

DOI: 10.24850/j-tyca-18-03-09

Artículos

Modelación hidráulica bidimensional y exposición poblacional para evaluar la peligrosidad por inundación en una ciudad semiárida del noroeste de México

Two-dimensional hydraulic modeling and population exposure to assess flood hazard in a semi-arid city in northwest Mexico

Argelia Tiburcio-Sánchez¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5674-2597>

Agustín Robles-Morua², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8813-8124>

Luis Arturo Méndez-Barroso³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7467-5498>

Israel Huerta-Ibarra⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4247-918X>

¹Instituto Tecnológico Superior de Cajeme-Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Ciudad Obregón, Sonora, México, atiburcio@secihtl.mx

²Instituto Tecnológico de Sonora-Departamento de Ciencias del Agua y del Medio Ambiente, Ciudad Obregón, Sonora, México, aroblesmorua@gmail.com

³Instituto Tecnológico de Sonora-Departamento de Ciencias del Agua y del Medio Ambiente, Ciudad Obregón, Sonora, México, luis.mendez78585@potros.itson.edu.mx



⁴Instituto Politécnico Nacional-Centro de Vinculación y Desarrollo
Regional Cajeme, Ciudad Obregón, Sonora, México, ihuertai@ipn.mx

Autora para correspondencia: Argelia Tiburcio Sánchez,
atiburcio@secihti.mx

Resumen

Las inundaciones en ciudades de regiones semiáridas influenciadas por Monzón de Norteamérica, aunque esporádicas, pueden generar impactos severos debido a la ausencia de sistemas de drenaje pluvial. Esta condición se ve agravada por los escurrimientos provenientes de las zonas periurbanas. Que ingresan a la zona urbana debido a la baja infiltración de los suelos y la escasa vegetación. Este estudio evalúa la peligrosidad por inundaciones y la exposición poblacional en Ciudad Obregón, Sonora, mediante un enfoque integrado que combina la simulación hidráulica, el análisis de escenarios de precipitación y la estimación de población expuesta. Se analizaron cinco eventos de precipitación con distintos periodos de retorno (7 a 141 años), definidos a partir de registros históricos diarios de la CONAGUA y registros horarios de alta resolución del Distrito de Riego del Río Yaqui. Los resultados muestran que los eventos con precipitaciones superiores a 100 mm generan niveles de peligrosidad significativos. El escenario de 104 mm fue el más crítico, con una superficie inundada de 563,892 m² y 3,492 personas expuestas, de las cuales 1,156 se ubicaron en zonas de alta peligrosidad de acuerdo con el Índice de Peligrosidad Hidráulica propuesto, el cual pondera profundidad (80%) y velocidad del flujo (20%). Se concluye que la metodología constituye una herramienta robusta y transferible para

evaluar la peligrosidad de inundación en ciudades de regiones semiáridas, aportando información útil fortalecer la planificación territorial, la gestión del riesgo y el diseño de políticas públicas orientadas a la adaptación frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

Palabras clave: inundación, modelo matemático, precipitación, zona árida, zona urbana, reducción del riesgo de desastres, Sonora, México.

Abstract

Floods in cities located in semi-arid regions influenced by the North American Monsoon, although sporadic, generate severe impacts due to the lack of storm drainage systems. This condition is exacerbated by runoff originating from peri-urban areas that enters the urban environment because of low soil infiltration capacity and sparse vegetation cover. This study evaluates flood hazard and population exposure in Ciudad Obregón, Sonora, using an integrated approach that combines hydraulic simulation, precipitation scenario analysis, and exposed population estimation. Five rainfall events with return periods ranging from 7 to 141 years were analysed, based on historical daily records from CONAGUA and high-resolution hourly rainfall data from the Yaqui River Irrigation District. The results indicate that rainfall events exceeding 100 mm generate significant flood hazard levels. The 104.4 mm rainfall scenario was identified as the most critical, with an inundated area of 563,892 m² and 3,492 exposed inhabitants, of whom 1,156 were in high-hazard areas according to the proposed Hydraulic Hazard Index, which weights flow depth (80%) and flow velocity (20%). The proposed methodology is robust and transferable for evaluating flood hazard in semiarid urban environments, providing valuable information to support

land-use planning, flood risk management, and the development of public policies aimed at enhancing adaptation to extreme hydrometeorological events.

Keywords: floods, mathematical models, precipitation, arid zones, urban areas, disaster risk reduction, Sonora, Mexico.

Recibido: 19/01/2026

Aceptado: 06/08/2026

Publicado *ahead of print*: 25/09/2026

1. Introducción

Las inundaciones representan una de las amenazas naturales más devastadoras a escala mundial, con impactos significativos sobre la seguridad de la población, la infraestructura y el desarrollo sostenible (Zhang, *et al.*, 2025). En las últimas décadas, el incremento de la urbanización, la ocupación de zonas susceptibles a inundación y la mayor ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos han incrementado la exposición de las ciudades, convirtiendo a las inundaciones en uno de los principales desafíos para la gestión territorial.

Aunque la investigación y la gestión de inundaciones han avanzado significativamente en regiones húmedas y tropicales, la comprensión de estos fenómenos en contextos áridos y semiáridos sigue siendo limitada (Robertson *et al.*, 2014; Pizzorni *et al.*, 2024). En estas regiones, la gestión del agua se ha orientado tradicionalmente hacia la escasez hídrica y la mitigación de sequías, relegando la peligrosidad por inundación a un segundo plano. Sin embargo, esta percepción contrasta con la ocurrencia

de eventos de precipitación extrema, capaces de generar inundaciones repentinas de gran impacto social, económico y ambiental, fenómeno descrito como la paradoja sequía- inundación (Lin, 1999; Nabinejad & Schüttrumpf, 2023).

Las inundaciones en regiones semiáridas presentan una dinámica hidrológica particular, caracterizada por la elevada variabilidad espacial y temporal de la precipitación, la ocurrencia de tormentas convectivas intensas y la limitada capacidad de infiltración de los suelos, condiciones que favorecen la generación de escurrimientos superficiales concentrados (Wheater, 2008; Al-Qurashi *et al.*, 2008). Estas condiciones representan un desafío adicional para las ciudades localizadas en estos ambientes, donde el crecimiento urbano suele desarrollarse sin considerar plenamente los cauces naturales de escurrimiento y las zonas potencialmente inundables.

En numerosas ciudades de regiones semiáridas, la insuficiente cobertura de infraestructura de drenaje pluvial ha dado lugar a configuraciones funcionales conocidas como sistemas calle-canal, en las que las vialidades operan como los principales conductos para el desalojo de los escurrimientos superficiales durante eventos de lluvia intensa. Bajo estas condiciones, el agua circula sobre la red vial siguiendo la pendiente natural del terreno hasta concentrarse en las zonas topográficamente más bajas, incrementando la profundidad y la velocidad del flujo, así como la exposición de la población y de la infraestructura urbana (Nabinejad & Schüttrumpf, 2023).

En México, las regiones áridas y semiáridas ocupan aproximadamente el 63 % del territorio nacional y concentran cerca del 41 % de la población (Díaz-Padilla *et al.*, 2011). Particularmente en el noroeste del país, la combinación entre lluvias intensas asociadas al

Monzón de Norteamérica, crecimiento urbano acelerado y deficiencias en la infraestructura hidráulica ha incrementado la incidencia de inundaciones urbanas. Diversos estudios han documentado esta problemática desde distintas perspectivas. En Baja California se ha destacado la necesidad de desarrollar estrategias de gestión que integren simultáneamente los desafíos asociados a la sequía y a las inundaciones bajo escenarios de cambio climático (Imaz-Lamadrid *et al.*, 2023). Asimismo, en Guasave, Sinaloa, se demostró que la expansión urbana y las modificaciones antropogénicas del relieve alteran los patrones naturales de drenaje y favorecen la ocurrencia de inundaciones (Peinado Guevara *et al.*, 2022).

A pesar de estos avances, persisten importantes vacíos de conocimiento en la evaluación de la peligrosidad por inundación en ciudades semiáridas. La mayoría de los estudios se ha centrado en la caracterización hidrológica de los eventos, el análisis del crecimiento urbano o la simulación hidráulica de manera independiente. En contraste, son escasas las investigaciones que integran registros pluviométricos de alta resolución temporal, la modelación hidráulica bidimensional para determinar las zonas inundables y el análisis espacial de la exposición poblacional para identificar las zonas con mayor peligrosidad por inundación. Esta limitación restringe la disponibilidad de información espacialmente explícita para apoyar la planificación territorial y la toma de decisiones en ciudades con infraestructura de drenaje pluvial limitada.

Ciudad Obregón, Sonora, constituye un caso de estudio representativo de esta problemática. Su localización en una planicie aluvial de baja pendiente, la influencia del Monzón de Norteamérica y la ausencia de una red pluvial funcional favorecen la ocurrencia de inundaciones durante eventos de lluvia intensa, afectando principalmente

a sectores urbanos localizados sobre corredores naturales de escurrimiento.

Con base en este contexto, el objetivo de este estudio es evaluar la peligrosidad por inundación y la exposición poblacional en el área urbana de Ciudad Obregón, Sonora, mediante la integración de escenarios de precipitación, modelación hidráulica bidimensional y análisis geoespacial, con el propósito de generar información que contribuya a fortalecer la planificación territorial y la gestión de inundaciones en ciudades de regiones semiáridas.

1.1. Marco teórico

1.1.1. Peligrosidad por inundación y exposición poblacional

La evaluación de los desastres asociados a inundaciones se fundamenta en la interacción entre tres componentes principales: la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad. (Smith & Smith, 2013; Natenzon & Ríos, 2015). Aunque estos conceptos suelen emplearse de manera conjunta dentro de los estudios de riesgo, representan dimensiones distintas del problema y requieren procedimientos específicos de análisis.

La peligrosidad describe la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino y su intensidad física, mientras que la exposición corresponde a la presencia de población, infraestructura o bienes localizados en las zonas susceptibles de ser afectadas. Por su parte, la vulnerabilidad se refiere al grado de susceptibilidad de dichos elementos para sufrir daños ante la ocurrencia del fenómeno (Smith & Smith, 2013; Natenzon, 1995).

Para esta investigación, el análisis se desagrega en dos componentes: peligrosidad y exposición. La caracterización de estos componentes constituye una etapa fundamental para identificar áreas prioritarias de intervención territorial, reconociendo que la vulnerabilidad social constituye una dimensión complementaria que excede el alcance del presente estudio. Esta distinción es consistente con la literatura especializada, que define el riesgo como la combinación de peligrosidad, exposición y vulnerabilidad (Smith & Smith, 2013), y permite circunscribir el alcance de esta nota técnica a la cuantificación de la amenaza física y la población potencialmente afectada.

1.1.2. Fundamentos de la modelación hidrológica

Las inundaciones urbanas en regiones áridas y semiáridas presentan características particulares derivadas de la baja infiltración de los suelos, la ocurrencia de lluvias intensas de corta duración y el creciente proceso de impermeabilización asociado a la expansión urbana. Estas condiciones favorecen respuestas hidrológicas rápidas y elevadas tasas de escorrentía superficial (Mishra & Singh, 2003).

La definición de escenarios de precipitación para estudios hidrológicos requiere caracterizar la frecuencia con que ocurren los eventos extremos de lluvia. Para ello se emplean técnicas de análisis de frecuencia que estiman la probabilidad de excedencia y el período de retorno de las precipitaciones máximas registradas. El período de retorno representa el intervalo promedio de tiempo en el que un evento de determinada magnitud puede ser igualado o superado y constituye uno de los principales criterios para el diseño hidrológico y la evaluación de fenómenos extremos (Chow *et al.*, 1988). En este estudio se utilizó el

método de posición de trazado de Weibull, el cual ordena los eventos máximos de una serie histórica de mayor a menor magnitud y calcula su frecuencia de ocurrencia mediante la expresión:

$$T = \frac{n + 1}{m}$$

donde:

T = período de retorno (años)

n = número de años de registro

m = orden del evento dentro de la serie

A partir del período de retorno puede estimarse la probabilidad anual de ocurrencia como:

$$P = \frac{100}{T}$$

Estas relaciones constituyen un procedimiento ampliamente utilizado en hidrología para la caracterización de eventos extremos y la definición de lluvias de diseño (Chow *et al.*, 1988).

Para estimar la escorrentía en zonas con escasez de datos, se pueden utilizar diversos modelos hidrológicos (Devia *et al.*, 2015). Uno de los métodos más populares a nivel mundial es el método del Número de Curva (SCS-CN) del Servicio de Conservación de suelos de E.U.A. (actualmente NRCS). Este método fundamenta la transformación de la lluvia en escorrentía bruta (exceso de precipitación) basándose en el uso

de suelo, el grupo hidrológico del suelo y las condiciones de humedad antecedente (Chow *et al.*, 1988). En el contexto de zonas urbanas semiáridas, los valores del número de curva CN son típicamente altos (85-98) debido a la alta permeabilidad de las superficies, lo que implica que la mayor parte de la lluvia se convierte en escorrentía superficial (Cea *et al.*, 2025). La lluvia efectiva así calculada se utiliza como entrada para la generación de hidrogramas de escorrentía, que constituyen el forzamiento de los modelos hidráulicos. A pesar de la utilidad de este tipo de estudios de modelación hidrológica urbana, ejecutarlos requiere de una gran cantidad de datos y principalmente de mediciones de escurrimiento para calibrar y validar, los cuales rara vez se tienen en zonas urbanas.

Ante esta limitante de datos para ejecutar modelos más avanzados, en este trabajo se propone el uso de técnicas que estiman la propagación del flujo superficial en entornos urbanos requiere resolver las ecuaciones de agua someras bidimensionales (2D-SWE) o ecuaciones de Saint-Venant en 2D. Estas ecuaciones permiten simular la distribución espacial de profundidades y velocidades considerando la influencia de la topografía urbana y las características superficiales del terreno (Bates, 2022; de Almeida & Bates, 2013). El modelo "Flood Simulation" de ArcGIS Pro, utilizado en este estudio, resuelve numéricamente las ecuaciones 2D-SWE mediante un esquema de volúmenes finitos, permitiendo calcular la evolución temporal de la profundidad y velocidad del flujo superficial a partir de un hietograma de precipitación y las características topográficas del terreno (ESRI, Environmental Systems Research Institute, 2021).

1.1.3. Índice de Peligrosidad Hidráulica

La peligrosidad para la población expuesta a inundaciones está determinada principalmente por la profundidad y la velocidad del flujo, variables que controlan la estabilidad física de las personas y el riesgo de arrastre. Diversos estudios han demostrado que la combinación de ambas variables proporciona una representación más adecuada del peligro que su análisis independiente, por lo que el producto profundidad-velocidad ($h \cdot V$) se ha consolidado como uno de los indicadores más utilizados para evaluar la pérdida de equilibrio y la seguridad de la población durante eventos de inundación (Shand *et al.*, 2011; Martínez-Gomariz *et al.*, 2016).

