

Inundaciones pluviales microurbanas asociadas a fenómenos hidrometeorológicos: estudio de caso en Proterritorio, Quintana Roo, México

Micro-urban pluvial flooding linked to hydrometeorological phenomena: a case study of Proterritorio, Quintana Roo, Mexico

JOSÉ MANUEL CAMACHO SANABRIA*,  <https://orcid.org/0000-0003-0366-0613>
Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México, jmanuelcs@live.com.mx

ROSALÍA CHÁVEZ ALVARADO,  <https://orcid.org/0000-0003-3468-9283>
Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, México, rosaliadf@gmail.com

LUIS GIOVANNI RAMÍREZ SÁNCHEZ,  <https://orcid.org/0000-0003-0509-3413>
El Colegio Mexiquense, México, lr Ramirez@cmq.edu.mx

*Autor de correspondencia

Abstract

Between 1993 and 2023, the evolution and distribution of micro-urban rainfall flooding in the neighborhood of Proterritorio, Quintana Roo, Mexico, associated with hydrometeorological phenomena, was analyzed. The study included data on precipitation, location, extent, duration, and depth of flooded areas, as well as elements exposed at the block level. Sixty-seven events were identified, primarily linked to tropical waves and cold fronts. Daily rainfall exceeding 47.6 mm and a maximum intensity above 57 mm/h are critical flood hazard thresholds for Proterritorio residents and highlight the area's vulnerability to extreme hydrometeorological events.

Keywords: MNDWI index, severe flooding, semi-structured interviews, hydrometeorological phenomena.

Resumen

Entre 1993 y 2023 se analizó la evolución y distribución de las inundaciones pluviales microurbanas en el barrio de Proterritorio, Quintana Roo, México, asociadas a fenómenos hidrometeorológicos. El estudio incluyó datos de precipitación, ubicación, extensión, duración y profundidad de las zonas inundadas, así como los elementos expuestos a nivel de manzana. Se identificaron 67 eventos, vinculados principalmente con ondas tropicales y frentes fríos. Las precipitaciones diarias superiores a 47.6 mm y una intensidad máxima mayor a 57 mm/h son umbrales críticos de peligro de inundación para los residentes de Proterritorio y evidencian la vulnerabilidad del área ante eventos hidrometeorológicos extremos.

Palabras clave: índice MNDWI, inundaciones severas, entrevistas semiestructuradas, fenómenos hidrometeorológicos.

Recepción: 23 de abril de 2024 / Aceptación: 4 de febrero de 2025 / Publicación: 16 de octubre de 2025



Esta obra está protegida bajo la
Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-Sin
Derivadas 4.0 Internacional



CÓMO CITAR: Camacho Sanabria, José Manuel; Chávez Alvarado, Rosalía y Ramírez Sánchez, Luis Giovanni (2025). Inundaciones pluviales microurbanas asociadas a fenómenos hidrometeorológicos: estudio de caso en Proterritorio, Chetumal, Quintana Roo. *Economía, Sociedad y Territorio*, 25: e2342. <http://dx.doi.org/10.22136/est20252342>

Introducción

En las últimas dos décadas, la frecuencia de inundaciones a nivel mundial ha mostrado un aumento significativo. Entre 1980 y 1999 se registraron 1389 eventos, mientras que en 2000 y 2019 esta cifra se incrementó a 3254 (CRED-UNDRR, 2021). Durante el periodo 2003-2022, el promedio anual fue de 170 eventos que afectaron a 75 millones de personas, causaron 5518 muertes y ocasionaron daños estimados en 41 billones de dólares estadounidenses por año (CRED, 2024). Estas tendencias resultan alarmantes, pues se prevé que, en las próximas décadas, se siga incrementando la frecuencia, intensidad y duración de las inundaciones, lo que podría generar daños y pérdidas aún más significativos, particularmente en zonas urbanas (Agonafir *et al.*, 2023).

Los estudios resaltan que el acelerado crecimiento urbano ha desempeñado un papel crucial en el aumento de las inundaciones en las ciudades y sus impactos subsecuentes (Feng *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2023). Históricamente, la mayor parte de la investigación, planificación y políticas relacionadas con las inundaciones urbanas se han enfocado en las inundaciones fluviales o en las costeras (Rosenzweig *et al.*, 2018). No obstante, en los últimos años, las inundaciones pluviales han emergido como una preocupación crítica en numerosas ciudades del mundo, debido a las pérdidas humanas y los daños materiales que ocasionan a propiedades públicas y privadas (Ke *et al.*, 2020), principalmente a escala intraurbana y micro, como en algunos barrios o vecindarios específicos de una ciudad (Netzel *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2023).

De acuerdo con la literatura, diversas ciudades de países desarrollados han experimentado inundaciones pluviales, incluyendo Worcester, en Reino Unido (Visser, 2014); Roma, en Italia (Di Salvo *et al.*, 2017); Berlín, Potsdam, Remscheid y Leegebruch, en Alemania (Dillenardt *et al.*, 2021); Malmö, en Suecia (Mobini *et al.*, 2021); y Atlanta, Phoenix y Portland, en Estados Unidos (Pallathadka *et al.*, 2022). En países en desarrollo se destacan Coro, en Venezuela (Sánchez y Martínez, 2012); Montería, en Colombia (Padilla y Gónima, 2015); Shenzhen, en China (Ke *et al.*, 2020); Rosario, en Argentina (Zimmermann y Bracalenti, 2017); y Alejandría, en Egipto (Young *et al.*, 2021), entre otras.

México se encuentra entre los países más afectados por el incremento de las inundaciones pluviales urbanas en América Latina. La Ciudad de México destaca como una de las urbes más estudiadas en relación con esta problemática, con distintos trabajos que abordan el tema (Reinoso *et al.*, 2012;

Zambrano *et al.*, 2018; Santos y Rodríguez, 2020). Sin embargo, otras ciudades también han registrado la ocurrencia de este tipo de inundaciones, como San Luis Potosí (Pérez *et al.*, 2023), Tijuana (Goodrich *et al.*, 2020), Culiacán (Sánchez-Núñez *et al.*, 2023), San Pedro Cholula (Casiano *et al.*, 2019) y Chetumal (Martínez *et al.*, 2018; Barrera, 2020; Camacho-Sanabria *et al.*, 2022; Valle *et al.*, 2024).

A pesar de que la literatura existente documenta diversos estudios de inundaciones pluviales en México, el conocimiento de los patrones espaciales y temporales de estas inundaciones a escala micro (barrio y manzana) continúa siendo limitado, especialmente en Chetumal. Ante esta brecha, el presente estudio analiza la evolución y distribución de las inundaciones pluviales microurbanas asociadas a fenómenos hidrometeorológicos extremos en el barrio de Proterritorio, Chetumal, durante el periodo 1993-2023.

En específico, esta investigación tiene como objetivo responder a las siguientes preguntas: ¿cuándo y con qué frecuencia ocurren las inundaciones pluviales en el barrio de Proterritorio?, ¿dónde se localizan?, ¿qué fenómenos hidrometeorológicos están asociados a ellas? y ¿cuál es su grado de influencia? Asimismo, busca establecer los umbrales de peligrosidad relacionados con la cantidad e intensidad de lluvia que generan las zonas de inundación. Además, se propone documentar las inundaciones más severas registradas en la memoria de los residentes del barrio. Por último, se plantea representar espacialmente, a nivel manzana, las características de las zonas de acumulación de agua pluvial urbanas (ZAAPU), incluyendo su ubicación, extensión, profundidad y los elementos expuestos, con un enfoque particular en el evento de inundación más severo registrado en Proterritorio.

Los resultados de este estudio pueden coadyuvar al diseño de estrategias efectivas para la Gestión del Riesgo por Inundaciones Pluviales (GRIP) a escala micro, favoreciendo la planificación urbana, la mitigación de riesgos y el fortalecimiento de la resiliencia comunitaria. En particular, pueden ayudar a las autoridades locales en la identificación y priorización de áreas que requieren atención y recursos para el diseño de sistemas de drenaje más eficientes y de infraestructuras resilientes, esenciales para reducir el impacto de futuras inundaciones. Asimismo, la información obtenida puede ser oportuna para mejorar la preparación y la respuesta ante emergencias causadas por estos fenómenos.

