

Gestión del riesgo por inundación aplicando el Modelo HEC-RAS en Microcuencas Urbanas

María Luisa Berenice Benito Díaz; Dora María Esther González Turrubiates; Rocío del Carmen Vargas Castilleja y Luis Álvaro Zavala Guerrero

RESUMEN

Los efectos del cambio climático han impactado de manera significativa; entre los fenómenos más evidentes se encuentran las sequías e inundaciones (IPCC, 2021). Derivado del aumento en la frecuencia e intensidad de lluvias extremas, las inundaciones han afectado con mayor severidad a las ciudades debido al acelerado crecimiento urbano, la impermeabilización del suelo y las limitaciones en la infraestructura hidráulica, incrementando su vulnerabilidad frente a eventos hidrometeorológicos extremos (IPCC, 2021). El objetivo de la investigación fue simular escenarios de inundación e identificar zonas de riesgo mediante el modelo hidráulico HEC-RAS en cuencas urbanas, utilizando como variables principales la topografía del terreno a partir de modelos digitales de elevación, la rugosidad del suelo, la precipitación máxima, así como la infraestructura hidráulica. El modelo se fundamenta en las ecuaciones de Saint-Venant, que representan la conservación de la masa y de la cantidad de movimiento para flujos en superficie libre (Chow, 1959). La simulación permitió la delimitación de las zonas críticas de encharcamiento, desbordamiento y la generación de mapas de inundación. El desarrollo de estos modelos es la base para una planificación territorial ordenada y preventiva, permitiendo desarrollar atlas urbanos de riesgo de inundación para la toma de decisiones en proyectos de ingeniería presentes y futuros.

Palabras clave: inundación, modelos hidráulicos, riesgo, lluvias, microcuencas urbanas.

Cómo citar: Benito, M., González, D., Vargas, R., Zavala, L. (2026). Gestión del riesgo por inundación aplicando el Modelo HEC-RAS en Microcuencas Urbanas. En Peña Guzmán, C. *Mujeres y su impacto en la ciencia y tecnología latinoamericana*. High Rate Consulting. <https://doi.org/10.38202/mujeresimpacto5>

Flood risk management applying the HEC-RAS Model in Urban Micro-Watersheds

ABSTRACT

The effects of climate change have had a significant impact; among the most evident phenomena are droughts and floods (IPCC, 2021). As a result of the increase in the frequency and intensity of extreme rainfall, floods have affected cities more severely due to accelerated urban growth, soil impermeabilization, and limitations in hydraulic infrastructure, increasing their vulnerability to extreme hydrometeorological events (IPCC, 2021). The objective of the research was to simulate flood scenarios and identify risk zones using the HEC-RAS hydraulic model in urban basins, using as main variables the terrain topography from digital elevation models, soil roughness, maximum precipitation, as well as hydraulic infrastructure. The model is based on the Saint-Venant equations, which represent the conservation of mass and momentum for free-surface flows (Chow, 1959). The simulation allowed the delimitation of critical zones of waterlogging, overflow, and the generation of flood maps. The development of these models is the basis for orderly and preventive territorial planning, allowing the development of urban flood risk atlases for decision-making in present and future engineering projects.

Keywords: flood; hydraulic models; risk; rainfall; urban micro-basins.

UAT-GD-174 Hidrología e Hidráulica Fluvial Marítima y Costera
UAT-CA-29 Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable
UAT-CA-134 Transversalidad Ambiental

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, las inundaciones se han convertido en una de las principales preocupaciones para muchas regiones del mundo, con el constante crecimiento de la población y el aumento del valor de la infraestructura y bienes materiales (Truong et al., 2024, p. 1). Los países en desarrollo, con su alta susceptibilidad como consecuencia de las malas condiciones socioeconómicas y los asentamientos no planificados, se ven afectados de forma desproporcionada por estos desastres (Ennouini et al., 2024, p. 1). Durante su ocurrencia, el agua invade zonas que normalmente permanecen secas, afectando tierras de cultivo e infraestructura, obligando a las personas a abandonar sus hogares, interrumpiendo actividades económicas y, en el peor de los casos, provocando la aparición de enfermedades y la pérdida de vidas humanas (Nkwunonwo et al., 2020).

Dentro de la gran variedad de inundaciones, las inundaciones pluviales se problematizaron con base en el cambio de uso del suelo, la geomorfología, la falla de las instalaciones de drenaje urbano y la mala planificación urbana (Peker et al., 2024).

La zonificación de inundaciones constituye una herramienta clave para apoyar la reducción del riesgo de inundaciones en entornos urbanos. Este proceso consiste en delimitar y analizar la extensión y propagación del flujo de agua sobre la llanura aluvial, con el fin de identificar las áreas

susceptibles a inundarse (Khatooni et al., 2025). En este sentido, el mapeo de inundaciones representa una etapa clave dentro del proceso de evaluación del impacto potencial de estos eventos, ya que permite estimar el grado de exposición, orientar decisiones de inversión y respaldar la formulación de políticas de gestión y prevención del riesgo hídrico (Qian et al., 2024).

Estudios recientes destacan que la combinación de características topográficas, la velocidad del escurrimiento superficial, la capacidad de drenaje y los cambios en la cobertura del suelo determinan cuán severa puede ser la inundación. Por ejemplo, Ansarifard et al. (2024) estudiaron la cuenca de Khalkai, Irán, donde emplearon modelos hidráulicos e hidrológicos para simular inundaciones pluviales bajo distintos periodos de retorno (50, 100, 500 años), lo que permitió identificar la vulnerabilidad de áreas agrarias y urbanas.