En el contexto de llanuras aluviales de baja pendiente, la profundidad del agua es el factor dominante en la determinación del daño potencial, mientras que la velocidad juega un papel secundario (Merz *et al.*, 2010; De Moel *et al.*, 2009). La asignación de ponderaciones en un índice de peligrosidad debe reflejar esta realidad física. Por ello, el Índice de Peligrosidad Hidráulica (HIP) propuesto en este estudio pondera la profundidad con un 80% y la velocidad con un 20%, siguiendo las recomendaciones de la literatura para ambientes de llanura aluvial donde la profundidad explica la mayor parte de los daños (70-85% de los casos). Este enfoque, basado en una combinación lineal ponderada, es ampliamente utilizado por su sencillez, transparencia e interpretación física (Merz *et al.*, 2010; De Moel *et al.*, 2009).

2. Materiales y métodos

2.1. Enfoque metodológico

El presente estudio adoptó un enfoque integrado y secuencial que comprendió la caracterización hidrológica de la cuenca urbana, la simulación hidráulica bidimensional de los escurrimientos superficiales, la evaluación de la peligrosidad mediante el criterio profundidad-velocidad ($h \cdot V$) y la estimación de la población potencialmente expuesta a partir de información censal a nivel manzana.

La elección de un modelo de flujo superficial 2D responde a la falta de información detallada de la red de alcantarillado en Ciudad Obregón, así como a su diseño histórico bajo el sistema "calle-canal". Como señalan Cea *et al.*, (2025), los modelos de flujo superficial 2D son apropiados para aplicaciones a escala local cuando la información de la red de alcantarillado es incompleta o inexistente, o cuando se carece de información de mediciones de escurrimiento para calibrar y validar modelos más avanzados, lo que se alinea con las condiciones de la zona de estudio.

2.2. Zona de estudio

La zona de estudio corresponde a Ciudad Obregón, cabecera del municipio de Cajeme, localizada en el sur del estado de Sonora, México (Figura 1). La ciudad es el principal núcleo del Valle del Yaqui, una de las zonas agrícolas más productivas del país. Su ubicación en una planicie aluvial de baja pendiente y su exposición a eventos de precipitación intensa asociados al Monzón de Norteamérica la convierten en un caso de estudio

representativo para el análisis de inundaciones urbanas en regiones áridas y semiáridas.

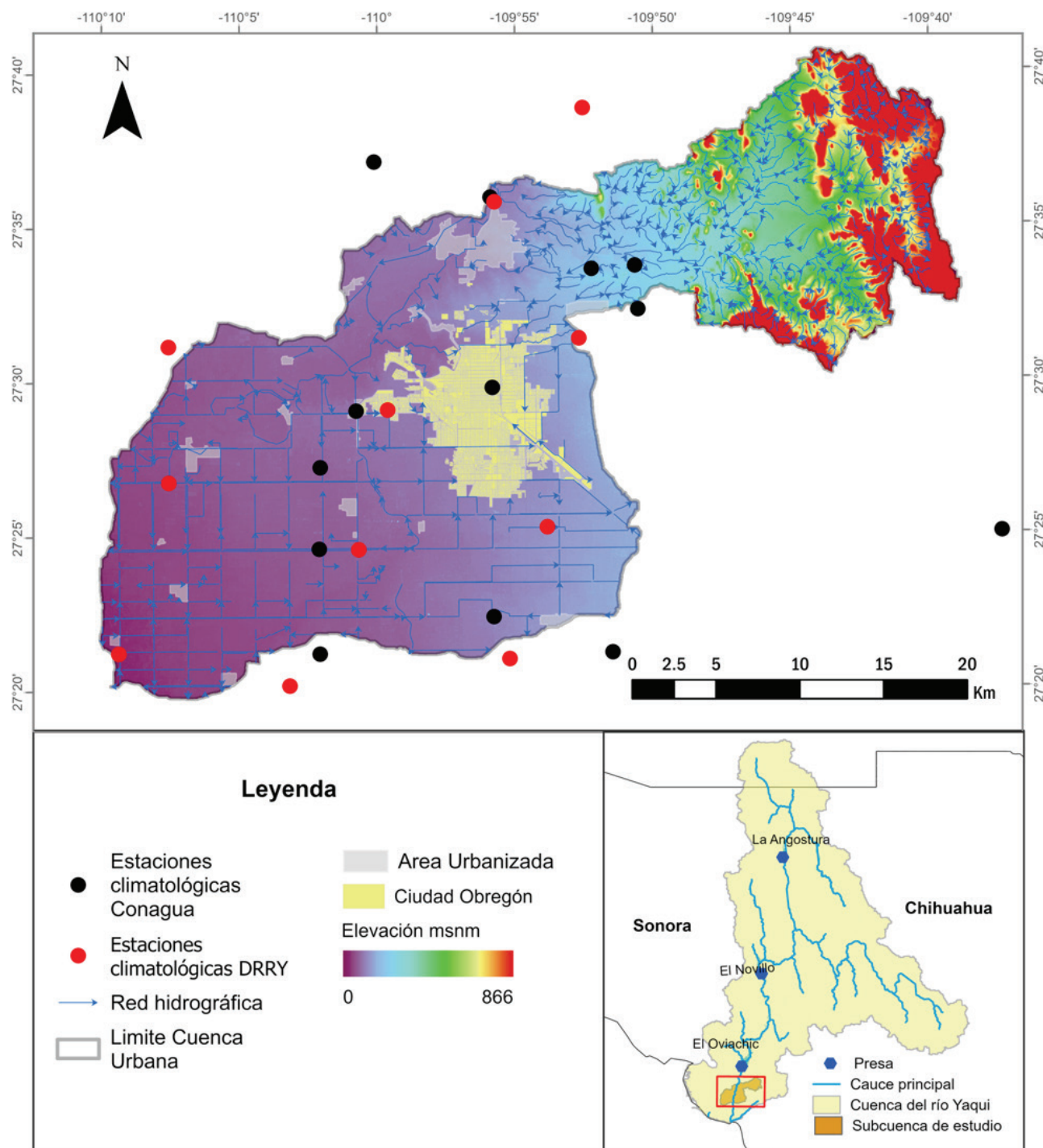


Figura 1. Localización geográfica de Ciudad Obregón, Sonora, y delimitación de la subcuenca urbana analizada. Fuente: Elaboración propia con base en datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018; 2020).

Ciudad Obregón se localiza a una altitud de 46 msnm en la porción baja de la cuenca del río Yaqui, cuya superficie total es de 79,172 km². Los escurrimientos de la cuenca alta son regulados por las presas Lázaro Cárdenas (La Angostura), Plutarco Elías Calles (El Novillo) y Álvaro Obregón (Oviachic) (Martínez-Austria *et al.*, 2014). Sin embargo, la dinámica de las inundaciones urbanas está determinada principalmente por los escurrimientos generados en la zona inmediata de aporte a la ciudad y por el drenaje superficial, caracterizado por pendientes menores al 2%.

Para el análisis de este estudio se delimitó la subcuenca urbana de 917 km² (ver Figura 1), de la cual aproximadamente 91% corresponde a usos agrícolas y periurbanos, mientras que la mancha urbana consolidada representa cerca del 8% del territorio (INEGI, 2020). La ciudad dispone de una red vial de aproximadamente 1,488 km y una red de drenaje superficial cercana a 1,270 km integrada por cauces naturales, canales y drenes agrícolas que condicionan la conducción de los escurrimientos durante eventos de lluvia intensa que señala el Instituto Municipal de Planeación Urbana de Cajeme (IMIP Cajeme, 2023). Asimismo, las áreas verdes representan el 3% de la superficie urbana, lo que limita la capacidad de retención e infiltración del agua.

El clima de la región es seco cálido, con una precipitación media anual histórica de aproximadamente 375 mm, con variaciones en el área periurbana que oscilan entre 255 mm y 420 mm (Tabla 1S). La distribución temporal de las lluvias presenta una marcada estacionalidad, concentrándose entre julio y septiembre alrededor del 75-80% del total anual. Durante este periodo ocurren tormentas de alta intensidad y corta duración que favorecen la generación de escorrentía superficial y la

ocurrencia de inundaciones repentinas. Eventos extremos asociados a tormentas tropicales como el registrado en la estación Hornos (1978), donde se alcanzaron 240 mm en 24 horas, evidencian la magnitud de los fenómenos que pueden afectar la ciudad (Márquez & Ortiz, 1978).

Sectores como el centro histórico, el poniente y el sur de la ciudad han reportado inundaciones recurrentes durante eventos extremos (Echeverría, 2024), evidenciando la limitada capacidad del sistema de drenaje pluvial actual. Estos eventos extremos, aunque infrecuentes, superan la capacidad de infiltración de los suelos y la capacidad de drenaje de la infraestructura urbana, generando escorrentía superficial rápida e inundaciones repentinas (Nabinejad & Schüttrumpf, 2023). La expansión urbana sobre terrenos de escasa pendiente, la presencia de infraestructura hidráulica agrícola interconectada y la recurrencia de eventos de precipitación extrema han favorecido la ocurrencia de inundaciones en distintos sectores de la ciudad. Estas condiciones convierten a Ciudad Obregón en un caso de estudio adecuado para evaluar la distribución de la peligrosidad por inundación y la población potencialmente expuesta ante eventos hidrometeorológicos extremos, ejemplificando los desafíos de las ciudades en contextos semiáridos donde la escasez hídrica permanente enmascara un riesgo latente.

2.3. Base de datos

La modelación hidrológica e hidráulica requirió la integración de información topográfica, pluviométrica y demográfica proveniente de distintas fuentes oficiales. Estos conjuntos de datos constituyeron la base para la construcción de los escenarios de precipitación, la simulación de inundaciones y la estimación de la población potencialmente afectada.

2.3.1. Modelo Digital de Superficie (MDS)

Se utilizó un Modelo Digital de Superficie (MDS) con resolución de 5 metros y escala 1:10,000, obtenido a partir de datos de altimetría de relieve proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2018). Se eligió el MDS porque incluye elementos sobre la superficie (edificaciones, vegetación arbórea, infraestructura) que pueden actuar como barreras o canales de flujo, un aspecto crítico en entornos urbanos densamente contruidos (Cea *et al.*, 2025). El MDS fue procesado en ArcGIS Pro para corregir depresiones artefactuales (Wang & Liu, 2006) y se remuestreó a una resolución de cálculo de 3.5 m para optimizar el balance entre detalle topográfico y eficiencia computacional.

Con el Modelo Digital de Superficie corregido hidrológicamente se delimitó la cuenca urbana que aporta escurrimientos desde las zonas periurbanas hasta la mancha urbana principal, considerando la dirección y acumulación del flujo superficial. La delimitación permitió identificar el área de aportación responsable de concentrar los escurrimientos durante los eventos de precipitación y constituyó la base espacial para la elaboración del mapa de isoyetas, así como para la definición de los escenarios de simulación hidrológica e hidráulica.

2.3.2. Información pluviométrica

La caracterización de la precipitación se realizó mediante la integración de información pluviométrica provenientes de dos fuentes de información complementarias: la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el Distrito de Riego del Río Yaqui (DRRY). La utilización conjunta de ambas bases de

datos permitió combinar series históricas de largo plazo para el análisis de frecuencia de las precipitaciones con registros de alta resolución temporal necesarios para la simulación hidrológica e hidráulica.

Los registros diarios históricos de precipitación de 15 estaciones climatológicas operadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) se emplearon para identificar los eventos extremos de lluvia, estimar sus respectivos períodos de retorno y generar el mapa de isoyetas de la cuenca urbana delimitada. Estas series constituyen la principal fuente de información histórica para el análisis estadístico de las precipitaciones máximas y permitieron caracterizar la distribución espacial de la lluvia, así como definir la magnitud de los escenarios de precipitación evaluados en este estudio (Tabla 1S del anexo).

Para complementar el análisis de la distribución espacial y temporal de la precipitación, se incorporaron los registros de 10 estaciones meteorológicas pertenecientes a la red del Distrito de Riego del Río Yaqui (DRRY), con una resolución temporal de 10 min. Estos registros permitieron analizar la variabilidad temporal y espacial de la lluvia en los eventos seleccionados y detectar las estaciones con información más representativa de la intensidad de las tormentas de lluvia. Con base en este análisis, se seleccionaron dos estaciones con los registros de mejor calidad y continuidad, a partir de las cuales se construyeron los hietogramas utilizados como datos de entrada en la modelación hidrológica e hidráulica. La alta resolución temporal de estas series permitió una representación fidedigna de la evolución de la intensidad de la precipitación en cada evento, condición indispensable para simular la generación y propagación de los escurrimientos superficiales (Tabla 2S del anexo).

Los registros fueron sometidos a un proceso de revisión para verificar su consistencia e integridad. Posteriormente, se organizaron en hietogramas correspondientes (Figura 1S del anexo) a cada evento de precipitación, conservando la resolución temporal original. Los hietogramas constituyeron la información de entrada de la herramienta “Flood Simulation” de ArcGIS Pro (ESRI, 2021), proporcionando la intensidad de precipitación y la precipitación acumulada requeridas por el modelo para cada intervalo de tiempo.

La integración de ambas fuentes permitió disponer de una base de datos consistente que combina la representatividad estadística de los registros históricos con el detalle temporal de los hietogramas, mejorando la caracterización de los eventos extremos utilizados en la modelación hidrológica e hidráulica. Las principales características de las bases de datos empleadas se resumen en la Tabla 1, mientras que la distribución espacial de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio se presenta en la Figura 2.

Tabla 1. Características de la información pluviométrica utilizada en la construcción de los escenarios de simulación

Fuente	Tipo de datos	Resolución temporal	Uso en el estudio
CONAGUA	Registros diarios de precipitación	Diaria	Análisis de frecuencia, estimación de periodos de retorno y elaboración de mapa de isoyetas
DRRY	10	10 min	Análisis de la distribución espacial de la precipitación y selección de estaciones representativas
DRRY	2	10 min	Construcción de hietogramas y entrada de la simulación hidrológico- hidráulica

Con el propósito de caracterizar la distribución espacial de la precipitación en el área de estudio, se elaboró un mapa de isoyetas de la subcuenca urbana mediante interpolación espacial por Kriging ordinario, utilizando los registros históricos de las 15 estaciones climatológicas de CONAGUA con series de al menos 30 años de observaciones siguiendo las recomendaciones de la World Meteorological Organization (WMO, 2012). La distribución espacial obtenida muestra un gradiente de precipitación media anual que varía de 286.33 mm en la porción oeste de la subcuenca hasta aproximadamente 467 mm en el sector noreste (Figura 2). Asimismo, el mapa evidencia una mayor densidad de estaciones meteorológicas en las áreas agrícolas del Valle del Yaqui, donde se concentra la red del Distrito de Riego del Río Yaqui, mientras que en la zona urbana la cobertura de estaciones es más limitada.

