas al cauce del arroyo mostraron niveles más altos de vulnerabilidad, lo que subraya la importancia de implementar estrategias de mitigación en zonas críticas, tales como la instalación de sistemas de drenaje eficientes, la adopción de medidas estructurales de protección y la regulación del uso del suelo en áreas de alto riesgo, con el objetivo de reducir la exposición y mejorar la capacidad de respuesta frente a inundaciones.

El análisis detallado de los factores que inciden en la vulnerabilidad urbana indicó que la velocidad del agua es el factor más influyente, seguido por el tirante, lo que orienta las estrategias de adaptación hacia la disminución de la velocidad del flujo en calles y espacios habitacionales mediante intervenciones como la implementación de infraestructura para control de flujo, pavimentos permeables y adecuaciones en la red de drenaje pluvial. En términos generales, la vulnerabilidad urbana ante inundaciones se define como la susceptibilidad de un área urbana a sufrir daños significativos durante eventos hidrometeorológicos, resultado de la interacción de factores físicos, ambientales, socioeconómicos y de habitabilidad. Esta forma de vulnerabilidad está estrechamente vinculada a la densidad poblacional, la concentración de edificaciones en espacios reducidos y procesos de urbanización que muchas veces se desarrollan sin planificación adecuada, aumentando la exposición y reduciendo la capacidad de adaptación de la población frente a inundaciones.

Desde una perspectiva social y territorial, los resultados mostraron que la vulnerabilidad urbana no puede comprenderse únicamente desde el peligro físico, sino que requiere integrar la vulnerabilidad social y el impacto del territorio. La vulnerabilidad social refleja la susceptibilidad de la población a sufrir daños y pérdidas, considerando factores como ingreso económico, nivel educativo, acceso a servicios y organización comunitaria. El impacto social sobre el territorio se manifiesta en la densidad urbana, la ocupación de áreas de riesgo y la

insuficiencia de infraestructura, demostrando que el espacio urbano es un soporte activo de la actividad social cuya configuración influye directamente en la capacidad de adaptación frente a las inundaciones. La interacción sociedad-territorio-paisaje permite comprender cómo la distribución de la población, el uso del suelo y los elementos del paisaje urbano y natural afectan la capacidad de respuesta de las comunidades y la efectividad de las estrategias de mitigación.

Para mejorar y complementar la evaluación realizada, se considera fundamental incorporar estudios de percepción social y encuestas directas a la población, con el fin de evaluar más profundamente la capacidad de adaptación y las experiencias previas ante inundaciones. La integración de modelaciones hidrodinámicas más detalladas, incluyendo escenarios futuros bajo efectos del cambio climático, permitiría anticipar la evolución de la vulnerabilidad urbana y diseñar estrategias más robustas. Además, la consideración de variables adicionales, como calidad de construcción, accesibilidad a servicios de emergencia y redes de comunicación, resulta clave para evaluar de manera integral la capacidad de respuesta ante desastres. Un análisis temporal de la evolución de la vulnerabilidad, en relación con procesos de urbanización y cambios en el uso del suelo, aportaría una visión dinámica y prospectiva. Finalmente, la participación activa de actores locales y autoridades permitiría validar los resultados y definir estrategias de mitigación y adaptación más efectivas, asegurando que la planificación urbana y las políticas públicas se orienten a reducir riesgos, aumentar la capacidad de adaptación y garantizar condiciones de habitabilidad dignas para toda la población.

En conclusión, la integración de los factores físicos, socioeconómicos y de habitabilidad en el cálculo del IVUI, junto con la consideración de la vulnerabilidad social, el impacto territorial y la interacción sociedad-territorio-paisaje, proporciona una evaluación integral de la vulnerabilidad urbana ante inundaciones. Este enfoque permite no solo identificar las zonas más críticas y priorizar intervenciones, sino también diseñar estrategias de mitigación y adaptación que fortalecen la capacidad de adaptación urbana y contribuyen al desarrollo sostenible y seguro de la microcuenca del arroyo 24 de junio.