Para comprender, cuantificar y prever los efectos de las inundaciones, sean de cauces fluviales o pluviales, se utilizan herramientas de modelación hidrológica e hidráulica como HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) para generar mapas de inundaciones, simular profundidades, velocidades de flujo y delimitar las llanuras de inundación para diferentes periodos de retorno (Tr). Amoussou et al. (2024) aplicaron el HEC-RAS para simular inundaciones excepcionales en el delta del río Ouémé,

Benín, pronosticando extensiones de inundación y alturas de inmersión que varían significativamente dependiendo del evento, lo que permitió orientar políticas públicas y medidas preventivas.

A nivel regional, estudios en México han comenzado a adoptar estos enfoques para evaluar inundaciones y formular recomendaciones de gestión del riesgo. En la cuenca Ciatepec, México, Arganis et al. (2023) aplicaron un método de regionalización para estudiar inundaciones repentinas (flash floods), empleando técnicas hidrometeorológicas y datos de cuenca, lo que permite anticipar las zonas susceptibles a inundaciones repentinas y mejorar alertas tempranas. También en la cuenca del río Santa Catarina, Monterrey, durante el huracán Alex, se generaron mapas de peligro de inundación utilizando modelos 2D de HEC-RAS y estimaciones de precipitación de sensores múltiples. Todo ello facilitó una caracterización espacial de inundaciones que puede servir para la toma de decisiones en situaciones de emergencia (Stella, 2025).

Las inundaciones representan un problema creciente y una amenaza global; el rápido crecimiento urbano y los cambios en el uso del suelo han llevado a la invasión de cauces naturales, afectando a poblaciones en diversas partes del mundo (Qian y otros, 2024). En este contexto, el peligro o amenaza se entiende, generalmente, como la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente dañino en un periodo determinado, cuya intensidad y frecuencia se expresan comúnmente mediante el periodo de retorno. La exposición hace referencia a la cantidad de personas, bienes e infraestructuras susceptibles de ser afectadas, mientras que la vulnerabilidad describe el grado de fragilidad o propensión de esos elementos a sufrir daños ante la ocurrencia del fenómeno. La combinación de estos factores determina el riesgo, entendido como la probabilidad de que un peligro se materialice en un desastre y genere consecuencias negativas (SGM, 2025).

La aplicación de medidas de mitigación, la evaluación de la vulnerabilidad, el análisis comparativo de riesgos y la elaboración de mapas de amenaza constituyen estrategias fundamentales para reducir los daños ocasionados por las inundaciones (Qian et al., 2024). La gestión del riesgo de inundaciones ha mostrado ser una herramienta clave para disminuir la exposición a los peligros asociados con este fenómeno. Gracias a su aplicación, se ha logrado prevenir la pérdida de vidas humanas durante eventos de inundación y reducir el impacto económico que sufren las comunidades y regiones afectadas (Disse et al., 2020).

Objetivo: Analizar el comportamiento hidrológico de la microcuenca Libramiento, estimando los gastos pico para diferentes periodos de retorno a partir de una modelación hidráulica mediante el software HEC-RAS durante una tormenta, y tomar las medidas necesarias para minimizar los impactos que pudieran afectar la zona.

METODOLOGÍA

Área de estudio: El área de estudio se encuentra sobre la región hidrológica No. RH25 San Fernando-Soto la Marina, cuenca Laguna de San Andrés-Laguna de Morales, subcuenca Laguna de San Andrés, en el municipio de Altamira, Tamaulipas, justo a un costado de la carretera Tampico-Mante, a 200 m aproximadamente del paso a desnivel "El Barquito", una estructura vial representativa en la zona (Figura 1). La microcuenca tiene un área total de 1.68 km², con una longitud de cauce de 1.10 km, y recibe aportaciones. En sus características de uso de suelo y vegetación predomina, en el noroeste, el suelo vertisol pélico y, en la parte sureste, cambisol cálcico y calcárico.



Figura 1. Localización de la microcuenca Libramiento en Altamira, Tamaulipas

La metodología empleada en este estudio se fundamenta en la integración de herramientas de modelación hidrológica e hidráulica que permiten representar de manera precisa el comportamiento del flujo superficial en la microcuenca de estudio (Figura 2). Es el caso del software HEC-RAS permite modelar con las ecuaciones de Saint-Venant 2D o ecuaciones de onda de difusión 2D para análisis 2D (Yunus & Fatih, 2025, p. 6). El modelado 2D de HEC-RAS utiliza un esquema de solución de volumen finito. El algoritmo de volúmenes

finitos completos permite trabajar con pasos de cálculo más grandes que otros métodos (USACE, 2025).

Los modelos hidráulicos emplean el caudal como dato de entrada y permiten simular el comportamiento del agua al desplazarse por ríos, llanuras de inundación o entornos urbanos. A través de las ecuaciones hidrodinámicas, posibilita estimar variables clave del fenómeno, como la profundidad, la velocidad y la extensión del flujo durante un evento de inundación (Plata-Rocha et al., 2025, p. 4).

