

JOURNAL OF ENERGY ENGINEERING OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY

2025



Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 01-2016-050908471400-203. ISSN: 2448-8186

Vol. 9 Núm. 3 (2025)



UJAT

UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



DIRECTORIO

L.D. GUILLERMO NARVÁEZ OSORIO

Rector

DR. WILFRIDO MIGUEL CONTRERAS SÁNCHEZ

Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

DR. LUIS MANUEL HERNÁNDEZ GOVEA

Secretario de Servicios Académicos

LIC. ALEJANDRINO BASTAR CORDERO

Encargado del Despacho de la Secretaría de Servicios
Administrativos

Esta revista está citada en:

Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal LATINDEX.<http://www.1atindex.unam.mx/>

JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY, Vol 9, No. 3, Año 2025, es una publicación continua editada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, C.P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. Tel. (+52) (933) 358 1500 Ext. 5040, <https://revistajeeos.ujat.mx/JEEOS/es/>, Email: jeeos@ujat.mx. Indizada en LATINDEX. Editora responsable: Laura Lorena Díaz Flores. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2016-050908471400-203, ISSN: 2448-8186, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Pauly González Mayo, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Centro, Tabasco. C.P. 86040. Fecha de última actualización, 30 de abril de 2025.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution- NonCommercialShareAlike 4.0 International License.

Dra. Laura Lorena Díaz Flores
EDITORIA EN JEFE

MSI. Alva del Rocío Pulido Téllez
GESTORA

M.A. Pauly González Mayo Dra. Antonia del Rocío López Guemez
ASISTENTE EDITORIAL Y MAQUETADO

MIS Dalia Exaltación Medina Mandujano MAEE. Mari Cruz Valenzuela Jiménez
ASISTENTE DE DISEÑO Y ESTILO

MC Sulma Guadalupe Gómez Jiménez MC Sirleni Ordóñez Frías
ASISTENTE DE TRADUCCION

EDITORES ASOCIADOS POR ÁREA

Dra. Angélica del Carmen Lizardo Pérez

M en C en Arq. Margarita del Carmen Noguera Miceli

Dra. Haydee Pérez Castro

Dr. Luis Manuel López Manrique

Dra. Karla María Aguilar Castro

Dr. Edgar Vicente Macias Melo

Dr. José de los Santos López Lázaro

Dra. Lizeth Rojas Blanco

Dr. Erik Ramírez Morales

M. C. Cristina Ponce Parra

Dr. Reymundo Ramírez Betancour

Dr. Emmanuel Munguía Balvanera

Dr. René Sebastián Mora Ortiz

COMITÉ EDITORIAL

Dr. Bassam Ali, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán

Dr. Fabricio Nápoles Rivera, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**

Dr. Francisco López Villareal, **Instituto Tecnológico de Villahermosa.**

Dr. Fernando Israel Gómez Castro, **Universidad de Guanajuato**

Dr. Juan Serrano Arellano, **Instituto Tecnológico de Pachuca**

Dra. Isabel María Valdivia Fernández, **Universidad de la Habana-Facultad de Geografía**

Dra. Ivett Zavala Guillén, **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California**

Dr. Luis Alfonso García Cerda, **Centro de Investigación de Química Aplicada**

Dra. Nancy del Pilar Medina Herrera, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Ma. Guadalupe Garnica Romo, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Dra. María Guadalupe Alpuche Cruz, **Universidad de Sonora**

Dr. Pedro Cruz Alcantar, **Universidad Autónoma de San Luis Potosí**

Dr. Salvador Tututi Ávila, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Santa del Carmen Herrera Sánchez, **Universidad Autónoma del Carmen**

Índice Vol. 9 Núm. 3 (2025)

APROVECHAMIENTO DE LOS ESCOMBROS DE CERÁMICA COMO AGREGADO FINO EN MEZCLAS DE MORTERO	1-14
De la Cruz-López L.F. ¹ , Gómez-May E. ¹ , Mora-Ortiz R.S. ^{1*} , Díaz-Alvarado S.A. ¹ , Álvarez-Reyes J. ²	
ANÁLISIS FISICOQUÍMICO DE ABONOS ORGÁNICOS ELABORADOS CON RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS PROCESADOS AERÓBICA Y ANAERÓBICAMENTE	15-32
San Juan- Martínez A. ^{1*} , Casanova-Pérez L. ¹ , García-Alonso F. ¹	
EFEITO DE LA CONCHA DE OSTIÓN CALCINADA EN LA RESISTENCIA DEL MORTERO DE ALBAÑILERÍA	33-46
López-López J.M., Jiménez-Bautista J.R., Rodríguez-Martínez K.J., Mora-Ortiz R.S.*., Díaz-Alvarado S.A.	
DESAFÍOS NUMÉRICOS Y SOLUCIONES HIDRÁULICAS PRÁCTICAS A ESCALA LOCAL: CASO UNIDAD CHONTALPA, TABASCO, MEX.	47-62
Pérez- De la Cruz A. ¹ , Priego-Hernández G. ¹ , Rivera-Trejo F. ^{1*} .	
ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA A PARTIR DE LODO RESIDUAL: PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO	63-78
Contreras-Vázquez E. ¹ , Vargas-Ibáñez L.T. ² , Cano-Gómez J.J. ^{1*}	

DESAFÍOS NUMÉRICOS Y SOLUCIONES HIDRÁULICAS PRÁCTICAS A ESCALA LOCAL: CASO UNIDAD CHONTALPA, TABASCO, MEX.

NUMERICAL CHALLENGES AND PRACTICAL HYDRAULIC SOLUTIONS AT LOCAL SCALE: THE CHONTALPA CASE, TABASCO, MEX.

Pérez- De la Cruz A.¹, Priego-Hernández G.¹, Rivera-Trejo F. ^{1*}.