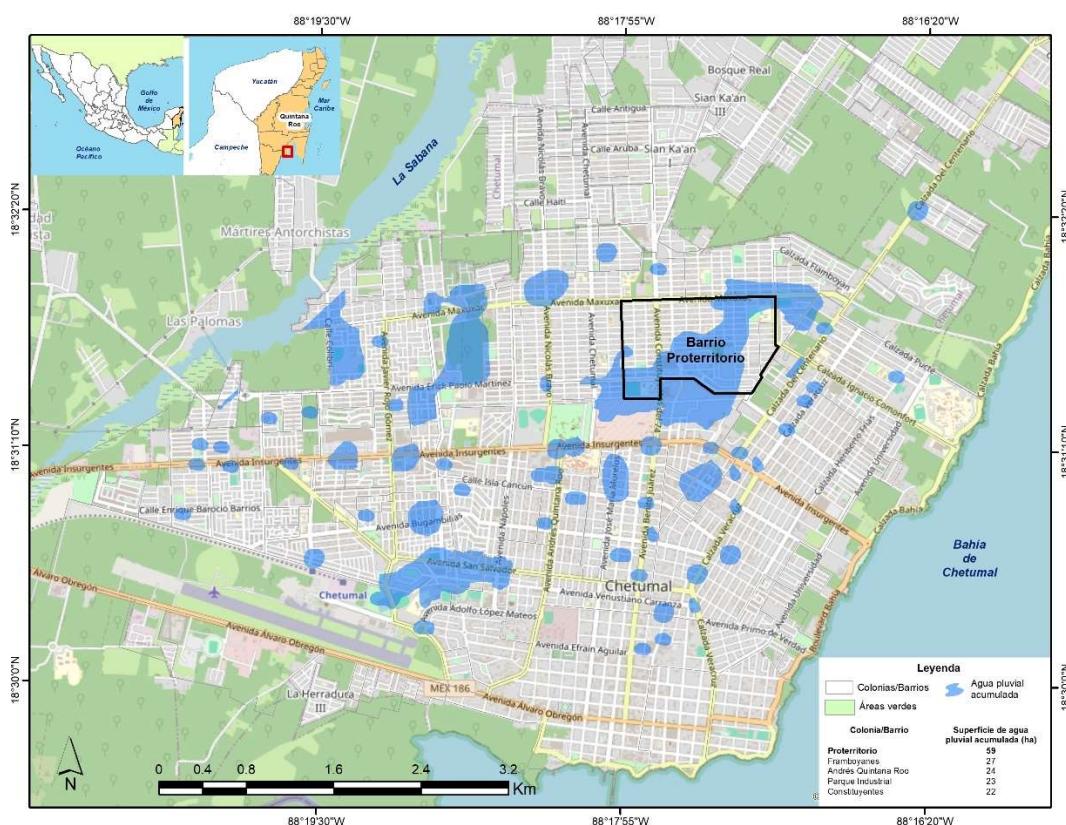
1. Metodología

1.1. Área de estudio

Chetumal es una ciudad costera ubicada en el sur del estado de Quintana Roo, que se encuentra frecuentemente expuesta al impacto de huracanes, los cuales provocan inundaciones extremas (Rodríguez, 2018; Hernández *et al.*, 2018). Estos fenómenos hidrometeorológicos generan afectaciones en los distintos barrios o colonias que conforman la ciudad.

El área de estudio seleccionada para esta investigación fue el barrio de Proterriorio, reconocido por su alta incidencia de inundaciones y por presentar la mayor cobertura inundada por precipitaciones en Chetumal (mapa 1). Además, existen registros que evidencian niveles de agua superiores a un metro de altura (CAPA-IMTA, 2016 y 2013). Este barrio tiene una superficie de 117 hectáreas y una población de 9411 habitantes (Inegi, 2020).

Mapa 1
Ubicación del área de estudio



Fuente: elaboración propia con base en datos históricos de zonas de inundación pluvial obtenidos de UAEQROO-CIG (2011) y procesados mediante el *software* ArcMap versión 10.5 (ESRI, 2016).

1.2. Diseño de estudio

El estudio se realizó a través de un enfoque metodológico complementario, sustentado en la triangulación de diversas técnicas y procedimientos de recolección y análisis de datos primarios y secundarios. Se trata de un estudio analítico, longitudinal, observacional y retrospectivo. Su alcance investigativo se sitúa en el nivel relacional, ya que se analizó la evolución y distribución de las inundaciones pluviales urbanas asociadas a fenómenos hidrometeorológicos, utilizando el barrio y la manzana como unidades de análisis espacial a escala micro.

1.3. Relación entre inundaciones pluviales y fenómenos hidrometeorológicos

En esta fase metodológica, se analizaron registros históricos de precipitación pluvial diaria del periodo 1993-2023, de la estación climatológica convencional Chetumal Tecnológico, ubicada aproximadamente a un kilómetro del barrio Proterritorio. Los datos fueron obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional, a través de la Comisión Nacional del Agua (SMN-Conagua, 2024).

Los datos de precipitación se clasificaron en cuatro categorías, según la cantidad de lluvia acumulada, considerando los criterios establecidos por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (2021a): lluvias fuertes (25-50 mm), lluvias muy fuertes (50.1-70 mm), lluvias intensas (70.1-150 mm) y lluvias torrenciales (mayores a 150 mm). Asimismo, los eventos de inundación fueron categorizados de acuerdo con la duración de las precipitaciones: lluvias en 24 horas, 48 horas, 72 horas y 96 horas.

Adicionalmente, se recopilaron registros de eventos de inundación y fenómenos hidrometeorológicos asociados de la Hemeroteca del Archivo General del Estado de Quintana Roo, específicamente del periódico local *Diario de Quintana Roo* (del periodo 1993-2023). Para el análisis de las inundaciones, se seleccionaron exclusivamente notas periodísticas que documentaron acumulaciones de agua críticas en el barrio de Proterritorio, desde encharcamientos que afectaron vías de comunicación hasta inundaciones severas que ocasionaron daños y pérdidas significativas.

Con base en esta información, se estableció un umbral de peligrosidad para los eventos de inundación registrados en el barrio de Proterritorio. Asimismo, se caracterizó cada evento considerando la cantidad de lluvia acumulada, la duración de la precipitación y el fenómeno hidrometeorológico que lo ocasionó.

1.4. Inundaciones severas

Fueron catalogados como inundaciones severas los eventos ocurridos en octubre de 1995, octubre de 1998, agosto de 2012, octubre de 2015 y agosto de 2022. La selección se sustentó en los eventos mencionados con mayor frecuencia por los entrevistados, considerando relatos derivados de las memorias episódica (Tulving, 2022) y colectiva (Díaz, 2013). Se priorizaron aquellos eventos que impactaron significativamente la vida cotidiana de los habitantes de Proterritorio, ya fuera por la interrupción de actividades o por los daños y pérdidas reportados.

La información se obtuvo mediante entrevistas semiestructuradas aplicadas a aproximadamente 185 residentes del barrio, utilizando un muestreo no probabilístico intencional. Se priorizó la participación de hogares que han experimentado de manera recurrente inundaciones causadas por precipitaciones extremas y fenómenos hidrometeorológicos asociados.

Para la caracterización de cada evento, se analizaron variables como la superficie inundada, la cantidad e intensidad de lluvia acumulada, la duración de la inundación y el fenómeno hidrometeorológico asociado a su ocurrencia. La selección de estas variables estuvo limitada por la disponibilidad y accesibilidad de los datos, lo que condicionó su inclusión en algunos casos.

1.4.1. Eventos: octubre de 1995 y octubre de 1998

Para estos eventos se determinó la superficie inundada, la duración del agua anegada y el total de lluvia acumulada durante el periodo de inundación posterior a la fecha de cada suceso. La evolución del área inundada se calculó a partir del índice *Normalized Difference Water Index Modified* (MNDWI) (Condeça *et al.*, 2022; Xu, 2006), empleando imágenes de satélite del sensor Landsat 5 Thematic Mapper (TM), libres de nubosidad y asociadas a fechas próximas a cada evento: 10 de noviembre de 1995, 26 de noviembre de 1995, 12 de diciembre de 1995 y 4 de diciembre de 1998 (USGS, 2023). También se utilizaron registros de precipitación pluvial diaria de la estación Chetumal Tecnológico para determinar la lluvia acumulada durante el periodo de inundación posterior a cada evento.