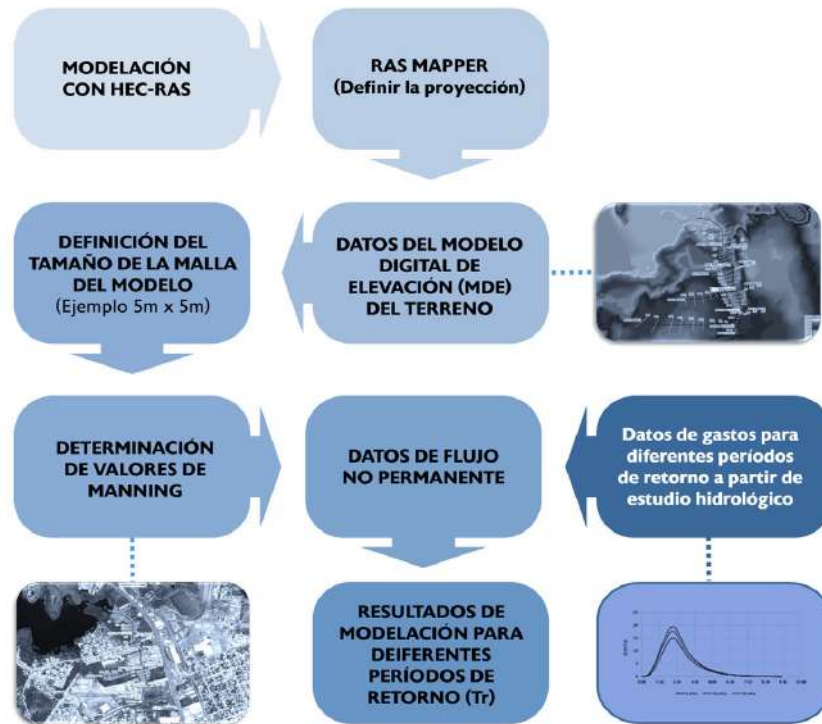


Figura 2. Diagrama metodológico utilizado para la modelación en HEC-RAS (Peker y otros, 2024)

Modelación con HEC-RAS

• Modelo Digital de Elevación

Se empleó un Modelo Digital de Elevación (DEM) obtenido del Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), proyectado adecuadamente en este estudio; se utilizaron las coordenadas UTM Zona 14N, que sirvió como base para la representación cartográfica de la microcuenca y la delimitación de los cauces principales. Este modelo permitió generar mapa de pendientes y de la red de drenaje, importantes para el modelo hidráulico.

La geometría del modelo se construyó en Rasmapper y el editor HEC-RAS, utilizando el DEM para representar la superficie del terreno. De manera complementaria, se incorporó información topográfica detallada del canal principal, así como la ubicación geoespacial de estructuras (puentes y alcantarillas), con el fin de mejorar la precisión del modelo y representar las condiciones reales del flujo.

• Determinación de los valores de Manning

En la determinación de los valores de Manning son esenciales algunos aspectos que no deben ser descuidados. La calibración de un modelo numérico de inundaciones se basa principalmente en la asignación adecuada del coeficiente de rugosidad. Este punto es esencial en estos estudios dado que este parámetro incide de manera directa en la estimación de la velocidad y la profundidad del flujo. Por ello, su determinación precisa resulta esencial para lograr una configuración confiable y representativa del comportamiento hidráulico del modelo (Toapaxi-Álvarez, 2021).

Asimismo, para la cobertura vegetal (LandCover) y las características superficiales del terreno, se utilizó el shape de edafología de INEGI, el cual fue recortado con base en el contorno de la microcuenca. Esta información permitió asignar valores de rugosidad (Coeficientes de Manning) de acuerdo con los tipos de suelo, lo que hizo posible realizar una simulación más realista del comportamiento hidráulico dentro del modelo.

- **Análisis de la información climatológica y estimación de gastos**

La primera parte del estudio contempla el análisis de los registros de lluvias máximas en 24 h de las estaciones cercanas al área de estudio, cuyo registro debe superar los 30 años para considerarse confiable; posteriormente, se calculará la tormenta máxima de diseño para diferentes periodos de retorno. Un método adecuado para elegir la lluvia de diseño es la aplicación de las diferentes funciones de distribución de probabilidad y, a partir de la función que presente un mejor ajuste de los datos medidos, se podrá seleccionar esta para la extrapolación de los datos de lluvia. Las funciones de probabilidad más usuales en la práctica, y que se mencionan a continuación, son: Normal, lognormal, Gumbel, exponencial, gamma y doble Gumbel.

Una vez analizada la precipitación máxima en 24 h para la lluvia de diseño y las características fisiográficas de la cuenca en estudio, se procede al cálculo de la avenida máxima probable para diferentes periodos de retorno mediante los métodos hidrológicos y empíricos más usuales en la práctica, como son: hidrograma unitario triangular, Ven Te Chow y racional.

- **Datos para la configuración del modelo**

Para los datos de flujo en el modelo de HEC-RAS 2D se integran los resultados del estudio hidrológico (hidrogramas o gastos) para diferentes periodos de retorno y se definen las condiciones de frontera aguas arriba (entrada). Se construye la geometría del modelo a partir del DEM y la generación de la malla; las condiciones de frontera para aguas abajo se definen mediante la descarga o niveles fijos. Configurados los parámetros hidráulicos y las estructuras hidráulicas presentes en el área de estudio, se realiza la simulación empleando las ecuaciones de Saint-Venant..

- **Validación del modelo**

Finalmente, se efectúa la validación del modelo comparando los resultados simulados con los registros históricos o datos observados, ajustando los parámetros para mejorar la representatividad del comportamiento hidrodinámico (El-Bagoury & Gad, 2024).

- **Mapas de peligro y escenarios de inundación**

La elaboración de mapas de peligro se sustenta en tres componentes fundamentales que proporcionan la información básica necesaria para construir el modelo numérico de escurrimientos superficiales.

El primero corresponde al análisis de la precipitación, cuyo propósito es caracterizar la distribución espacial y temporal de la lluvia para definir el evento de diseño.