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

* Avenida Universidad s/n Zona de la Cultura, Colonia Magisterial CP 86690 Villahermosa Centro Tabasco México
*jose.rivera@ujat.mx

Artículo Científico

Publicado: 17 de diciembre 2025

RESUMEN

En la presente investigación se realizó una modelación hidráulica bidimensional de alta resolución para evaluar el comportamiento de los escurrimientos superficiales en la Unidad Chontalpa de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT). La unidad se caracteriza por estar ubicada en una planicie de inundación. El objetivo fue diagnosticar el funcionamiento actual del sistema de drenaje y proponer soluciones estructurales prácticas. Con este fin, se construyó un modelo numérico bidimensional en HEC-RAS 2D V6.6 y se simularon dos escenarios: a) condiciones actuales y b) con obras hidráulicas propuestas. Los resultados mostraron que, en condiciones actuales, el sistema presenta anegamientos prolongados con tiempos de residencia mayores a 10 horas, canales saturados y falta de zonas de almacenamiento. En contraste, con la implementación de obras, se reduce el área inundada en un 90%, disminuyen los tiempos de salida y los niveles de lámina de agua. El estudio confirmó la importancia de modelos con alta

resolución espacial para el diseño de obras efectivas de drenaje en entornos urbanos propensos a inundaciones. La metodología propuesta se puede replicar en zonas con características topográficas similares.

Palabras clave: Modelación hidráulica urbana; HEC-RAS 2D; inundaciones locales; topografía de alta resolución; soluciones estructurales.

ABSTRACT

In this research, a high-resolution two-dimensional hydraulic model was used to evaluate the behavior of surface runoff on the Unidad Chontalpa campus of the Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), which is located within a floodplain. The objective was to assess the drainage system's current performance and propose practical structural solutions. For this purpose, a two-dimensional numerical model was developed in HEC-RAS 2D version 6.6, and two scenarios were simulated: (a) current conditions and (b) conditions with proposed hydraulic works. The results showed that, under



current conditions, the system experiences prolonged ponding with residence times greater than 10 hours, saturated channels, and a lack of storage areas. In contrast, implementing the proposed works reduces the flooded area by 90%, shortens outflow times, and lowers water surface levels. The study confirmed the importance of using high-resolution models for designing effective drainage works in flood-prone urban environments. The proposed methodology can be replicated in areas with similar topographic characteristics.

Keywords: Urban hydraulics; HEC-RAS 2D; local flooding; high-resolution topography; structural solutions.

INTRODUCCION

La modelación hidráulica es una herramienta esencial para comprender y gestionar los escurrimientos superficiales a diferentes escalas espaciales. Tradicionalmente, las simulaciones a mediana y gran escala (de varios kilómetros) han sido empleadas para representar el comportamiento hidrodinámico de sistemas fluviales extensos, permitiendo evaluar efectos regionales de eventos extremos o diseñar estrategias de manejo integral de cuencas [1], [2].

En estos modelos, ciertas simplificaciones topográficas pueden aceptarse sin comprometer significativamente la precisión de los resultados [3]. Sin embargo, la modelación a escalas locales, que abarcan dominios espaciales del orden de cientos de metros, presenta

desafíos particulares que requieren una atención meticulosa. En áreas con pendientes suaves, como es el caso de la Unidad Chontalpa de la UJAT, pequeñas variaciones en la elevación del terreno tienen un impacto significativo en la dirección y velocidad del flujo de los escurrimientos. En tales escenarios, la resolución de los datos topográficos se convierte en factor crítico para garantizar la fiabilidad de las simulaciones hidráulicas [4], [5].

Diversos estudios, han resaltado la importancia de utilizar Modelos Digitales de Elevación (MDE) de alta resolución para capturar con precisión las características del terreno en aplicaciones hidráulicas a pequeña escala. Por ejemplo, [6] y [7] demostraron que la elección de la fuente de datos de elevación influye significativamente en los resultados de las simulaciones hidráulicas, siendo los datos obtenidos mediante escaneo láser aerotransportado (LiDAR) y fotogrametría aérea los más confiables. En línea con esto, [8] y [9] resaltaron que, en regiones urbanas densas, el uso de MDE de baja resolución puede conducir a errores significativos en la identificación de zonas críticas de inundación. Además de la resolución de los MDE, el refinamiento de la malla de cálculo también juega un papel crucial. Estudios como los de [10] y [11] han evidenciado que una malla fina, en combinación con datos topográficos detallados, mejora la representación del flujo superficial, especialmente en terrenos planos donde pequeñas

irregularidades alteran significativamente la dinámica del agua.

En este contexto, el presente estudio se enfocó en la modelación hidráulica a microescala de la Unidad Chontalpa, una región caracterizada por tener una topografía suave y ser propensa a inundaciones recurrentes (**Figura 1**).



Figura 1. Evento de inundación, unidad Chontalpa- UJAT, 20 de Octubre 2024.

El objetivo principal fue desarrollar y validar un modelo hidráulico de alta resolución que permitiera diagnosticar las áreas críticas de acumulación de agua y proponer soluciones prácticas para mitigar el riesgo de inundaciones. Para ello, se integraron datos topográficos detallados, obtenidos mediante técnicas de escaneo láser y levantamientos topográficos, que se integraron a un modelo numérico bidimensional. El alcance fue simular con precisión el comportamiento del flujo en condiciones actuales y bajo diferentes escenarios de intervención. Este enfoque permitió no solo comprender las dinámicas hidráulicas específicas de la Unidad Chontalpa, sino también establecer una metodología replicable para otras regiones con características similares, donde la modelación a

microescala y el uso de datos topográficos de alta resolución son esenciales para una gestión efectiva del riesgo hídrico.