1.4.2. Eventos: agosto de 2012, octubre de 2015 y agosto de 2022

Para el análisis de las inundaciones ocurridas en agosto de 2012, octubre de 2015 y agosto de 2022, se utilizaron datos de precipitación registrados a intervalos de 10 minutos, obtenidos principalmente de la Estación Sinóptica Meteorológica Automática (ESMA) de Chetumal (SMN-Conagua, 2022). Sin embargo, debido a inconsistencias en los registros (valores de 0 mm) correspondientes al evento de octubre 2015, se complementó el análisis con datos de la Estación Meteorológica Automática de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo (UAEQROO, 2024). Los datos recopilados permitieron calcular la precipitación total acumulada y determinar los valores máximos de intensidad de precipitación asociados a cada evento de inundación.

1.5. Características de las Zonas de Acumulación de Agua Pluvial Urbanas

En este estudio, las ZAAPU se definieron como áreas específicas de la ciudad donde el agua de lluvia se concentra y permanece durante un periodo determinado. Esto ocurre como resultado de las características del microterreno, las condiciones hidrológicas, la insuficiencia o deficiencia de los sistemas de drenaje y el grado de impermeabilización del suelo.

La caracterización espacial de las ZAAPU se centró en la ubicación, extensión de la cobertura inundada, profundidad del agua acumulada y los elementos expuestos, con especial énfasis en la inundación de octubre de 2015. Este evento fue seleccionado como caso de estudio debido a su alta severidad, que resultó en su declaración como desastre para el estado de Quintana Roo (Cenapred, 2021b). Los datos necesarios para esta caracterización se recopilaron mediante entrevistas semiestructuradas.

Para representar la profundidad del agua acumulada en las ZAAPU, se utilizaron isolíneas ortogonales obtenidas a través de la interpolación de valores de profundidad similares (Mora, 2020). Este procedimiento permitió clasificar las ZAAPU en zonas de encharcamiento pluvial urbanas (ZEPU) y zonas de inundación pluvial urbanas (ZIPU). Las ZEPU se definieron como áreas donde la acumulación de agua fue menor a 0.3 m, mientras que las ZIPU correspondieron a zonas con una altura acumulada superior a este valor.

La tabla 1 muestra los niveles de profundidad del agua de lluvia acumulada, determinados con base en la relación entre la altura del agua y los daños y pérdidas asociados a cada nivel.

Tabla 1
Niveles de profundidad de las ZAAPU y su relación con los daños y pérdidas

<i>Tipo de ZAAPU</i>	<i>Categoría</i>	<i>Profundidad (m)</i>	<i>Daños y pérdidas asociados</i>
ZEPU	Muy bajo	0.10-0.30	El agua se acumula en las vías de comunicación, causando daños en vehículos y motovehículos por hundimientos o baches. En algunos casos, ingresa en viviendas ubicadas por debajo del nivel de la calle o sin guarniciones (banquetas).
ZIPU	Bajo	0.31-0.50	El agua ingresa a viviendas, comercios y centros educativos debido al efecto de ola provocado por vehículos en circulación. También se observan interrupciones en el tránsito vehicular y peatonal.
	Medio	0.51-0.75	Vehículos varados en las vías, daños en bienes, productos e inmobiliario de viviendas, comercios y centros educativos, además del riesgo de cortocircuito al alcanzar el agua los conectores eléctricos. La movilidad de los niños menores de cinco años (excluidos los bebés) se reduce.
	Alto	0.76-1.00	Afectaciones en autopartes de vehículos y limitaciones en la movilidad de personas adultas. Los niños menores de cinco años se encuentran en mayor peligro. En las viviendas, comercios y centros educativos, se reportan daños significativos y pérdidas materiales.
	Muy alto	> 1.00	Pérdida total de bienes materiales y vehículos, con un peligro considerable para la integridad y vida de las personas.

Nota: en las categorías a partir de bajo en adelante, para viviendas, comercios y centros educativos el valor máximo de cada intervalo debe ajustarse restando 0.3 m, que representa la altura del agua acumulada en las vías de comunicación.

Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos de las entrevistas.

Por otra parte, la representación espacial de los elementos expuestos identificados en las ZAAPU, específicamente los comercios y escuelas, se realizó mediante los datos del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) (Inegi, 2015). Respecto a las viviendas y la población que reside en estas zonas, la información se obtuvo del Censo de Población y Vivienda 2020 (Inegi, 2020).

La siguiente figura presenta las diferentes etapas metodológicas que guiaron la realización de este estudio.

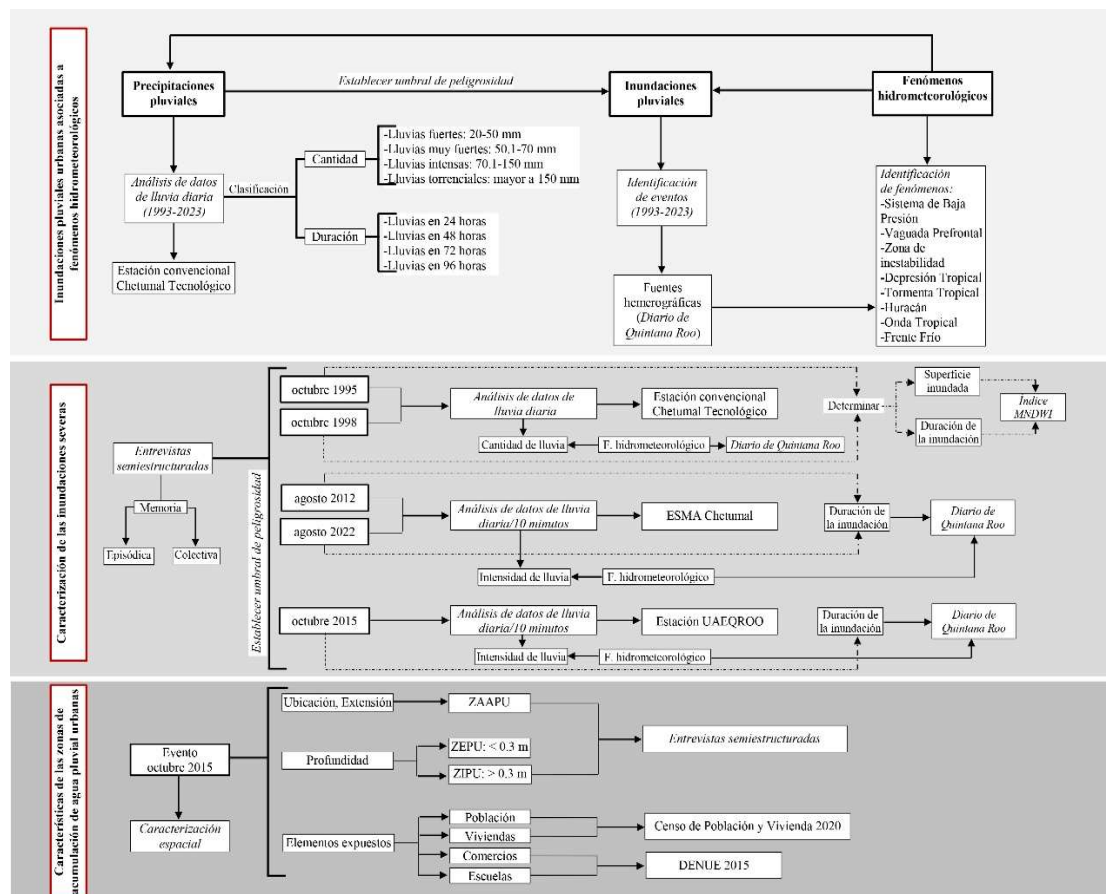
2. Resultados

2.1. Inundaciones pluviales urbanas asociadas a fenómenos hidrometeorológicos

Entre 1993 y 2023, se registraron 67 eventos de inundación en el barrio de Proterritorio, asociados a precipitaciones diarias superiores a 47.6 mm, umbral a partir del cual se formaron zonas de acumulación de agua pluvial. De estos eventos, 52 ocurrieron por lluvias acumuladas en un lapso

de 24 horas, 10 fueron resultado de precipitaciones en 48 horas, tres eventos en 72 horas y dos en 96 horas. En particular, de los eventos registrados en 24 horas, 24 fueron causados por lluvias muy fuertes, 22 por lluvias intensas, cuatro por lluvias torrenciales y dos por lluvias fuertes.

Figura 1
Diagrama metodológico del estudio



Fuente: elaboración propia con base en las secciones 1.3, 1.4 y 1.5, referentes a las fases metodológicas del estudio.

