

APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON DRONES Y MODELACIÓN DE INUNDACIONES PARA LA PLANIFICACIÓN URBANA EN CHETUMAL

Cristina Candelaria Valle Queb¹, Juan Carlos Alcérreca Huerta², Gabriela Rosas Correa³,
Anita Martínez Méndez⁴, Joan Alberto Sánchez Sánchez⁵

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Recibido: 30/06/2024 Aceptado: 07/07/2024

<https://doi.org/10.69823/avacient.v4n2a5>

Resumen.- El rápido crecimiento urbano en el Sureste de México en las últimas décadas ha generado la necesidad de comprender el funcionamiento hidrológico de las zonas urbanas para mitigar inundaciones. Chetumal ha experimentado daños significativos por fenómenos meteorológicos e intensas lluvias en áreas antes ocupadas por selvas o humedales. Así, el objetivo del trabajo busca analizar los efectos ocasionados por las inundaciones pluviales en la porción norte de la microcuenca Proterritorio, en Chetumal, considerando la aplicación de metodologías avanzadas de análisis espacial y modelación numérica. Para lograr esto, se emplearon Sistemas de Información Geográfica (SIG) para analizar Modelos Digitales de Elevación (MDE). Estos modelos permitieron delimitar y representar las cuencas del área urbana de Chetumal en 2020. Además, se aplicó la fotogrametría con drones y modelación numérica en espacios públicos y viales propensos a inundaciones de la porción norte de la subcuenca Proterritorio. Se generó la red de flujo en la cual se identificaron velocidades máximas de 0.94 m/s, alturas de inundación de hasta 1 m y un área ocupada por el flujo superficial de 110 ha, donde normalmente se presentan afectaciones severas. También se describió el Coeficiente de Ocupación del Suelo (COS) y el Coeficiente de Uso del Suelo (CUS).

Palabras clave: urbanización, hidrología, SIG, fotogrametría, inundaciones

APPLICATION OF DRONE PHOTOGRAMMETRY AND FLOOD MODELING FOR URBAN PLANNING IN CHETUMAL

Abstract.- In response to Southeast Mexico's rapid urbanization in the last decades, understanding urban hydrology is crucial for flood mitigation. Chetumal has experienced significant damage due to weather events and heavy rains in areas previously occupied by jungles or wetlands. Thus, this study aims to analyze urban flooding and surface run-off in the northern portion of the Proterritorio subbasin, Chetumal, through the use of Geographic Information Systems (GIS), drone photogrammetry, and numerical modeling. To delimit and represent the basins developed within the urban area of Chetumal in 2020, the analysis of Digital Elevation Models (DEMs) was used. Drone photogrammetry was applied for mapping and further modelling of public spaces and roads prone to flooding, accounting for road infrastructure changes developed in the area. The flow network was obtained in which maximum velocities of 0.94 m/s, flooding heights of up to 1.0 m, and a flooded area of 110 ha were identified, being indicative of severe impacted zones. Urban descriptors such as the Land Occupation Coefficient (COS) and the Land Use Coefficient (CUS) enrich the analysis.

Keywords: urbanization, hydrology, GIS, photogrammetry, floods

Introducción

Durante las últimas décadas el crecimiento urbano acelerado en el Sureste de México ha planteado desafíos significativos en la gestión del agua y la mitigación de inundaciones (Monroy-Ortiz, 2013). Eventos

¹ Estudiante del Tecnológico Nacional de México/I. T. de Chetumal, Avenida Insurgentes 330, Chetumal, Quintana Roo, México, 77013. ORCID 0009-0004-3866-212X. (**Autor correspondal**)

² Adscrito al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías-El Colegio de la Frontera Sur Unidad Chetumal, Av. Centenario km 5.5, Chetumal, Quintana Roo, México, 77014. ORCID 0000-0001-6325-3118

³ Docente del Tecnológico Nacional de México/I. T. de Chetumal, Avenida Insurgentes 330, Chetumal, Quintana Roo, México, 77013 ORCID 0009-0007-7010-9377

⁴ Docente del Tecnológico Nacional de México/I. T. de Chetumal, Avenida Insurgentes 330, Chetumal, Quintana Roo, México, 77013 ORCID 0009-0009-1146-2124

⁵ Docente del Colegio de la Frontera Sur Unidad Chetumal, Av. Centenario km 5.5, Chetumal, Quintana Roo, México, 77014. ORCID 0000-0002-0538-7668

hidrometeorológicos extremos producen flujos y acumulaciones de agua en exceso, lo que provoca daños significativos en la infraestructura y la población (Dai et al., 2020). El incremento de los espacios urbanizados, impulsado por diversos factores como el desarrollo económico, transforman la permeabilidad y el paisaje en áreas anteriormente dominadas por selvas y humedales (Caruso, 2021; Ibarra-Marigal et al., 2022; Upegui & Tatiana, 2020), aumentando su vulnerabilidad ante inundaciones (Palom, 2020). En múltiples casos, los espacios urbanos son susceptibles a inundaciones como consecuencia de una insuficiente planeación del desarrollo urbano, ya que incluso suelen desarrollarse actividades contrarias a mejorar el funcionamiento de las cuencas urbanas (Palom, 2020; Porcel & Díaz, 2014; Sánchez, 2018).

Las inundaciones pluviales representan uno de los principales riesgos asociados con el desarrollo urbano acelerado (Isabeles Deniz et al., 2019; Lopardo et al., 2024) en Chetumal y otras ciudades de la región. Eventos meteorológicos extremos, exacerbados por la deforestación y la impermeabilización del suelo han provocado daños significativos en infraestructuras, viviendas y ecosistemas naturales. Además, la falta de diligencia en el mantenimiento de las infraestructuras de saneamiento y alcantarillado por parte de las autoridades encargadas puede contribuir a la gravedad de las inundaciones, lo que resalta la importancia de la responsabilidad administrativa en la gestión de estos riesgos (Garrido, 2020; Porcel & Díaz, 2014). La vulnerabilidad de Chetumal en cuanto a las inundaciones pluviales se ve agravada por su ubicación geográfica, su topografía plana y la presencia de corrientes de agua como el río Hondo, frontera natural México-Belice, o la de cuerpos de agua cercanos, como la bahía de Chetumal y las lagunas de Bacalar, Guerrero, Agua Salada, Chile Verde, Milagros, Mariscal, San Felipe y Noh Bec. Para mitigar los impactos de las inundaciones pluviales, es crucial comprender en profundidad el funcionamiento hidrológico de las zonas urbanas y desarrollar estrategias efectivas de mitigación y adaptación. Para ello, la fotogrametría aplicada a estudios de inundación es una técnica que utiliza fotografías aéreas para obtener información detallada del terreno como una base de gran importancia para la modelación numérica de las inundaciones y la proyección de escenarios de riesgo. La fotogrametría aérea realizada con drones equipados con cámaras de alta resolución, ha revolucionado esta técnica al ofrecer mayor versatilidad y precisión (Lalvay & Mercedes, 2022; Mesén et al., 2006). Más aún, los modelos numéricos hidrológicos resaltan como herramientas fundamentales para la gestión y planeación urbana al ofrecer una alternativa de proyección de escenarios, incluso como base para otros tipos de modelaciones como pueden ser la calidad de agua y daños por erosión (Cabrera, 2012; Jorquera et al., 2014).