ÁREA DE ESTUDIO

La Unidad Chontalpa es una sede académica de la UJAT ubicada en el municipio de Cunduacán, Tabasco, dentro de la región denominada Planicie Costera del Golfo Sur (**Figura 2**). La zona se caracteriza por una topografía suave con elevaciones que oscilan entre los 7 – 9 m s.n.m. y una red de drenaje natural y artificial, que históricamente ha presentado deficiencias operativas. Dicha condición geográfica, aunada a un régimen de lluvias intensas y a la modificación del patrón natural de escurrimientos, ha propiciado eventos de inundación recurrentes en instalaciones clave del campus. Entre los eventos extremos registrados recientemente se encuentran los del 22 de septiembre de 2022, el 10 de julio de 2024 y, de manera más severa, el 20 de octubre de 2024. Este último —considerado como el máximo histórico— generó anegamientos prolongados en diversas áreas del campus, incluyendo edificios administrativos, laboratorios y espacios deportivos, afectando la operatividad de las actividades académicas y administrativas.

El drenaje principal de la Unidad Chontalpa lo constituye una única salida externa conectada por alcantarillas al dren 10W. Este dren constituye la única vía de salida natural de las aguas pluviales en la zona. El análisis post-inundación reveló que los canales revestidos y drenes

naturales existentes (**Figura 3**), no tienen capacidad de evacuar eficientemente el volumen de escurrimiento superficial generado durante los eventos.

Asimismo, se identificaron alteraciones en los escurrimientos debido al crecimiento urbano desordenado circundante. Este ha modificado los patrones de escurrimiento redireccionándolos hacia zonas vulnerables dentro del campus.

El conjunto de factores descritos hace de la Unidad Chontalpa un caso representativo para el estudio de modelación hidráulica a escala local. La complejidad del comportamiento hidrodinámico en este entorno requirió un enfoque detallado que permitiera mitigar el riesgo de inundación mediante la simulación numérica de diferentes escenarios de intervención.

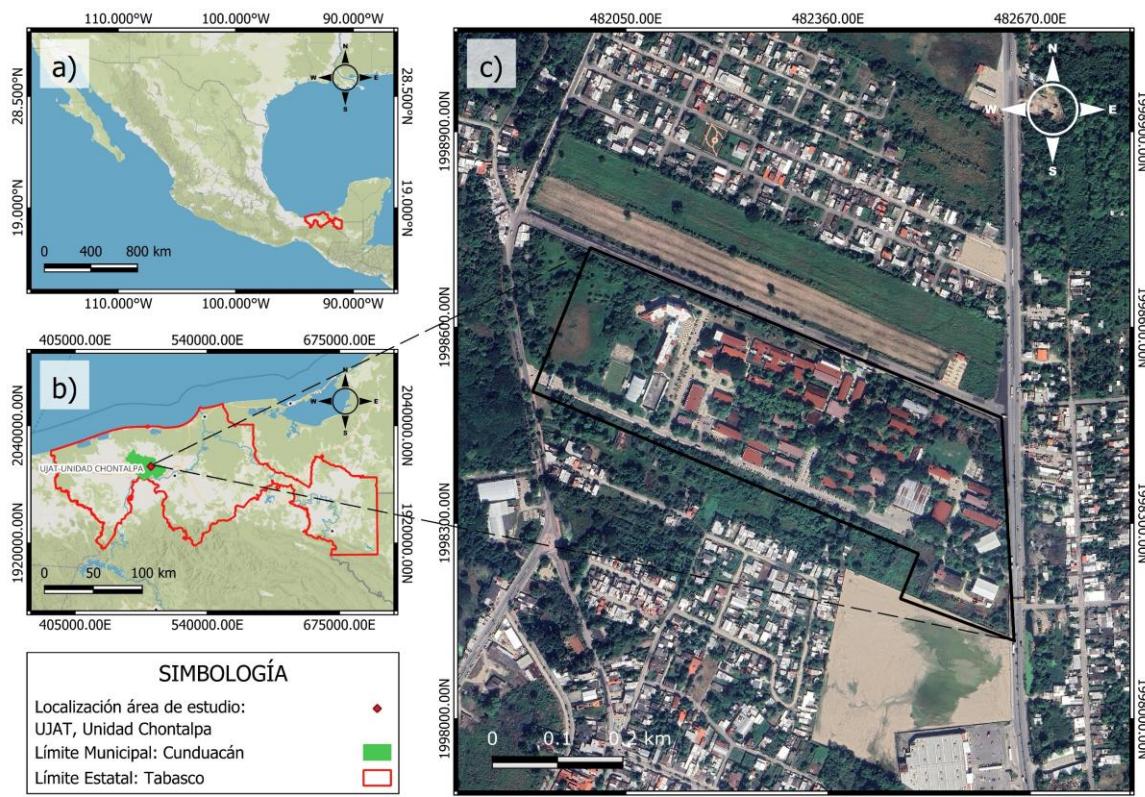


Figura 2. Localización geográfica y detalle del área de estudio: (a) ubicación general y límites estatales de la zona analizada; (b) delimitación municipal del área de estudio dentro del estado de Tabasco e (c) imagen satelital que muestra la configuración espacial actual y el contexto urbano del área analizada.