El segundo considera la infraestructura urbana, así como la configuración topográfica del área de estudio, factores que condicionan el comportamiento del flujo.

Finalmente, el tercero comprende la delimitación de subcuencas y microcuencas, integrando parámetros geomorfológicos como el área, el perímetro, el ancho y

la longitud del cauce principal (Alcocer-Yamanaka et al., 2016, pp. 36–37).

El mapa de peligro se genera para cada periodo de retorno, considerando los tirantes y velocidades calculados con el modelo numérico (Tabla 1).

Tabla 1.

Criterios establecidos para la generación del mapa de peligro por inundación (IMTA, 2015)

NIVEL DE PELIGRO	ALTURA (m)	VOLCAMIENTO (m ² /s)	DESPLAZAMIENTO (m ³ /s ²)
Nulo	$h < 0.3$	$vh < 0.3$	$v^2h < 0.3$
Bajo	$0.3 \geq h < 0.5$	$0.3 \geq vh < 0.5$	$0.3 \geq v^2h < 0.5$
Medio	$0.5 \geq h < 1.5$	$0.5 \geq vh < 1.5$	$0.5 \geq v^2h < 1.5$
Alto	$h \geq 1.5$	$vh \geq 1.5$	$v^2h \geq 1.5$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la metodología aplicada para la simulación del modelo en HEC-RAS 2D, considerando los Tr de 20 y 50 años, así como la profundidad, velocidad y extensión de la lámina de agua, además de identificar las zonas susceptibles a inundación.

En el área de estudio, las elevaciones del terreno presentan un rango que varía entre 7 y 10 m s. n. m. en la parte superior o corona del canal, tomando como referencia el terreno natural. La plantilla del cauce se encuentra a cotas menores, que oscilan entre 6 y 5 m s. n. m., lo que refleja una pendiente suave a lo largo de su recorrido (Figura 3).



Figura 3. Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio

El canal natural exhibe una sección transversal variable, con anchos en la plantilla que fluctúan entre 2.5 y 4 m, adaptándose a las condiciones locales del relieve en el tramo. En la parte aguas abajo, se localiza una estructura de cruce tipo puente, compuesta por doce tuberías circulares, que funcionan como obras de drenaje para permitir el paso del flujo y mantener la continuidad hidráulica del sistema.

Utilizando la información topográfica recopilada tanto en campo como en gabinete, así como los caudales de diseño obtenidos del estudio hidrológico, se procedió a desarrollar la modelación hidráulica con el fin de simular el comportamiento del flujo superficial ante eventos hidrometeorológicos representativos y así evaluar la capacidad hidráulica del cauce natural, identificar zonas de riesgo por desbordamiento y proponer soluciones de control pluvial en el predio destinado al proyecto.

• **Perfil de superficie de agua**

El canal presenta una geometría altamente variable, característica de un cauce natural. A lo largo del perfil longitudinal se observan cambios abruptos en la sección transversal, incluyendo zonas con escalones o transiciones marcadas alrededor de las estaciones 450 m y 1 000 m, las cuales corresponden a estructuras hidráulicas existentes (como puentes o cruces de infraestructura) o a modificaciones en el perfil del terreno.

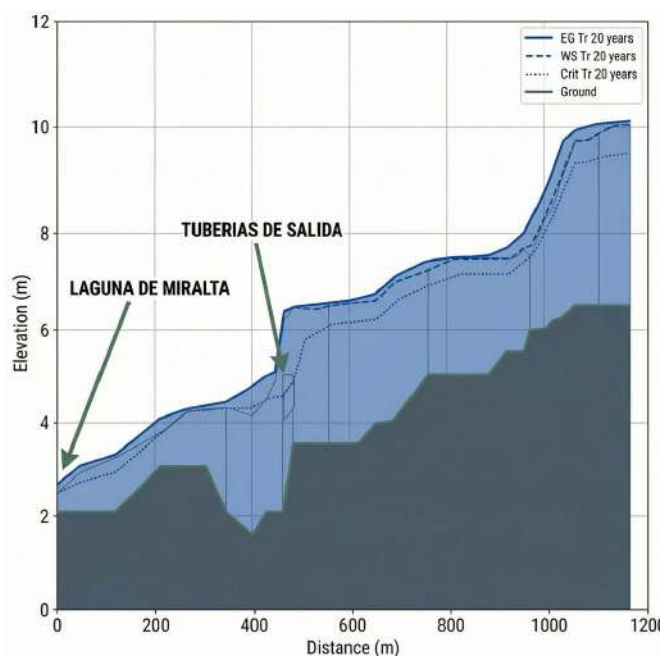


Figura 4. Vista del perfil longitudinal del canal para un TR de 20 años

• **Estimación de gastos pluviales**

A continuación se presentan los resultados del análisis probabilístico, donde se extrapolan los valores, obteniéndose las lluvias para los diferentes Periodos de Retorno (Tr) (Tabla 2).

Aplicando el factor de Corrección por Intervalo Fijo de Observación (I.F.O.) a los valores de la Tabla 2, se multiplicará por 1.13 para ajustarlo (Tabla 3).

Tabla 2.

Lluvias máximas para diferentes periodos de retorno (Tr) tomadas del análisis de lluvias máximas en 24 hs observadas en la estación Altamira

Tr años	Hpmax 24 mm
2	102.6
5	174.92
10	211.54
20	233.35
50	258.43

Tabla 3.