Discusión

El presente estudio permitió evaluar la vulnerabilidad urbana por inundaciones a través del cálculo del Índice de Vulnerabilidad Urbana por Inundaciones (IVUI) en la microcuenca del arroyo 24 de junio, integrando aspectos físicos, hidráulicos y socioeconómicos de la infraestructura urbana. Los resultados obtenidos confirman la pertinencia de la metodología aplicada y permiten situar los hallazgos en el contexto de investigaciones previas.

Una de las conclusiones más relevantes es la relación directa entre la habitabilidad y el IVUI, lo que confirma que la capacidad de adaptación de las manzanas urbanas reduce significativamente su vulnerabilidad ante inundaciones. Manzanas con infraestructura adecuada, acceso a servicios básicos y mejores condiciones socioeconómicas mostraron valores menores de IVUI, incluso cuando se localizaban en zonas expuestas a niveles elevados de inundación. Esto coincide con estudios anteriores que resaltan la importancia de la infraestructura urbana y la planificación como elementos clave para mitigar riesgos hidrometeorológicos.

La comparación entre los métodos de cálculo del IVUI —promedio simple y ponderado— evidenció que ambos permiten identificar zonas vulnerables; sin embargo, el IVUI ponderado proporciona una representación más precisa al considerar la frecuencia relativa de eventos con distintos periodos de retorno. La ponderación aplicada (0.5 para eventos de 5 años, 0.3 para 25 años y 0.2 para 50 años) permite priorizar la atención sobre eventos recurrentes, sin descuidar el impacto de eventos extremos, y ofrece una base sólida para la planificación a largo plazo.

El análisis del peligro hidráulico reveló que la velocidad del flujo es el factor que más influye en el IVUI, ya que velocidades superiores a 0.8 m/s representan un riesgo considerable para la movilidad y estabilidad de las personas. La profundidad del agua también impacta, especialmente cuando supera 1.5 metros, aumentando el riesgo de pérdida de control para peatones y vehículos. Estos resultados respaldan estudios previos sobre la estabilidad humana en condiciones de flujo, validando la metodología para reclasificar el peligro con base en tirante y velocidad.

En cuanto a la distribución espacial del IVUI, las zonas de mayor vulnerabilidad se ubicaron principalmente cerca del cauce, donde la exposición a flujos rápidos y profundos es mayor. No obstante, se identificaron áreas alejadas del cauce con altos valores de IVUI, atribuidos a deficiencias en infraestructura, limitaciones en el sistema de drenaje y condiciones socioeconómicas adversas, lo que subraya la necesidad de una gestión integral del riesgo que considere factores físicos, urbanos y sociales.

Desde el punto de vista metodológico, la modelación hidráulica con HEC-RAS integrada en un SIG permitió obtener resultados detallados y georreferenciados, facilitando la identificación de zonas críticas y la elaboración de cartografías útiles para la toma de decisiones. Sin embargo, la precisión de estos resultados depende de la calidad y resolución de los insumos, como Modelos Digitales de Elevación y datos pluviométricos, por lo que futuras evaluaciones podrían beneficiarse de mejoras en estos datos.

Finalmente, los resultados del IVUI pueden orientar medidas de mitigación, como la mejora del drenaje urbano, la regulación del uso del suelo en áreas vulnerables y el diseño de infraestructura resiliente. Además, la metodología puede replicarse en otras microcuencas urbanas con problemáticas similares, contribuyendo al desarrollo de estrategias de adaptación basadas en evidencia científica. No obstante, se reconoce que factores adicionales, como el acceso a información sobre riesgos, la organización comunitaria y la eficacia de sistemas de alerta temprana, también influyen en la respuesta ante eventos extremos y deberían incorporarse en estudios futuros para complementar la evaluación del IVUI.