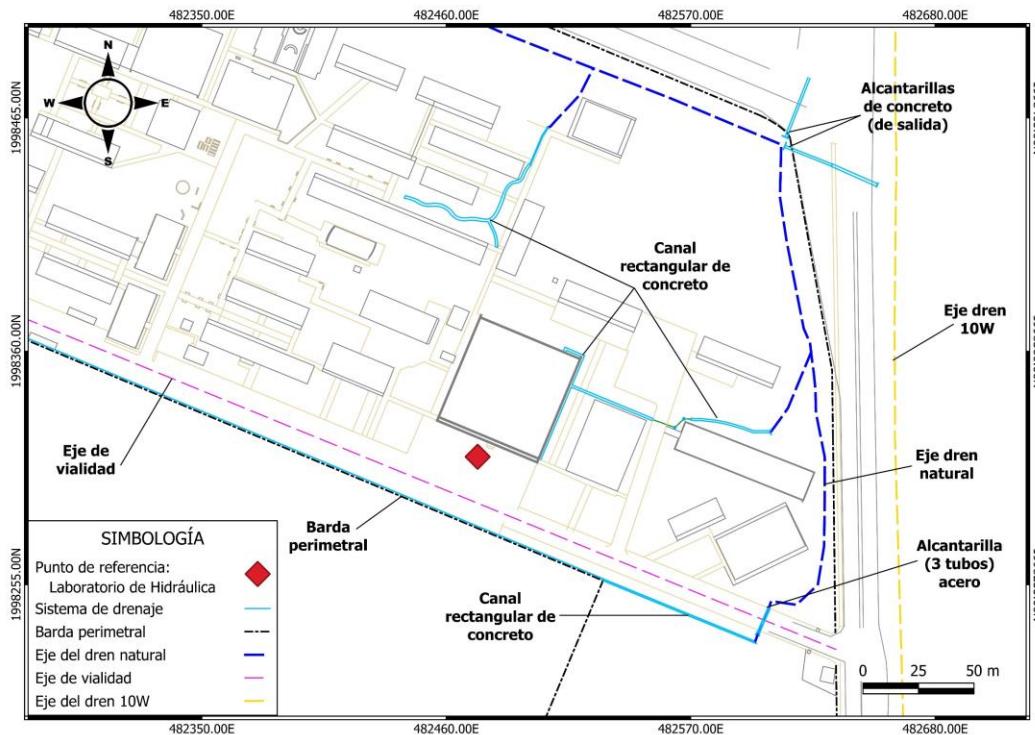


Figura 3. Planta general y sistema de drenaje actual de la Unidad Chontalpa, UJAT.

METODOLOGIA

La presente investigación se desarrolló mediante la implementación y análisis de un modelo hidráulico bidimensional en HEC RAS V6.6 [12]. Este ha demostrado su efectividad para simular flujos a superficie libre [13], [14]. HEC-RAS resuelve las ecuaciones de Saint-Venant en su forma completa de aguas poco profundas conocidas como Shallow Water Equations, (SWE), que representan la conservación de la masa (continuidad) y la cantidad de movimiento (momentum) en dos dimensiones [15].

La metodología se estructuró en cuatro componentes fundamentales: (i) recopilación y preparación de datos topográficos, (ii) implementación del modelo numérico, (iii) calibración del modelo y (iv) simulación y análisis de

resultados. A continuación, se hace una descripción de cada componente.

Recopilación y preparación de datos topográficos. La base del modelo hidráulico fue un MDE de alta resolución (5 m), bajado del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Sin embargo, debido a las elevaciones del terreno (7 – 9 m s.n.m), –donde 0.20 m hace la diferencia entre inundarse o no– fue necesario mejorar el MDE a partir de levantamientos de campo.

Estos se realizaron con una resolución vertical de 0.10 m, poniendo especial detalle en el sistema de drenaje existente y descrito en la **Figura 3**. La información fue procesada para generar una superficie continua corregida. Además, se digitalizaron y georreferenciaron elementos clave como edificaciones,

canales, bardas perimetrales y vialidades, generándose un MDE de alta resolución (**Figura 4**).

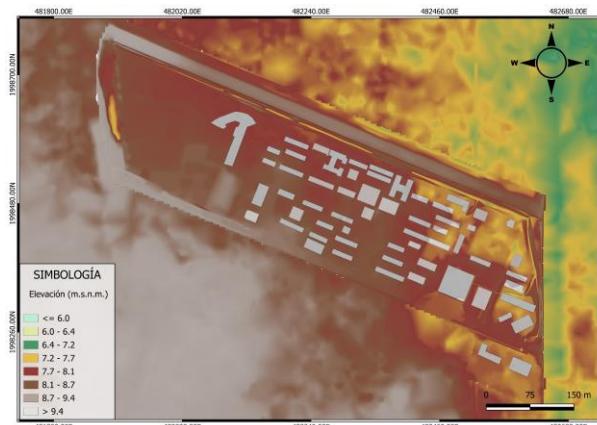


Figura 4. MDE generado para la unidad Chontalpa-UJAT.

Implementación del modelo numérico.
Inicialmente se generó una malla computacional con celdas de 5×5 m, resultando 8,196 celdas en un área de 0.208 km². Sin embargo, debido a las dimensiones del sistema de drenaje y bardas, se aplicó un refinamiento de 0.25 m en zonas específicas de la malla con el propósito de representar adecuadamente los escurrimientos. En el caso de los edificios a estos se les aplicó un refinamiento de 2 m. Quedando finalmente una malla de 110,068 celdas como se muestra en la **Figura 5**.

Como condiciones de frontera se consideraron: a) hidrograma de entrada en zonas críticas identificadas en campo (**Figura 6a**); y b) salida hacia el dren 10W (**Figura 6b**). Como condiciones iniciales, se consideró la superficie seca.

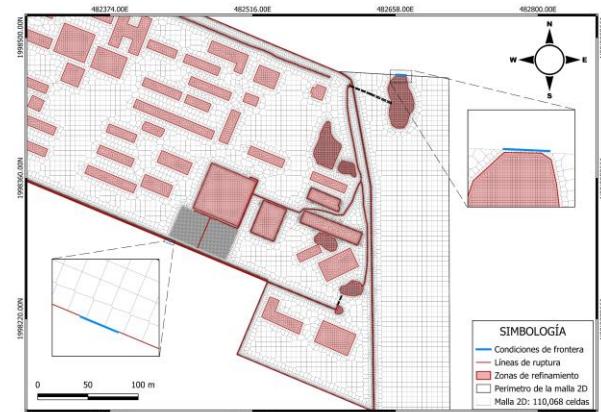


Figura 5. Malla de cálculo desarrollada en HEC-RAS V6.6.