En relación con los diferentes fenómenos hidrometeorológicos que desencadenaron los eventos de inundación pluvial, se observó que 29 se atribuyeron a ondas tropicales, 12 a frentes fríos, ocho a huracanes, seis a tormentas tropicales, cinco a sistemas de baja presión, tres a depresiones tropicales, dos a zonas de inestabilidad y dos a vaguadas prefrontales. Respecto a los meses que registraron la mayor frecuencia de inundaciones, destacan junio con 18 eventos, septiembre con 11, octubre con ocho y agosto con siete. En cuanto a los años con mayor incidencia de inundaciones, destacan 2012 con siete y 2023 con seis (figura 2).

Figura 2
Inundaciones pluviales asociadas a fenómenos
hidrometeorológicos en Proterritorio



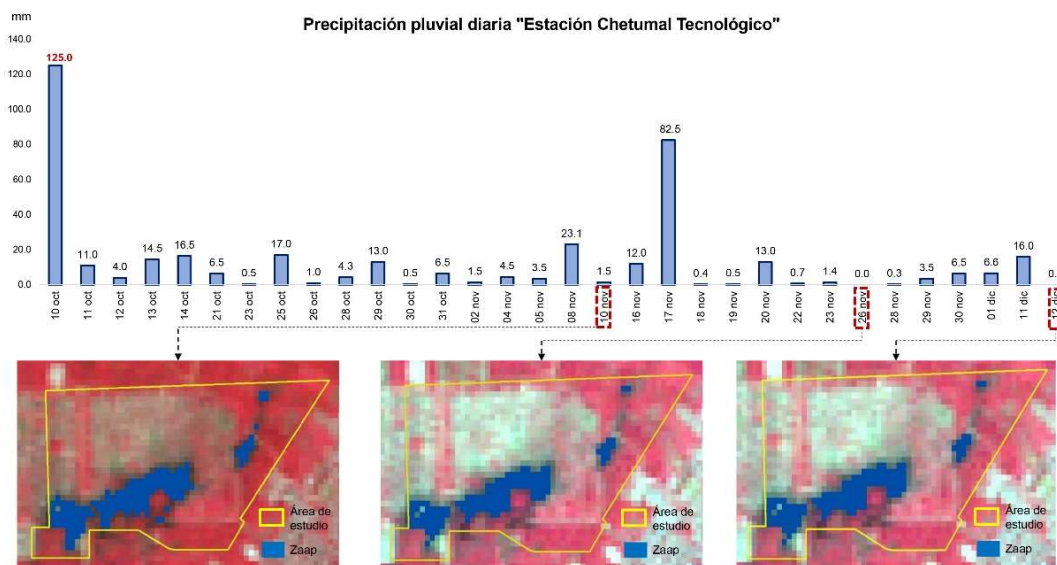
Fuente: elaboración propia con datos de la estación climatológica Chetumal Tecnológico (SMN-Conagua, 2024) y del *Diario de Quintana Roo* (1993-2023).

2.2. Inundaciones severas

2.2.1. Eventos: octubre de 1995 y octubre de 1998

El 10 de octubre de 1995, el huracán Roxana provocó intensas lluvias que ocasionaron inundaciones en el barrio de Proterritorio. De acuerdo con datos recopilados durante las entrevistas, el barrio permaneció inundado aproximadamente dos o tres meses. Esta información se ilustra en la figura 3, que muestra una cobertura inundada de 15 ha un mes después del evento inicial. Para el 26 de noviembre, esta área disminuyó a 12 ha, y para el 12 de diciembre se redujo aún más, a 8.4 ha. Durante el periodo comprendido entre el inicio del evento y esta última fecha, se acumularon 398 mm de precipitación pluvial en un lapso de 30 días, caracterizados por lluvias intermitentes.

Figura 3
Precipitaciones diarias y área inundada por el evento
de octubre de 1995 en Proterritorio

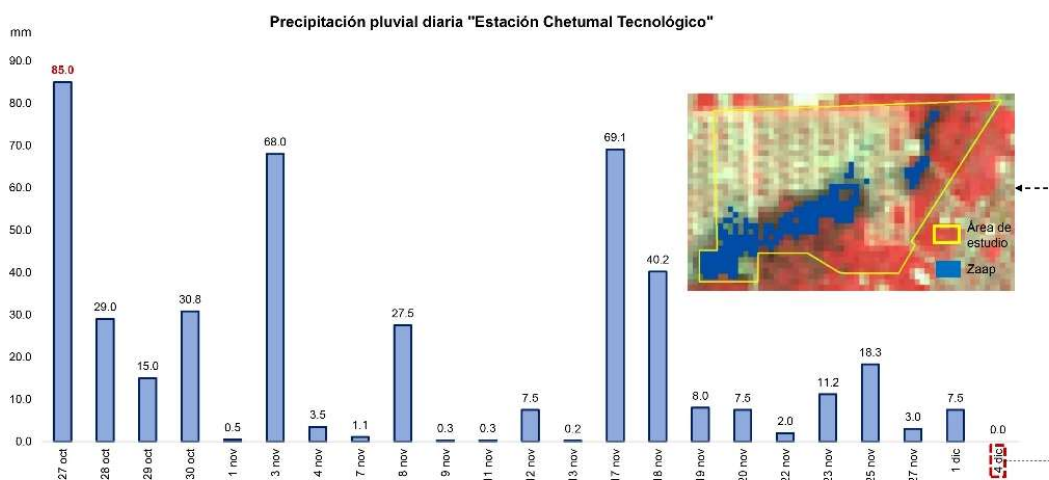


Fuente: elaboración propia con base en datos de la estación climatológica Chetumal Tecnológico (SMN-Conagua, 2024) y la interpretación de imágenes Landsat 5 TM (USGS, 2023).

Por otro lado, el 27 de octubre de 1998, las lluvias asociadas al huracán Mitch generaron inundaciones que afectaron nuevamente a la población de Proterritorio. La figura 4, correspondiente al 4 de diciembre de 1998, muestra que el barrio aún permanecía inundado,

abarcando una superficie estimada de 17.8 ha debido a las lluvias discontinuas registradas desde el inicio del evento. En total, se acumularon 435.5 m de precipitación en un periodo de 22 días.

Figura 4
Precipitaciones diarias y área inundada por el evento
de octubre de 1998 en Proterritorio



Fuente: elaboración propia con base en datos de la estación climatológica Chetumal Tecnológico (SMN-Conagua, 2024) y la interpretación de una imagen Landsat 5 TM (USGS, 2023).

2.2.2. Eventos: agosto de 2012, octubre de 2015 y agosto de 2022

En agosto de 2012, el primer evento, asociado a la onda tropical número 11, registró una precipitación acumulada de 326 mm en dos días, con una intensidad máxima de 52.2 mm/hora. El segundo evento, ocurrido en octubre de 2015 y relacionado con la onda tropical número 44, acumuló 399.5 mm de lluvia a lo largo de cuatro días consecutivos, alcanzando una intensidad máxima de 37.6 mm/hora. Por último, el tercer evento, en agosto de 2022, generado por la onda tropical número 23, produjo un total de 168 mm de precipitación en un solo día, con una intensidad máxima de 57.4 mm/hora (tabla 2). La duración de la inundación en cada caso fue proporcional al número de días de lluvia registrados.

Tabla 2
Precipitaciones diarias de los eventos de inundación
de agosto de 2012, octubre de 2015 y agosto de 2022

<i>Tiempo</i>	<i>Evento 2012 Precipitación (mm)</i>		<i>Evento 2015 Precipitación (mm)</i>				<i>Evento 2022 Precipitación (mm)</i>
	<i>16/08</i>	<i>17/08</i>	<i>16/10</i>	<i>17/10</i>	<i>18/10</i>	<i>19/10</i>	<i>18/08</i>
12:00 a.m.	0.6	0.0	1.3	11.7	0.0	0.0	0.0
01:00 a.m.	0.0	0.0	0.5	18.3	0.0	0.8	0.0
02:00 a.m.	0.0	0.0	0.3	13.0	0.0	2.5	0.0
03:00 a.m.	7.6	0.0	0.8	13.7	0.0	3.3	11.6
04:00 a.m.	26.4	0.0	0.3	27.4	0.0	37.6	11.4
05:00 a.m.	35.4	8.0	0.0	10.9	2.3	9.9	17.2
06:00 a.m.	19.4	3.4	0.8	15.5	3.6	14.5	11.2
07:00 a.m.	36.8	18.6	0.0	8.1	8.4	17.5	4.2
08:00 a.m.	52.2	6.4	1.5	17.5	4.6	2.0	57.4
09:00 a.m.	0.2	8.8	4.8	4.6	21.8	2.3	14.8
10:00 a.m.	13.0	1.6	1.8	5.3	24.4	4.3	30.2
11:00 a.m.	2.2	0.4	0.3	6.1	19.8	0.8	4.0
12:00 p.m.	5.8	0.2	0.3	11.2	23.4	0.0	1.4
01:00 p.m.	17.6	0.0	0.0	2.3	3.3	0.0	1.6
02:00 p.m.	31.4	0.0	0.0	0.3	1.3	0.0	2.4
03:00 p.m.	4.8	0.0	0.0	0.5	2.0	0.0	0.2
04:00 p.m.	0.0	0.2	0.0	1.8	1.5	0.0	0.4
05:00 p.m.	0.6	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0
06:00 p.m.	4.8	0.0	0.8	0.8	0.0	0.0	0.0
07:00 p.m.	0.4	0.0	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0
08:00 p.m.	13.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
09:00 p.m.	6.0	0.0	0.5	0.3	0.0	0.0	0.0
10:00 p.m.	0.2	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0
11:00 p.m.	0.0	0.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	278.4	47.6	16.9	170.4	116.3	96.0	168

Fuente: elaboración propia con base en datos de la ESMA Chetumal (SMN-Conagua, 2022) y la UAEQROO (2024).