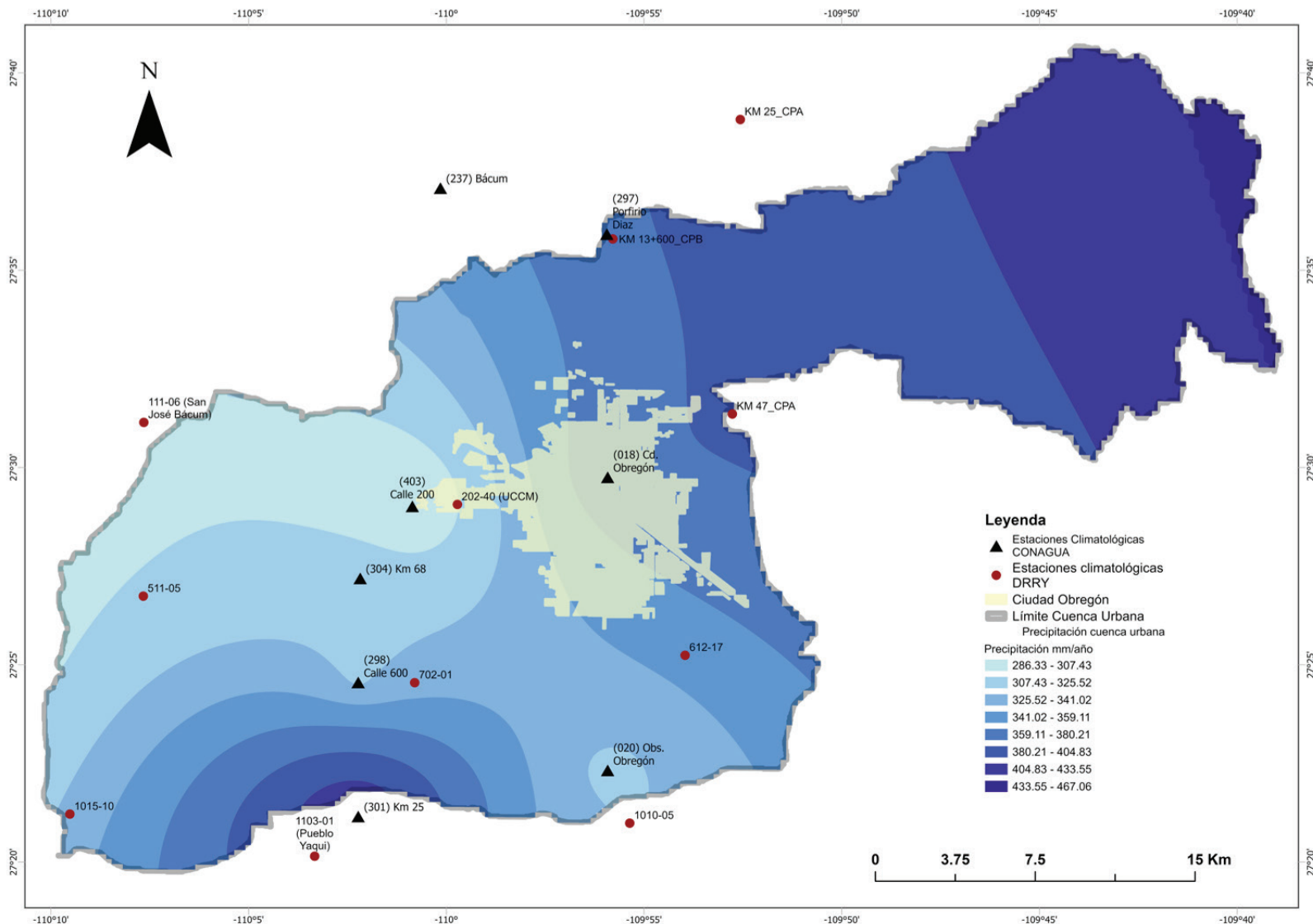


Figura 2. Distribución espacial de la precipitación media anual (isoyetas, en mm) y ubicación de las estaciones climatológicas en la subcuenca de estudio. Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA (2025) para las isoyetas y ubicación de las estaciones y datos del DRRY (2025) para la ubicación de las estaciones del Distrito de Riego.

2.3.3. Información demográfica

La información demográfica utilizada en este estudio provino del Sistema de Información Censal (SCINCE) 2020 del INEGI con datos del Censo de Población y Vivienda 2020 y de la cartografía geoestadística del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020). Se empleó la información censal a nivel de manzana urbana, por constituir la unidad espacial de mayor desagregación disponible para el análisis de la distribución de la población dentro del área urbana de Ciudad Obregón.

La cartografía de manzanas y la base de datos censal fueron integradas en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Posteriormente, la información fue homologada al mismo sistema de referencia cartográfica utilizado en la modelación hidrológica e hidráulica, garantizando la compatibilidad espacial con los resultados generados por Flood Simulation.

2.4. Definición de escenarios

Los escenarios de precipitación utilizados en la modelación hidrológica e hidráulica se definieron a partir de la integración de los registros históricos diarios de precipitación de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y los registros de lluvia de alta resolución temporal del Distrito de Riego del Río Yaqui (DRRY). Esta estrategia permitió combinar la representatividad estadística de una serie histórica de largo plazo con la variabilidad temporal de las tormentas observadas, indispensable para reproducir adecuadamente la respuesta hidrológica de la cuenca urbana.

Como etapa inicial, se analizó la serie histórica de precipitación anual correspondiente al periodo 1961–2023 de la estación climatológica

(018) Ciudad Obregón, con el propósito de caracterizar la variabilidad climática de la región e identificar los años asociados con eventos de precipitación extraordinaria (Figura 3). La serie evidencia la alta variabilidad interanual característica de las regiones semiáridas bajo la influencia del Monzón de Norteamérica, donde periodos de precipitación moderada alternan con años excepcionalmente lluviosos, capaces de generar inundaciones urbanas.

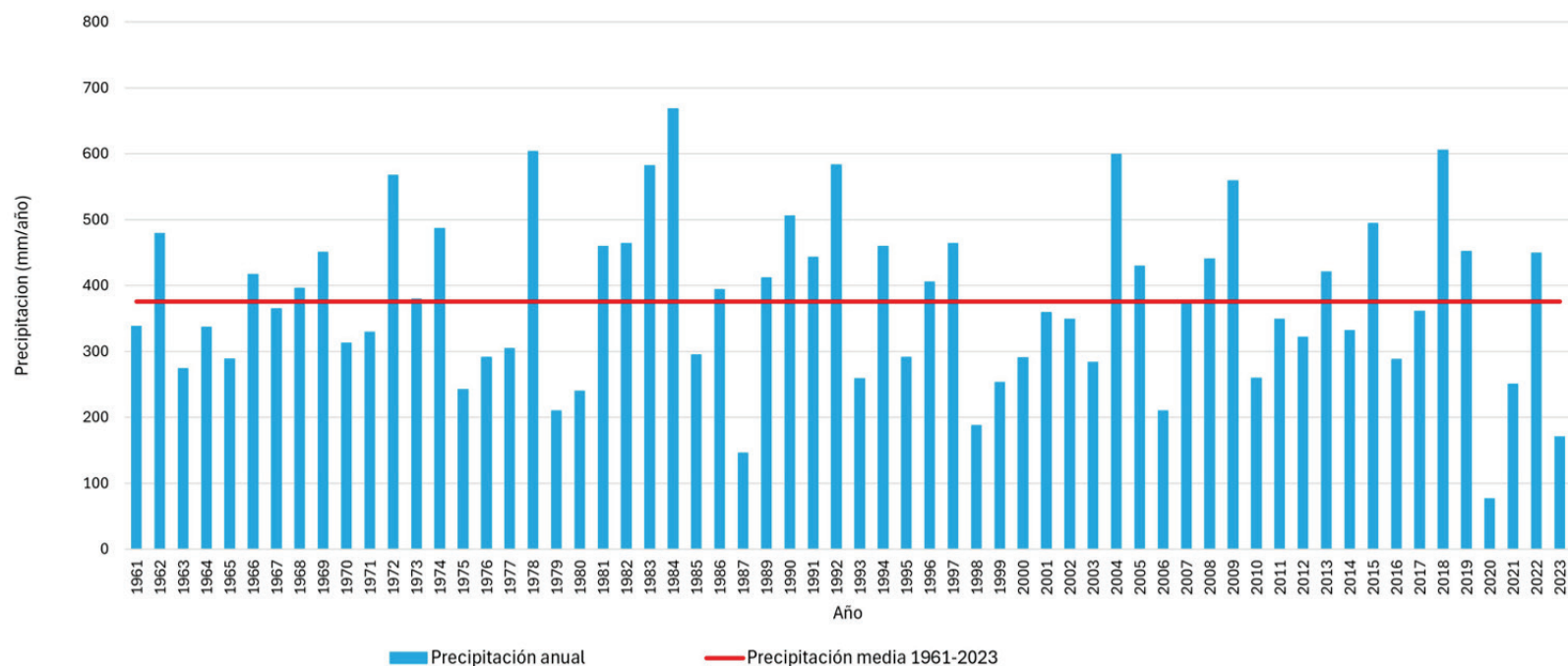


Figura 3. Serie temporal histórica de precipitación anual total (1961-2023) registrada en la estación (018) Cd. Obregon (CONAGUA). Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA (2025).

Posteriormente, se realizó un análisis de frecuencia de las precipitaciones máximas diarias anuales para estimar la probabilidad de ocurrencia y el período de retorno de los eventos extremos, siguiendo la

metodología propuesta por Chow *et al.* (1988). A partir de este análisis se seleccionaron cinco eventos representativos con precipitaciones acumuladas de 19.8, 60.8, 66.8, 85.6 y 104.4 mm, cuyos períodos de retorno varían entre 7 y 141 años. La selección de estos eventos permitió evaluar el comportamiento hidráulico del sistema urbano bajo diferentes niveles de severidad, desde tormentas relativamente frecuentes hasta eventos extremos de baja probabilidad de ocurrencia.

Los registros de las dos estaciones meteorológicas del DRRY seleccionadas se utilizaron para construir los hietogramas de los cinco eventos de precipitación, conservando la distribución temporal observada de lluvia con resolución de 10 min. Estos hietogramas constituyeron las condiciones de entrada para la modelación hidrológica e hidráulica, permitiendo representar de forma realista la evolución temporal de las tormentas durante la simulación hidrológica e hidráulica.

Dado que la precipitación constituye la principal variable de entrada del modelo hidrodinámico, cada escenario fue caracterizado mediante la precipitación acumulada, la duración del evento y la intensidad media de lluvia, esta última calculada como la relación entre la precipitación acumulada y la duración total del evento. Adicionalmente, se estimó la probabilidad anual de ocurrencia y el periodo de retorno correspondiente a cada escenario.

Como se observa en la Tabla 2, los escenarios seleccionados abarcan un amplio rango de condiciones de precipitación, desde eventos de baja intensidad y larga duración (eventos 1 y 3) hasta tormentas de alta intensidad y corta duración (evento 2). Asimismo, se incluyeron eventos de intensidad y duración intermedias (evento 4) y un evento frecuente de menor magnitud (evento 5). Esta diversidad permitió evaluar la respuesta hidráulica del sistema urbano frente a diferentes

patrones de lluvia característicos de las regiones semiáridas influenciadas por el Monzón de Norteamérica.

Tabla 2. Escenarios de precipitación analizados para la evaluación del riesgo de inundación.

No de evento	Estación Meteorológica	Precipitación acumulada (mm)	Duración (min)	Intensidad Media (mm/h)	Probabilidad de Ocurrencia (%)	Periodo de Retorno (años)	Patrón Intensidad-Duración Categoría	Evento Asociado
1	1000 202-40_(UCCM)DDRY	104.4	790	7.93	0.71%	141	Baja intensidad- larga duración Evento extremo	Depresión Tropical 19 E
2	KM 47_CPA13000 DDRY	85.6	80	64.20	1.05%	95	Alta intensidad-corta duración Evento extremo	Lluvias monzónicas
3	202-40_(UCCM)1000 DDRY	66.8	960	4.18	1.42%	70	Baja intensidad- larga duración Evento intermedio	Lluvias monzónicas
4	202-40_(UCCM)1000 DDRY	60.8	250	14.59	2.84%	35	Intensidad media- duración media Evento intermedio	Huracán Hilary
5	202-40_(UCCM)1000 DDRY	19.30	130	9.14	13.48%	7	Baja intensidad-corta duración Evento frecuente	Lluvias monzónicas

2.5. Modelación hidrológica e hidráulica

2.5.1. Estimación de la escorrentía superficial

En el presente estudio no se aplicó un modelo hidrológico de transformación lluvia-escorrentía, debido a que el área urbana de Ciudad Obregón está conformada predominantemente por superficies impermeables, como pavimentos asfálticos y de concreto, y no se dispone de información espacialmente detallada sobre las propiedades de infiltración de los suelos urbanos y tampoco se cuenta con información de mediciones de escurrimiento para poder calibrar y validar este tipo de modelos hidrológicos. Se adoptó un enfoque conservador consistente en

asumir una tasa de infiltración nula (0 mm h^{-1}) durante la simulación, equivalente a considerar que la totalidad de la precipitación se transforma en escorrentía superficial (coeficiente de escorrentía igual a 1).

Esta simplificación es consistente con estudios de modelación de inundaciones urbanas orientados a la evaluación de la peligrosidad, en los que el objetivo principal es representar escenarios de máxima generación de escurrimiento bajo eventos extremos, particularmente cuando la infiltración constituye una fracción reducida del balance hidrológico debido al elevado grado de impermeabilización de la superficie (Brunner, 2016; Cea *et al.*, 2025).

Bajo este supuesto, los hietogramas contruidos a partir de los registros de lluvia del Distrito de Riego del Río Yaqui se utilizaron directamente como condición de entrada del modelo hidráulico, conservando su resolución temporal de 10 min.

2.5.2. Simulación hidráulica

La propagación del flujo superficial se simuló mediante la herramienta Flood Simulation de ArcGIS Pro (ESRI, 2021), basada en la aproximación Local Inertial, adecuada para representar inundaciones urbanas sobre modelos digitales de alta resolución (de Almeida & Bates, 2013; Bates, 2022).

Como información de entrada se utilizaron el Modelo Digital de Superficie, los hietogramas de precipitación definidos para cada escenario y un coeficiente de rugosidad de Manning ($n = 0.013$), representativo de superficies pavimentadas de asfalto y concreto (Chow, 1959). Para cada escenario de simulación se obtuvieron mapas de profundidad máxima del flujo, velocidad máxima y extensión de la inundación, los cuales

constituyeron la base para la delimitación del área inundable, el cálculo del Índice de Peligrosidad Hidráulica (IPH) y la estimación de la población expuesta.

2.5.3. Delimitación y cuantificación del área inundable

El área inundada para cada escenario se delimitó a partir del ráster de profundidad máxima de flujo $D_s(x,y)$ obtenido mediante la herramienta Flood Simulation para cada escenario de precipitación; donde (x,y) representa la ubicación espacial de cada celda del Modelo Digital de Superficie (MDS) y s identifica el escenario de precipitación analizado. Para delimitar el dominio espacial de inundación, se definió un operador binario $I_s(x,y)$ que clasifica cada celda en función de la presencia o ausencia de agua superficial.

$$I_s(x,y) = \begin{cases} 1, & D_s(x,y) > 0 \\ 0, & D_s(x,y) = 0 \end{cases}$$

donde:

$I_s(x,y) = 1$ = indica que la celda se encuentra inundada para el escenario s

$I_s(x,y) = 0$ = representa una celda no inundada

El área total inundada para cada escenario (A_s) se obtuvo mediante la sumatoria de las áreas correspondientes a todas las celdas clasificadas como inundadas:

$$As = \sum_{x=1}^x \sum_{y=1}^y I_s(x, y) \Delta A$$

dónde:

X e Y = número de filas y columnas del ráster

ΔA = área de cada celda calculada como: $\Delta A = \delta^2$

Siendo δ la resolución espacial del Modelo Digital de Superficie (MDS). Para este estudio se empleó un MDS con resolución de 3.5 m, por lo que el área de cada celda fue de 12.25 m².