Corrección de lluvias máximas en 24 h, para periodos de retorno observadas en la estación Altamira

Tr años	Hpmax 24 mm	I.F.O	PCP Max 24 hrs CORREGIDO
2	102.6	1.13	115.94
5	174.92	1.13	197.66
10	211.54	1.13	239.04
20	233.35	1.13	263.68
50	258.43	1.13	292.03

Se realizaron los cálculos del gasto máximo de diseño empleando tres métodos hidrológicos distintos (hidrograma unitario triangular, Ven Te Chow y Racional), con el propósito de comparar sus resultados y seleccionar el valor más representativo para la cuenca en estudio (Tabla 4).

Tabla 4.

Gasto adoptado para diferentes periodo de retorno

Tr años	Qmax m ³ /s
2	17.77
5	21.04
10	28.98
20	56.5
50	84.4

• **Identificación de zonas inundables**

Los resultados de la modelación hidráulica reflejan la distribución espacial de las zonas susceptibles a inundaciones dentro de la cuenca o área de interés. las mismas consideran factores topográficos, hidrológicos y climáticos. La llanura de inundación que corresponde a un Tr de 20 años abarca un total de 21.78 ha (Figura 5), mientras que para un Tr de 50 años se extiende a 23.53 ha (Figura 6).

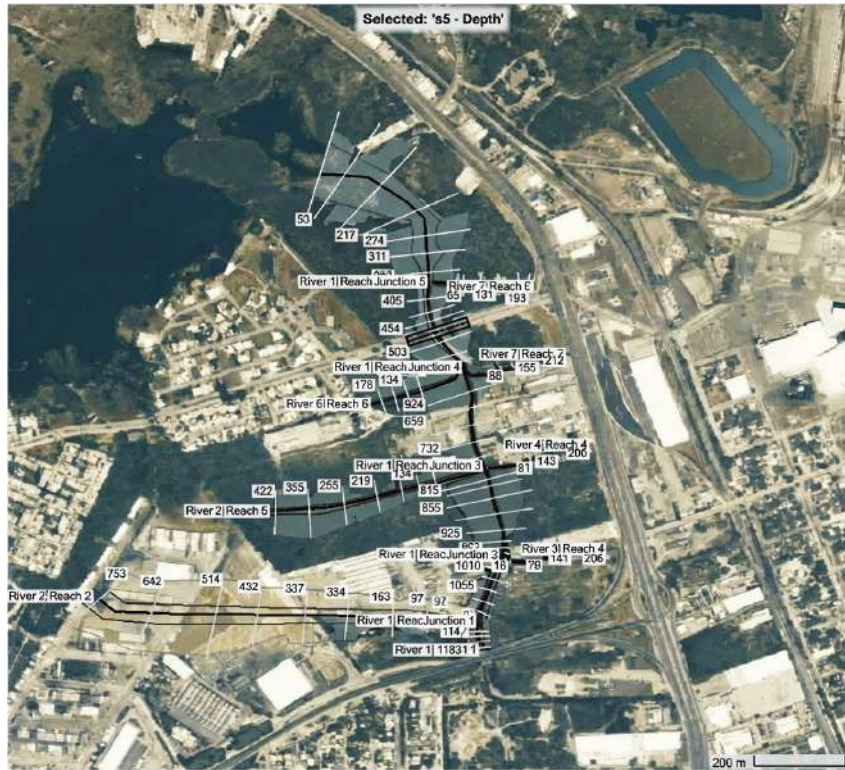


Figura 5. Representación espacial de la llanura de inundación asociada a un período de retorno de 20 años. El sombreado indica las áreas con mayor exposición al riesgo de inundación



Figura 6. Representación espacial de la llanura de inundación asociada a un período de retorno de 50 años. El sombreado indica las áreas con mayor exposición al riesgo de inundación



Figura 7.
Profundidades de inundación para Tr de 20 años

• **Profundidad hidráulica**

Para el estudio de la profundidad hidráulica, el modelo Depth refiere a la profundidad hidráulica del agua medida desde la superficie libre del agua hasta el terreno o fondo del canal en una sección transversal específica. Sobre esta base, este mapa representa la simulación de profundidades de inundación generadas con HEC-RAS para un evento con periodo de retorno de 20 años (Tr20) que alcanza profundidades máximas de hasta 3.76 m (Figura 7).

Las zonas más profundas tienden a localizarse en cauces principales y puntos de confluencia, mientras que las áreas sin sombreado representan sectores no afectados bajo este escenario de diseño. Para Tr de 50 años, se alcanza una profundidad máxima de 4.33 m; los resultados se superponen sobre una imagen satelital georreferenciada, permitiendo identificar con precisión zonas urbanas, viales e industriales afectadas por el evento (Figura 8).

En este caso, también las zonas más profundas tienden a localizarse en cauces principales y puntos de confluencia, mientras que las áreas sin sombreado representan sectores no afectados bajo este escenario de diseño. Este resultado permite identificar zonas vulnerables y verificar la capacidad hidráulica de la red modelada frente a un evento de $Tr = 20$, facilitando la evaluación de medidas de mitigación o ajuste de obras existentes. En la sección 448, aguas abajo, corresponde a un cruce con una estructura formada por 12 tuberías de concreto; el diámetro de los ductos es de 0.58 m. Para un periodo de retorno de 20 años, el modelo

hidráulico indica que el flujo no se desborda, es decir, el nivel del agua no supera la rasante del camino superior del cruce, lo que implica que la estructura contiene el caudal de diseño (Figura 9).



Figura 8.
Profundidades de inundación para Tr de 20 años

Para un periodo de retorno de 20 años, el modelo hidráulico indica que el flujo no sobrepasa la vialidad; sin embargo, para el periodo de 50 años se observa que existe desbordamiento que puede alcanzar profundidades de hasta 0.56 m (Figura 9).