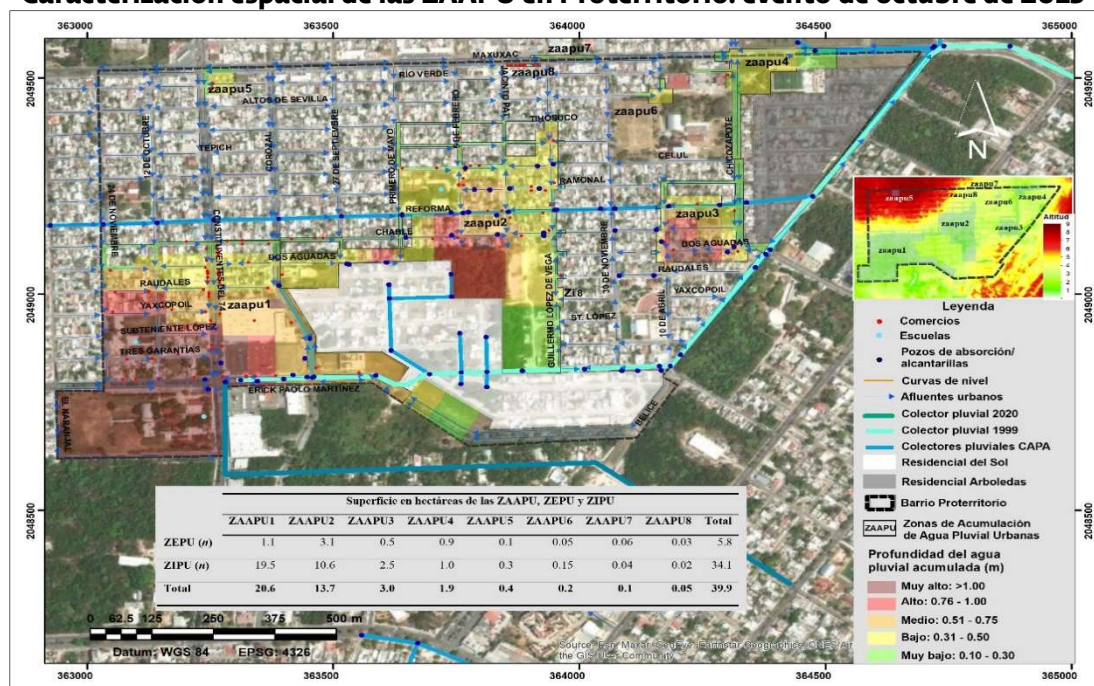
2.3. Características de las Zonas de Acumulación de Agua Pluvial Urbanas

El mapa 2 muestra la distribución espacial de las ZAAPU que caracterizan al barrio de Proterritorio, específicamente su extensión, profundidad y elementos expuestos del evento de inundación de octubre de 2015. En total, las ZAAPU abarcan una superficie de 39.9 ha, de las cuales 34.1 ha corresponden a las ZIPU y 5.8 ha a las ZEPU. Destacan las ZAAPU 1 y ZAAPU 2 como las áreas de mayor superficie anegada, abarcando 20.6 y 13.7 ha, respectivamente. Cabe señalar que estas mismas zonas comprenden las ZIPU con mayor extensión, con 19.5 ha para la ZAAPU 1 y 10.6 ha para la ZAAPU 2. Con relación a las ZEPU, la ZAAPU 2 fue la que registró la mayor cobertura.

Con respecto a los elementos expuestos, se identificaron en total 860 viviendas, 3809 habitantes, 99 comercios y tres centros educativos en las ZAAPU del barrio de Proterritorio. De éstos, 493 viviendas, 2583 personas, 73 comercios y los tres centros educativos se ubicaron en las ZIPU, mientras que 367 viviendas, 1226 residentes y 26 comercios correspondieron a las ZEPU. La ZAAPU 2, debido a su extensión, registró el mayor número de elementos expuestos, incluyendo 463 viviendas, 1987 habitantes, 25 comercios y un centro educativo (mapa 2).

Mapa 2

Caracterización espacial de las ZAAPU en Proterritorio: evento de octubre de 2015



Fuente: elaboración propia con base en datos obtenidos de las entrevistas, información del drenaje pluvial (CAPA-IMTA, 2013) y una imagen Landsat 5 TM de 1999 (USGS, 2023). El mapa se elaboró en el *software* ArcMap versión 10.5 (ESRI, 2016).

3. Discusión

Las inundaciones pluviales representan un desafío crítico para numerosas ciudades del mundo, debido a su creciente frecuencia y a los daños y pérdidas que generan a nivel intraurbano (Ke *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2023). En este contexto, el presente estudio se enfocó en analizar los patrones temporales y espaciales de las inundaciones pluviales en el barrio de Proterritorio, considerando la influencia de los fenómenos hidrometeorológicos en su origen durante el periodo 1993-2023.

La ciudad de Chetumal, debido a su cercanía con el mar Caribe, ha sido históricamente vulnerable al impacto de huracanes provenientes del Atlántico Norte (Hernández *et al.*, 2018). Estos fenómenos hidrometeorológicos, caracterizados por intensas lluvias, han provocado inundaciones severas que han afectado a los distintos barrios de la ciudad y a sus habitantes en varias ocasiones (Rodríguez, 2018). Sin embargo, los resultados de este estudio muestran que las precipitaciones que originan inundaciones pluviales a escala micro no siempre están directamente relacionadas con la incidencia de huracanes. Por el contrario, se destaca la prevalencia de las ondas tropicales, seguidas de los frentes fríos, como los principales factores desencadenantes de lluvias muy fuertes, intensas y torrenciales que provocan inundaciones en el barrio de Proterritorio.

Asimismo, se determinó que precipitaciones diarias superiores a 47.6 mm, así como aquellas con intensidades máximas mayores a 57 mm/h, representan un peligro significativo de inundación para los habitantes de Proterritorio. Aunque investigaciones previas (Camacho-Sanabria *et al.*, 2022) asociaron las inundaciones a lluvias extremas diarias superiores a 70 mm, este estudio identificó umbrales más bajos. Esta diferencia puede atribuirse a la definición operativa adoptada en este trabajo, que consideró como eventos de inundación los encharcamientos críticos en vías de comunicación con una profundidad mínima de 0.3 m, al considerar que estas condiciones interrumpen la vida cotidiana de los residentes, según lo documentado en notas periodísticas del *Diario de Quintana Roo*.

Respecto a las inundaciones severas, los eventos de 1995 y 1998, asociados a los huracanes Roxana y Mitch, respectivamente, evidencian la gravedad de las inundaciones históricas en Proterritorio. También destacan la limitada capacidad de drenaje del área y el impacto prolongado en la movilidad, acceso a servicios y funcionalidad del barrio, subrayando la necesidad de estrategias de gestión de riesgos más efectivas. Por otro lado, los eventos recientes (2012, 2015 y 2022)

muestran que las ondas tropicales, más que los huracanes, son el principal fenómeno hidrometeorológico detonante de inundaciones pluviales en Proterritorio. Aunque las precipitaciones acumuladas fueron menores, lluvias intensas en periodos cortos, como en agosto de 2022 (168 mm en un día, con una intensidad máxima de 57.4 mm/h), ocasionan impactos significativos. Esto resalta que, además del volumen acumulado, la intensidad de las lluvias es un factor crítico en la generación de inundaciones en áreas urbanas a escala micro.

