

Restauración fluvial de bajo impacto en el canal Tlahuelilpan, Hidalgo Low-impact River restoration in the Tlahuelilpan canal, Hidalgo

Jesús Vargas-Martínez ^a, Humberto I. Navarro-Gómez ^a, Omar S. Areu-Rangel ^{a,*}

^a Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

Las crecientes inundaciones en el municipio de Tula de Allende, Hidalgo, se han visto agravadas por el aumento del caudal del río Tula, influenciado por descargas urbanas provenientes del Valle de México. Ante esta problemática, el presente estudio evalúa alternativas sostenibles de restauración fluvial mediante infraestructura verde, empleando modelación hidráulica en HEC-RAS. Se analizaron cuatro escenarios: condiciones actuales del canal y tres configuraciones con geometría trapezoidal y distinto tipo de revestimiento vegetal (vegetación ligera, pasto corto y vegetación densa). Para cada caso se consideraron parámetros hidráulicos clave, como el coeficiente de rugosidad de Manning y se realizó un análisis económico comparativo. Los resultados indican que el escenario con revestimiento de pasto corto proporciona el mejor equilibrio entre eficiencia hidráulica, viabilidad económica y sostenibilidad ambiental. Esta propuesta contribuye a la gestión integral del riesgo hídrico y ofrece una alternativa replicable para la adaptación de cauces urbanos en contextos similares.

Palabras clave: *infraestructura verde, modelación hidráulica, restauración fluvial, sostenibilidad, control de inundaciones.*

Abstract.

The increasing flood events in the municipality of Tula de Allende, Hidalgo, have been exacerbated by rising flows in the Tula River, driven by urban discharges from the Valley of Mexico. In response to this issue, the present study evaluates sustainable river restoration alternatives through green infrastructure, using hydraulic modeling in HEC-RAS. Four scenarios were analyzed: current channel conditions and three configurations with trapezoidal geometry and different types of vegetative cover (light vegetation, short grass, and dense vegetation). Key hydraulic parameters were considered for each case, such as the Manning roughness coefficient, along with a comparative economic analysis. The results indicate that the scenario with short grass lining provides the best balance between hydraulic efficiency, economic feasibility, and environmental sustainability. This proposal contributes to integrated flood risk management and offers a replicable solution for the adaptation of urban waterways in similar contexts.

Keywords: *green infrastructure, hydraulic modeling, river restoration, sustainability, flood control.*

1. Introducción.

El canal de Tlahuelilpan es un afluente del río Tula, ubicado en el estado de Hidalgo, México, y forma parte de una de las principales corrientes que reciben aguas del sistema de drenaje profundo del Valle de México. A lo largo de los últimos años, ha sido reportado constantemente por sus desbordamientos, particularmente en temporada de lluvias. Este fenómeno ha

provocado inundaciones con severos impactos sociales, económicos y ambientales (Hernández-Espinoza, 2021). En el contexto de la expansión urbana acelerada, la pérdida de áreas de infiltración, el uso intensivo del suelo y la insuficiencia de infraestructura para el manejo de avenidas extraordinarias se ha vuelto urgente la búsqueda de soluciones alternativas (Cruz-Ruiz et al. 2020).

*Autor para la correspondencia: omar_areu@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: va357257@uaeh.edu.mx (Jesús Vargas-Martínez), humberto_navarro@uaeh.edu.mx (Humberto Iván Navarro-Gómez), omar_areu@uaeh.edu.mx (Omar Salvador Areu-Rangel).

Historial del manuscrito: recibido el 05/08/2025, última versión-revisada recibida el 14/10/2025, aceptado el 24/10/2025, publicado el 05/12/2025. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial3.15611>



Las medidas tradicionales, como los bordos de contención y canales de concreto, han demostrado ser insuficientes o de alto costo de mantenimiento. En este sentido, la infraestructura verde ha emergido como un enfoque innovador, sustentado en principios ecológicos y de resiliencia urbana.

Además de su función hidráulica, estas soluciones integran beneficios adicionales como la mejora de la calidad del agua, la generación de hábitats naturales y la disminución de las islas de calor urbano.