En este contexto, el presente estudio se centra en la aplicación de metodologías avanzadas de análisis espacial y modelación numérica para investigar las inundaciones pluviales en el área urbana de Chetumal. Utilizando una combinación de Sistemas de Información Geográfica (SIG), fotogrametría con drones y modelación hidráulica computacional, se busca obtener un conocimiento detallado de la dinámica de inundaciones en la ciudad. El análisis se enfoca especialmente en la microcuenca Proterritorio, ubicada en la porción norte del área urbana de Chetumal, donde se han presentado cambios significativos en la infraestructura vial y el uso del suelo en las últimas dos décadas (Alonzo & Vera, 2010; Barrera Rojas, 2020; Jimenez Sanchez et al., 2021). La modelación numérica a partir de modelos lluvia-escurrimiento es considerada para representar las consecuencias de eventos críticos de precipitación, la dinámica de la escorrentía, los caudales críticos y las áreas afectadas. Además de analizar a detalle las características hidrográficas en el área de estudio, se presta especial atención a los aspectos urbanísticos que influyen en la vulnerabilidad de Chetumal a las inundaciones pluviales. Se examinan indicadores como el Coeficiente de Ocupación del Suelo (COS) y el Coeficiente de Uso del Suelo (CUS), así como las tendencias de desarrollo urbano y la planificación territorial.

Métodos

Zona de estudio

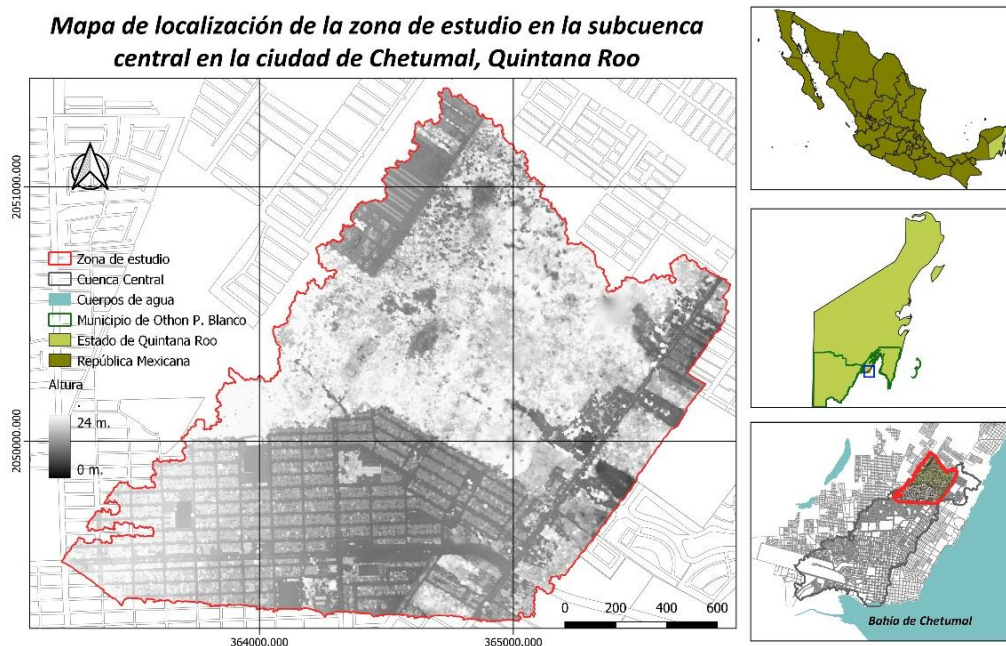
La zona de estudio se localiza en la porción norte de la subcuenca central de Chetumal, la capital de Quintana Roo y cabecera del municipio de Othón P. Blanco (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La ciudad es la sede de los poderes ejecutivo, legislativo y judicial del estado de Quintana Roo, albergando infraestructura de los diferentes órdenes de gobierno. En ella se encuentran una diversidad de oficinas gubernamentales, agencias estatales y federales, así como sedes de empresas privadas que ofrecen servicios administrativos y financieros, generando una actividad económica destacada en el sector de servicios. Concentra también instituciones educativas de nivel básico, media superior y superior, centros de investigación y servicios de salud para atención de la población local y de la región circundante. De forma particular, dentro del área de estudio destacan recintos importantes como el Juzgado familiar y civil oral y el Juzgado Penal Oral, además de corredores comerciales de gran importancia para la zona norte de la ciudad, instituciones educativas zonificadas como equipamiento regional urbano, como la Escuela Preparatoria Eva Sámano, la escuela Primaria Octavio Paz, y el Jardín de Niños María Maldonado de Lugo (Figura 1). Uno de los

equipamientos urbanos más recientes realizado por la Secretaría de Desarrollo Territorial y Urbano es el Centro de Desarrollo Comunitario y polideportivo en Proterritorio (Figura 1).

El crecimiento urbano de Chetumal (antes Payo Obispo), fue lento desde su origen y hasta la mitad del siglo XX, pasando de 2,112 habitantes en 1910 a 4,672 en 1940 (Romero Mayo & López, 2014). Tras la destrucción ocasionada por el huracán Janet en 1955 (Frausto Martínez, 2018), la ciudad inició un nuevo desarrollo y crecimiento urbano que para 1980 alcanzó los 56,709 habitantes, incrementándose exponencialmente para pasar en el año 2000 a más de 100 mil habitantes y hasta 169 mil para 2020 (INEGI, 2021a, 2016). Desde 1980 existe el registro de diferentes fenómenos hidrometeorológicos como la tormenta tropical “Gert” (1993), que mostró la necesidad de desalojar a los habitantes de las partes bajas de la ciudad. Los huracanes “Opal” y “Roxanne” (1995) con categorías 4 y 5 respectivamente, provocaron la inundación de diversas colonias de la ciudad y se suspendió el suministro de agua en un 60% de esta, inundándose también tres tramos la carretera federal Chetumal-Mérida. Las bandas nubosas del huracán “Mitch” (1998) categoría 5, provocaron fuertes inundaciones y encharcamientos en gran parte de la ciudad, además de afectaciones menores en postes de alumbrado público. A estos grandes eventos hidrometeorológicos se suman la tormenta tropical “Chantal” (2001), el huracán “Dean” (2007), huracán “Karl” (2010) y el huracán “Ernesto” (2012), y uno de los eventos meteorológicos más recientes es la onda tropical núm. 44 (octubre 2015) que causó inundaciones severas que incluyó el cierre de 14 puntos de diversas vialidades donde el nivel del agua superó los 0.80 m (SEDETUS, 2018).

En los años noventa del siglo XX, la expansión de Chetumal se orientó principalmente hacia el norte. Durante este período, se llevaron a cabo expropiaciones de tierras ejidales, agregando un área de 858.83 hectáreas. Se establecieron colonias en el sector norte de la ciudad, consolidando así la dirección predominante del crecimiento urbano de Chetumal. Durante los primeros diez años del siglo XXI, la ciudad continuó expandiéndose en la misma dirección. Esto dio lugar a nuevos desarrollos urbanos como Arboledas (entre 2001 y 2004), La Esperanza (en 2002), Caribe (en diferentes fases entre 2004 y 2006), Maya Real (en 2004), Villas Kinichná (en 2005), Félix González, Villas Oxtankah (en 2006), Las Américas I y la expansión de Villas Oxtankah (en 2007), Las Américas II, Andara (en 2008), Sian Ka'an I (en 2009), Sian Ka'an II y Las Américas III (en 2010), entre otros. (SEDETUS, 2018).

Figura 1. Mapa de localización



Nota. División política de México y Quintana Roo obtenido a partir de datos del INEGI. Se muestra la delimitación de la cuenca urbana de Chetumal (línea negra) y de la microcuenca Proterritorio (línea roja) a partir del MDE del INEGI (resolución 5 m). El MDE y elevaciones dentro de la microcuenca Proterritorio (resolución 1 m) obtenido a partir de fotogrametría con dron se muestra en la Figura.