Adicionalmente, las características topográficas del barrio contribuyen a intensificar las inundaciones. La presencia de áreas de menor altitud y depresiones kársticas, en combinación con la impermeabilidad de los suelos (Fragoso-Servón y Pereira-Corona, 2018), reduce significativamente la eficiencia del drenaje, intensificando tanto la magnitud como la duración de los eventos de inundación. Este patrón es evidente tanto en eventos históricos como recientes, destacando los casos de 1995 y 1998, cuando las zonas afectadas permanecieron anegadas durante semanas o incluso meses. La interacción entre lluvias intensas en periodos cortos, como las registradas en 2022, y un microrrelieve que limita el flujo natural del agua exacerba los impactos de estos fenómenos, afectando severamente la infraestructura y la calidad de vida de los residentes.

Respecto al evento de 2015, la identificación y caracterización espacial de las ZAAPU evidenció que estas áreas no sólo concentraron las mayores acumulaciones de agua, sino que también expusieron un alto número de elementos vulnerables, destacando las ZAAPU 1 y 2. En comparación con 1998, cuando la superficie inundada alcanzó 18 ha, en 2015 esta cifra se duplicó a 40 ha. El incremento se atribuye a las lluvias continuas asociadas a la onda tropical número 44, que se prolongaron durante cuatro días, generando niveles de profundidad significativos y exacerbando los impactos en la infraestructura y los habitantes del barrio.

Por otra parte, factores de origen antrópico, como la insuficiencia y deficiencia de la infraestructura pluvial, la acumulación de residuos sólidos y el rápido crecimiento urbano, agravan las inundaciones pluviales urbanas (Shadman Sakib *et al.*, 2023; Sambeto Bibi *et al.*, 2023; Zambrano *et al.*, 2018). Al respecto, los hallazgos de este estudio corroboran que, a pesar de las intervenciones realizadas, como la instalación de un colector pluvial en 1999 y medidas recientes implementadas en 2020 (mapa 2), las inundaciones persisten en Proterritorio. Un ejemplo significativo es el evento de 2022, en el que se registraron profundidades superiores a 0.7 m en la intersección de las avenidas Erick Paolo Martínez y Constituyentes del 74 (Olvera, 2022). Esto

evidencia que, además de las limitaciones de infraestructura pluvial, la acumulación de residuos sólidos desempeñó un papel crítico en la obstrucción del flujo pluvial.

Al igual que cualquier investigación científica, este estudio presenta ciertas limitaciones metodológicas que deben ser consideradas al interpretar los resultados. En primera instancia, el estudio se realizó en un contexto específico y con una muestra limitada de participantes, lo que puede restringir la aplicabilidad de los hallazgos a otros entornos o poblaciones. Además, la dependencia de datos autoinformados provenientes de entrevistas semiestructuradas representa otra limitación, ya que pueden estar sujetos a sesgos que afectan la precisión y objetividad de los resultados.

Dada la limitación del tamaño de la muestra, se recomienda que futuras investigaciones intenten replicar estos hallazgos en otros barrios de Chetumal o en otras ciudades costeras del Caribe mexicano. Esta ampliación permitiría una mayor generalización de los resultados y una evaluación más sólida de la validez externa de nuestras conclusiones. Además, conviene realizar estudios que examinen el proceso de convergencia entre los factores climáticos y antrópicos en la ocurrencia de las inundaciones pluviales urbanas, así como sus implicaciones en la gestión del riesgo a escala micro. También conviene integrar en investigaciones futuras la perspectiva hidrográfica para enriquecer el análisis y proporcionar una visión más holística del problema.

A pesar de las limitaciones de este estudio, sus resultados continúan siendo valiosos para el diseño y aplicación de estrategias efectivas de prevención, reducción y preparación ante la ocurrencia de inundaciones pluviales urbanas a escala micro. Estas medidas son cruciales para reducir significativamente el impacto de estos eventos y garantizar la seguridad de los residentes del barrio de Proterritorio ante posibles daños futuros. Asimismo, la información recopilada proporciona una base sólida para la planificación y ejecución de acciones concretas. Aunque se reconoce la necesidad de investigaciones adicionales para una comprensión más completa de estos fenómenos, los hallazgos actuales son un recurso valioso para los responsables de la toma de decisiones y los planificadores urbanos.

Conclusiones

Las inundaciones pluviales en el barrio de Proterritorio ocurren, en promedio, de tres a cuatro veces al año, alcanzando un máximo de siete eventos en 2012. Los meses con mayor frecuencia de inundaciones son junio y septiembre, con 18 y 11 inundaciones, respectivamente. Estos eventos

están estrechamente relacionados con la cantidad e intensidad de las lluvias causadas por diversos fenómenos hidrometeorológicos. Aunque históricamente los huracanes han sido los principales causantes, las ondas tropicales y los frentes fríos también representan amenazas significativas debido a su alta frecuencia y a las precipitaciones intensas que generan, superando los 47.6 mm diarios y alcanzando intensidades máximas de 57.4 mm/hora.

En los últimos 30 años, las ZAAPU de Proterritorio han experimentado un notable incremento en su frecuencia, pasando de tres zonas de anegamiento en 1998 a ocho en 2015. Dicho aumento también se refleja en el área inundada, que se duplicó de 18 a 40 ha, lo que equivale a una tercera parte del área total del barrio. Este comportamiento es resultado de la interacción de factores naturales y antrópicos que intensifican su impacto. Los eventos históricos de 1995 y 1998, asociados a huracanes, evidenciaron no sólo la ausencia de infraestructura pluvial adecuada, sino también su importancia para mitigar los efectos prolongados en la funcionalidad del barrio.

En contraste, en los eventos recientes de 2012, 2015 y 2022 destaca que las ondas tropicales y las lluvias intensas en periodos cortos son los principales detonantes de inundaciones, siendo la intensidad de las lluvias un factor crítico. La topografía del área, caracterizada por depresiones kársticas y suelos impermeables, en conjunto con factores antrópicos, como la insuficiencia de infraestructura pluvial, el crecimiento urbano desordenado y la acumulación de residuos sólidos exacerbaban la magnitud y duración de las inundaciones. Estos hallazgos subrayan la necesidad de desarrollar estrategias integrales que incluyan mejoras en infraestructura, gestión de residuos y planificación urbana para mitigar los impactos de futuras inundaciones.

La metodología implementada permitió un análisis detallado de las inundaciones pluviales microurbanas, destacando la integración de datos primarios de profundidad del agua acumulada obtenidos mediante participación ciudadana, un enfoque poco común en estudios hidrológicos tradicionales. Esta aproximación, complementada con datos secundarios acerca de elementos expuestos, facilita la identificación de áreas críticas y prioritarias para la gestión de contingencias, y proporciona insumos clave para la toma de decisiones. Aunque limitada a una escala geográfica micro, la metodología ofrece parámetros replicables en otros contextos, como la ubicación, extensión y profundidad de las inundaciones, así como los elementos vulnerables asociados. Para optimizar futuras aplicaciones, se sugiere incorporar modelos predictivos que combinen estos datos con factores climáticos y antrópicos, fortaleciendo así la capacidad de anticipación y respuesta ante eventos de inundación pluvial.

En síntesis, este estudio subraya la necesidad de adoptar un enfoque holístico que combine análisis hidrográfico, planificación urbana sostenible, gestión eficaz del agua y los residuos, y mejoras en la infraestructura de drenaje pluvial. Además, es fundamental promover la resiliencia comunitaria y fomentar la colaboración entre diferentes actores para gestionar de manera efectiva las inundaciones pluviales intraurbanas a escala micro.