La cuantificación del área inundada constituye un paso intermedio fundamental dentro de la metodología, ya que permite transformar los resultados continuos de la simulación hidráulica en un indicador espacial directamente comparable con la cartografía censal. Este procedimiento facilita la integración de la información hidráulica con las unidades territoriales utilizadas para la estimación de la población expuesta.

Para cuantificar el área inundada en cada manzana censal, se empleó la herramienta Zonal Statistics as Table de ArcGIS Pro, utilizando las manzanas del Censo de Población y Vivienda 2020 como zonas de agregación y el ráster binario $I_s(x, y)$ como capa de entrada. La estadística SUM proporcionó el número total de celdas inundadas contenidas dentro de cada manzana, el cual se multiplicó por el área de la celda (ΔA) para obtener el área inundada correspondiente a cada unidad censal:

$$A_{s,m} = N_{s,m} \Delta A$$

donde:

$A_{s,m}$ = área inundada en la manzana m para el escenario s

$N_{s,m}$ = número de celdas inundadas dentro de la manzana

ΔA = área de cada celda del MDS (12.25 m²)

El área inundada cuantifica exclusivamente la extensión espacial de la inundación, no de su severidad. Por esta razón, en el presente estudio el área inundada se utilizó para estimar la población expuesta, mientras que la profundidad y la velocidad del flujo se utilizaron posteriormente para calcular el Índice de Peligrosidad Hidráulica (IPH). De esta forma, la exposición y la peligrosidad se evalúan mediante indicadores complementarios derivados de la simulación hidráulica.

2.6. Cálculo del Índice de Peligrosidad Hidráulica

Con el propósito de evaluar la distribución espacial de la peligrosidad hidráulica, se desarrolló un Índice de Peligrosidad Hidráulica (IPH) que integra las dos variables de salida principales de la simulación hidráulica: la profundidad máxima del flujo $D_s(x,y)$ y la velocidad máxima $V_s(x,y)$. Ambas variables fueron obtenidas para cada escenario de precipitación mediante Flood Simulation y constituyen los principales indicadores físicos asociados a la severidad de una inundación.

El índice se calculó para cada celda (x,y) y para cada escenario s mediante la siguiente expresión:

$$IPH_s(x,y) = (0.8 \cdot D_s(x,y) + 0.2 \cdot V_s(x,y)) \cdot \frac{T_s}{T_{ref}} \cdot \frac{I_s}{I_{ref}} \cdot \frac{1}{A}$$

dónde:

$D_s(x, y)$ = profundidad máxima en la celda (x, y) para el escenario s (m)

$V_s(x, y)$ = velocidad máxima en la celda (x, y) para el escenario s (m/s)

T_s = duración del evento s (segundos)

$T_{ref} = 3600s$ = tiempo de referencia (1 hora)

I_s = intensidad media del evento (mm/h), calculada como la precipitación total entre la duración

$I_{ref} = 1.0$ mm/h = intensidad de referencia

$A = 12.25$ m² = área de una celda

El factor de escala $\frac{T_s}{T_{ref}} \cdot \frac{I_s}{I_{ref}} \cdot \frac{1}{A}$ es constante para todo el dominio en cada escenario, por lo que la clasificación espacial del peligro depende únicamente de la combinación lineal $D_s(x, y)$ y $V_s(x, y)$. Este enfoque permite comparar la magnitud del peligro entre eventos de diferente duración e intensidad, manteniendo la consistencia de la clasificación.

Los pesos asignados reflejan la mayor influencia de la profundidad sobre la peligrosidad de la inundación en ciudades con pendientes muy bajas, como Ciudad Obregón, donde la afectación suele estar determinada principalmente por la altura alcanzada por la lámina de agua, mientras que la velocidad del flujo presenta una contribución secundaria. Esta ponderación se adoptó considerando las características geomorfológicas del área de estudio y fue evaluada posteriormente mediante un análisis de sensibilidad.

2.6.1. Análisis de sensibilidad y clasificación del Índice de Peligrosidad Hidráulica

Con el fin de evaluar la robustez de la ponderación adoptada (80% profundidad / 20% velocidad) en el Índice de Peligrosidad Hidráulica, se realizó un análisis de sensibilidad mediante la comparación de esquemas de ponderación alternativos. Se evaluaron cuatro escenarios de ponderación para el evento de 85.6 mm, seleccionado por ser representativo de los eventos extremos sin alcanzar la magnitud excepcional del evento de 104.4 mm. Los escenarios evaluados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Escenarios de ponderación utilizados para evaluar la influencia de la profundidad y la velocidad en el Índice de Peligrosidad Hidráulica.

Escenario	Peso profundidad	Peso velocidad	Denominación
1	90%	10%	Conservador
2	80%	20%	Base (seleccionado)
3	70%	30%	Equilibrado
4	50%	50%	Extremo

Para todos los escenarios se utilizaron los mismos umbrales de clasificación, obtenidos a partir de la distribución del IPH del escenario base (80/20). Los percentiles P20, P40, P60 y P80 se calcularon considerando la distribución completa de los valores del índice en toda el área urbana, incluyendo las celdas con IPH = 0. Este criterio permitió generar una clasificación homogénea del territorio, representar las zonas sin afectación y garantizar la comparabilidad espacial entre los diferentes

escenarios de ponderación. La Tabla 4 muestra los umbrales utilizados para clasificar la peligrosidad hidráulica.

Tabla 4. Umbrales de clasificación del Índice de Peligrosidad Hidráulica (IPH) obtenidos para el escenario base (ponderación 80/20).

Categoría	Umbral	Valor
Muy bajo	<P20	<0.000007
Bajo	P20- P40	0.000007–0.000024
Moderado	P40-P60	0.000024–0.000075
Alto	P60-P80	0.000075–0.001076
Muy alto	≥ P80	≥0.001076

2.7. Cálculo de la población expuesta

La estimación de la población expuesta se realizó mediante la integración de los resultados de la simulación hidráulica con la información censal a nivel de manzana. El procedimiento se estructuró en dos componentes complementarios: (i) la cuantificación de la población localizada dentro del área inundable (población expuesta total) y (ii) la identificación de la población que reside en zonas clasificadas con alta peligrosidad según el Índice de Peligrosidad Hidráulica (IPH).

2.7.1. Población expuesta total

La estimación de la población expuesta se realizó mediante la integración de los resultados de la simulación hidráulica con la cartografía censal del Censo de Población y Vivienda 2020 del INEGI. Como unidad espacial de

análisis se utilizaron las manzanas urbanas, debido a que constituyen la unidad geográfica de mayor desagregación disponible para la información demográfica y permiten una representación espacial más precisa de la distribución de la población.

La población expuesta para cada escenario se estimó a partir de la intersección espacial entre el área inundada (A_s), delimitada mediante el operador binario descrito anteriormente, y los centroides de las manzanas censales. Se consideró que una manzana se encontraba expuesta cuando su centroide quedaba contenido dentro del área inundada. La población expuesta se calculó mediante la siguiente expresión:

$$P_{exp,s} = \sum_{j=1}^M P_j I(\text{centroide}_j \in A_s)$$

donde:

$P_{exp,s}$ = Población expuesta para el escenario s

M = Número total de manzanas censales

P_j = Población de la manzana j

A_s = Área inundada correspondiente al escenario s

$I(\text{centroide}_j \in A_s)$ = función indicadora definida como: $I(\text{centroide}_j \in A_s) = \begin{cases} 1, & \text{si el centroide de la manzana } j \text{ pertenece a } A_s \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

La asignación de la población mediante el centroide de cada manzana supone una distribución homogénea de los habitantes dentro de la unidad censal. Este criterio, ampliamente utilizado en estudios de exposición a inundaciones (Smith *et al.*, 2019), proporciona una

estimación robusta, reproducible y ampliamente utilizada para la estimación de la población expuesta en estudios de inundación.

2.7.2. Población en zonas de alta peligrosidad

Para identificar la población localizada en zonas de mayor severidad hidráulica, se superpuso el mapa de población expuesta con el mapa del Índice de Peligrosidad Hidráulica (IPH). El procedimiento comprendió los siguientes pasos:

1. Extracción de valores de IPH por manzana: Mediante la herramienta Estadísticas Zonales de ArcGIS Pro, se extrajo el valor medio del IPH para cada polígono de manzana, utilizando las manzanas como zonas de agregación y el ráster de IPH como capa de valores.

2. Clasificación de la población en peligro alto: Se clasificó como población en zonas de alta peligrosidad aquella residente en manzanas cuyo valor medio de IPH era igual o superior al percentil P66 del escenario base (ponderación 80/20), es decir, $IPH \geq P66$. Este umbral, equivalente a la categoría Alta peligrosidad, permite identificar las áreas donde las condiciones hidráulicas representan un riesgo significativo para la población.

La población en zonas de alta peligrosidad se calculó como:

$$P_{alto,s} = \sum_{j=1}^M P_j \cdot \mathbb{I}(IPH_j \geq P66)$$

donde:



$I\bar{P}H_j$ = valor medio de IPH en la manzana j

$P66$ = percentil 66 del escenario base (0.000118)

$\mathbb{I}$ = función indicadora que toma el valor 1 si se cumple la condición y 0 en caso contrario

2.7.3. Justificación del enfoque

La diferenciación entre población expuesta total y población en zonas de alta peligrosidad responde a la necesidad de distinguir entre la mera presencia de agua (extensión de la inundación) y la severidad de las condiciones hidráulicas (profundidad y velocidad del flujo). Mientras que la población expuesta total cuantifica el número de personas afectadas por la presencia de agua superficial, la población en zonas de alta peligrosidad identifica aquellos habitantes que enfrentan condiciones más severas, donde la combinación de profundidad y velocidad puede comprometer la estabilidad de las personas y la integridad de las edificaciones (Shand *et al.*, 2011; Martínez-Gomariz *et al.*, 2016).

Esta doble clasificación proporciona información complementaria para la gestión del riesgo: la población expuesta total orienta las acciones de alerta temprana y evacuación, mientras que la población en zonas de alta peligrosidad permite priorizar intervenciones estructurales y de ordenamiento territorial en las áreas de mayor severidad.

3. Resultados

3.1. Comparación de escenarios de precipitación

La respuesta hidráulica de Ciudad Obregón se evaluó mediante la simulación de cinco escenarios de precipitación representativos de diferentes magnitudes, intensidades y periodos de retorno. La Tabla 5 resume los principales indicadores obtenidos para cada escenario, incluyendo el área inundable, el porcentaje del área urbana afectada y los indicadores de exposición poblacional. En términos generales, los resultados muestran una tendencia creciente de la respuesta hidráulica conforme aumenta la severidad del evento de precipitación, aunque dicha relación no depende exclusivamente de la precipitación acumulada.

Tabla 5. Indicadores de peligrosidad por inundación y exposición poblacional para los escenarios de precipitación evaluados.

Escenario (mm)	Intensidad Media (mm/h)	Área Inundable (Km ²)	Área urbana inundada (%)	Población expuesta (habitantes)	Población en zonas de alta peligrosidad (habitantes)
104.4 mm	7.93	0.5639	1.22%	3,492	1,156
85.6 mm	64.20	0.3222	0.70%	2,338	41
66.8 mm	4.18	0.0006	0.00%	7	0
60.8 mm	14.59	0.2515	0.54%	1,526	6
19.3 mm	9.14	0.0138	0.03%	112	0

Nota: El área urbana analizada fue de 46.169 Km².

El escenario correspondiente al evento de 104.4 mm presentó los valores máximos para todas las variables analizadas, con una superficie inundada de 0.5639 Km², equivalente al 1.22%. En el extremo opuesto, el escenario de 19.8 mm registró la menor extensión inundada (0.0138 km², 0.03% del área urbana) evidenciando que los eventos frecuentes generan afectaciones localizadas y de menor magnitud.

Los escenarios intermedios presentaron respuestas hidráulicas contrastantes. En particular, el evento de 60.8 mm produjo una mayor extensión del área inundable (0.2515 km²) que el evento de 66.8 mm, el cual registró únicamente 0.0006 km², a pesar de presentar una precipitación acumulada superior (Tabla 5). Asimismo, el escenario de 85.6 mm mostró una respuesta hidráulica cercana a la observada para el evento extremo de 104.4 mm.

La Figura 4 presenta el análisis espacial del evento extremo 104.4 mm. El mapa de profundidades máximas del flujo (Figura 4a) muestra que las mayores profundidades se localizan en el sector sur y suroeste de la ciudad, con valores superiores a 0.5 m en las colonias Las Misiones, Los Héroes, Villa Fontana, Villas del Sur, Nueva Palmira y Vista Hermosa. El mapa de área inundable (Figura 4b) delimita la extensión superficial de la inundación, que alcanza los 0.5639 km² distribuidos principalmente en la misma zona.

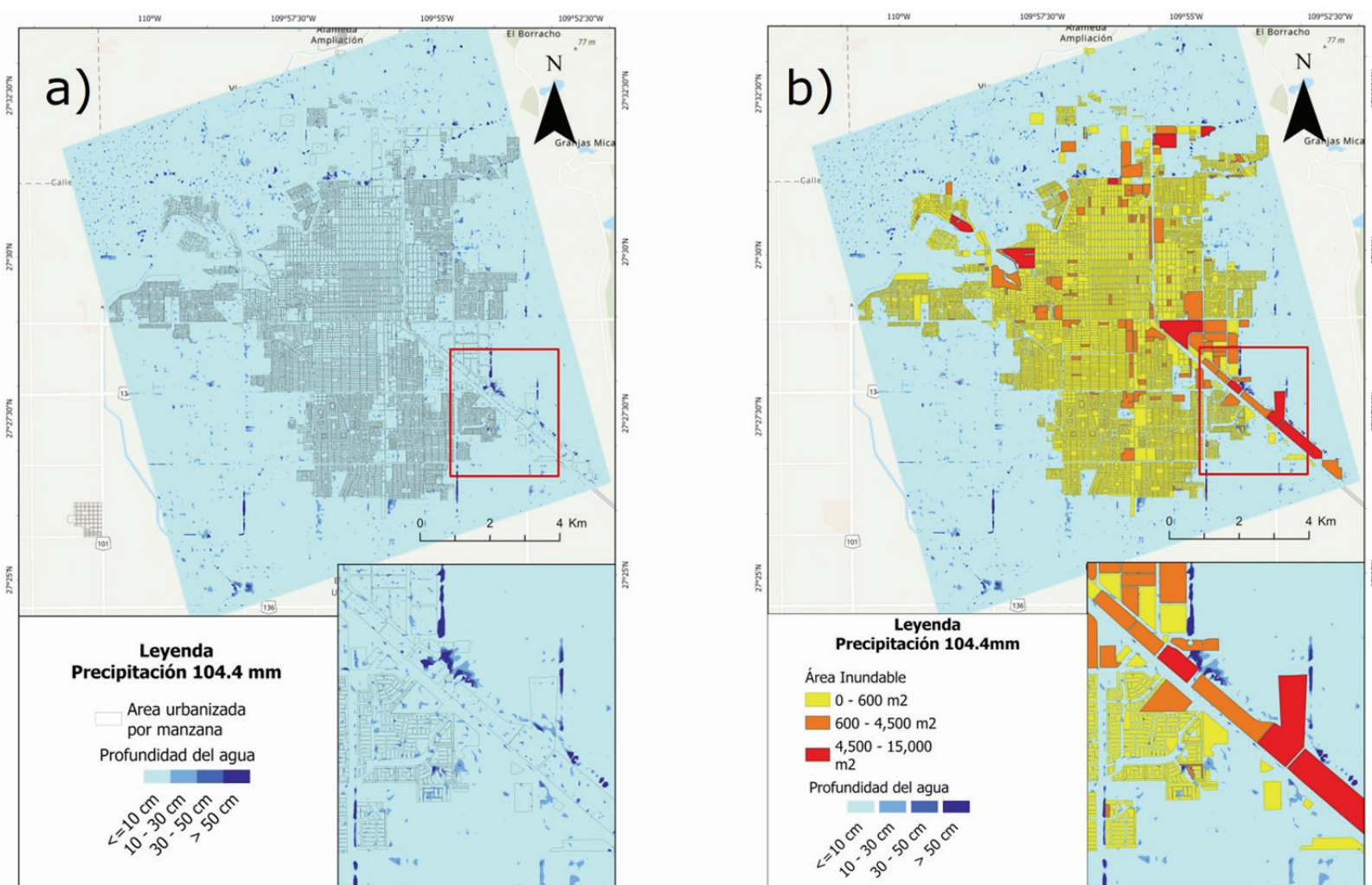


Figura 4. Análisis hidrológico del evento extremo de 104 mm en Ciudad Obregón: (a) Mapa de profundidad del agua (m); (b) Mapa del área inundable (m²).