Este estudio evalúa, mediante simulación y análisis comparativo, el potencial de estas estrategias aplicadas al caso específico del canal del río Tula (SEMARNAT, 2019).

1.1 Casos de estudio relevantes

Actualmente, los proyectos de canalización de cauces están experimentando una transformación significativa en su concepción y ejecución. Los enfoques tradicionales están siendo reemplazados por modelos que priorizan la sostenibilidad ambiental, integrando soluciones de infraestructura ecológica que combinan eficiencia hidráulica con conservación de los ecosistemas (Fletcher et al., 2015).

La infraestructura verde se ha convertido en una estrategia clave para la gestión sostenible de canales, combinando soluciones naturales con ingeniería tradicional para mejorar el manejo del agua, reducir inundaciones, filtrar contaminantes y promover la biodiversidad.

Un ejemplo de restauración es el arroyo Medrano en Buenos Aires, Argentina, que involucró un esfuerzo por recuperar un canal urbano altamente degradado. Este proyecto empleó técnicas de bioingeniería para estabilizar las márgenes, utilizando gaviones combinados con vegetación autóctona. Además, se implementaron humedales artificiales para tratar las aguas pluviales y franjas buffer con pastos y arbustos nativos, lo que permitió reducir la erosión, mejorar la infiltración del agua y aumentar la presencia de fauna local (Rodríguez et al., 2020).

De forma paralela, el programa Green Alley, desarrollado en Chicago (USA), en una ciudad con frecuentes problemas de inundaciones, transformó callejones y canales urbanos mediante la incorporación de pavimentos permeables, bioswales (zanjas de infiltración) y jardines de lluvia.

Estas intervenciones lograron captar y filtrar el agua de escorrentía, reduciendo la carga sobre el sistema de alcantarillado y recargando los acuíferos subterráneos de manera natural (City of Chicago, Department of Transportation, 2010).

1.2 Valor agregado del estudio

La principal contribución de este trabajo es presentar un enfoque replicable para evaluar soluciones basadas en vegetación para canales semiurbanos en México, donde aún existen pocos estudios que combinen herramientas numéricas, observación en campo y análisis económico.

En contraste con investigaciones centradas únicamente en la hidráulica o la ecología, este estudio integra tres componentes: funcionalidad hidráulica, viabilidad económica y valor ambiental, aportando un modelo de análisis integral. Esto se inscribe dentro del paradigma de infraestructura natural

e híbrida en restauración fluvial, promovido en los últimos años en América Latina (Rodríguez-Labajos et al., 2020).

2. Justificación técnica y estado del conocimiento

La restauración de cauces fluviales ha cobrado una relevancia creciente a nivel global debido al deterioro de los ecosistemas y al aumento de eventos hidrometeorológicos extremos. En este contexto, la recuperación de canales urbanos mediante soluciones ecológicas y de bajo impacto ha sido reconocida como una estrategia efectiva y sostenible.

2.1 Fundamentos de restauración de ríos

Al hablar sobre la restauración de ríos, se hace referencia a la recuperación funcional y ecológica de un ecosistema fluvial degradado. Esta disciplina se basa en intervenciones ecológico-ingenieriles que buscan restablecer la estructura, dinámica y funciones naturales de los ríos, llevándolos a un estado de referencia que cumpla con criterios ecológicos (Wohl et al., 2015).

La rehabilitación de ecosistemas fluviales es hoy una prioridad en las políticas de conservación hídrica de múltiples países.

Establecer objetivos medibles y verificables (como la mejora en la calidad del agua o el aumento de biodiversidad) es esencial (Palmer et al., 2005). No basta con reparar secciones afectadas, sino que se busca restituir las relaciones naturales que permiten el funcionamiento del sistema fluvial, minimizando además impactos aguas abajo.