Figura 6. Condiciones de frontera. a) Entrada de flujo por barda perimetral y b) Salida del flujo por alcantarilla hacia el dren 10W.

Los coeficientes de rugosidad de Manning se asignaron con base en inspecciones de campo y fotointerpretación, diferenciando entre superficies pavimentadas, áreas verdes, canales revestidos y drenes naturales, quedando distribuidos como se muestra en la **Figura 7**. La **Tabla 1**, resume estos valores.



Figura 7. Distribución de coeficientes de rugosidad de Manning.

Tabla 1. Valores de los coeficientes de rugosidad de Manning.

Coeficientes de rugosidad de Manning	
Cobertura vegetal	Coeficiente de Manning (n)
Dren Natural	0.060
Concreto	0.035
Pasto	0.005
Vegetación media	0.027
Vegetación densa	0.030
Canal revestido de concreto	0.013

Calibración del modelo. El modelo fue calibrado hasta reproducir los datos medidos en campo correspondientes al evento de octubre de 2024 —el mayor registrado a la fecha—. Obteniendo un nivel de 8.03 m s.n.m. enfrente del laboratorio de hidráulica (**Figura 8a**). El caudal de ingreso fue aforado con un perfilador acústico Doppler, modelo StreamPro (Teledyne, San Diego, CA), midiendo en promedio $0.5 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ (**Figura 8b**). Las características del equipo y técnicas de medición se pueden consultar en [16], [17].



Figura 8. a) Registro de niveles alcanzados y **b)** proceso de medición de caudales.

Simulación y análisis de resultados. Se realizaron simulaciones para las condiciones del 22 de octubre de 2024, bajo dos escenarios: a) Condición actual, que representa el sistema de drenaje, canales y edificaciones en condiciones existentes; y b) Condición con propuestas de solución, que considera la inclusión de elementos diseñados para reducir el riesgo de inundación. Ambos escenarios fueron evaluados mediante el evento de escurreimientos de octubre con un caudal de entrada de $0.5 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, simulado durante 8 horas. Se evaluaron las áreas de anegamiento, los tiempos de residencia del agua, la eficiencia de evacuación y la variación de niveles de inundación en puntos críticos. El análisis comparativo

entre escenarios permitió cuantificar el impacto hidráulico de las soluciones propuestas, estimar la reducción del área inundada y validar la efectividad de las estrategias en condiciones extremas.

PROPUESTA DE SOLUCIONES HIDRÁULICAS

Con base en el diagnóstico del funcionamiento hidrodinámico de la Unidad Chontalpa, se identificaron las zonas críticas propensas al anegamiento. A partir de estos hallazgos, se diseñó una propuesta de solución que mejorará la capacidad de conducción, redujera el almacenamiento temporal y controlará los escurrimientos superficiales dentro del campus.

Descripción de las obras propuestas.

Las soluciones consideradas fueron de tres tipos (**Figura 9a**): a) Rediseño de canales de drenaje (**Figura 9b**), se propuso la rehabilitación de los canales existentes mediante el aumento de su capacidad hidráulica y la colocación de revestimiento de concreto; b) Bordos de protección (**Figura 9c**), se planteó la construcción de bordos perimetrales en puntos estratégicos de desbordamiento. Su diseño se optimizó para no interferir con las rutas de evacuación ni con las pendientes naturales de escurrimiento; c) Laguna de regulación artificial con una superficie de 1,900 m² y un perímetro de 195 m (**Figura 9d**), diseñada con bordos perimetrales para captar los excedentes de escurrimiento durante los eventos de mayor intensidad. La laguna actuará como una zona de amortiguamiento y descarga

de los excedentes de agua hacia el dren 10W. Las modificaciones fueron incorporadas al modelo hidráulico mediante la actualización del MDE con las nuevas elevaciones y estructuras.

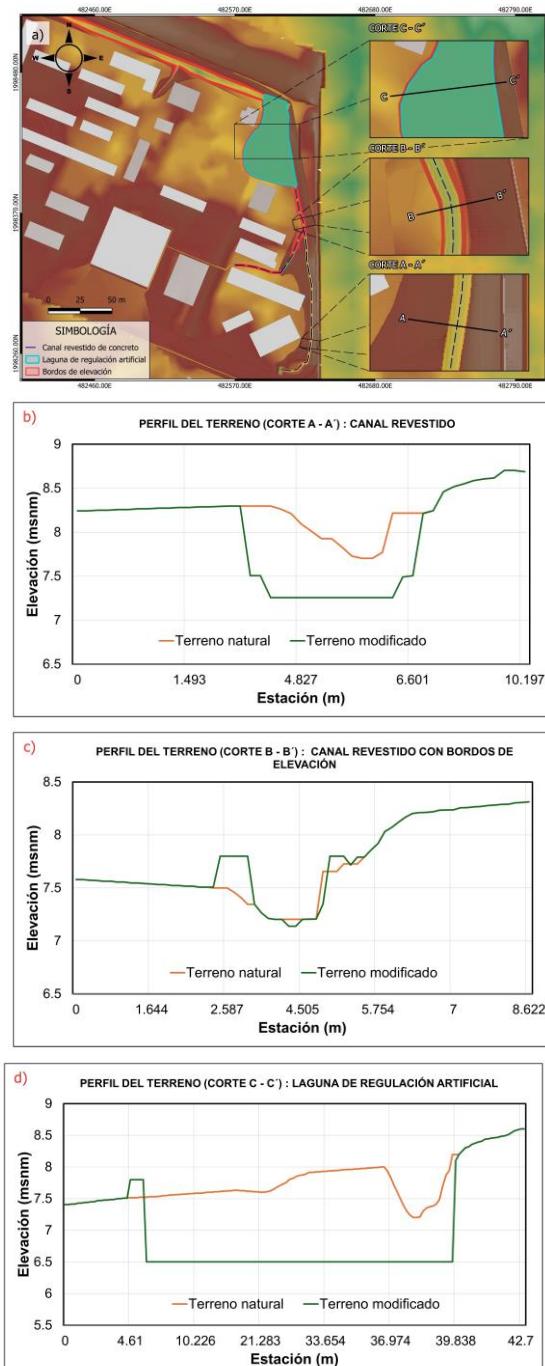


Figura 9. a) MDE con obras propuestas y modificaciones del terreno en la Unidad Chontalpa; b) Ampliación de canales; b) Creación de bordos y d) Construcción de laguna de regulación.