Más allá de las diferencias cuantitativas entre escenarios, la distribución espacial de la inundación muestra patrones consistentes en todos los eventos analizados. La Figura 4 ilustra, para el escenario más crítico (104.4 mm), la localización de las mayores profundidades y la extensión superficial de la inundación en el área urbana.

3.2. Distribución espacial de la peligrosidad hidráulica

La distribución espacial de la peligrosidad hidráulica se evaluó mediante el Índice de Peligrosidad Hidráulica (IPH), el cual integra la profundidad y velocidad del flujo en una medida adimensional. La Figura 5 presenta la distribución del IPH para el escenario de (104.4 mm), seleccionado por corresponder al evento que generó la mayor respuesta hidráulica entre los escenarios simulados.

En el escenario de 104.4 mm, las zonas clasificadas con peligrosidad Alta y Muy Alta se localizan principalmente en el sector sur y suroeste de la ciudad, coincidiendo con las áreas de mayor profundidad identificadas en la Figura 4. Las colonias Las Misiones, Los Héroes, Villa Fontana, Villas del Sur, Nueva Palmira y Vista Hermosa presentan las mayores concentraciones de celdas con IPH elevado. En contraste, el sector norte y centro-oriente de la ciudad muestra valores de IPH predominantemente bajos o muy bajos, con escasa presencia de áreas clasificadas como de peligrosidad moderada o alta.

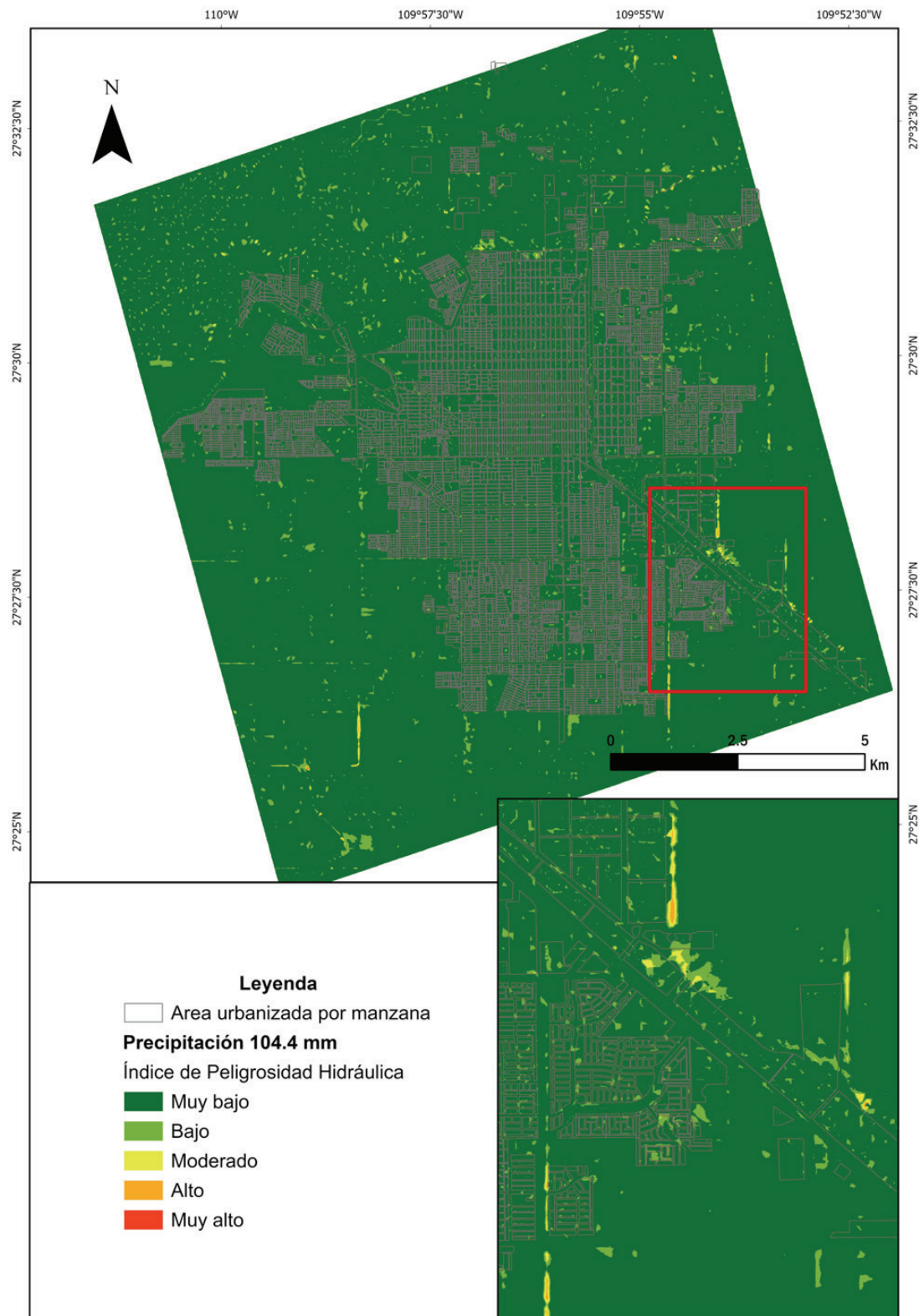


Figura 5: Distribución espacial del Índice de Peligrosidad Hidráulica.

Para los escenarios de 85.6 mm, 66.8 mm, 60.8 mm y 19.8 mm, los patrones espaciales de distribución del IPH son similares al del evento de 104.4 mm, aunque con una menor extensión de las áreas clasificadas como de peligrosidad Alta y Muy Alta (Figura 2S, Figura 3S, Figura 4S, Figura 5S del anexo). En todos los casos, las zonas de mayor peligrosidad se concentran en los mismos sectores del sur y suroeste de la ciudad, mientras que las áreas de peligrosidad baja y muy baja predominan en el resto del territorio.

La identificación de las zonas con mayor IPH permite determinar qué áreas urbanas concentran las condiciones hidráulicas más severas. La superposición de estos resultados con la información censal a nivel de manzana permite cuantificar la población que reside en dichas zonas, diferenciando entre la población expuesta a la inundación (presencia de agua) y la población localizada en áreas de alta peligrosidad hidráulica.

3.3. Distribución espacial de la población expuesta

La integración de los resultados de la modelación de la inundación bidimensional con la información censal permitió estimar la población localizada dentro del área inundable y la población residente en zonas clasificadas con alta peligrosidad hidráulica (Tabla 5). La Figura 6 muestra la distribución espacial de la población expuesta para el escenario de 104.4 mm.

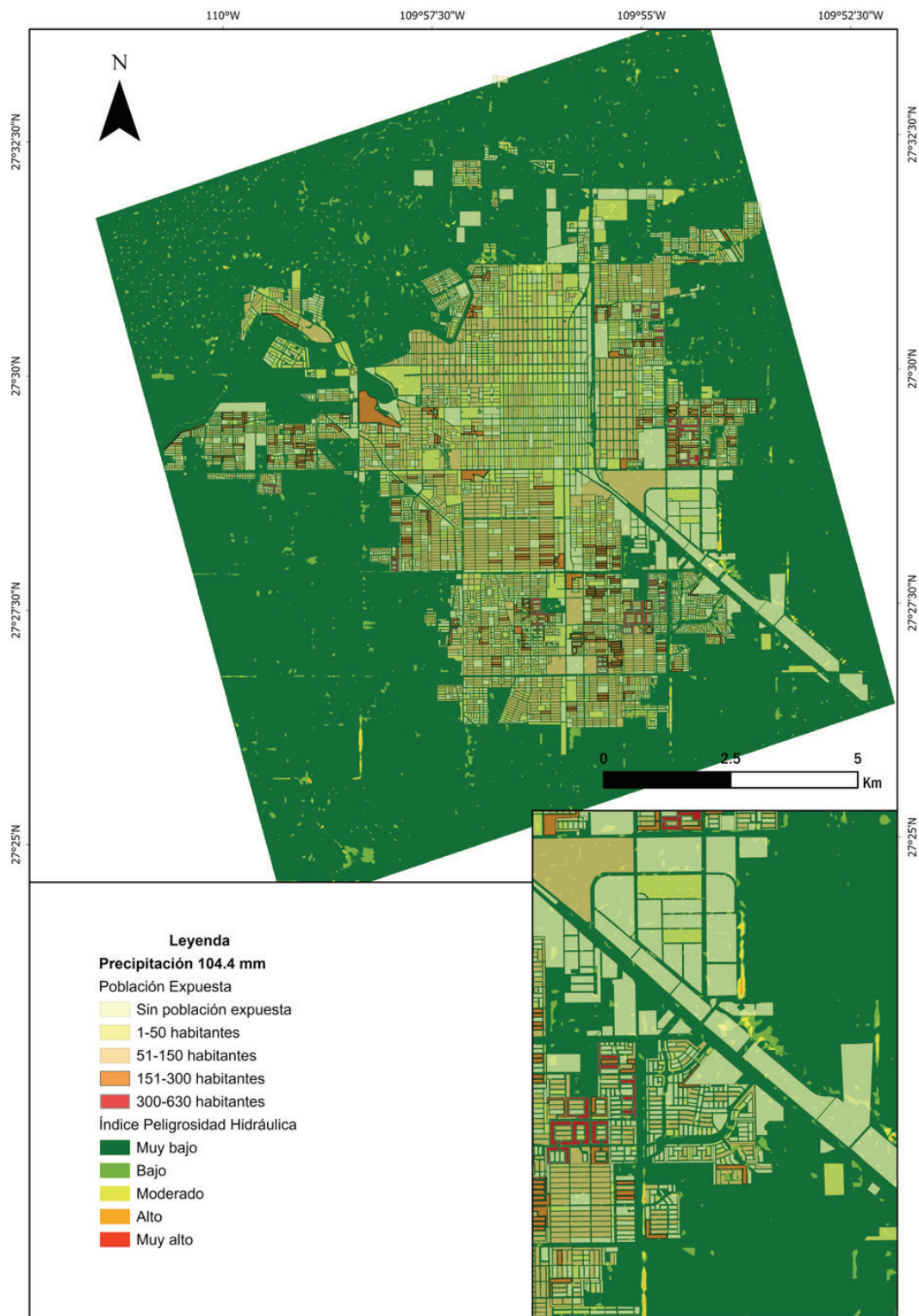


Figura 6: Distribución espacial de la población expuesta para el evento de 104.4 mm.

El escenario de 104.4 mm, presentó la mayor población expuesta con los 3,492 habitantes localizados dentro del área inundable, de los cuales 1,156 se localizaron en zonas de alta peligrosidad (Tabla 5). La mayor concentración de población expuesta se localiza en el sector sur de Ciudad Obregón, principalmente en las colonias Las Misiones, Los Héroes, Villa Fontana, Villas del Sur, Nueva Palmira y Vista Hermosa, coincidiendo con las áreas donde se identificaron los valores más elevados del Índice de Peligrosidad Hidráulica.

El escenario de 85.6 mm registró 2,338 habitantes expuestos, de los cuales 41 se ubicaron en zonas de alta peligrosidad. Por su parte, el escenario de 60.8 mm presentó 1,526 habitantes expuestos y 6 habitantes en zonas de alta peligrosidad, mientras que el evento de 66.8 mm registró únicamente 7 habitantes expuestos y no se identificó población en categorías de alta peligrosidad. Finalmente, el escenario de 19.8 mm presentó la menor afectación, con 112 habitantes expuestos y ausencia de población localizada en zonas de alta peligrosidad.

3.4. Comparación con mapas institucionales de riesgo (IMIP Cajeme)

Con el fin de contextualizar los resultados obtenidos y evaluar su consistencia con el conocimiento institucional existente, se compararon las zonas de inundación simuladas para el evento de 104.4 mm con el mapa de zonas en peligro de inundación elaborado por el Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Cajeme (IMIP Cajeme, 2023) (Figura 7). Este mapa, identifica las áreas de la ciudad que han

sido reconocidas como susceptibles a inundaciones por las autoridades municipales.