2.2 Medidas tradicionales vs. técnicas de bajo impacto

Históricamente, las intervenciones fluviales se basaban en estructuras rígidas como muros de contención o canales rectos. Estas soluciones ofrecían protección inmediata, pero producían impactos adversos sobre la ecología del cauce: bloqueaban el transporte de sedimentos, alteraban la continuidad biológica y reducían la diversidad de especies (Bernhardt et al., 2005; Kondolf, 2006). Además, estas infraestructuras exigen mantenimiento frecuente, lo que representa una carga económica constante.

En respuesta, han surgido estrategias de infraestructura verde y bioingeniería, que integran vegetación autóctona, restablecen zonas inundables y permiten el flujo natural de sedimentos.

Estas técnicas ofrecen múltiples beneficios: mayor resiliencia, mejor aceptación social, integración paisajística y costos más bajos a largo plazo (Binns et al., 2022; Beechie et al., 2010).

Recientes estudios también destacan que estas intervenciones aumentan la capacidad de autorregulación del ecosistema (Schulz et al., 2021; Gurnell, 2023).

2.3 Tipos de restauración fluvial

La restauración fluvial actual se basa en enfoques multidimensionales que combinan aspectos ecológicos, geomorfológicos y sociales. Bednarek (2001) destaca la complejidad de restablecer la conectividad longitudinal y lateral del río, considerando no solo el flujo de agua, sino también la interacción ecológica entre riberas y planicies

aluviales. Kondolf (2006) y Wohl (2015) abogan por la rehabilitación morfológica, que implica devolver la sinuosidad al cauce y restaurar bancos de grava. Esta estrategia permite al río autorregularse, reduciendo su dependencia de mantenimiento técnico.

El componente biológico, particularmente la vegetación de ribera, también cumple funciones vitales. Naiman et al. (2005) y Richardson (2007) señalan que la reintroducción de especies nativas fortalece la calidad del agua y proporciona refugios naturales para fauna acuática.

Estas intervenciones pueden realizarse a pequeña escala, pero para lograr impactos más amplios requieren coordinación institucional (Beechie et al., 2010).

2.4 Vegetación ribereña y su efecto hidráulico

La vegetación ribereña modifica la dinámica hidráulica del cauce: aumenta la rugosidad, reduce la velocidad del flujo y estabiliza los márgenes. Julien (2018) señala que el uso de vegetación puede reducir hasta un 30% la velocidad del agua, favoreciendo la deposición de sedimentos.

Según Baptist et al. (2007), las plantas emergentes disminuyen la energía del flujo, reduciendo su capacidad erosiva. Además, raíces densas mejoran la cohesión del terreno hasta en 5 kPa, según Pollen-Bankhead et al. (2016), protegiendo los bordes del cauce durante eventos extremos.

Desde una perspectiva de gestión hídrica sostenible, la vegetación ribereña ofrece también beneficios ecológicos como la depuración natural del agua y la reducción de costos de conservación (Naiman et al., 2005; Beechie et al., 2010). Richardson et al. (2007) y Simon & Collison (2002) subrayan la importancia de seleccionar especies adaptadas hidrológicamente para maximizar su funcionalidad.

Nuevos estudios reafirman que estas soluciones, bien implementadas, no solo estabilizan el cauce, sino que mejoran su capacidad de conducción cuando se combinan con diseños geométricos adecuados (Arcement & Schneider, 2020; Salazar et al., 2022; Martínez-Ruiz et al., 2023).

3. Materiales y Métodos

3.1 Canal Tlahuelilpan, Hidalgo.

A su paso por el municipio de Tlahuelilpan, el río Tula presenta una dinámica compleja, resultado de la interacción entre elementos naturales y modificaciones humanas. Este cuerpo de agua atraviesa el estado de Hidalgo, en el centro de México y forma parte de la cuenca del río Pánuco. La región se encuentra a una altitud promedio de 2,020 metros sobre el nivel del mar y se ha convertido en un punto crítico debido a la confluencia de varios desafíos hídricos relacionados con el manejo de avenidas, descargas residuales y presión urbana.

Estas condiciones hidrológicas y de presión urbana por los asentamientos humanos convierten a este tramo en una prioridad para el análisis técnico de posibles medidas de restauración fluvial.