Bibliografía

1. Zepeda, O., Hernández, Edgar., Torres, Lucrecia, (2006), *Conceptos básicos sobre peligros, riegos y su representación geográfica*, Guía básica para la elaboración y atlas estatales y municipales de peligros y riesgos, Centro Nacional de Prevención de Desastres.
2. Adger, W. N. (2006). *Vulnerability*. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
3. Alcántara-Ayala, Irasema. (2019). *Desastres en México: mapas y apuntes sobre una historia inconclusa*. *Investigaciones geográficas*, (100), e60025. Epub 27 de febrero de 2020. <https://doi.org/10.14350/rig.60025>
4. Álvarez Trinidad, J. A. (2023). *Análisis de la resiliencia comunitaria y la protección civil ante inundaciones en la microrregión Potinaspak, Tuxtla Gutiérrez, México*. Universidad Autónoma de Chiapas. Recuperado de <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/2088>
5. Angulo, R. C., & Álvarez, J. L. (2018). *Criterios para el diseño de infraestructura con impacto hidrológico cero en zonas urbanas de México*. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).
6. Aparicio Mijares F.J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa, México, 302 pp.
7. Ayala-Carcedo, F. J. (2002). *Estrategias y medidas de mitigación del riesgo de inundaciones. Gestión de zonas inundables*. En F. J. Ayala-Carcedo & J. Olcina Cantos (Coords.), *Riesgos naturales* (pp. 977-995). Editorial Ariel.
8. Ayala-Carcedo, F. J., & Olcina Cantos, J. (Coords.). (2002). *Riesgos naturales* (1ª ed., 1512 pp.). Editorial Ariel. Ayala-Carcedo, F.J., (2002). *Estrategias y medidas de mitigación del riesgo de inundaciones. Gestión de zonas inundables*. En: F.J. Ayala-Carcedo y J. Olcina Cantos (Coords.), *Riesgos Naturales*. 52, 977-995, Editorial Ariel, Ariel Ciencia, 1ª edición, 1512 pp., Barcelona.
9. Berger, C., Silva, V., & Álvarez, A. (2020). *Gestión integral de arroyos urbanos en el contexto de cambio climático*. *Revista de Estudios Urbanos*, 15(3), 45-62.
10. briBertrand-Krajewski, J. L., Fletcher, T. D., & Mitchell, V. G. (2008). *Urban drainage: out-of-sight-out-of-mind?* *Water Science and Technology*, 57(11), 1867–1872.

11. *Bitrán Bitrán, Daniel. 2001. Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el periodo 1980-99. México: Secretaría de Gobernación y Centro Nacional de Prevención de Desastres. <http://www.cenapred.unam.mx/es/DocumentosPublicos/PDF/SerieImpacto/Impacto1.pdf>*
12. *Bubeck, P., Botzen, W. J. W., & Aerts, J. C. J. H. (2012). A review of risk perceptions and other factors that influence flood mitigation behavior. Risk Analysis, 32(9), 1481-1495. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2011.01783.x>*
13. *Cardona, O. D., van Aalst, M. K., Birkmann, J., Fordham, M., McGregor, G., Rosa, P., ... & Lavell, A. (2012). Determinants of risk: exposure and vulnerability. In C. B. Field et al. (Eds.), Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX) (pp. 65–108). Cambridge University Press.*
14. *CENAPRED (2020). Atlas Nacional de Riesgos. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.*
15. *Chacón, W. (2024). Urbanización y deforestación provocan inundaciones. Cuarto Poder. Recuperado de Cuarto Poder*
16. *Chang, H. (2003). Urban flood disaster management. CRC Press.*
17. *Chang, S. E. (2016). Urban Flooding and Resilience: Planning for an Uncertain Future. Springer.*
18. *Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill.*
19. *Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada (1a. ed.). Bogotá: Mc Graw Hill*
20. *COLMEX. (2018). COLMEX (El Colegio de México). México: El Colegio de México, BBVA Bancomer.*
21. *Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). Reporte anual de eventos hidrometeorológicos en México. <https://www.gob.mx/cna>*
22. *Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). Base de Datos Climatológica Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>*
23. *CONAGUA. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Drenaje Pluvial Urbano; Comisión Nacional del Agua. Naturales, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos: Ciudad de México, México, 2016; ISBN 9786076260159.*