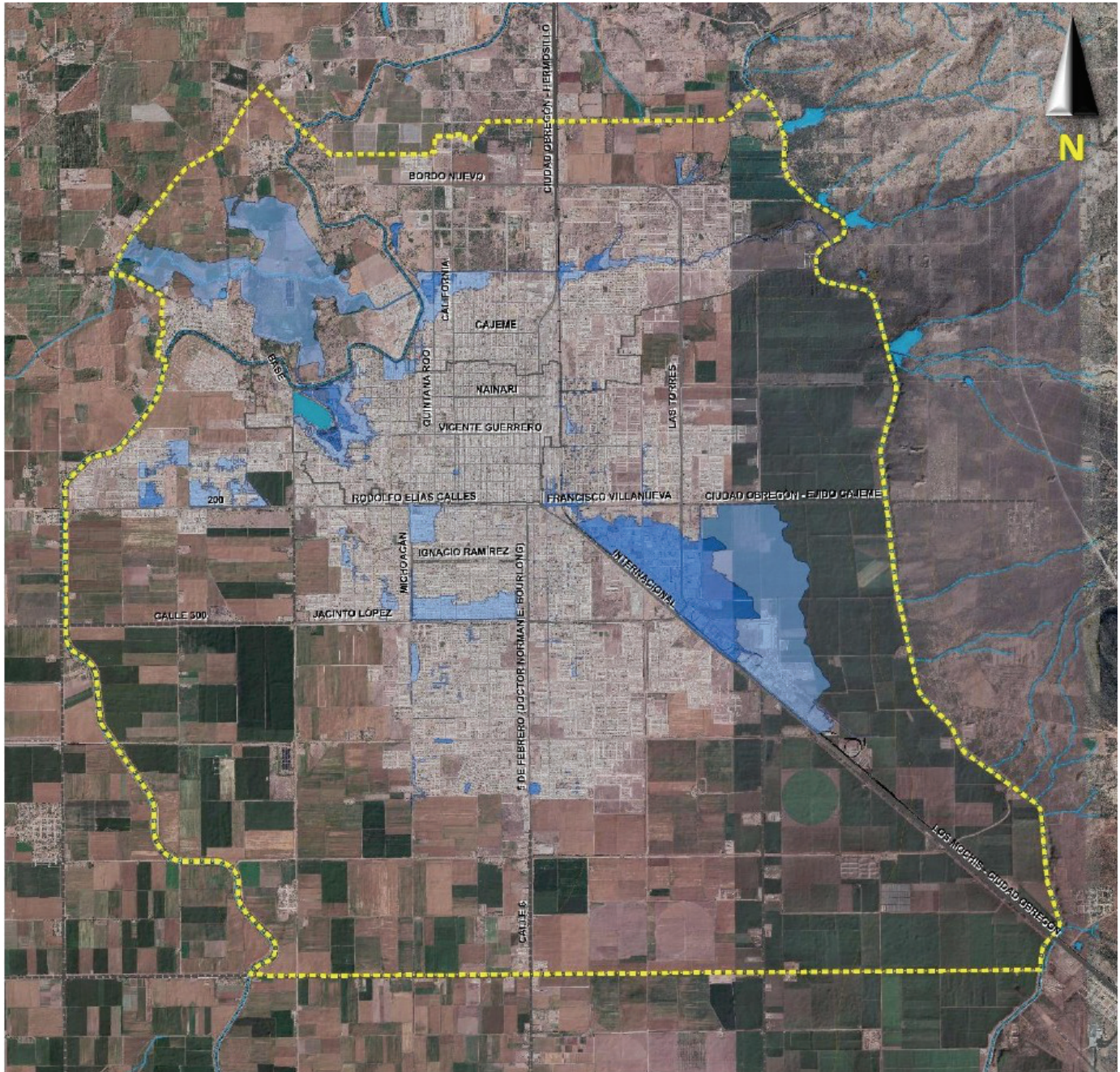


Figura 7. Zonificación de las zonas en peligro de inundación, elaborada por el IMIP Cajeme. Fuente: IMIP Cajeme (2023).

Si bien no se realizó una superposición geoespacial formal debido a la baja resolución y calidad del mapa disponible del IMIP Cajeme, una comparación visual entre las zonas de inundación simuladas y las áreas señaladas por el IMIP Cajeme revela una coincidencia espacial significativa en los sectores sur y suroeste de la ciudad, particularmente en las colonias Las Misiones, Los Héroes, Villa Fontana y Villas del Sur. Estas áreas, que en el modelo presentan las mayores profundidades de agua y los valores más altos del Índice de Peligrosidad, coinciden con las zonas que el IMIP Cajeme ha catalogado como de alto riesgo en sus instrumentos de planeación. Esta concordancia refuerza la validez de los resultados del modelo y confirma que las áreas identificadas como críticas por la simulación corresponden con la realidad observada y documentada por las autoridades locales, a pesar de las limitaciones en la información cartográfica institucional. Sin embargo, es importante resaltar que los resultados del modelo bidimensional de inundación presentado aquí generó datos de mayor resolución espacial que los mapas actualmente disponibles por el IMIP Cajeme.

3.5. Análisis de sensibilidad del índice de Peligrosidad Hidráulica

Con el fin de evaluar la influencia de la ponderación asignada a la profundidad y la velocidad del flujo sobre el Índice de Peligrosidad Hidráulica (HIP), se realizó un análisis de sensibilidad usando el evento de precipitación de 85.6 mm. Se comparó el escenario base (80 % profundidad -20% velocidad) con tres esquemas alternativos de ponderación (90/10, 70/30 y 50/50), manteniendo constantes los

umbrales de clasificación definidos mediante los percentiles P20, P40, P60 y P80 del escenario base.

Los resultados muestran que la distribución espacial del IPH presentó una elevada estabilidad ante las diferentes configuraciones evaluadas. (Tabla 6). En todos los escenarios alternativos se obtuvieron coeficientes de correlación de Spearman superiores a 0.989, lo que indica una correspondencia muy alta entre los valores del índice calculados con respecto al escenario base.

Tabla 6. Resultados del análisis de sensibilidad del Índice de Peligrosidad (HI) para el evento de precipitación de 85.6 mm.

Escenario	Correlación de Spearman (ρ)	Píxeles con cambio de categoría (%)
90% profundidad – 10% velocidad	0.9939	22.75
80% profundidad	1.000	0
70% profundidad – 30% velocidad	0.9980	14.73
50% profundidad -50% velocidad	0.9896	33.49

Nota: los porcentajes de cambio corresponden a la proporción de píxeles que modifican su categoría de peligrosidad respecto al escenario base.

Aunque entre el 14.7 % y el 33.5 % de los píxeles cambiaron de categoría, dichos cambios ocurrieron principalmente entre categorías adyacentes, por lo que las áreas prioritarias para la gestión del riesgo permanecieron esencialmente invariables.

4. Discusión

4.1. Respuesta hidrológica del sistema urbano

Los resultados muestran que la respuesta hidráulica para predecir zonas de inundación del sistema urbano de Ciudad Obregón no sigue una relación lineal con la precipitación acumulada. En particular, el evento de 60.8 mm generó una extensión inundable considerablemente mayor (0.2515 km^2) que el evento de 66.8 mm (0.0006 km^2), pese a registrar una menor precipitación total. Este resultado se debe a que las inundaciones no dependen únicamente del volumen total de lluvia, sino también de la duración de las tormentas (intensidad) y distribución temporal. Este comportamiento coincide con lo reportado por Nabinejad & Schüttrumpf (2023) para regiones áridas y semiáridas y con estudios de hidrología urbana que identifican a la intensidad de la precipitación como uno de los principales factores que controlan la generación de escorrentía superficial (Bates *et al.*, 2021; Smith *et al.*, 2022).

En Ciudad Obregón, esta respuesta puede atribuirse además a las características del sistema de drenaje urbano. La ausencia de una red pluvial favorece que las vialidades funcionen como los principales corredores de conducción superficial, por lo que eventos de corta duración y alta intensidad pueden superar rápidamente la capacidad hidráulica del sistema calle-canal, incrementando la acumulación de agua en las zonas topográficamente más bajas.

4.2. Umbral hidrológico e implicaciones para la gestión del riesgo

Los resultados confirman la existencia de un comportamiento de umbral en la respuesta hidrológica de Ciudad Obregón. Solo el evento extremo de 104.4mm generó incrementos significativos tanto en el área inundable como en la población expuesta, mientras que los eventos de menor magnitud produjeron afectaciones considerablemente menores. Este comportamiento es consistente con la dinámica hidrológica característica de las ciudades semiáridas, donde la rápida generación de escorrentía superficial ocurre únicamente cuando la intensidad y duración de la lluvia superan la capacidad de infiltración y conducción del sistema urbano.

Por otra parte, se observó que la extensión del área inundable, por sí sola, no constituye un indicador suficiente del impacto potencial sobre la población. Aunque el evento de 104.4 mm produjo la mayor superficie inundada, una fracción importante de ésta se localizó en la zona industrial de Ciudad Obregón, caracterizada por una baja densidad poblacional. Por lo tanto, una mayor extensión de la inundación no implica necesariamente una mayor exposición poblacional, ya que el impacto depende de la localización espacial de las zonas inundadas respecto a la distribución de la población y de los usos del suelo.

En este contexto, la integración del Índice de Peligrosidad Hidráulica permitió identificar los sectores zonas donde coinciden condiciones hidráulicas severas y una elevada concentración de habitantes. Esta aproximación proporciona una representación del peligro más útil que la simple delimitación del área inundable, al facilitar la priorización de acciones de prevención, protección civil y ordenamiento urbano.

4.3. Alcances y limitaciones del modelo

El presente estudio presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados. Primero, la estimación de la población expuesta se basó en una distribución homogénea de la población dentro de cada manzana censal, una aproximación estándar en estudios de exposición (Smith *et al.*, 2019), pero que podría sobreestimar o subestimar la exposición en manzanas con usos de suelo mixtos o densidad variable.

Segundo, el estudio no consideró la vulnerabilidad social como componente del análisis. De esta manera se reconoce que no es posible una evaluación integral del riesgo como es reconocido en la literatura (Natenzon & Ríos, 2015; Smith & Smith, 2013). Por lo que la vulnerabilidad constituye una dimensión complementaria que deberá ser incorporada en trabajos futuros para una evaluación integral del riesgo de inundación en Ciudad Obregón.

En tercer lugar, el evento de 1978 (240 mm en 24 horas), el más extremo registrado en la región, no pudo ser modelado debido a la falta de datos detallados sobre la estructura temporal y la evolución espacial de esta precipitación. Este evento que, inundó prácticamente toda la ciudad (Márquez & Ortiz, 1978) representa un escenario de peligro aún más severo que el aquí modelado (104.4 mm) y subraya la necesidad de contar con sistemas de monitoreo hidrometeorológico continuo y de alta resolución que permitan caracterizar eventos extremos con mayor precisión (Wheater, 2008).

En cuarto lugar, la ausencia de una calibración formal del modelo hidráulico bidimensional para estimar inundaciones con datos de niveles

de agua y caudales observados constituye una limitación inherente a estudios en regiones con escasez de datos (Cea *et al.*, 2025). Sin embargo, la configuración del modelo se basó en parámetros físicamente consistentes y ampliamente documentados en la literatura (Manning $n = 0.013$; infiltración nula para superficies impermeables), y los resultados fueron validados cualitativamente mediante la comparación con el mapa del IMIP Cajeme y registros históricos.

En quinto lugar, la red de drenaje pluvial (sistema de drenaje menor) no se incluyó explícitamente en el modelo debido a su desarrollo fragmentario y limitado a las calles principales y zonas críticas. Como señalan Cea *et al.* (2025), los modelos de flujo superficial 2D son apropiados para aplicaciones a escala local cuando no hay información disponible sobre la red de alcantarillado o cuando esta es incompleta. En el contexto de Ciudad Obregón, modelar explícitamente una red que no existe en la mayor parte de la ciudad sería menos representativo de la realidad que el enfoque adoptado, ya que se centra en el sistema de drenaje mayor (calles y vialidades).

A pesar de estas limitaciones, la metodología desarrollada es replicable y de bajo costo, mediante herramientas y datos de amplia disponibilidad (ArcGIS Pro). Su aplicación en otras ciudades de regiones semiáridas con características similares y disponibilidad de información básica (MDS, datos de precipitación, censos de población) es viable, aunque los parámetros específicos (como los umbrales de clasificación del IPH) deberán calibrarse localmente según las condiciones topográficas y climáticas de cada sitio.

5. Conclusiones

En este estudio se evaluó la peligrosidad por inundación y la exposición poblacional en Ciudad Obregón, mediante la simulación hidráulica bidimensional de cinco escenarios de precipitación representativos de diferentes magnitudes e intensidades. A partir de los resultados obtenidos se concluye que:

1. La intensidad de la precipitación es un factor determinante de la respuesta hidráulica. La respuesta hidráulica de la ciudad no presentó una relación estrictamente proporcional con la precipitación acumulada. El evento de 60.8 mm produjo una extensión inundable considerablemente mayor que el evento de 66.8 mm, evidenciando que la intensidad y la distribución temporal de la lluvia desempeñan un papel determinante en la.

2. Existe un umbral hidrológico crítico en torno a los 60-85 mm de precipitación: Los resultados muestran un comportamiento no lineal de la respuesta hidráulica del sistema urbano. Eventos con precipitaciones superiores a este umbral generan incrementos desproporcionados en el área inundable y la población expuesta. El evento de 104.4 mm (periodo de retorno de 141 años) constituyó el escenario más crítico, con 0.5639 km² de área inundable, 3,492 habitantes expuestos y 1,156 habitantes en zonas de alta peligrosidad. Este umbral refleja la capacidad limitada del sistema de drenaje superficial (sistema calle-canal) para manejar volúmenes extremos de escorrentía y debe ser considerado en la actualización de los instrumentos de gestión del riesgo y planeación urbana.

3. El Índice de Peligrosidad Hidráulica (IPH) es una herramienta robusta para la identificación de zonas críticas. El IPH, basado en una

combinación ponderada de profundidad (80%) y velocidad (20%), permitió clasificar el peligro en cinco categorías (Muy bajo, Bajo, Moderado, Alto, Muy alto). El análisis de sensibilidad confirmó su estabilidad, con correlaciones de Spearman superiores a 0.989 entre el escenario base y los escenarios alternativos, y cambios de categoría concentrados mayoritariamente entre categorías adyacentes. Esta robustez respalda la aplicación del IPH como herramienta de cribado (*screening*) para la identificación de zonas de atención prioritaria en ciudades de llanura aluvial con pendientes reducidas.

4. Las zonas críticas se concentran en el sector sur de la ciudad, en áreas de expansión urbana reciente. Las colonias Las Misiones, Los Héroes, Villa Fontana, Villas del Sur, Nueva Palmira y Vista Hermosa concentran la totalidad de la población en zonas de alta peligrosidad (1,156 habitantes) para el evento de 104.4 mm. Estas áreas corresponden a sectores de crecimiento urbano no planificado sobre llanuras de inundación naturales, lo que evidencia la necesidad de revisar los instrumentos de ordenamiento territorial y establecer restricciones al desarrollo en estas zonas. La coincidencia espacial de los resultados con el mapa de zonas en peligro de inundación del IMIP Cajeme refuerza la validez de la metodología y su utilidad para la gestión del territorio.

5. La metodología desarrollada es replicable y de bajo costo, adecuada para ciudades semiáridas con información limitada. La integración de datos de precipitación de diferente resolución temporal (CONAGUA (2025), DRRY (2025), modelación hidráulica 2D en ArcGIS Pro y análisis espacial de población expuesta constituye un enfoque metodológico robusto y transferible. La metodología es aplicable en otras ciudades de México y América Latina con disponibilidad de información básica (MDE, precipitación y censos de población), incluso en ausencia de

datos detallados de redes de alcantarillado. Su implementación puede contribuir a fortalecer la planificación territorial y la gestión del riesgo de inundación en contextos semiáridos, donde la percepción de escasez hídrica ha invisibilizado históricamente el peligro de inundación.

6. Agradecimientos

Al Distrito de Riego del Río Yaqui por facilitar los datos meteorológicos de sus estaciones meteorológicas, así como a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) y al Instituto Tecnológico de Sonora.

7. Financiamiento

Se reconoce la beca otorgada por la SECIHTI en el marco de la Convocatoria de Becas de Estancias Sabáticas Vinculadas a la Consolidación de Grupos de Investigación (2024). La cual contribuyó a la realización de este trabajo; no obstante, el presente artículo no contó con financiamiento específico para su desarrollo.

8. Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés relacionados con la presente investigación.

9. Declaración de uso de IA

Los autores declaran la utilización de la herramienta de inteligencia artificial Deep Seek de manera limitada y exclusivamente para la revisión de estilo y mejora puntual de la redacción del manuscrito.