Modelación, adquisición de datos y análisis

Para el desarrollo de la metodología se consideró la aplicación de diferentes herramientas que permitieran optimizar el análisis de inundaciones pluviales en la zona de estudio. De forma general, como primer paso se consideró la delimitación de la cuenca urbana de Chetumal y de la microcuenca Proterritorio considerando productos existentes dados por los Modelo Digital de Elevación (MDE) de INEGI de resolución de 5 m. Con el área de estudio delimitada, se empleó la fotogrametría para la obtención de un MDE de alta resolución mediante un vuelo de dron en la microcuenca Proterritorio previamente delimitada y que se consideró como insumo principal para la modelación numérica de las inundaciones. Para la selección del caso crítico de inundación, se utilizaron datos meteorológicos de CONAGUA y documentación histórica de eventos pasados. Se eligió un método de lluvia-escurrentía (SCS-CN) basado en la cobertura y rugosidad del suelo. El MDE de alta resolución y los datos se integraron como insumos para la modelación hidrográfica con IBER, el cual arrojó resultados en los que se observaron los niveles, áreas y velocidades de inundación. Asimismo, considerando dichos resultados y la revisión del Plan de Desarrollo Urbano y de los parámetros urbanos a fin de identificar las zonas más propensas a la inundación pluvial y críticas para un desarrollo urbano en la zona. En la Figura 2, se muestra el diagrama de flujo general de la metodología empleada.

Figura 2. Diagrama de flujo de la metodología



La delimitación de las cuencas hidrográficas sobre el área urbana de Chetumal se realizó utilizando los Modelos Digitales de Elevación (MDE) disponibles del INEGI, los cuales se derivan de datos de sensores remotos satelitales y aéreos de los accidentes geográficos georreferenciados sobre el nivel medio del mar, calculados con una resolución de 5 metros de tamaño de pixel. La delimitación de las cuencas urbanas se desarrolló con el software QGIS utilizando el algoritmo *r.watershed* y *r.water.outlet* (Ehlschlaeger et al, 2021) a partir de los MDE obtenidos, para la delimitación de la microcuenca Proterritorio. Además, se aplicó el método de Strahler (Strahler, 1957) para medir el tamaño del drenaje natural urbano y la complejidad de ramificación (S) de la red de drenaje.

La fotogrametría del dron permite extraer información geométrica diversa a partir de la adquisición de dos o más imágenes desde diferentes puntos de vista y con una adecuada superposición entre imágenes. Para obtener datos más detallados se realizó un vuelo autónomo con drones, capturando imágenes de alta resolución de la porción norte de la cuenca, específicamente en la colonia Proterritorio Ampliación I. El proceso de vuelo incluyó: i) plan de vuelo realizado en *droneDeploy.com*; ii) calibración del dron; iii) captura de fotos aéreas con dron en áreas seleccionadas; iv) postprocesamiento de las imágenes considerando procesos de alineación, georreferenciación y generación de una nube de puntos densa; v) conversión de coordenadas geográficas a coordenadas UTM y la adición de puntos de control (pats) para asegurar la precisión de los datos, mismos que fueron tomados por la aplicación *Mobile Topographer* con una precisión de 0.45 m; vi) análisis de la calidad de los datos capturados, ajustando parámetros para mejorar la resolución del Modelo Digital de Elevación (MDE) (Barreiro et al., 2014; Yeh et al., 2016). La altura a la que fue realizada el vuelo sobre el área de análisis fue de 200 metros, la distancia del muestreo del suelo fue de 7.04 cm/ pixel, el ángulo de la cámara de 90°, la velocidad a la cual se realizó el vuelo fue de 13 m/s, capturando 808 fotos y cubriendo un área de 2.57 km², la superposición frontal y lateral fueron de 70% y 80% respectivamente. El vuelo autónomo fue desarrollado el 20.03.2024 entre las 10 y 11 hrs (GMT-5).

El modelado del escenario de inundación pluvial se llevó a cabo utilizando el modelo IBER y como insumo el MDE obtenido con el vuelo de dron, considerando el método de lluvia-escurrentía del Número de Curva del Servicio de Conservación del Suelo (SCS-CN). El escenario es comparado con la modelación considerando el MDE proporcionado por INEGI a fin de mostrar las similitudes y diferencias por la resolución del MDE. En ambos casos se consideró factores como el tipo de suelo, las coberturas terrestres, las condiciones de la superficie y la condición de humedad

antecedente del suelo (Mishra & Singh, 2003). Asimismo, se determinó un número de curva compuesta (CN) específico para la subcuenca Proterritorio, considerando las características de las subáreas descritas en NRCS (2007) para la selección del grupo hidrológico de suelo A (HSG Grupo A). Esto se justifica por las propiedades de permeabilidad e infiltración de las calizas y margas arenosas presentes en la zona.

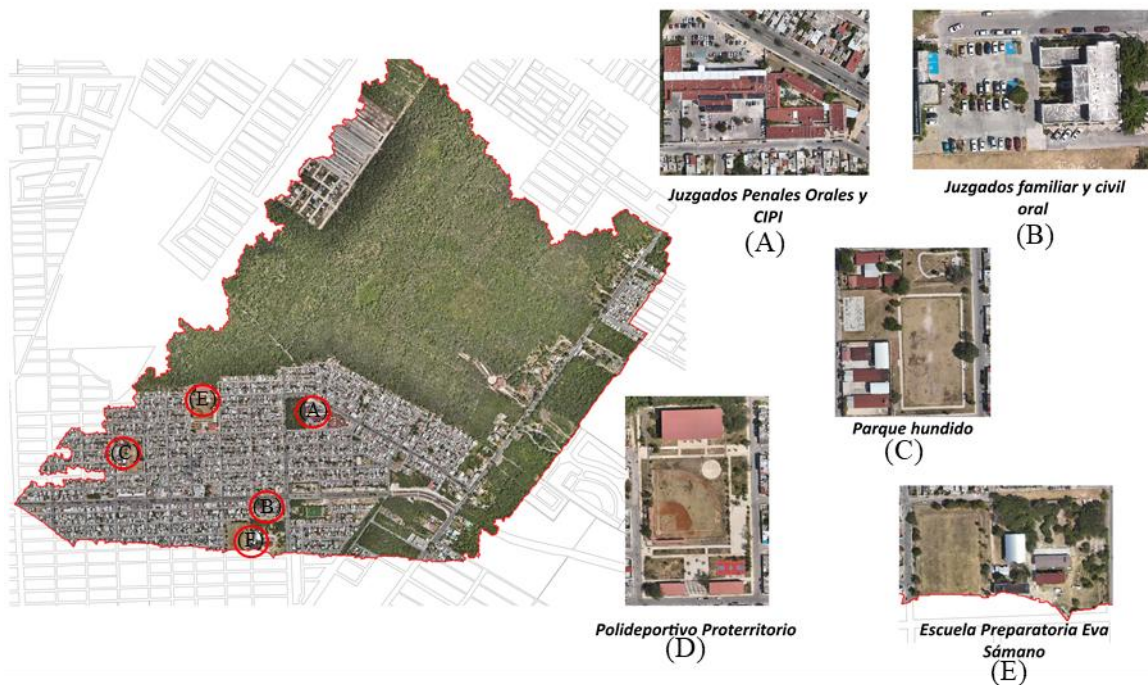
Se seleccionó la precipitación crítica de 2015 asociada con la onda tropical 44, la cual presentó 570.8 mm de lluvia en 4 días, siendo uno de los eventos hidrometeorológicos recientes más severos registrados que causó inundaciones críticas en la zona (Camacho-Sanabria et al., 2020). Se utilizaron registros meteorológicos de la estación SMN-ESMA-Chetumal (18.5006°N, 88.3275°W) pertenecientes a la red de Estaciones Meteorológicas Automáticas del Consejo Nacional del Agua (CONAGUA) para describir el hietograma con resolución de 10 minutos como insumo para la modelación numérica. Se definieron los coeficientes de rugosidad de Manning para las subáreas según lo descrito por Chow (1994), considerando la textura y características del terreno.