RESULTADOS

A continuación, se describen los principales hallazgos de las simulaciones.

Escenario base: condiciones actuales (Diagnóstico). Bajo condiciones actuales, el modelo evidenció desbordamientos masivos en las primeras tres horas de simulación (**Figura 10a**). La falta de capacidad de conducción provocó que el agua se distribuyera caóticamente en gran parte de la zona, alcanzando en puntos críticos de hasta 0.4 m de profundidad de agua, con una permanencia en el sitio mayor a 8 horas (**Figura 10b**). Las áreas de mayor afectación son:

- Área de estacionamiento en frente del edificio de hidráulica (Punto de referencia)
- Intersecciones entre vialidades.
- Linderos de edificios administrativos y espacios académicos.
- Tramos del dren natural con obstrucciones topográficas.

Este escenario representa las condiciones de inundación registradas el 24 de octubre de 2024. Estas condiciones son las mismas que se simularon en el siguiente escenario, pero con las obras propuestas.



Figura 10. Escenarios con hidrograma de $0.5 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$: (a) condiciones naturales en las 3 primeras horas, con desbordamientos; (b) condiciones naturales a 8 horas simulación; (c) condiciones con soluciones propuestas en las 3 primeras horas, con control del escurrimiento; y (d) condiciones con soluciones propuestas a 8 horas de simulación.

Escenario con obras hidráulicas propuestas. Se registraron desbordamientos en las primeras tres horas (**Figura 10c**); sin embargo, el sistema presentó una respuesta controlada. Se logró el desalojo completamente del agua en menos de 5 horas (**Figura 10d**). La laguna artificial almacenó el pico de los escurrimientos; mientras que los bordos, impidieron que el flujo accediera a las zonas de edificios. La velocidad del flujo en la red de canales se mantuvo en valores subcríticos, sin generar erosión ni socavación. También se observó que las áreas afectadas son mínimas y no ponen en riesgo ninguna infraestructura, solamente áreas verdes.

La **Figura 11**, presenta un análisis detallado de la evolución de los niveles en la zona que se considera más crítica. Esta es la que se ubica enfrente del estacionamiento de hidráulica (Punto de referencia). En esta zona la condición de desbordamiento empieza a la cota 7.8 msnm, que es el nivel de la banqueta del estacionamiento. A partir de ahí, inicia la inundación en los edificios, pudiendo llegar según los registros de octubre de 2024, hasta la cota 8.03 m s.n.m.

En la **Figura 11**, se muestra que, en condiciones actuales, el agua alcanza el nivel máximo (8.03 msnm) en un lapso de 30 minutos; y permanece en esa cota al menos 6 horas. En comparación, los resultados del funcionamiento hidráulico con las obras, muestra que retrasa el tiempo en que empieza la inundación hasta en dos horas; y además, reduce el

tiempo de permanencia a menos de 2 horas.

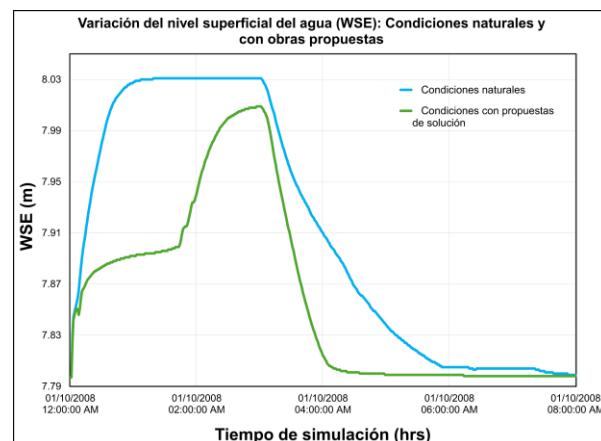


Figura 11. Niveles de la superficie libre del agua (msnm) para las condiciones máximas simuladas ($0.5 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$).

La **Tabla 2** resume los resultados principales de ambos escenarios para una mejor comparación. Uno de los hallazgos principales es la disminución significativa del área inundada del orden del 90% menos; una reducción del tiempo de permanencia, menor a 2 horas; y menores profundidades de inundación.

Tabla 2. Resumen de resultados

Indicador	Escenario	
	Natural	Obras
Área inundada (m ²)	14,200	1,100
Tiempo de permanencia del agua (h)	>10	<2
Profundidades máximas alcanzados (m)	0.40	0.20

Los resultados confirmaron que las soluciones hidráulicas propuestas mejoraron el desempeño del sistema de drenaje de la Unidad Chontalpa,

haciéndolo más resiliente ante eventos extremos. Además, validan la importancia de la modelación hidráulica a escala local, donde se comprueba la importancia de datos topográficos de alta resolución.

Durante el desarrollo de este trabajo y como resultado de las simulaciones hidráulicas, se llevó a cabo la excavación de los canales propuestos (**Figura 12a**). Posterior a la excavación, se presentó un evento de lluvia significativo, donde se evidenció la efectividad de las obras, a pesar de no estar terminadas completamente (**Figura 12b**).



Figura 12. a) Ampliación de área hidráulica en canales, b) funcionamiento del sistema de canales y c) Vista del laboratorio con resultados eficientes.