Tanto aguas arriba como aguas abajo, para estos periodos de retorno, las tuberías se encuentran completamente llenas, lo que indica que están trabajando en régimen de flujo a presión; esta condición representa un funcionamiento en su máxima capacidad.

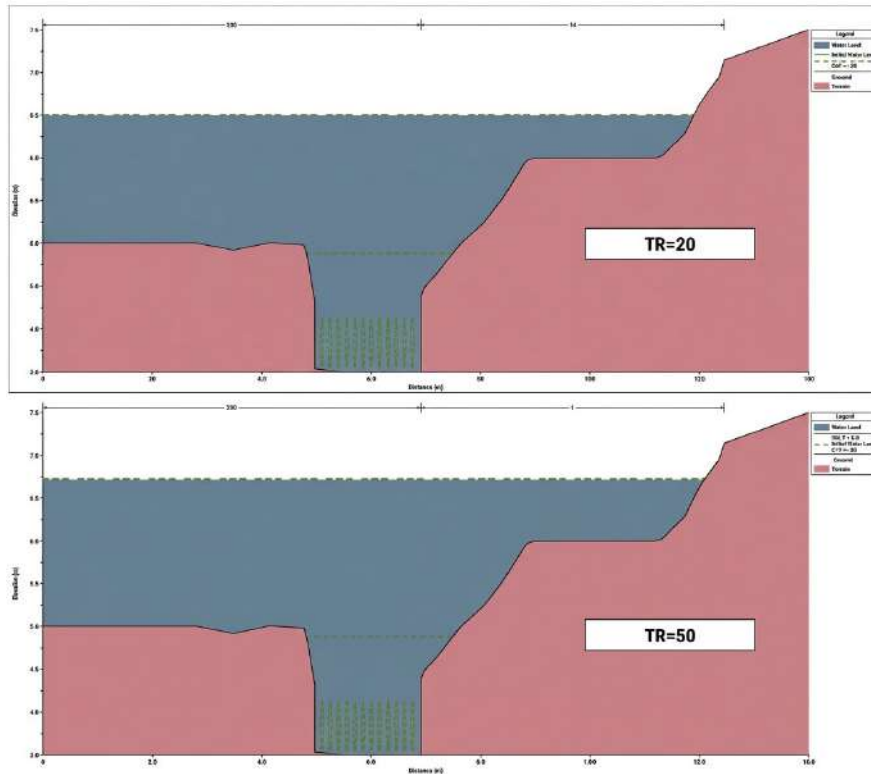


Figura 9. La sección 448 aguas arriba, corresponde a un cruce con una estructura formada por 12 tuberías de concreto

Además, se observa que el flujo supera la línea crítica, lo cual implica que el régimen del flujo es supercrítico, es decir, el agua fluye con alta velocidad y baja profundidad relativa, lo que puede estar asociado a una transición hidráulica abrupta o a un flujo controlado aguas abajo. Este tipo de flujo puede generar inestabilidad, socavación en la estructura y riesgos estructurales o de inundación aguas arriba.

Para un periodo de retorno de 50 años ($Tr = 50$ años), el análisis hidráulico muestra que el flujo supera la capacidad hidráulica de las tuberías y rebasa la rasante del puente, lo que indica una condición de desbordamiento.

Además, se observa que el flujo supera la línea crítica, lo cual implica que el régimen del flujo es supercrítico, es decir, el agua fluye con alta velocidad y baja profundidad relativa (Figura 10), lo que puede estar asociado a una transición hidráulica abrupta o a un flujo controlado aguas abajo, la velocidad máxima alcanzada es de 4.57 m. Este tipo de flujo puede generar inestabilidad, socavación en la estructura y riesgos estructurales o de inundación aguas arriba.

Los resultados obtenidos para el período de retorno de 20 años muestran que las profundidades de inundación varían entre 0 y 3.76 m, mientras que las velocidades del

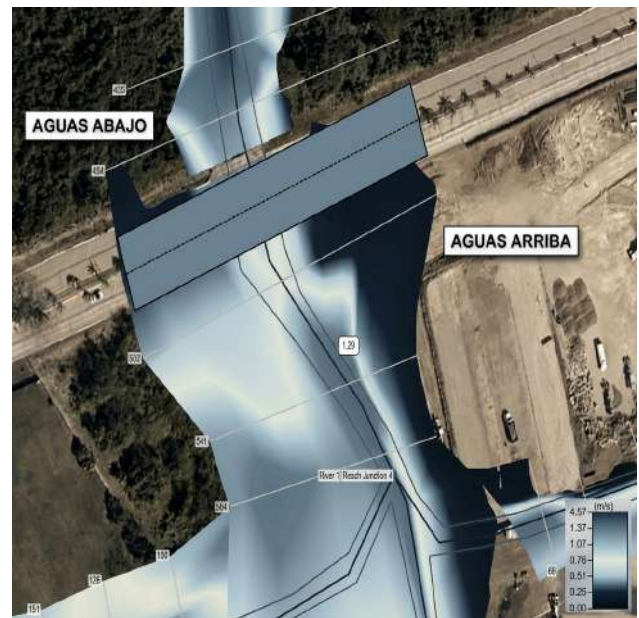


Figura 10. Velocidades en el seccionamiento 448 aguas arriba

flujo oscilan entre 0 y 4.49 m/s (Figura 11). Con base en los criterios de clasificación de peligro establecidos, fueron identificadas zonas con diferentes niveles de afectación.