La caracterización de la zonificación urbana se obtuvo de la Bitácora Territorial de la SEDETUS y el Programa de Desarrollo Urbano del Centro de Población Chetumal, Huay-Pix y Calderitas 2021. Estos datos se procesaron en QGIS para extraer información detallada sobre el uso del suelo y las características urbanas relevantes para el modelado. Por último, para validar los resultados del modelado, se compararon con las intersecciones bloqueadas por encharcamientos según el informe de la Secretaría de Seguridad Pública, ocasionadas por las lluvias de la onda tropical núm. 44 (SEDETUS, 2018).

Resultados

La fotogrametría proporcionó la capacidad de generación de una ortofoto de alta calidad, con resolución de 0.07 m por píxel. La ortofoto supera la resolución de imágenes satelitales Landsat (~30.0 m) y Sentinel (~10.0 m), así como de los productos procesados por INEGI para el área, con resoluciones de 5.0 y hasta 1.5 m. Su alta resolución espacial permite la identificación detallada de características del terreno relevantes para la modelación de inundaciones como camellones, patios internos de casas, diferencia de elevación entre calles, topes y banquetas. Dentro de las calles, se pueden observar manchas oscuras que dan lugar a baches que han sido reparados, incluso, con esta resolución, se puede verificar el cumplimiento del COS en cada vivienda y podría servir para regular los parámetros establecidos (Figura 3).

Figura 3. Ortofoto obtenida a partir del vuelo de DJI Mavic 3T



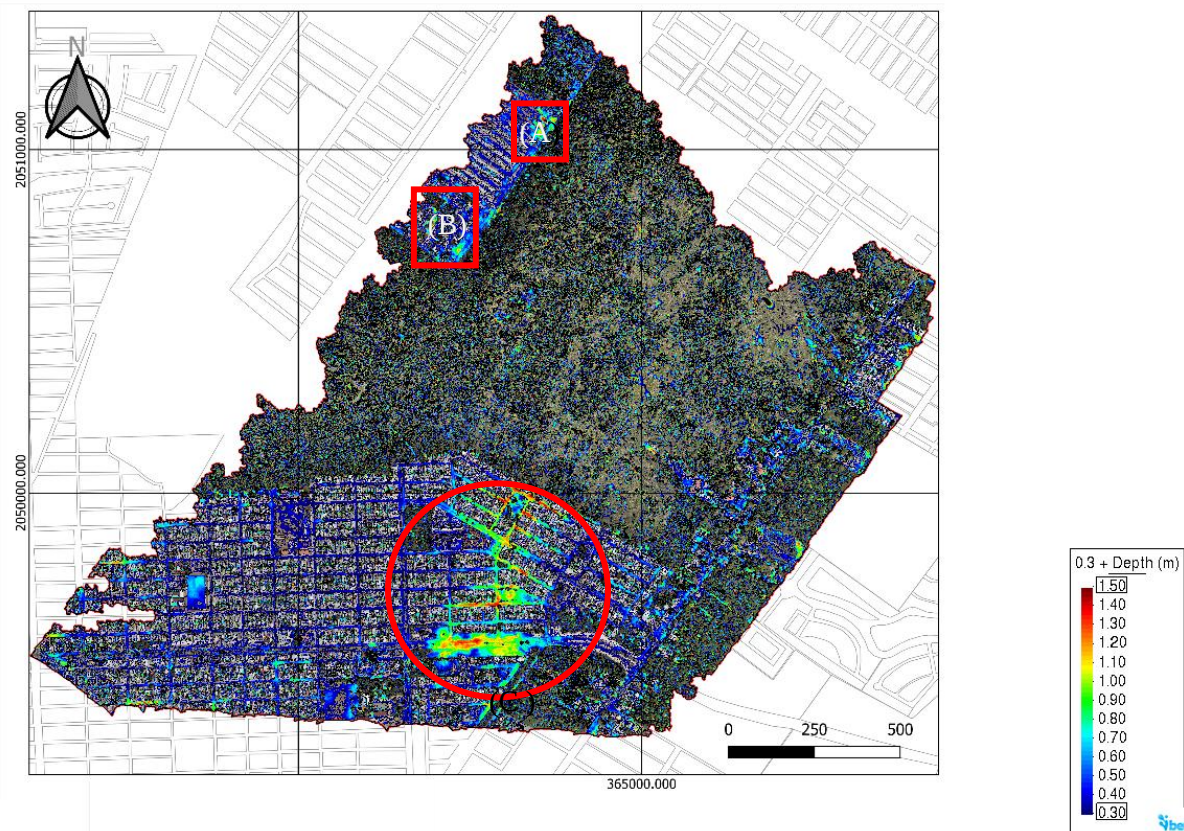
Nota. Elaboración propia obtenida a partir de la fotogrametría realizada

La ortofoto refleja con precisión las condiciones actuales del terreno, lo que es crucial para una modelación precisa de las inundaciones en el área de estudio. Además, proporciona un contexto visual claro que facilita la interpretación de los resultados del modelo. La precisión geoespacial de la ortofoto es fundamental para la validación y verificación de los resultados de la simulación de inundaciones, asegurando que se ajusten a las condiciones reales del terreno.

La modelación hidrológica de la precipitación de 2015 mostró patrones de inundación en la zona de estudio particularmente durante el día 3 del escenario de precipitación con 421 mm. Las áreas problemáticas donde se observaron encharcamientos visibles se distribuyeron particularmente en la porción este de la principal vía de comunicación en la zona de estudio, i.e. Av. Maxuxac (Figura 4). Los niveles de encharcamiento de entre 0 a 0.3 m, ocuparon una superficie de 740,000 m² (74 ha). A pesar de lo anterior, la mayoría de las zonas parecen permitir el tránsito con precaución tanto para peatones como para vehículos. De acuerdo con Bignami (2019) los pasajeros de vehículos con un nivel de inundación de 0 a 0.60 m tiene un bajo impacto de peligro, de 0.60 a 0.90 m comienza a estar bajo el juicio del conductor con potenciales riesgos según el tipo de vehículo. Si el nivel del agua supera ese límite, el vehículo corre el riesgo de dañarse rápidamente al igual que las personas se encuentran en peligro alto (i.e., alturas de inundación >0.9 m). Por lo anterior, es crucial considerar que los vehículos están preparados para resistir una profundidad máxima de agua de 0.20 a 0.25 m a velocidad reducida, aunque existen áreas críticas de mayor altura de inundación (EL UNIVERSAL, 2023) (Figura 4).

Los niveles de inundación superiores a los 0.30 m se localizaron en la sección noroeste de la zona de estudio. Se encontraron áreas dispersas pero notables con elevación del nivel del agua por encima de los 0.30 m, correspondientes a espacios baldíos, probablemente lotificados, y distinguibles con el resultado de la ortofoto con vuelo de dron (Figura 4, (A)). Aproximadamente a 400 m en dirección sur aparecen alturas de entre 0.30 a 1.00 m, donde se ubican viviendas, pero normalmente vinculadas con áreas verdes o espacios vacíos sin viviendas (Figura 4, (B)). En el centro de la zona de estudio, específicamente en la intersección de las calles Flamboyanes, C. Machiché, y C. Lluvia de Oro, que limitan con el Centro Integral de Primera Infancia y una iglesia, se obtuvieron niveles de inundación de 0.10 m hasta 0.70 m, siendo esta última el nivel promedio de inundación estimado.