10. Anexo

Tabla 1S. Estaciones climatológicas de CONAGUA en la subcuenca del Río Yaqui.

No	Latitud	Longitud	Estación de la CONAGUA	Número años completos	Precipitación anual mm
1	3033396.4	635921.4	(021) Cocoraque 21	40	420.25
2	3077960.3	609714.88	(068) Alvaro_Obregon_068	72	403.81
3	3058242.9	569543.27	(107) Vícam	61	325.19
4	3041849.9	605496.3	(018) Cd. Obregón	62	375.72
5	3028135.7	605614.1	(020) Obregón Observatorio	43	321.12
6	3050320.5	676221.36	(099) Tesocoma	55	716.22
7	3053225.2	605365.95	(297) Porfirio Díaz	48	374.37
8	3055321.1	598424.29	(237) BÁCUM	34	342.48
9	3040423	597375.04	(403) Calle 200	53	282.38
10	3037035	595229.91	(304) KM68	34	327.1147059
11	3032165.2	595184.07	(298) Calle 600	52	324.5192308
12	3025891.5	595232.56	(301) KM25	34	436.5147059
13	3019952.9	602054.51	(299) Calle_1200	36	324.2055556
14	3065833.9	608158.36	(043) Hornos	58	394.95
15	3030804.2	574226.16	(293) Rio Muerto 4P12	32	255.26

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA (2025).

Tabla 2S. Estaciones climatológicas del DRRY en la subcuenca del Río Yaqui.

No Estación	Estación seleccionada para simulación	Latitud	Longitud	Estación de la CONAGUA	Número años completos	Precipitación Anual mm
1	Si	599250.1	3040488	202-40_(UCCM)	1	209.20
2	No	597537	3032131	702-01	3	339.60
3	No	586169.5	3044229	111-06_(San José BÁCUM)	3	192.27
4	No	606557.5	3025637	1010-05	1	122.20
5	No	583214.4	3025877	1015-10	0	
6	No	586204.1	3036099	511-05	2	192.80
7	Si	610664	3044817	KM 47_CPA	0	
8	No	608797.2	3033513	612-17	1	149.60
9	No	593435.5	3023976	1103-01_(Pueblo Yaqui)	3	181.40
10	No	605614.7	3052961	KM 13+600_CPB	1	189.50

Fuente: Elaboración propia con datos del Distrito de Riego del Río Yaqui (2025).

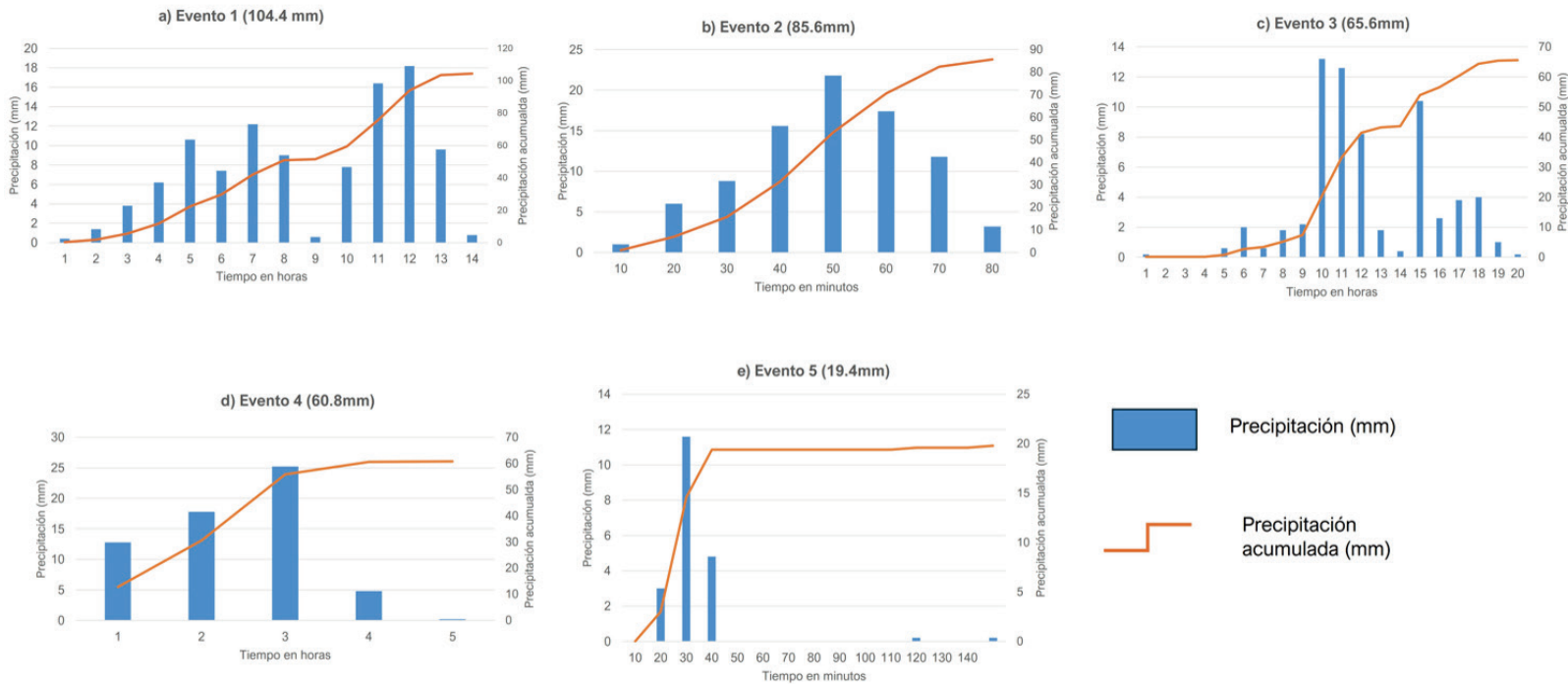


Figura 1S. Hietogramas de intensidad (mm/h) de cinco escenarios de precipitación (104.4, 85.6, 66.8, 60.8 y 19.8 mm).

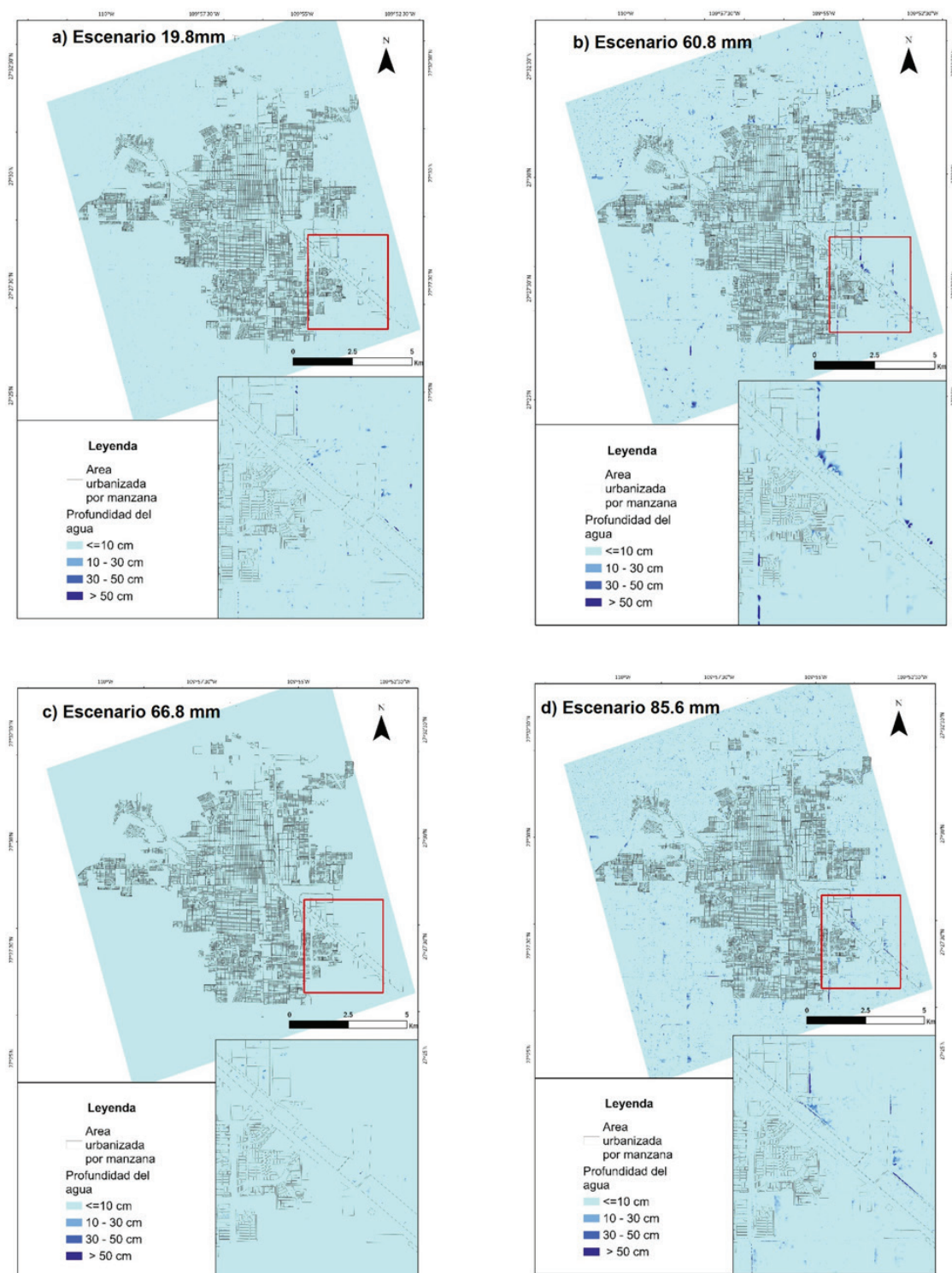


Figura 2S. Mapas de profundidad máxima del agua para los escenarios de 19.8mm, 60.8 mm, 66.8 mm y 85.6 mm.

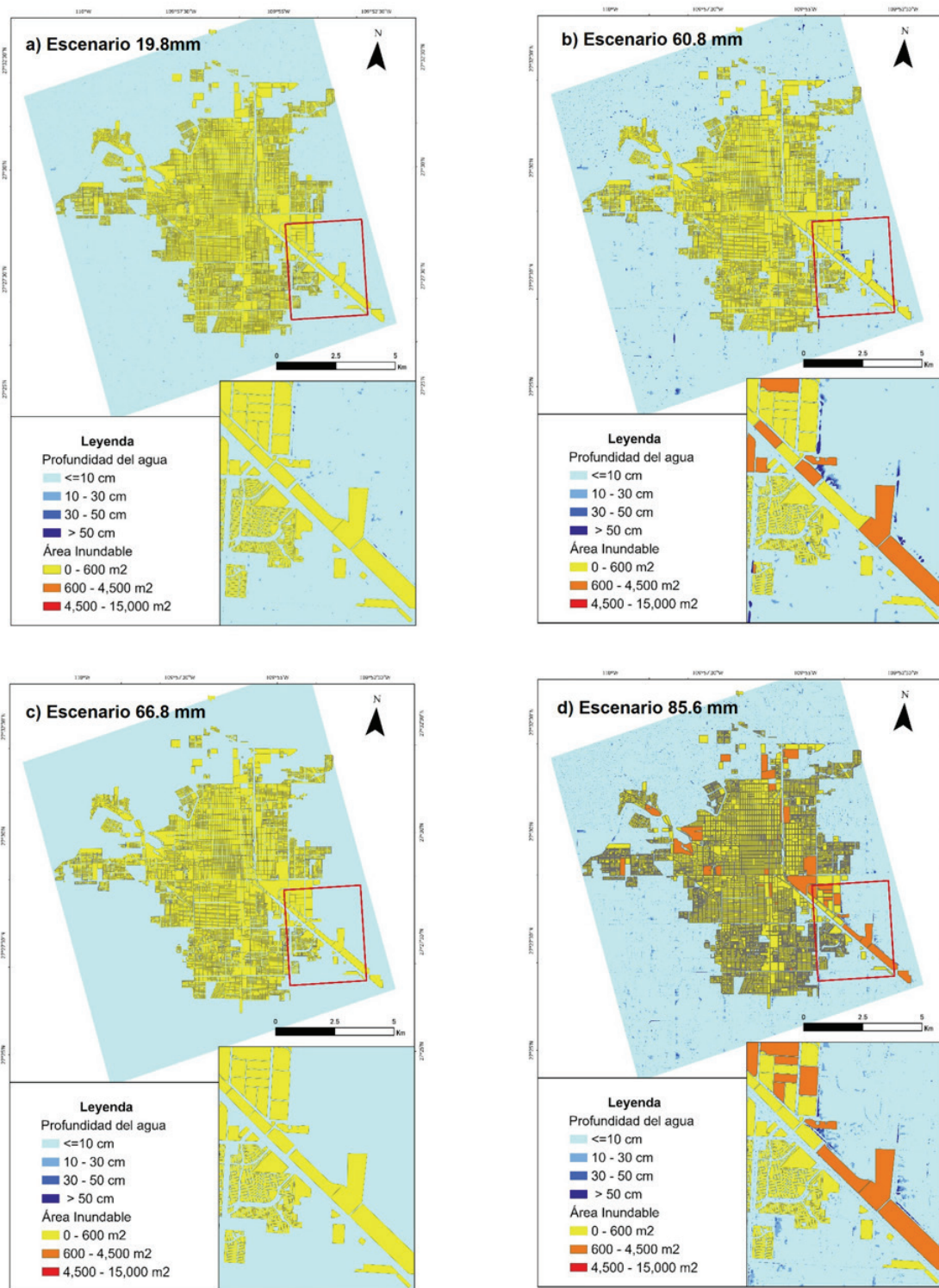


Figura 3S. Mapas de área inundable para los escenarios de 19.8 mm, 60.8 mm, 66.8 mm y 85.6 mm.