De acuerdo con lo anterior, las áreas con nivel de peligro nulo o bajo corresponden principalmente a sectores con tirantes menores a 0.5 m y velocidades reducidas, donde el impacto del flujo es limitado. Sin embargo, se observan zonas de peligro medio en sectores donde el tirante supera 0.5 m y la velocidad se incrementa, generando condiciones propicias para el volcamiento parcial de estructuras o peatones.

Finalmente, las zonas de peligro alto se localizan en áreas con profundidades mayores a 1.5 m y velocidades superiores a 1.5 m/s, alcanzando en algunos puntos valores cercanos a 4.49 m/s, lo que implica un riesgo considerable de inestabilidad, deslizamiento y arrastre de personas o vehículos.



Figura 11.
Velocidades para un Tr de 20 años.

Para el evento de 50 años de período de retorno, los tirantes alcanzan valores máximos de 4.33 m y las velocidades varían de 0 a 4.95 m/s (Figura 12), lo que evidencia tanto el aumento de la magnitud como de la extensión de las áreas inundadas respecto al evento de 20 años. En consecuencia, las zonas clasificadas como de peligro alto se amplían significativamente debido al incremento simultáneo de la velocidad y la profundidad, condiciones que favorecen el volcamiento y el deslizamiento según los umbrales establecidos.

En este sentido, las áreas con peligro medio se distribuyen a lo largo de los cauces y zonas de transición hacia terrenos urbanos, mientras que las de peligro bajo se asocian a márgenes elevadas con tirantes entre 0.3 y 0.5 m.

En conjunto, los resultados que se han obtenido confirman que el incremento del período de retorno intensifica el riesgo de inundación, tanto por mayores profundidades como por el aumento de la energía del flujo, representando un escenario de impacto potencialmente más severo para la población e infraestructura.



Figura 12.
Velocidades para un Tr de 20 años.

CONCLUSIONES

La aplicación del modelo HEC-RAS en microcuencas urbanas ha demostrado ser una herramienta eficaz para la gestión del riesgo por inundación, al permitir la simulación detallada del comportamiento hidráulico ante distintos escenarios de precipitación y períodos de retorno. A través de su implementación, es posible identificar con precisión las zonas más propensas a inundarse, cuantificar los tirantes y velocidades del flujo y generar mapas de peligro que han de facilitar la evaluación de la exposición y vulnerabilidad de la población y la infraestructura.

Con base en el estudio hidrológico realizado para definir los caudales de entrada al modelo HEC-RAS, así como en la topografía del terreno y las secciones transversales del canal integradas en el modelo, se llevó a cabo la simulación hidráulica para períodos de retorno de 20 y 50 años.

Los resultados muestran que, para un Tr = 50 años, la cota máxima de la superficie del agua alcanza los 8.68 msnm en la sección aguas arriba (cadenamiento 1010). Esta elevación deja un bordo libre de solo 0.32 m respecto a la rasante (9.00 msnm), lo que representa una condición hidráulicamente crítica, con alto riesgo de desbordamiento ante cualquier incremento adicional del caudal o por obstrucciones. Aguas abajo del cruce, el flujo es conducido por 12 tuberías de 0.58 m de diámetro, las cuales operan completamente llenas durante los eventos de diseño, generando un efecto de represamiento que contribuye a elevar los niveles de agua aguas arriba. Esta situación compromete la seguridad hidráulica del sistema en la zona de estudio.

Adicionalmente, se identificó que, en la margen derecha del cauce, en dirección hacia la Central de Abastos, la topografía presenta una pendiente más suave o reducida, lo que

propicia una acumulación localizada de agua en esa área durante eventos de lluvia intensa, aumentando el riesgo de encharcamientos o inundaciones.

La gestión del riesgo por inundación apoyada en el modelado numérico representa una práctica indispensable para reducir los impactos sociales y económicos de las crecidas en microcuencas urbanizadas.

Una de las limitantes para este estudio es que la resolución y exactitud del Modelo Digital de Elevación (DEM) influyen directamente en la representación del relieve y, por ende, en la correcta simulación del flujo superficial; pequeñas imprecisiones topográficas pueden generar errores en la delimitación de zonas inundables. Asimismo, la disponibilidad y calidad de los datos hidrológicos, como registros de precipitación y caudales observados, pueden ser limitadas o discontinuas, lo que afecta la confiabilidad del hidrograma de entrada.

Otra limitante importante radica en las suposiciones del modelo hidráulico, que, aunque robustas, se basan en condi-

ciones ideales y en la homogeneidad de parámetros como la rugosidad de Manning o las condiciones de contorno, los cuales en la realidad pueden variar espacial y temporalmente. Además, el modelo no considera factores dinámicos como la sedimentación, la obstrucción parcial de estructuras o el efecto de la vegetación durante eventos extremos, que podrían modificar significativamente la respuesta hidráulica.

Finalmente, ha de tenerse en cuenta que la calibración y validación del modelo está en dependencia de la existencia de información histórica de eventos de inundación. Esta información, generalmente, es escasa o inexistente. Es por esta razón que aunque los resultados obtenidos permiten comprender el comportamiento general del sistema y evaluar escenarios de riesgo, deben interpretarse como una aproximación técnica sujeta a incertidumbre y complementarse con verificación en campo y análisis de sensibilidad para garantizar su aplicación confiable en la gestión del riesgo por inundaciones.