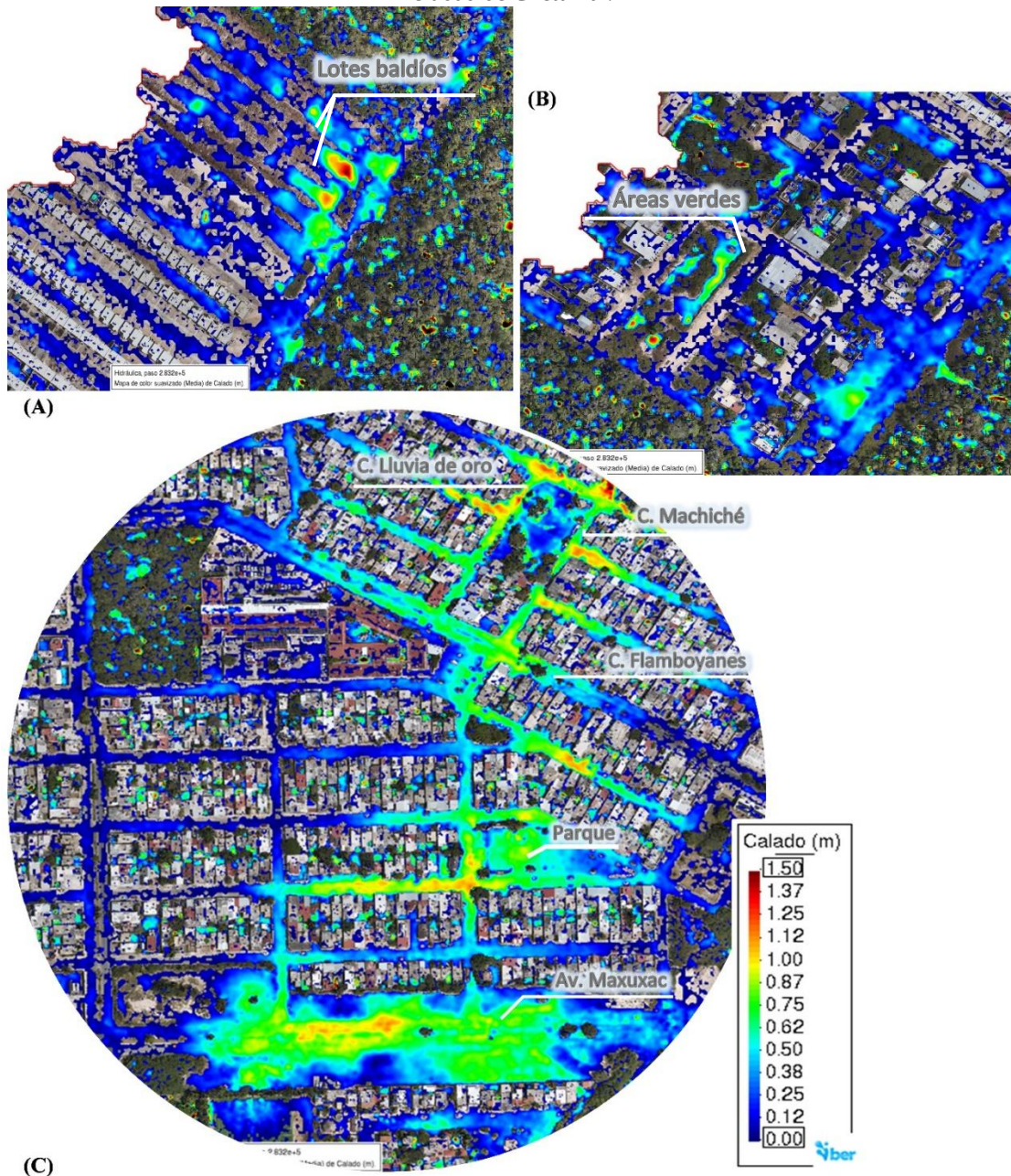
Figura 4. Modelación hidrológica



Nota. Modelación realizada en el software Iber

Se registraron puntos excepcionales de inundación que alcanzaron 1.00 m e incluso, en puntos aislados, niveles de hasta 1.5 m (Figura 4, (C)). Continuando hacia el sur, sobre las calles Guanábana y Machiché, se encontró otro punto crítico en la Av. Maxuxac, especialmente en su ampliación y prolongación hacia la Av. Centenario (Figura 4, (C)). Esta área presentó los niveles más altos de inundación, alcanzando hasta 1.00 m. La Figura 4 (C) muestra claramente cómo la inundación cubre toda la superficie pavimentada y parte de los terrenos baldíos adyacentes, ocupando aproximadamente 2.5 ha. Los datos obtenidos destacan áreas críticas particularmente en la sección noroeste y el centro de la zona de estudio. evidenciando la necesidad de atención prioritaria en estas áreas. A continuación, muestra claramente las zonas críticas de inundación, facilitando una mejor comprensión visual de los puntos más afectados.

Figura 5. Áreas críticas de inundación distribuidas en la porción norte de la subcuenca urbana Proterritorio de la ciudad de Chetumal.



Nota. Elaboración a partir de la modelación realizada en el software Iber

Por otra parte, de acuerdo con la zonificación secundaria que establece el Programa de Desarrollo Urbano Chetumal, Calderitas, Subteniente López, Huay-Pix, Xul-Há, actualización 2021, en la zona de estudio existen los usos de suelos con sus diferentes normatividades (Tabla 1).

Tabla 1. Zonificación, usos y destinos de suelo del área de estudio

Normas			Zonificación secundaria							
			Habitacional		Comercial y de servicios				Destinos	
			Habitacional Mixta	Habitacional mixta vertical	Corredor comercial urbano	Subcentro urbano	Comercio Distrital	Calle comercial	Equipamiento urbano y regional	Área Verde
No.	Descripción	Unidad	HM	HVM	COU	SCU	COD	CC	EU	AV
1.	DENSIDAD									
1.1.	Densidad habitacional máxima permitida	viviendas /ha	170	170	200	200	80	170	NA	NA
1.2.	Área de terreno mínimo/vivienda	m ²	59	59	50	50	125	59	NA	NA
2.	INTENSIDAD EN EL USO DEL SUELO									
2.1.	COS	%	50%	30%	30%	30%	30%	30%	NA	NA
2.2.	% mínimo de la superficie del lote con vegetación	%	40%	56%	56%	56%	56%	56%	25%	80%
2.3.	CUS	Veces la superficie del predio	1.50	1.80	3.6	3.6	1.8	1.80	1.5	0.2
3.	RESTRICCIONES DE CONSTRUCCIÓN									
3.1.	Altura máxima permitida	nivel	3	6	12	12	12	6	NA	NA
3.2.	Niveles permitidos con uso mixto	nivel	1	1	4	4	40	2	NA	NA

Nota. Elaborada a partir de la Actualización 2021 del Programa de Desarrollo Urbano Chetumal Calderitas Subteniente López Huay-Pix Xul-Há

Relacionando la tabla 1 y la figura 5, se muestra que en la zona de estudio predomina corredores comerciales urbanos, sin embargo, en los mismos se encuentran áreas verdes, equipamiento urbano y regional, zona habitacional mixta y mixta vertical. En tal sentido, se detectó que la zona crítica de inundación del área de estudio corresponde a la zonificación de calle comercial, situación que se considera relevante dado que evidencia la importancia de tomar en cuenta en la planificación urbana la relación entre la zonificación del uso del suelo y la susceptibilidad a inundaciones.