24. Cutter, S. L. (1993): *Living with Risk*, Arnold, Londres-Nueva York, 214 pp.
25. Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2008). *Social vulnerability to environmental hazards*. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242–261.
26. Cutter, S. L., Burton, C. G., & Emrich, C. T. (2015). *Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions*. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 7(1), 1–22. <https://doi.org/10.2202/1547-7355.1732>
27. Dauphiné, A. (2003): *Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer*, Armand Colin, París, 280 pp
28. Fernández, M. A. (2014). *Vulnerabilidad urbana: aproximaciones teóricas y metodológicas desde la geografía*. *Revista de Geografía Norte Grande*, (58), 9–30.
29. Folke, C. (2006). *Resilience: The emergence of a perspective for social–ecological systems analyses*. *Global Environmental Change*, 16(3), 253–267. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.04.002>
30. Füssel, H. M. (2007). *Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research*. *Global Environmental Change*, 17(2), 155–167.
31. García Benítez, M., & Fernández Alcántara, J. C. (2024). *Atlas de habitabilidad urbana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (1ª ed.)*. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
32. García Benítez, M., Nucamendi Hernández, S., & Ávila Flor, O. (2022). *Condiciones de habitabilidad ante inundaciones: el caso de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México*. *Decumanus*, 7(2), 1–18. Recuperado de <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/decumanus/article/view/4513/7209>
33. García, T. (2024). *Cauce artificial inunda calles de Tuxtla Gutiérrez*. *El Heraldo de Chiapas*. Recuperado de *El Heraldo de Chiapas*
34. García, W., Delfín, M., Ledezma, M., & Arévalo, B. (2021). *Integrando métodos de evaluación de riesgos de deslizamientos e inundaciones en cuencas del Tunari y zona de Alto Cochabamba*. *Acta Nova*, 10(1), 61–95.
35. Gleick, P. H. (1993). *Water in crisis: A guide to the world's fresh water resources*. Oxford University Press.
36. Global Disaster Risk Centre. (2023). *Cities vulnerability to disasters*.
37. Gobierno del Estado de Chiapas. (2021). *Carta Geográfica de Chiapas 2021*.

38. Hernández-Tapia, G. M. (2017). *Ríos urbanos. Análisis de la relación entre el desarrollo urbano y la pérdida de los ecosistemas fluviales.*
39. Huang, S., Fu, G., Han, D., & Zhu, Z. (2018). *Failure mechanisms and risk assessment of flood control infrastructures: A review.* *Journal of Hydrology*, 564,
40. Hydrologic engineering center (2015). *HEC-HMS. Hydrologic Modeling System. User's Manual.* US Army Corps of Engineers.
41. INEGI. (2010). *Hidrografía.* INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/>
42. INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020. Principales resultados por localidad (ITER).*
43. Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgos de Desastres del Estado de Chiapas. (2015). *Atlas de Riesgo del Municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.*
44. IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press.
45. Johnson, R., & Kuby, P. (2008). *Estadística elemental: Lo esencial.* México, D.F.: Cengage Learning
46. Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., ... & Sherstyukov, B. (2017). *Flood risk and climate change: global and regional perspectives.* *Hydrological Sciences Journal*, 62(1), 1-28.
47. Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., ... & Sherstyukov, B. (2017). *Flood risk and climate change: global and regional perspectives.* *Hydrological Sciences Journal*, 62(1), 1-28.
48. Li, Y., Zhang, Q., & Jiang, Y. (2019). *Impacts of urbanization on hydrological processes in small watersheds.* *Science of the Total Environment*, 648, 974-982.
49. Lozano, M. A. (2008). *El riesgo de inundaciones y la vulnerabilidad en áreas urbanas. Análisis de casos en España.* *Estudios geográficos*, 69(265), 385-416.
50. Maidment, D. R. (1993). *Handbook of Hydrology.* McGraw-Hill.
- 51.
52. , J., Morales, A., & Gómez, M. (2017). *Análisis espacial de la vulnerabilidad a inundaciones en zonas urbanas del sureste mexicano.* *Revista Mexicana de Ciencias Sociales*, 9(2), 85–103.