El canal captó el agua que ingresó a la unidad y la condujo efectivamente al dren 10W. Se consiguió por primera vez en más de una década que el estacionamiento enfrente del laboratorio de hidráulica no se inundara (**Figura 12c**).

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la simulación hidrodinámica de la Unidad Chontalpa demostraron la efectividad de las soluciones hidráulicas propuestas en un entorno caracterizado por una topografía plana con una alta susceptibilidad a inundaciones. La modelación a escala local permitió diagnosticar con precisión las zonas críticas de acumulación y cuantificar el impacto hidráulico de cada intervención bajo distintos escenarios de escurrimiento. Los resultados mostraron que la ampliación de los canales existentes, la generación de bordos de protección y la construcción de una laguna artificial de regulación, pueden reducir aproximadamente en un 90% el área inundada. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por estudios recientes que destacan la eficacia de soluciones combinadas —como lagunas de retención y bordos perimetrales— para entornos con pendiente reducida, donde la capacidad de almacenamiento temporal y el control de la conducción resultan determinantes [18], [19]. En este contexto, la modelación hidráulica no solo permitió diagnosticar la respuesta ante eventos extremos; sino también, fundamentar técnicamente la viabilidad de obras de bajo impacto, replicables en campus universitarios u otros espacios urbanos con condiciones similares.

No obstante, el desarrollo de este modelo reveló desafíos numéricos inherentes a la modelación bidimensional a microescala. Entre los más representativos fueron: Las variaciones subméticas en la topografía; y el refinamiento de la malla. Implementar estas acciones incrementó de forma notable la carga computacional y la sensibilidad en los criterios de estabilidad de Courant [20], obligando a reducir los pasos de tiempo y ajustar los parámetros de convergencia de HEC-RAS 2D. Tales dificultades concuerdan con lo señalado por [21], quienes demostraron que la reducción del tamaño de celda en modelos urbanos incrementa la exactitud hidrodinámica, pero también la inestabilidad numérica si no se gestionan adecuadamente los límites temporales. De manera complementaria, [19] documentaron que las simulaciones con resoluciones subméticas requieren una cuidadosa gestión geométrica y altos recursos de procesamiento para evitar errores acumulativos. Asimismo, [18] evidenciaron que resoluciones menores a 0.5 m mejoran la representación del almacenamiento y drenaje superficial, aunque multiplican los tiempos de simulación por un orden de magnitud. En el presente trabajo, los tiempos de cómputo se incrementaron sustancialmente conforme se refinó la malla, lo que obligó a priorizar el refinamiento selectivo únicamente en sectores de interés hidráulico.

Por otra parte, los Modelos Digitales de Elevación (MDE) de alta resolución fueron determinantes en la simulación del comportamiento hidrodinámico.

Diferencias verticales menores a 0.10 m modificaron los patrones de anegamiento y la velocidad del flujo, tal como señalaron [22], quienes demostraron que la resolución del MDE y la densidad de la malla alteran la rugosidad efectiva y la predicción de las zonas de almacenamiento. En la Unidad Chontalpa, estas variaciones resultaron decisivas para determinar el inicio o la disipación de láminas de agua residuales dentro del campus.

CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que la modelación hidráulica a escala local permite identificar con precisión zonas críticas de acumulación y proponer soluciones estructurales efectivas para la mitigación de inundaciones en entornos con pendientes suaves y propensos a inundaciones frecuentes. El caso particular de la Unidad Chontalpa, es un ejemplo claro de este tipo de entorno. Las simulaciones realizadas para las condiciones actuales, diagnosticaron el funcionamiento del sistema. Esta información, permitió incorporar las medidas estructurales —canales, bordos de protección y una laguna artificial de regulación— que lograron una reducción significativa (90%) del área inundada; así como una mejora significativa en los tiempos de evacuación y niveles de láminas de agua alcanzados.

Desde el punto de vista técnico, el trabajo abordó de manera directa los desafíos numéricos asociados con la modelación a microescala, especialmente el equilibrio

entre la resolución espacial y la estabilidad computacional. La mejora en la resolución del MDE y el refinamiento de la malla hasta tamaños submétricos, permitió representar de forma realista las microvariaciones del terreno y los gradientes hidráulicos locales. Esto también implicó un incremento exponencial en los tiempos de simulación y en la demanda de memoria computacional. Esta experiencia pone de relieve que la precisión del modelo debe gestionarse de manera estratégica, priorizando el refinamiento solamente en zonas críticas

Entre los principales aportes de este trabajo se destacan:

- La validación del uso de mallas computacionales finas y MDE detallados con levantamientos topográficos de alta resolución, que mejora la representación realista del flujo en dominios reducidos.
- La evidencia de que soluciones estructurales localizadas pueden ser altamente eficaces cuando se diseñan a partir del diagnóstico del funcionamiento hidráulico de la zona de estudio.
- La demostración de que herramientas como HEC-RAS 2D, complementadas con levantamientos topográficos de alta resolución, permiten realizar diagnósticos y evaluaciones de intervención incluso en contextos con recursos técnicos y financieros limitados.

Finalmente la metodología aportada en este estudio es replicable para otras instalaciones educativas, institucionales o urbanas con condiciones geomorfológicas similares. Se recomienda que futuras investigaciones incluyan la modelación acoplada con sistemas de alcantarillado, análisis de condiciones de borde no libres (presión), y evaluación de alternativas no estructurales como sistemas de infiltración o drenaje sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Este análisis fue resultado de un esfuerzo colaborativo institucional orientado a proteger la infraestructura universitaria y garantizar la seguridad y el bienestar de la comunidad. Especial agradecimiento a los estudiantes de topografía del profesor Adolfo Cornelio y los estudiantes del Laboratorio de Simulación, quienes apoyaron en las mediciones de campo.