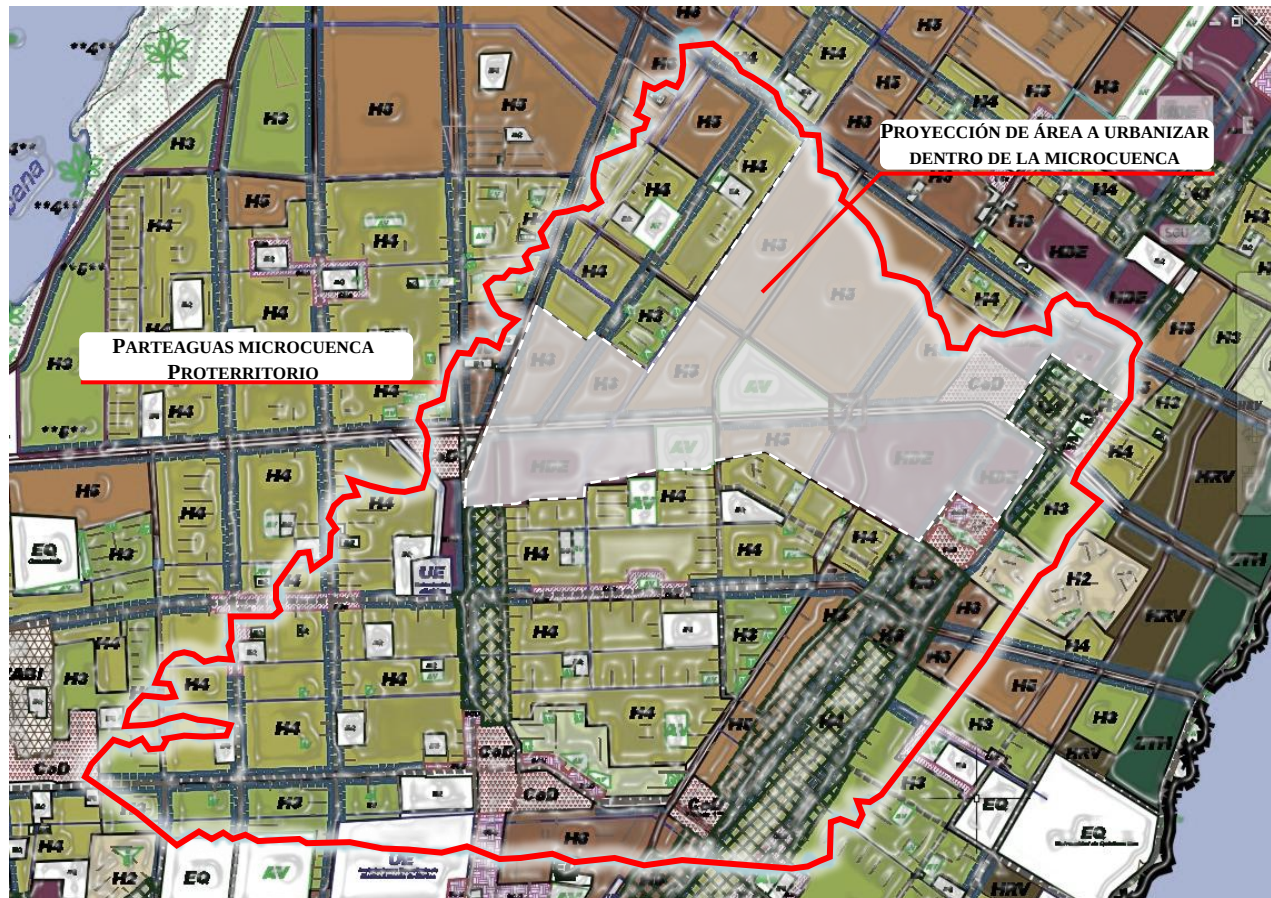
Asimismo, en la sección norte del área de estudio se detectó un área verde no urbanizada, misma que de acuerdo con el PDU ya cuenta con zonificación, en la cual predomina el uso para subcentros urbanos, situación que permite el uso habitacional con usos mixtos en los niveles inferiores, como son el comercial, de servicios y oficinas, alojamiento temporal y del equipamiento de los centros vecinales, de barrio y de subcentro urbano. Este escenario podría resultar en una urbanización a corto plazo que, de continuar con la misma tendencia de ocupación de suelo, generaría problemáticas similares a las actuales en un futuro, de continuar sin tomar en cuenta los problemas presentes de inundaciones.

En zonas críticas de inundación, actualmente, la mayoría de las viviendas son de un solo nivel, prácticamente sin encontrarse viviendas o edificaciones con tres o más niveles. Sin embargo, de acuerdo con las normas urbanísticas como se señala en la Figura 6, existen diversos espacios (aun no urbanizados) que tienen permitida la construcción de entre 3 y 6 niveles. El potencial desarrollado observado en el PDU implicaría un incremento de la vulnerabilidad de la zona de estudio dados la presencia de puntos críticos de inundación y la reducción de espacios permeables. En las zonas críticas de inundación, se puede observar la presencia y consideración de áreas verdes que también se identifican en la zonificación del programa de desarrollo urbano (Figura 6). Dichas áreas son esenciales para la gestión del agua y la reducción del impacto de las inundaciones, sin embargo, las zonas aledañas, como las vialidades y las viviendas, se ven afectadas, lo que resalta la necesidad de considerar soluciones integrales que aborden tanto la zonificación como

la gestión del riesgo de inundaciones, y una revisión del impacto que un desarrollo con usos de suelo H5 (Habitacional, 5 niveles) y H6 (Habitacional, 6 niveles) produciría en el sitio ante las condiciones de inundación y los escenarios de posible reducción o imposibilidad de uso de las vialidades ante eventos hidrometeorológicos críticos.

De acuerdo a la Figura 6, se observa la proyección de calles y espacios a urbanizar próximas a las zonas críticas de inundación según los resultados de la modelación hidrográfica (Figura 5), lo que subraya la importancia de planificar infraestructuras urbanas que no solo funcionen como vialidades, sino que también sean resistentes a las inundaciones ayudando significativamente a reducir la vulnerabilidad, implementando sistemas de drenaje eficientes, creando áreas verdes que actúen como zonas de amortiguamiento y elevando el nivel de las vías y construcciones en áreas propensas a inundaciones.

Figura 6. Zonificación secundaria de la zona de estudio



Nota. Imagen elaborada con apoyo del archivo CAD de la zonificación secundaria de acuerdo a la Actualización 2021 del Programa de Desarrollo Urbano Chetumal Calderitas Subteniente López Huay-Pix Xul-Há

Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con investigaciones previas que destacan la importancia de la alta resolución en la fotogrametría para estudios hidrológicos. Por ejemplo, (Quispe Iporra & Santa Cruz Marín, 2021) y (Bonilla - Granados et al., 2023) subrayan que la fotogrametría con drones ofrece una precisión geoespacial superior para la identificación de características topográficas finas, esenciales para la modelación de procesos hidrológicos. De manera similar, Espino Barajas (2023) demostró que la alta resolución de las ortofotos obtenidas mediante drones permite una mejor detección y análisis de las estructuras del terreno la infraestructura urbana, facilitando una modelación más precisa de inundaciones y otros riesgos naturales. En particular, la capacidad de los drones para captar datos en alta resolución ha permitido una mejora significativa en la identificación de zonas vulnerables a inundaciones, tal como lo demuestra este estudio. Los resultados indican que la zona de estudio, especialmente en las áreas mencionadas, es vulnerable a inundaciones significativas durante eventos pluviales intensos. Esto se ha señalado en López-Villanueva et al. (2022), el cual utilizó modelos hidrológicos para simular escenarios de inundaciones en áreas urbanas y resultó en inundaciones significativas lo que permitió un plan de manejo para la

conducción e infiltración de las aguas pluviales, sin embargo sin proveer detalles de alta resolución espacial de las características de la inundación.