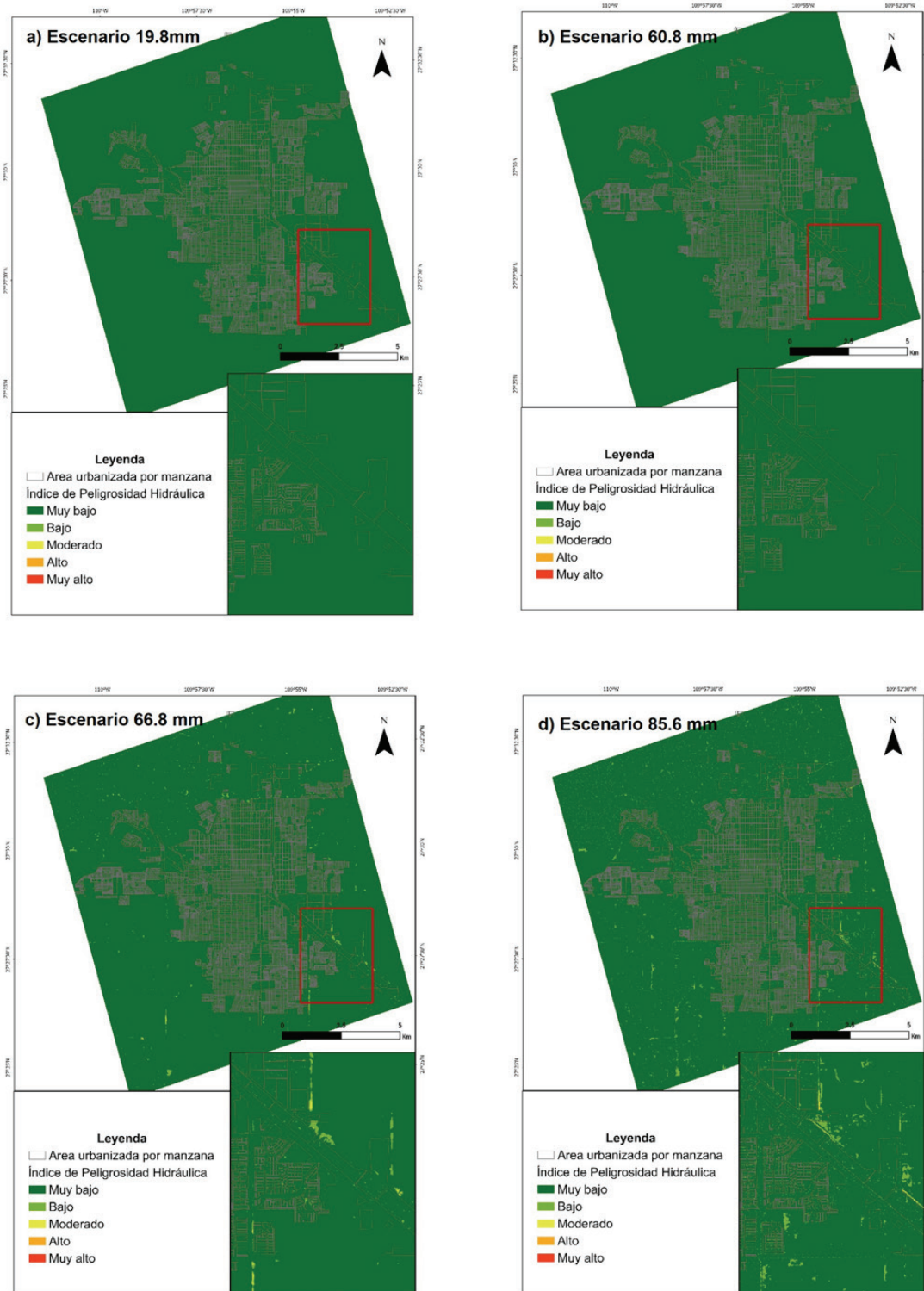


Figura 4S. Mapas de Índice de Peligrosidad Hidráulica para los escenarios de 19.8 mm, 60.8 mm, 66.8 mm y 85.6 mm.

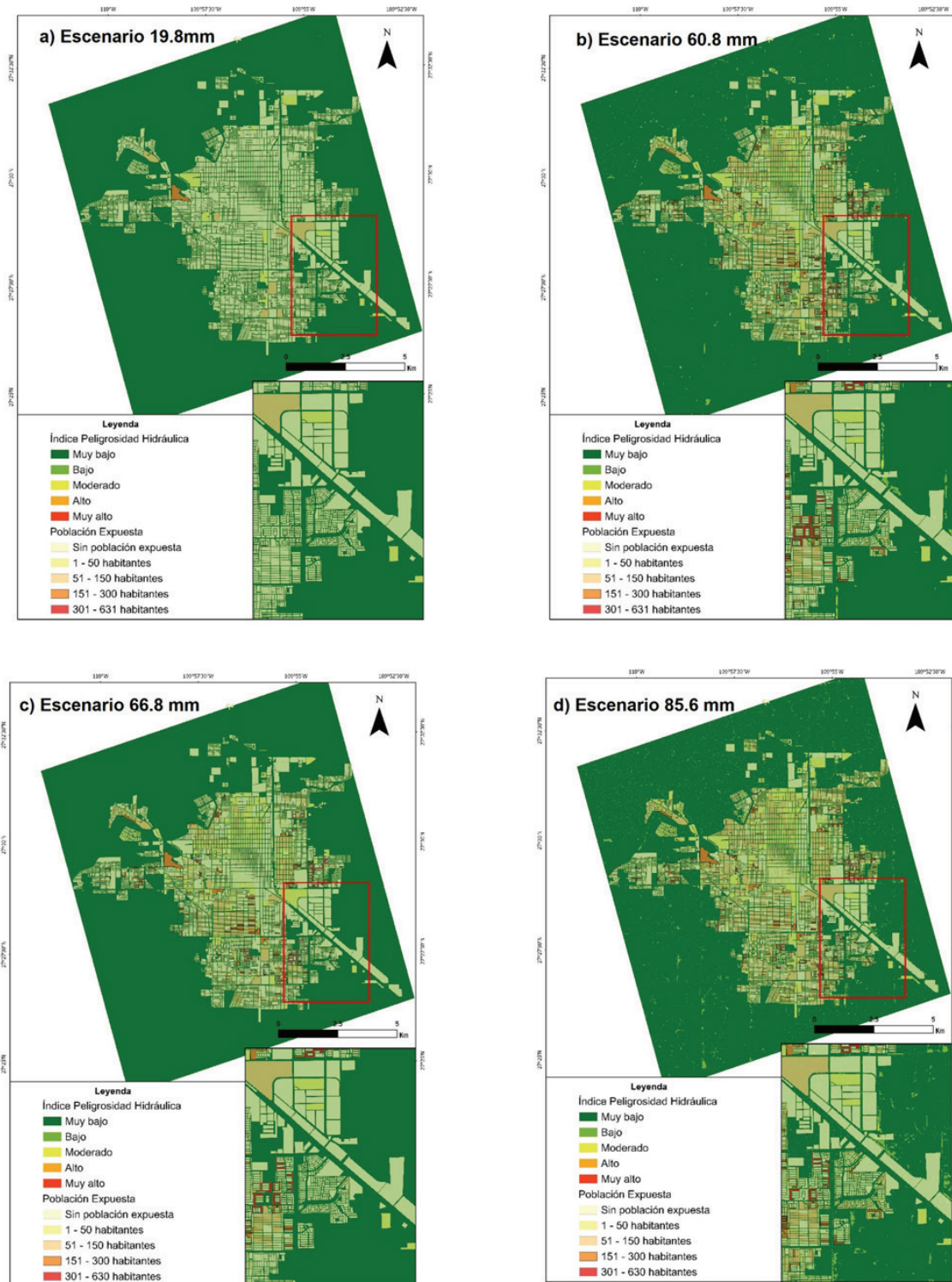


Figura 5S. Mapas de Población Expuesta para los escenarios de 19.8 mm, 60.8 mm. 66.8 mm y 85.6 mm.

11. Referencias

- Al-Qurashi, A., McIntyre, N., Wheeler, H., & Unkrich, C. (2008). Application of the Kineros2 rainfall-runoff model to an arid catchment in Oman. *Journal of Hydrology*, 355(1-4), 91-105. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.03.022>
- Bates, P. D. (2022). Flood inundation prediction. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 54(1), 287-315. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-030121-113138>
- Bates, P. D., Quinn, N., Sampson, C., Smith, A., Wing, O., Sosa, J., Savage, J. Olcese, G., Neal, J. Schumann, G., Giustarini, L., Coxon, G., Porter, J.R., Amodeo, M.F., Chu, Z., Lewis-Gruss, S., Freeman, N.B., Houser, T., Delgado, M., ... Krajewsky, W.F. (2021). Combined modelling of US fluvial, pluvial, and coastal flood hazard under current and future climates. *Water Resources Research*, 57, e2020WR028673. <https://doi.org/10.1029/2020WR028673>
- Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS river analysis system – user’s manual version 5.0 US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC). <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Users%20Manual.pdf>
- Cea, L., Sañudo, E., Montalvo, C., Farfán, J., Puertas, J., & Tamagnone, P. (2025). Recent advances and future challenges in urban pluvial flood modelling. *Urban Water Journal*, 22(2), 149-173. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2024.2446528>

- Chow, V. T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
<https://archive.org/details/openchannelhydra0000chow/page/688/mode/2up>
- Chow, V.T., Maidment, D.R. & Mays, L.W. (1988) *Applied Hydrology*. (International ed.) McGraw-Hill.
https://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2025). *Datos de lluvia diaria de 21 estaciones meteorológicas* [Conjunto de datos]. Servicio Meteorológico Nacional.
<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- de Almeida, G. A. M., & Bates, P. (2013). Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modelling. *Water Resources Research*, 49(8), 4833-4844.
<https://doi.org/10.1002/wrcr.20366>
- De Moel, H., Van Alphen, J., & Aerts, J. C. J. H. (2009). Flood maps in Europe – Methods, availability and use. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), 289–301. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-289-2009>
- Devia, G.K., Ganasri, B.P. & Dwarakish, G.S. (2015) A Review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007.
<https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Díaz-Padilla, G., Sánchez-Cohen, I., Guajardo-Panes, R.A., Del Ángel-Pérez, A.L., Ruíz-Corral, A., Medina-García, G., & Ibarra-Castillo, D. (2011). Mapeo del índice de aridez y su distribución poblacional en México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17(spe), 267-275. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.09.069>

- DRRY, Distrito de Riego del Río Yaqui. (2025). *Datos meteorológicos de lluvia diaria (2017-2025)*. [Conjunto de datos]. <http://www.drnyaqui.org.mx/drrymet/dashboard>
- Echeverría, M. (2024, 13 de septiembre). Lluve y se inundan partes de Cd. Obregón por Ileana. *El Imparcial*. <https://www.elimparcial.com/son/ciudad-obregon/2024/09/13/llueve-y-se-inundan-partes-de-cd-obregon-por-ileana/>
- ESRI, Environmental Systems Research Institute. (2021). ArcGIS Pro (Version 3.5.2) [Software de computación]. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/mapping/simulation/simulation-in-arcgis-pro.htm>
- Imaz-Lamadrid, M. A., Ivanova-Boncheva, A., Flores-López, M. Z., & Cortés-Martínez, M. Y. (2023). Participative Policy Design to Manage Droughts and Floods in an Arid Region under Changing Climate Scenarios: The Case of Baja California Sur, Mexico. *Sustainability*, 15(18), 13547. <https://doi.org/10.3390/su151813547>
- IMIP Cajeme, Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana de Cajeme (2023). *Programa de desarrollo urbano del centro de población Ciudad Obregón, Esperanza, Cócorit y Providencia, Municipio de Cajeme*. <https://www.imipcajeme.org/programa-de-desarrollo-urbano-de-centros-de-poblacion/>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). *Modelo Digital de Elevación Escala 1:5,000*. [Conjunto de datos de mapa] <https://www.inegi.org.mx/programas/mde/>

- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Sistema para la Consulta de Información Censal (SCINCE)*. [Base de datos] <https://gaia.inegi.org.mx/scince2020/>
- Lin, X. (1999). *Flash floods in arid and semi-arid zones*. (Technical Documents in Hydrology, IHP-V). UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000118882>
- Márquez, G., & Ortiz, M. L. (1978, 23 de octubre). ¡Veinte mil damnificados! La tormenta tropical "Sergio" arrasó con varias poblaciones. *Diario del Yaqui. Hemeroteca del Diario del Yaqui, Sonora, México*.
- Martínez-Austria, P. F., Patiño-Gómez, C., & Tamayo-Escobar, J. E. (2014). Análisis de tendencias climáticas en la cuenca baja del río Yaqui, Sonora, México. *Tecnología y ciencias del agua*, 5(6), 135-149. <https://www.revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/1225>
- Martínez-Gomariz, E., Gómez, M. & Russo, B (2016). Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding. *Natural Hazards*, 82, 1259–1278. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2242-z>
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., & Thieken, A. (2010). Assessment of economic flood damage. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(8), 1697–1724. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1697-2010>
- Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2003). Infiltration and Runoff Hydrograph Simulation. In *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology* (Vol. 42, pp. 173-213). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1_6

- Nabinejad, S., & Schüttrumpf, H. (2023). Flood risk management in arid and semi-arid areas: A comprehensive review of challenges, needs, and opportunities. *Water*, 15(17), 3113. <https://doi.org/10.3390/w15173113>
- Natenzon, C. (1995). *Catástrofes naturales, riesgo e incertidumbre*. (Serie de Documentos e Informes de Investigación N° 197). FLACSO. www.gub.uy/sistema-nacional-emergencias/comunicación/publicaciones/catástrofes-naturales-riesgo-incertidumbre
- Natenzon, C., & Ríos, D. (2015). *Riesgos, catástrofes y vulnerabilidades. Aportes desde la geografía y otras ciencias sociales para casos argentinos*. Ediciones Imago Mundi.
- Peinado Guevara, H. J., Espinoza Ortiz, M., Peinado Guevara, V. M., Herrera Barrientos, J., Peinado Guevara, J. A., Delgado Rodríguez, O., Pellegrini Cervantes, M.J., & Sánchez Morales, M. (2022). Potential Flood Risk in the City of Guasave, Sinaloa, the Effects of Population Growth, and Modifications to the Topographic Relief. *Sustainability*, 14(11), 6560. <https://doi.org/10.3390/su14116560>
- Pizzorni, M., Innocenti, A., & Tollin, N. (2024). Droughts and floods in a changing climate and implications for multi-hazard urban planning: A review. *City and Environment Interactions*. 24, Article 100169. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2024.100169>
- Robertson, A. W., Baethgen, W., & Block, P., Lall, U., Sankarasubramanian, A., de Sherbinin, A., Hansen, J. Grover, S., Greene, A.M., Chen, H., & Bell, M. (2014). Climate risk management for water in semi-arid regions. *Earth Perspectives*, 1(1), Article 12. <https://doi.org/10.1186/2194-6434-1-12>

- Shand, T. D., Smith, G. P., Cox, R. J., & Blacka, M. (2011, 26 de junio-1 de julio). *Development of appropriate criteria for the safety and stability of persons and vehicles in floods* [Presentación en documento]. En *Proceedings of the 34th IAHR World Congress, Brisbane, Australia*. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research. <https://www.iahr.org/library/infor?pid=25124>
- Smith, A., Bates, P.D., Wing, O., Sampson, C., Quinn, N., & Neal, J. (2019) New estimates of flood exposure in developing countries using high-resolution population data. *Nature Communications*, 10, 1814. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09282-y>
- Smith, K., & Smith, K. (2013). *Environmental hazards: Assessing risk and reducing disaster* (6th ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203805305>
- Wang, L., & Liu, H. (2006). An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(2), 193-213. <https://doi.org/10.1080/13658810500433453>
- Wheater, H.S. (2008). Modelling hydrological processes in arid and semi-arid areas: An introduction. In: H. Wheeler, S. Sorooshian & K.D. Sharma (Eds.), *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas* (pp. 1-20) Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535734.002>

World Meteorological Organization. (2012). *Standardized Precipitation Index User Guide* (WMO-No. 1090). <https://library.wmo.int/viewer/39629#page=1&viewer=picture&bookmark=n=0&q=>

Zhang, Q., Li, C., Wen, D., J., Chen, T., Zhang, B., Y., Yin, J., & Slater, L. (2025). Global South shows higher urban flood exposures than the Global North under current and future scenarios. *Communications Earth & Environment*, 6, 594. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02585-7>