Fuentes consultadas

- Agonafir, Candace; Lakhankar, Tarendra; Khanbilvardi, Reza; Krakauer, Nir; Radell, Dave y Devineni, Naresh (2023). A review of recent advances in urban flood research. *Water Security*, 19, 100141, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2023.100141>
- Barrera, Miguel Ángel (2020). Pobreza por ingreso y vulnerabilidad frente a inundaciones en Chetumal, Quintana Roo. En Sergio Gabriel Ceballos Pérez, Jorge Villanueva Solís y Jaime Andrés Quiroa Herrera (Dirs.), *Infraestructura verde y planeación urbana para el desarrollo urbano sustentable* (pp. 138-155). Universidad Autónoma de Coahuila-El Colegio del Estado de Hidalgo. <https://lc.cx/ruDdTZ>
- Camacho-Sanabria, José Manuel; Chávez-Alvarado, Rosalía; Estrada Porcayo, Aranelly Wendolyne; Robertos Pinto, Alicia Guadalupe; Sánchez Zavalegui, Romeo Alejandro y Álvarez-Trinidad, Juan Antonio (2022). Inundaciones por lluvias extremas asociadas a fenómenos meteorológicos. Caso de estudio: colonia Proterritorio, Chetumal, Quintana Roo. En José Manuel Camacho Sanabria y Rosalía Chávez Alvarado (Coords.), *Riesgos hidrometeorológicos en el sureste mexicano (Quintana Roo): inundaciones urbanas* (pp. 19-50). Clave Editorial. <https://acortar.link/M5hOHw>
- Cenapred (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2021a). *Tormentas severas*. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. <https://lc.cx/a2PiUu>
- Cenapred (Centro Nacional de Prevención de Desastres) (2021b). *Impacto socioeconómico de los desastres en México durante 2015. Resumen ejecutivo*. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. <https://lc.cx/S4GbnD>

- Casiano, Cesar; Cromptvoets, Joep; Ibarra, María Eugenia y Farrelly, Megan (2019). Evaluación de la gobernanza de la política de infraestructura de inundación en San Pedro Cholula, México: potencial para un salto a la sensibilidad al agua. *Sustainability*, 11(24), 7144. <https://doi.org/10.3390/su11247144>
- CAPA-IMTA (Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Quintana Roo-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) (2016). *Informe final: estudio geohidrológico en el Acuífero de Chetumal, Quintana Roo*. Gobierno del Estado de Quintana Roo.
- CAPA-IMTA (Comisión de Agua Potable y Alcantarillado de Quintana Roo-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) (2013). *Programa para el manejo del agua pluvial de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo*. Gobierno del Estado de Quintana Roo.
- Condeça, Joaquim; Nascimento, João y Barreiras, Nuno (2022). Monitoring the Storage Volume of Water Reservoirs Using Google Earth Engine. *Water Resources Research*, 58(3), e2021WR030026. <https://doi.org/10.1029/2021WR030026>
- CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters) (2024). *2023 Disasters in Numbers: A significant year of disaster impact*. <https://acortar.link/A5ZuZ9>
- CRED-UNDRR (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters-United Nations Office for Disaster Risk Reduction) (2021, 16 de julio). *The human cost of disasters. An overview of the last 20 years (2000-2019)*. <https://lc.cx/nNRnwr>
- Di Salvo, Cristina; Ciotoli, Giancarlo; Pennica, Francesco y Paolo Cavinato, Gian (2017). Pluvial flood hazard in the city of Rome (Italy). *Journal of Maps*, 13(2), 545-553. <https://doi.org/10.1080/17445647.2017.1333968>
- Diario de Quintana Roo (1993-2023). *Acervo hemerográfico acerca de inundaciones en Chetumal*. Hemeroteca del Archivo General de Quintana Roo.
- Díaz, Rodrigo (2013). Memoria colectiva: procesos psicosociales. *Polis*, 9(1), 171-181. <https://acortar.link/rSdBil>
- Dillenardt, Lisa; Hudson, Paul y Thieken, Annegret (2021). Urban pluvial flood adaptation: results of a household survey across four German municipalities. *Journal of Flood Risk Management*, 15(3), 1-15. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12748>
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) (2016). ArcMap (versión 10.5). <https://acortar.link/fddsPN>

- Feng, Boyu; Zhang, Ying y Bourke, Robin (2021). Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models. *Natural Hazards*, 106, 613-627. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04480-0>
- Fragoso-Servón, Patricia y Pereira-Corona, Alberto (2018). Suelos y karst, origen de inundaciones y hundimientos en Chetumal, Quintana Roo, México. *European Scientific Journal*, 14(14), 33-52. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n14p33>
- Goodrich, Kristen A.; Basolo, Victoria; Feldman, David L.; Matthew, Richard A.; Schubert, Jochen E.; Luke, Adam; Eguiarte, Ana; Boudreau, Dani; Serrano, Kimberly; Reyes, Abigail S.; Contreras, Santina; Houston, Douglas; Cheung, Wing; AghaKouchak, Amir y Sanders, Brett F. (2020). Abordaje de las inundaciones repentinas pluviales a través de la investigación colaborativa basada en la comunidad en Tijuana, México. *Water*, 12(5), 1257. <https://doi.org/10.3390/w12051257>
- Hernández, María Luisa; Carreño, Martha Liliana y Castillo, Luisa Eugenia (2018). Methodologies and tools of risk management: Hurricane risk index (HRi). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 926-937. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.08.006>
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Principales resultados por AGEB y manzana urbana. Inegi. <https://acortar.link/m8ljmT>
- Inegi (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2015). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (Denue). Inegi. <https://acortar.link/ZU12vp>
- Ke, Qian; Tian, Xin; Bricker, Jeremy; Tian, Zhan; Guan, Guanghua; Cai, Huayang; Huang, Xinxing; Yang, Honglong y Liu, Junguo (2020). Urban pluvial flooding prediction by machine learning approaches –a case study of Shenzhen city, China. *Advances in Water Resources*, 145, 103719, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103719>
- Li, Cailin; Sun, Na; Lu, Yihui; Guo, Baoyun; Wang, Yue; Sun, Xiaokai y Yao, Yukai (2023). Review on Urban Flood Risk Assessment. *Sustainability*, 15(1), 765. <https://doi.org/10.3390/su15010765>
- Martínez, Anita; Travieso, Ana Cecilia y Frausto, Oscar (2018). Resiliencia del sistema de drenaje pluvial ante inundaciones: caso de estudio Chetumal, Quintana Roo, México. *Antrópica. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(8), 273-300. <https://acortar.link/9jshK6>

- Mobini, Shifteh; Nilsson, Erik; Persson, Andreas; Becker, Per y Larsson, Rolf (2021). Analysis of pluvial flood damage costs in residential buildings –A case study in Malmö. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 62, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102407>
- Mora, Juan Carlos (2020). *Mapping the Risk of Flood, Mass Movement and Local Subsidence. A New Proposal for Major Cities*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-22472-1>
- Netzel, Leon Maximilian; Heldt, Sonja; Engler, Steven y Denecke, Martin (2021). The importance of public risk perception for the effective management of pluvial floods in urban areas: A case study from Germany. *Journal of Flood Risk Management*, 14(2), e12688. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12688>
- Olvera, Fernando (2022, 18 de agosto). Para limpieza y desazolve de pozos CAPA activó operativo de atención. *Diario de Quintana Roo*. Local. <https://acortar.link/iiEuqE>
- Padilla, Manuel y Gónima, Leonardo (2015). Desarrollo de una metodología para el estudio de las inundaciones causadas por encharcamiento de agua de lluvia en zonas urbanas relativamente planas. Área de estudio: Montería (Colombia). *Estudios Geográficos*, 76(278), 265-284. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201509>
- Pallathadka, Arun; Sauer, Jason; Chang, Heejun y Grimm, Nancy B. (2022). Urban flood risk and green infraestructura: Who is exposed to risk and who benefits from investment? A case study of three U.S. Cities. *Landscape and Urban Planning*, 223, 104417. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104417>
- Pérez, Nancy Lorena; Cisneros, Rodolfo y Durán, Héctor Martín (2023). Revisión de la ocurrencia de inundaciones en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P. en el periodo 2014-2021. *Decumanus. Revista Interdisciplinar de Estudios Urbanos*, 10(10), 1-17. <https://doi.org/10.20983/decumanus.2023.1.2>
- Reinoso, Eduardo; Pérez-Negrón, Marco A.; Jaimes, Miguel Ángel; Franco, Víctor; Domínguez-Mora, Ramón y Pozos, Óscar (2012). *Escenarios de pérdidas por inundación pluvial en la ciudad de México ante la falla de algún componente del Sistema de Drenaje Pluvial*. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://acortar.link/oA5Nzx>
- Rodríguez, María N. (2018). Entre huracanes e inundaciones: riesgo y vulnerabilidad en la ciudad de Chetumal frente a las amenazas hidrometeorológicas. En Rogelio Altez e Isabel Campos Goenaga (Eds.), *Antropología, historia y vulnerabilidad: miradas diversas desde América Latina* (pp. 21-57). El Colegio de Michoacán. <https://lc.cx/VTzDCO>