REFERENCIAS

- [1] M. S. Horritt and P. D. Bates, "Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation," *J Hydrol (Amst)*, no. 268, pp. 97–99, Jan. 2002, [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/jhydrol.
- [2] J. Neal, I. Villanueva, N. Wright, T. Willis, T. Fewtrell, and P. Bates, "How much physical complexity is needed to model flood inundation?," *Hydrol Process*, vol. 26, no. 15, pp. 2264–2282, Jul. 2012, doi: 10.1002/hyp.8339.

- [3] M. S. Horritt, P. D. Bates, and M. J. Mattinson, "Effects of mesh resolution and topographic representation in 2D finite volume models of shallow water fluvial flow," *J Hydrol (Amst)*, vol. 329, no. 1–2, pp. 306–314, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.02.016.
- [4] K. Marks and P. Bates, "Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models," in *Hydrological Processes*, John Wiley & Sons Ltd, 2000, pp. 2109–2122, doi: 10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/12<2109::aid-hyp58>3.0.co;2-1.
- [5] K. Guo, M. Guan, and D. Yu, "Urban surface water flood modelling—a comprehensive review of current models and future challenges," May 27, 2021, *Copernicus GmbH*. doi: 10.5194/hess-25-2843-2021.
- [6] K. Bakuła, M. Stępnik, and Z. Kurczyński, "Influence of Elevation Data Source on 2D Hydraulic Modelling," *Acta Geophysica*, vol. 64, no. 4, pp. 1176–1192, Aug. 2016, doi: 10.1515/acgeo-2016-0030.
- [7] A. Casas, G. Benito, V. R. Thorndycraft, and M. Rico, "The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling," *Earth Surf Process Landf*, vol. 31, no. 4, pp. 444–456, Apr. 2006, doi: 10.1002/esp.1278.
- [8] L. M. Sidek *et al.*, "High-resolution hydrological-hydraulic modeling of urban floods using infoworks icm," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 18, Sep. 2021, doi: 10.3390/su131810259.
- [9] S. Yuan Fong, L. Yan Ting, J. Jiun Huei, and H. Jen Yu, "High-Resolution Flood Simulation in Urban Areas Through the Application of Remote Sensing and Crowdsourcing Technologies," *Front Earth Sci (Lausanne)*, vol. 9, Jan. 2022, doi: 10.3389/feart.2021.756198.
- [10] N. M. Hunter, P. D. Bates, M. S. Horritt, and M. D. Wilson, "Simple spatially-distributed models for predicting flood inundation: A review," Oct. 15, 2007. doi: 10.1016/j.geomorph.2006.10.021.
- [11] P. Costabile, C. Costanzo, D. Ferraro, F. Macchione, and G. Petaccia, "Performances of the new HEC-RAS version 5 for 2-D hydrodynamic-based rainfall-runoff simulations at basin scale: Comparison with a state-of-the art model," *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 9, Sep. 2020, doi: 10.3390/W12092326.
- [12] G. W. Bruner, "HEC-RAS 2D User's Manual," Davis, CA, 2020. [Online]. Available: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/r2dum/latest>
- [13] J. A. Hernandez-Ramon, G. Priego-Hernandez, K. K. Plesiński, and J. G. F. Rivera-Trejo, "Management of an urban lagoon. Study case: Ilusiones Lagoon, Tabasco, Mexico," *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, vol. 10, no. 3, Oct. 2023, doi: 10.19136/era.a10n3.3756.
- [14] M. García-Reyes, F. Rivera-Trejo, G. Priego-Hernández, and G. Soto-Cortes, "Análisis hidrodinámico en un canal de derivación: Caso El Censo, Municipio de Centro,

- Tabasco," *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*, vol. 1, no. 2, pp. 23–42, Jun. 2017, doi: 10.19136/JEEOS.A1N2.1896.
- [15] G. W. Brunner, "HEC-RAS HEC-RAS 2D User's Manual," 2021.
- [16] G. A. Priego-Hernandez, H. Rubio-Arias, and F. Rivera-Trejo, "Hydrodynamics and measurement of natural currents in a plain river using acoustic Doppler equipment," *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, vol. 5, no. April, p. 14, 2018, doi: 10.19136/era.a5n14.1515.
- [17] G. A. Priego-Hernández and F. Rivera-Trejo, "Secondary currents: Measurement and analysis," *Atmosfera*, vol. 29, no. 1, 2016, doi: doi: 10.20937/ATM.2016.29.01.03.
- [18] P. Costabile, C. Costanzo, D. Ferraro, F. Macchione, and G. Petaccia, "Performances of the new HEC-RAS version 5 for 2-D hydrodynamic-based rainfall-runoff simulations at basin scale: Comparison with a state-of-the art model," *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 9, Sep. 2020, doi: 10.3390/W12092326.
- [19] G. A. M. de Almeida, P. Bates, and H. Ozdemir, "Modelling urban floods at submetre resolution: challenges or opportunities for flood risk management?," *J Flood Risk Manag*, vol. 11, pp. S855–S865, Feb. 2018, doi: 10.1111/jfr3.12276.
- [20] M. J. Alexopoulos *et al.*, "A novel and scalable flood risk assessment framework for cultural heritage based on unmanned aerial vehicle photogrammetry and multi-scale rain-on-grid hydraulic modeling," *Science of the Total Environment*, vol. 998, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.180256.
- [21] H. Ozdemir, C. C. Sampson, G. A. M. De Almeida, and P. D. Bates, "Evaluating scale and roughness effects in urban flood modelling using terrestrial LIDAR data," *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 17, no. 10, pp. 4015–4030, 2013, doi: 10.5194/hess-17-4015-2013.
- [22] E. M. Prior, N. Michaelson, J. A. Czuba, T. J. Pingel, V. A. Thomas, and W. C. Hession, "Lidar DEM and Computational Mesh Grid Resolutions Modify Roughness in 2D Hydrodynamic Models," *Water Resour Res*, vol. 60, no. 7, Jul. 2024, doi: 10.1029/2024WR037165.