Se evidencian de manera directa la relación entre la zonificación del uso de suelo y la susceptibilidad a inundaciones como un aspecto crucial en la planificación urbana. Al respecto, Rivera Godínez et al. (2021), señalaron que la ocupación de los cambios de uso de suelo y ocupación de zonas inundables, relacionadas con la reducción de áreas verdes contribuye al aumento de la impermeabilización del suelo y los volúmenes de escurrimiento, lo que a su vez aumenta la susceptibilidad a inundaciones en las zonas urbanas.

En ese mismo sentido, Castrillón Ocampo (2014) hace énfasis que realizar un diagnóstico es prioritario para identificar los riesgos que presentan las diversas zonas urbanas y permitirá a los tomadores de decisiones conocer la forma en que probablemente evolucionará como parte de sus actividades de desarrollo, lo que resulta ser un elemento fundamental para proponer soluciones que permitan reducir el riesgo de inundaciones en una determinada zona.

Entonces, en la planificación urbana se debe considerar la mitigación de inundaciones a través de estrategias como regulación de uso de suelo, la preservación de áreas verdes y humedales. Asimismo, la elaboración de un diagnóstico de riesgos y la implementación de sistemas de drenaje adecuados. Al respecto, autores como Rivera Godínez et al. (2021) y Sedano et al. (2013) han destacado que solo a través de una planificación integral que considere los factores mencionados será posible contribuir en la reducción de daños y riesgos asociados con las inundaciones en las ciudades y evitar generar desafíos similares en el futuro para garantizar un desarrollo equilibrado y seguro a largo plazo.

Por ello, la existencia de áreas verdes y equipamiento urbano y regional dentro del área de estudio destaca la necesidad de integrar estrategias de manejo del agua que no solo aborden la protección contra inundaciones, sino también promuevan la sustentabilidad ambiental y la calidad de vida de los residentes. Estos resultados también plantean interrogantes sobre la eficacia de las regulaciones de zonificación existentes en la prevención de riesgos relacionados con inundaciones. ¿Están las normativas de uso del suelo adecuadamente diseñadas para mitigar los impactos de eventos extremos como inundaciones? ¿Qué medidas adicionales podrían implementarse para mejorar la resiliencia de estas zonas ante futuros eventos climáticos?

Conclusiones

Los sistemas de drenaje suelen ser deficientes debido a fallas de diseño y construcción. Con el tiempo, estas deficiencias se ven exacerbadas por la acumulación de basura, animales muertos y desechos humanos en lotes baldíos, y la obstrucción de las alcantarillas debido al crecimiento demográfico (Alarcón, 2017) (Alarcón, 2017).

Los resultados de este estudio proporcionan herramientas y conocimientos prácticos para mitigar los impactos adversos de las inundaciones pluviales y promover el desarrollo urbano sostenible y resiliente en Chetumal y ciudades similares en el sureste de México.

A partir de esta investigación se deben incorporar consideraciones de mitigación y adaptación a inundaciones en los instrumentos de planificación territorial, mejorando así la planificación urbana en contextos de rápido crecimiento urbano y cambio climático (Currie Ríos & Pérez González, 2021; Isabeles Deniz et al., 2019; Zapata Alegría & Cerdà Troncoso, 2019).

El uso de ortofotos fotogramétricamente actualizadas de 1.00 m/píxel mejora significativamente la precisión y confiabilidad del modelado de inundaciones, ofreciendo una herramienta invaluable para la gestión de riesgos y la planificación de medidas de mitigación en áreas propensas a inundaciones.

La relación entre la zonificación del uso del suelo y la gestión del riesgo de inundaciones surge como un enfoque crítico para desarrollar políticas y prácticas urbanas más resilientes en respuesta al cambio climático y los eventos de precipitación extrema.

Las simulaciones se realizaron sin considerar la infraestructura de drenaje existente, por lo que es necesario realizar más investigaciones que incorporen estas obras de ingeniería a los escenarios de inundaciones para evaluar sus efectos con precisión.

Aunque algunos puntos de inundación mostraron niveles de agua más altos que los observados en la realidad, las áreas de inundación más críticas fueron identificadas con precisión, alineándose con los problemas actuales relacionados con las inundaciones.

Referencias bibliográficas

- Alarcón, M. N. R. (2017). *El desarrollo urbano en el Caribe mexicano construcción social del riesgo en Chetumal, Quintana Roo*.
https://www.academia.edu/36694161/El_desarrollo_urbano_en_el_Caribe_mexicano_construcci%C3%B3n_social_del_riesgo_en_Chetumal_Quintana_Roo

- Alonzo, L., & Vera, M. A. G. (2010). *PERDIDA DE COBERTURA VEGETAL COMO EFECTO DE LA URBANIZACIÓN EN CHETUMAL, QUINTANA ROO*. <https://www.semanticscholar.org/paper/PERDIDA-DE-COBERTURA-VEGETAL-COMO-EFECTO-DE-LA-EN-Alonzo-Vera/52d2dba2b560a56cfd18e16f2ab2c02e3540ac5f>
- Barreiro, A., Domínguez, J. M., C. Crespo, A. J., González-Jorge, H., Roca, D., & Gómez-Gesteira, M. (2014). Integration of UAV Photogrammetry and SPH Modelling of Fluids to Study Runoff on Real Terrains. *PLoS ONE*, 9(11), e111031. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111031>
- Barrera Rojas, M. A. (2020). Pobreza por ingreso y vulnerabilidad frente a inundaciones en Chetumal, Quintana Roo. *Importancia de la infraestructura verde y la planeación para el desarrollo urbano sustentable*, 138-155. <https://doi.org/10.47386/20203007B6>
- Bignami, D., Rosso, R., & Sanfilippo, U. (2019). *Flood Impact on Human Beings Stability* (pp. 25-43). https://doi.org/10.1007/978-3-030-05934-7_3
- Bonilla - Granados, C. A., Sánchez - Tapiero, D. I., & Ramón - Valencia, J. D. (2023). Digitalización de redes de distribución de agua, implementando imágenes satelitales, drones y sistemas de información geográfica. *Respuestas*, 28(3). <https://doi.org/10.22463/0122820X.4156>
- Cabrera, J. (2012). Modelos hidrológicos. *Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Ni-o, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú*, 8.
- Caruso, S. A. (2021). Gambeteando la reserva: Conflictos ambientales y urbanización de humedales. El caso de la Laguna de Rocha (Buenos Aires, Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 30(1), 171-200. <https://doi.org/10.52292/j.rug.2021.30.1.0020>
- Castrillón Ocampo, Y. A. (2014). Estrategias para el control de inundaciones en la zona urbana de la cuenca del Río Meléndez (Tesis licenciatura). Universidad del Valle. Colombia.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill.
- Currie Ríos, R., & Pérez González, G. (2021). Cambio climático y planificación urbana: Desafíos y oportunidades para la Evaluación Ambiental Estratégica. *Revista de Derecho Ambiental*, 2(16), 73. <https://doi.org/10.5354/0719-4633.2021.60524>
- Dai, L., García, M., & Herrero, A. D. (2020). *Estimación económica de daños potenciales sobre infraestructuras de transporte por inundaciones en el tramo Toro-Zamora*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Estimaci%C3%B3n-econ%C3%B3mica-de-da%C3%B1os-potenciales-sobre-de-Dai-Garc%C3%ADa/74d46bae288d649a3938ae8ef1b6128ed1103f4c>
- EL UNIVERSAL. (2023). *Qué nivel de agua puede soportar un auto en una inundación*. El Universal. <https://www.eluniversal.com.mx/autopistas/que-nivel-de-agua-puede-soportar-un-auto-en-una-inundacion/>
- Ehlschlaeger, C., Metz, M. & Gericke, A. (2021). *GRASS GIS 7.9.dev Reference Manual*. https://mirrors.ibiblio.org/grass/code_and_data/grass79/manuals/r.watershed.html
- Espino Barajas, L. A. (2023). *EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LOS DRONES PARA LA EVALUACIÓN*.
- Frausto Martinez, O. (2018). *Turismo oscuro: El desastre del huracán Janet de 1955 en la ciudad de Chetumal, México*.
- Garrido, B. B. (2020). *Responsabilidad administrativa de los entes locales por falta de mantenimiento o inadecuación de las instalaciones de saneamiento y alcantarillado*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Responsabilidad-administrativa-de-los-entes-locales-Garrido/d3eefcade733088f59d9c25fca202b94f53fd495>
- Godínez, M. F. R., Magaña, M. P. R., & Guerrero, J. A. H (2021). Inundaciones y uso de suelo en la ciudad de Querétaro.
- Ibarra-Marigal, S. M., Hernández-Montero, Y. N., Nahuat-Sansores, J. R., Rejón-Parra, D. G., Sánchez-Quijano, M. Á., Mena-Rivero, R., Torrescano-Valle, N., Arellano-Guillermo, A., & Romero-Martínez, Á. I. (2022). Diseño urbano sensible al agua para la zona kárstica de Bacalar, Quintana Roo, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(2). <https://doi.org/10.19136/era.a9n2.3236>
- Isabeles Deniz, K. G., Olavarria Sánchez, Á. M., Quintanilla Montoya, A. L., & Ríos Aguilar, J. (2019). Adaptación metodológica en el diseño y desarrollo urbano de bajo impacto para el manejo de aguas pluviales en Colima, México. *Tecnura*, 23(62), 55-72. <https://doi.org/10.14483/22487638.15452>
- Jimenez Sanchez, P. L., González Vera, M. A., Rosas Ferrusca, F. J., & Calderón Maya, J. R. (2021). Impactos socio ambientales de los asentamientos humanos irregulares en zonas y áreas naturales protegidas: Chetumal, Quintana Roo, México. *Revista Ciudades, Estados y Política*, 87-99. <https://doi.org/10.15446/cep.v8n1.85013>
- Jorquera, E., Weber, J. F., & Reyna, S. M. (2014). *Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada*. 19.