- Rosenzweig, Bernice R.; McPhillips, Lauren; Chang, Heejun; Cheng, Chingwen; Welty, Claire; Matsler, Marissa; Iwaniec, David y Davidson, Cliff I. (2018). Pluvial flood risk and opportunities for resilience. *WIREs Water*, 5(6), 1-18. <https://doi.org/10.1002/wat2.1302>
- Sambeto Bibi, Takele; Reddythta, Daniel y Sime Kebebew, Abdisa (2023). Assessment of the drainage systems performance in response to future scenarios and flood mitigation measures using stormwater management model. *City and Environment Interactions*, 19, 100111. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2023.100111>
- Sánchez-Núñez, Guadalupe Yuceli; Rentería-Guevara, Sergio Arturo; Rangel-Peraza, Jesús Gabriel; Monjardín-Armenta, Sergio Alberto; Sanhouse-García, Antonio Jesús y Mora-Félix, Zuriel Dathan (2023). Standardizing criteria for calculating urban storm drainage flow rates using basin división based on aerial photogrammetry: the case study of Culiacan, Mexico. *Applied Sciences*, 13(22), 12334. <https://n9.cl/ljef0g>
- Sánchez, Luis Alejandro y Martínez, Yoel (2012). Inundaciones pluviales en una cuenca urbana aplicando el método de ponderación mixta. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 33(2), 90-105. <https://acortar.link/xDa6kq>
- Santos, Clemencia y Rodríguez, Hugo (2020). Modelando la inundación pluvial por escurrimiento superficial urbano y de la cuenca en la Ciudad de México. *UD y Geomática*, 15, 33-39. <https://acortar.link/AP3HTQ>
- Shadman Sakib, Md; Alam, Siam; Shampa; Binte Murshed, Sonia; Kirtunia, Ripan; Shahjahan Mondal, M. y Amin Chowdhury, Ahmed Ishtiaque (2023). Impact of Urbanization on Pluvial Flooding: Insights from a Fast Growing Megacity, Dhaka. *Water*, 15(21), 3834. <https://doi.org/10.3390/w15213834>
- SMN-Conagua (Servicio Meteorológico Nacional-Comisión Nacional del Agua) (2024, 8 de marzo). *Normales climatológicas por estado*. SMN-Conagua. <https://acortar.link/38mXEJ>
- SMN-Conagua (Servicio Meteorológico Nacional-Comisión Nacional del Agua) (2022, 22 de agosto). *Sistema de Información y Visualización de Estaciones Automáticas (SIVEA)*. SMN-Conagua. <https://acortar.link/N58lCx>
- Tulving, Endel (2022). Episodic Memory: From Mind to Brain. *Annual Review of Psychology*, 53, 1-25. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.53.100901.135114>

- UAEQROO (Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo) (2024, 27 de marzo). *Datos meteorológicos*. UAEQROO.
- UAEQROO-CIG (Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo-Centro de Información Geográfica) (2011). Atlas de riesgo de la ciudad de Chetumal, municipio de Othón P. Blanco, Quintana Roo 2011. Universidad de Quintana Roo. <https://lc.cx/FIk5Wr>
- USGS (United States Geological Survey) (2023, 28 de abril). Imágenes satelitales Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM) Collection 2 Level-1. <https://n9.cl/kc0fv>
- Valle, Cristina Candelaria; Alcérreca, Juan Carlos; Rosas, Gabriela; Martínez, Anita y Sánchez, Joan Alberto (2024). Aplicación de fotogrametría con drones y modelación de inundaciones para la planificación urbana en Chetumal. *AvaCient*, 2(2), 37-48. <https://doi.org/10.69823/avacient.v4n2a5>
- Visser, Fleur (2014). Rapid mapping of urban development from historic Ordnance Survey maps: an application for pluvial flood risk in Worcester. *Journal of Maps*, 10(2), 276-288. <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.893847>
- Xu, Hanqiu (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025-3033. <https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Young, Adele; Bhattacharya, Biswa y Zevenbergen, Chris (2021). A rainfall threshold-based approach to early warnings in urban data-scarce regions: a case study of pluvial flooding in Alexandria, Egypt. *Journal of Flood Risk Management*, 14(2), 1-16. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12702>
- Zambrano, Luis; Pacheco-Muñoz, Rodrigo y Fernández, Tania (2018). Influence of solid waste and topography on urban floods: the case of Mexico City. *Ambio*, 47, 771-780. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1023-1>
- Zhu, Zhongfan; Gou, Lufeng; Liu, Shuyou y Peng, Dingzhi (2023). Effect of urban neighbourhood layout on the flood intrusion rate of residential buildings and associated risk for pedestrians. *Sustainable Cities and Society*, 92, 104485. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104485>
- Zimmermann, Erik y Bracalenti, Laura (2017). Validación de una metodología empírica para evaluar modificaciones del riesgo de inundación urbana ante escenarios hipotéticos de uso del suelo. *Cuadernos del CURIHAM*, 23, 63-75. <https://doi.org/10.35305/curiham.v23i0.31>

Reseñas curriculares

José Manuel Camacho Sanabria. Doctor en Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma del Estado de México. Actualmente es investigador de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por México, comisionado en la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, nivel I. Su línea de investigación actual es resiliencia comunitaria y gestión del riesgo de desastres. Entre sus últimas publicaciones destacan, en coautoría: Inundaciones pluviales intraurbanas en Chetumal, México: un contexto para evaluar la resiliencia comunitaria a escala micro. En Dámaso Ramón Ponvert Delisles Batista y José Manuel Camacho Sanabria (Coords.), *Enfoques, experiencias y formas de construir resiliencia en comunidades de Iberoamérica* (pp. 153-176), Colex (2025); Resiliencia comunitaria ante riesgo por inundaciones pluviales en la colonia Proterritorio, Chetumal, Quintana Roo. En Oscar Frausto Martínez y Manuel E. Mendoza (Coords.), *Objetivos de Desarrollo Sostenible: acciones por el clima y la resiliencia* (pp. 277-291), Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica (2025); y Patrones espaciotemporales y fuerzas impulsoras de la urbanización en Playa del Carmen, Quintana Roo, México (2004-2015). *Revista de Geografía Norte Grande*, 85, 1-24 (2023). Correo-e: jmanuelcs@live.com.mx

Rosalía Chávez Alvarado. Doctora en Filosofía con Orientación en Asuntos Urbanos por la Universidad Autónoma del Estado de Nuevo León, México. Actualmente es investigadora de la SECIHTI por México, y profesora-investigadora de la División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Es parte del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, nivel I. Sus líneas de investigación son: planificación territorial, gerontología ambiental ante el cambio climático y vulnerabilidad social ante la gestión del riesgo de desastres por inundaciones. Entre sus últimas publicaciones destacan: El turismo, la planificación urbana y la gestión de riesgo de desastre en el estado de Quintana Roo. *Quivera. Revista de Estudios Territoriales*, 27(1), 233-258 (2025); la coordinación del libro *Gestión del riesgo de desastres en América Latina y el Caribe. Experiencias, aprendizajes y desafíos*. Comunicación Científica (2025); y Análisis espaciotemporal de incendios forestales en ejidos del sur de la Península de Yucatán (2012-2021). En Luis Giovanni Ramírez Sánchez, Iván Vilchis Mata y Danays del Carmen Castelo Agüero, *Análisis espacial: aplicaciones y retos para el futuro* (pp. 219-238), Editorial Comunicación Científica (2025). Correo-e: rosaliadf@gmail.com

Luis Giovanni Ramírez Sánchez. Doctor en Geografía por el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental UNAM-Campus Morelia. Actualmente es investigador de la SECIHTI por México, comisionado a El Colegio Mexiquense, y profesor en el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA) de la UNAM-Morelia, Universidad de Guadalajara y Universidad de Guanajuato. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores, nivel I. Sus líneas de investigación son: análisis espaciotemporal de ambientes urbanos y paisajes físico-geográficos, gentrificación, justicia espacial y ordenamiento ecológico territorial. Entre sus publicaciones más recientes se encuentran: como coautor, Futuro urbano del Estado de México: retos y oportunidades en el siglo XXI. *Geografía Aplicada*, 1(2), 38-60 (2025); Biophysical landscapes of the Río La Virgen watershed in the Ocosingo municipality, Chiapas, Mexico. *Journal of Maps*, 20(1) (2024); Clasificación de los paisajes físico-geográficos de la Unidad de Gestión Ambiental 33, Quintana Roo, México a escala 1:50000. *Estudios Geográficos*, 84(294), e130 (2023). Correo-e: lramirez@cmq.edu.mx