53. Martínez, J., Morales, A., & Gómez, M. (2017). *Análisis espacial de la vulnerabilidad a inundaciones en zonas urbanas del sureste mexicano*. *Revista Mexicana de Ciencias Sociales*, 9(2), 85–103.
54. Martínez, (2024, 27 de septiembre). *Importante conocer las zonas de riesgo en Tuxtla Gutiérrez*. *Meganoticias*. <https://www.meganoticias.mx/tuxtla-gutierrez/noticia/importante-conocer-las-zonas-de-riesgo-en-tuxtla-gutierrez/554712>
55. Mora Chaparro, J.C, Hernández Borges, E.E. & Mora Mora, L.L. (2023). *Mapa de riesgos de inundación en la Microcuenca Hidrográfica 24 de Junio, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México*. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 7 (1), 116-130. <https://doi.org/10.55467/reder.v7i1.111>.
56. Novelo-Casanova, D. A. (2018). *Impacto de la urbanización en los cauces naturales: retos para la gestión ambiental*. Editorial Universidad Nacional Autónoma de México.
57. OMM/UNESCO, (1974), “Glosario hidrológico internacional”, WMO/OMM/BMO, No. 385, *Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, Suiza*.
58. Organización Meteorológica Mundial [OMM], & Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO]. (1974). *Glosario Hidrológico Internacional*.
59. Organización Panamericana de la Salud. 2010. “*Reseña del impacto los principales desastres*”.
60. PDUCP TGZ 2015-2040. (2015). *Programa de desarrollo urbano del centro de población de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas 2015-2040*
61. Piperno, Adriana y Pablo Sierra (2009) “*De la recuperación a la planificación del desarrollo: el caso de las inundaciones de Treinta y Tres (Uruguay) en La Gestión del Riesgo Urbano en América Latina: recopilación de artículos*”. EIRD, Panamá
62. Pizarro, R. (2001), *La vulnerabilidad social y sus desafíos: una mirada desde América Latina*. Serie Estudios Estadísticos y Prospectivos 6, Comisión Económica para América Latina (CEPAL), Santiago de Chile.
63. Pollution Sustainability Directory. (2023). *Urban vulnerability*. <https://pollution.sustainability-directory.com/term/urban-vulnerability>
64. Rojas Vilches, O., & Martínez Reyes, C. (2011). *Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales*. *Revista Universitaria de Geografía*, 20(1), 83-116.

65. Salas, J. D., Marco, J. B., Jiménez, M. A., & Martín, V. A. (2004). Hidrología y manejo de cuencas hidrográficas. *Editorial Universidad de Costa Rica*.
66. Salas, Marco, Jiménez, Martin, (2004), *Inundaciones, Serie de fascículos, Guía básica para la elaboración y atlas estatales y municipales de peligros y riesgos, secretaria de Seguridad Y Protección Ciudadana, Centro Nacional de Prevención de Desastres*.
67. Samaniego, J. M. (2020). *Vulnerabilidad socioambiental en zonas urbanas: Una mirada integral para la gestión del riesgo. Revista Latinoamericana de Medio Ambiente y Sociedad, 6(1), 45-60*.
68. Slovic, P. (2000). *The perception of risk. Earthscan Publications*.
69. Smith, K. (2013). *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster (6th ed.)*. Routledge.
70. SNGR, PNUD, (2012). *Propuesta Metodológica: Análisis de Vulnerabilidad a Nivel Municipal. Quito: AH Editorial*.
71. U.S. Army Corps of Engineers. (2020). *HEC-RAS river analysis system, version 6.0: User's manual. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx>*
72. U.S. Army Corps of Engineers. (2021). *HEC-HMS hydrologic modeling system, version 4.9: User's manual. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation.aspx>*
73. U.S. Army Corps of Engineers. (2023). *HEC-RAS river analysis system, version 6.4: User's manual. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation.aspx>*
74. UNDRR (2023). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR 2023). United Nations Office for Disaster Risk Reduction*.
75. UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*.
76. Voudoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., Giardino, A., Feyen, L., & Salamon, P. (2020). *Extreme sea levels on the rise along Europe's coasts. Earth's Future, 8(3), e2019EF001321*.
77. Wisner, B., Adams, J., & Cannon, T. (2022). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters (3rd ed.)*. Routledge.

78. Wong, T. H. F., & Brown, R. R. (2019). *The water sensitive city: principles for practice*. *Water Science and Technology*, 70(7), 1141-1153.