REFERENCIAS

- Alcocer-Yamanaka, V.H., Rodríguez-Varela, J.M., Bourguett-Ortiz, V.J., Llaguno-Guilberto, O.J., & Alborno-Góngora, P.M. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas (Methodology for Generating Flood Risk Maps in Urban Areas). *Tecnología y ciencias del agua*, 7(5), 33-55. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500033&lng=es&tlng=es
- Amoussou, E., Amoussou, F.T., Bossa, A.Y., Kodja, D.J., Totin Vodounon, H.S., Houndénou, C., Borrell Estupina, V., Paturrel, J.-E., Mahé, G., Cudennec, C., & Boko, M. (2024). Use of the HEC RAS model for the analysis of exceptional floods in the Ouémé basin. *Proc. IAHS*, 385, 141-146. <https://doi.org/10.5194/piahs-385-141-2024>
- Ansarifard, S., Eyvazi, M., Kalantari, M., Mohseni, B., Ghorbanifard, M., Moghaddam, H. J., & Nouri, M. (2024). Simulation of floods under the influence of effective factors in hydraulic and hydrological models using HEC-RAS and MIKE 21. *Discover Water*, 4(92). <https://doi.org/10.1007/s43832-024-00155-0>
- Arganis, M., Preciado, M., De Luna, F., Cruz, L., Domínguez, R., & Santana, O. (2023). Application of a Regionalization Method for Estimating Flash Floods: Cuauhtepc Basin, Mexico. *Water*, 15(2), 303. <https://doi.org/10.3390/w15020303>
- Disse, M., Johnson, T.G., Leandro, J., & T. Hartmann. (2020). Exploring the relation between flood risk management and flood resilience. *Water Security*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100059>
- El-Bagoury, H., & Gad, A. (2024). Integrated hydrological modeling for watershed analysis, flood prediction, and mitigation using meteorological and morphometric data, SCS-CN, HEC-HMS/RAS, and QGIS. *Water*, 16(2), 356. <https://doi.org/10.3390/w16020356>
- Ennouini, W., Fenocchi, A., Petaccia, G., Persi, E., & Sibilla, S. (2024). A complete methodology to assess hydraulic risk in small ungauged catchments based on HEC-RAS 2D Rain-On-Grid simulations. *Natural Hazards*, 7381-7409. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06515-2>
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) (2015). *Estudio de riesgos de inundaciones en zonas urbanas de la república mexicana del Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua (FSIDSA) Conagua-Conacyt* (Flood Risk Study in Urban Areas of the Mexican Republic by the Sectoral Fund for Research and Development on Water Conagua-Conacyt). <https://www.gob.mx/imta/articulos/estudio-de-riesgos-de-inundaciones-en-zonas-urbanas-de-la-republica>
- Khatooni, K., Hooshyaripor, F., Bahram Malek Mohammadi, B. & Noori, R. (2025). A new approach for urban flood risk assessment using coupled SWMM-HEC-RAS-2D model. *Journal of Environmental Management*, 374. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123849>
- Nkwunonwo, U.C., Whitworth, M., & Baily, B. (2020). A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries. *Scientific African*, 7, e00269. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00269>
- Peker, İ.B., Gülbaz, S., Demir, V., Orhan, O., & Beden, N. (2024). Integration of HEC-RAS and HEC-HMS with GIS in Flood Modeling and Flood Hazard Mapping. *Sustainability*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/su16031226>
- Plata-Rocha, W., Avila-Aceves, E., Monjardín-Armenta, S.A., Pérez-Aguilar, L.Y., Rangel-Peraza, J.G., & Zambrano-Medina, Y.G. (2025). Urban flood modeling using hydrograph and Rain-on-Grid approaches with HEC-HMS and HEC-RAS: A case study of the Culiacán River. *South American Earth Sciences*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105694>
- Qian, Q., Edwards, D.J., Zhang, Y., & Haselbach, L. (2024). Improving Flood Inundation Mapping Accuracy Using HEC-RAS Modeling: A Case Study of the Neches River Tidal Floodplain in Texas. *Journal of Hydrologic Engineering*, 29(4). <https://doi.org/10.1061/JHYEFF.HEENG-6037>

- SGM (Servicio Geológico Mexicano) (2025). *Peligros y riesgos por fenómenos naturales* (Hazards and Risks from Natural Phenomena). [Archivo PDF]. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157799/Peligros-y-Riesgos.pdf>
- Stella, J.M. (2025). Modelling flood map during Alex hurricane: Simulation enforced by multisensory precipitation in the city of Monterrey, Mexico. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 16(5), 97-134. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2025-05-03>
- Toapaxi-Álvarez, J.A. & Acero Quilumbaquin, A. (2021). Análisis de Inundación por Rotura de Presa Utilizando el Modelo HEC-RAS 2D: Caso de Estudio de la Presa Mulacorral, Provincia de Tungurahua, Ecuador. *Revista Politecnica*, 48(1), 51-64. <https://doi.org/10.33333/rp.vol48n1.05>
- Truong, C., Malavasi, M. & Goldstein, M.A. (2024). Timing is (almost) everything: Real options, extreme value theory, climate adaptation, and flood risk management. *Journal of Environmental Management*, 370. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122621>
- USACE (US Army Corps of Engineers) (2025). *Manual del usuario de HEC-RAS 2D* (HEC-RAS 2D User's Manual). <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/latest/development-of-a-2d-or-combined-1d-2d-model/development-of-the-2d-computational-mesh>
- Yunus, Z.K., & Fatih, Ü. (2025). Comparison of three different satellite data on 2D flood modeling using HEC-RAS (5.0.7) software and investigating the improvement ability of the RAS Mapper tool. *Journal Flood Risk Management*, 18(1). <https://doi.org/10.1111/jfr3.13046>