- Lalvay, C., & Mercedes, J. (2022). “Uso de UAV para el levantamiento de variables hidrológicas en la gestión de la subcuenca del río Yanuncay, área dentro de los AMA, Cuenca-Ecuador”.
- Lopardo, L. J., Salvi, P. E., & Lopardo, M. C. (2024). Obras de mitigación sustentables aplicadas a inundaciones urbanas. *Revista Multidisciplinar do UniSantaCruz*, 2(1), e389. <https://doi.org/10.55905/rmuscv2n1-003>
- López-Villanueva, C. I., Almaraz-Andrade, H. M., Hernández-Hernández, P. A., & Carlón-Martínez, P. (2022). *Modelación hidrológica de una microcuenca para prevenir inundaciones en el AMG*. <https://hdl.handle.net/11117/8255>
- Mesén, R. A., Dostal, C. B., Vargas, D. G. D., & Araúz, M. S. (2006). *METODOLOGÍAS FOTOGRAFÉTRICAS E HIDROLÓGICAS PARA ESTIMAR LA AMENAZA Y VULNERABILIDAD DE INUNDACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO PURIRES, CARTAGO, COSTA RICA*.
- Mishra, S. K., & Singh, V. P. (2003). SCS-CN Method. En S. K. Mishra & V. P. Singh (Eds.), *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology* (pp. 84-146). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0147-1_2
- Monroy-Ortiz, R. (2013). Los sistemas urbanos de cuenca en México: Transitando a estrategias integrales de gestión hídrica. *Economía, sociedad y territorio*, 13(41), 151-179.
- NRCS, U. (2007). *National soil survey handbook*, title 430-VI.
- Palom, A. R. i. (2020). *Vulnerabilidad y adaptación a las inundaciones en espacios turísticos del litoral mediterráneo*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Vulnerabilidad-y-adaptaci%C3%B3n-a-las-inundaciones-en-Palom/9e9c68300b7e5bef2d6a21a1a104aee81d5d6040>
- Porcel, G. C., & Díaz, M. A. R. (2014, diciembre 15). *Inundaciones en la Región de Murcia en los inicios del siglo XXI*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Inundaciones-en-la-Regi%C3%B3n-de-Murcia-en-los-inicios-Porcel-D%C3%ADaz/1e7ed9b6939e2472a0ff23e55c5defd796c1eb46>
- Quispe Iporra, J. A., & Santa Cruz Marín, S. M. (2021). *Evaluación del análisis técnico-financiero del área inundable utilizando el modelamiento hidráulico en base al uso de imágenes satelitales frente al sistema fotogramétrico con RPA en la micro cuenca Cansas, provincia de Ica, 2020*. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/4622>
- Sánchez, G. (2018). *Riesgo y vulnerabilidad por inundaciones. Caso de estudio: Conjunto urbano San Andrés, Municipio de Calimaya*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Riesgo-y-vulnerabilidad-por-inundaciones.-Caso-de-S%C3%A1nchez/aec1602c8274a7e606e9302e15719ca1dc37d9a6>
- Sedano Cruz, R. K. (2013). *Gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia. España
- SEDATU (2018). PROGRAMA DE DESARROLLO URBANO DE CHETUMAL, CALDERITAS, SUB-TENIENTE LÓPEZ, HUAY PIX Y XULHA. MUNICIPIO DE OTHÓN P. BLANCO. H. Ayuntamiento de Othón P. Blanco, Quintana Roo & Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano
- Serie DJI Mavic 3 Enterprise—Drones de inspección cartográfica industrial—DJI Enterprise. (s. f.). DJI. Recuperado 8 de mayo de 2024, de <https://enterprise.dji.com/es/photo>
- Strahler, A. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions*, 38, 913-920.
- Upegui, Z., & Tatiana, P. (2020, febrero 20). *De las montañas al valle: Hacia un nuevo modelo de gestión basado en los vínculos entre la biodiversidad, los servicios de los ecosistemas y el bienestar humano para el departamento de Tolima, Colombia*. <https://www.semanticscholar.org/paper/De-las-monta%C3%B1as-al-valle%3A-hacia-un-nuevo-modelo-de-Upegui-Tatiana/d0a7e84c3dad1bc13dfdc54d984f65f8bcee7493>
- Yeh, M. L., Chou, Y. T., & Yang, L. S. (2016). The Evaluation of GPS techniques for UAV-based Photogrammetry in Urban Area. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B1, 1079-1084. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-1079-2016>
- Zapata Alegría, I., & Cerdà Troncoso, J. F. (2019). Modelo para sustentar un crecimiento urbano resiliente en un contexto de cambio climático. *XIII CTV 2019 Proceedings: XIII International Conference on Virtual City and Territory: “Challenges and paradigms of the contemporary city”: UPC, Barcelona, October 2-4, 2019*. Virtual City and Territory. <https://doi.org/10.5821/ctv.8454>



<http://avacient.chetumal.tecnm.mx/index.php/revista>
<https://doi.org/10.69823/avacient.v4n2a5>

<https://www.facebook.com/avacient>