El sistema hídrico en esta zona integra tanto el cauce natural del río como el Canal Tula, una infraestructura artificial destinada originalmente al riego agrícola. Este tramo se caracteriza por su triple función:

1. Recepción de aguas naturales de afluentes como El Salto y El Tepeji.
2. Manejo de descargas controladas del sistema Cutzamala.
3. Transporte de aguas residuales provenientes de la zona metropolitana del Valle de México.

La combinación de estas fuentes ha alterado significativamente el comportamiento hidrológico del canal, generando situaciones de riesgo e ineficiencia que requieren análisis detallado (Rodríguez-González et al., 2023).

3.2 Levantamiento topográfico y caracterización física del cauce.

Para comprender el estado actual del canal y sustentar la modelación hidráulica, se realizó un levantamiento técnico de campo en el tramo ubicado sobre la Avenida del Ejido, municipio de Tlahuelilpan, abarcando una extensión de 620 metros lineales, desde el kilómetro 0+000 hasta el 0+620. El objetivo principal fue evaluar la morfología del cauce y sus condiciones operativas, identificando zonas vulnerables que pudieran requerir intervención.

Durante la inspección se recorrió el área completa del canal y su entorno inmediato para identificar los escurreimientos superficiales y las áreas que presentan mayor susceptibilidad a desbordamientos o acumulaciones de agua. Se hizo especial énfasis en zonas críticas como las curvas del canal, donde se observó que algunas de ellas presentan riesgos potenciales debido a su geometría y estado actual.

Para mejorar la precisión de la inspección, se utilizaron herramientas tecnológicas avanzadas. Uno de los recursos clave fue el uso de un dron DJI Mavic Air 2s, que permitió obtener imágenes aéreas de alta resolución que documentan la situación actual del canal desde perspectivas inalcanzables mediante técnicas convencionales.

En el transcurso de la visita técnica se capturaron diversas imágenes del canal que ilustran claramente su estado actual y las características de las áreas críticas. La Figura 1 muestra una vista aérea general del Canal Tlahuelilpan, permitiendo observar el trazado completo del canal y su entorno inmediato. La Figura 2 destaca la primera curva del canal, donde se evidencian posibles limitaciones geométricas que podrían afectar el flujo de agua. Por su parte, la Figura 3 muestra las condiciones aguas arriba, incluyendo las dos tuberías principales que abastecen el canal.

Estas imágenes son esenciales para comprender el comportamiento hidráulico del canal y visualizar las áreas que requieren mantenimiento o intervención, lo cual servirá como base para la modelación posterior y el análisis de alternativas.

Uno de los factores clave para simular el comportamiento hidráulico de canales naturales o artificiales es la rugosidad del cauce, ya que define la resistencia al flujo y condiciona la eficiencia de conducción. La rugosidad depende principalmente del tipo de material del canal, textura, así como de factores como presencia de vegetación, protuberancias o falta de mantenimiento, afectando directamente las variables hidráulicas de velocidad de flujo y tirante hidráulico. Esto implica que la rugosidad afecta la eficiencia hidráulica del canal, determinando directamente la capacidad de conducción

de una sección transversal y las pérdidas de energía por fricción.



Figura 1. Vista aérea del Canal Tlahuelilpan, Avenida Del Ejido, Tlahuelilpan, Hidalgo. Del km 0+000 al km 0+620. *Fuente propia con dron DJI Mavic Air 2s (2024).*



Figura 2. Vista aérea de la primera curva del Canal Tlahuelilpan. *Fuente propia con dron DJI Mavic Air 2s (2024).*



Figura 3. Ductos de ingreso de aportación al Canal de Tlahuelilpan. *Fuente propia (2024).*

3.3 Rugosidades

La rugosidad varía en función del material de las paredes del canal, el acabado, el grado de mantenimiento, así como la presencia de vegetación o elementos obstructivos. En particular, en canales naturales o revestidos con vegetación, la rugosidad puede incrementarse sustancialmente debido al crecimiento de especies vegetales, lo que genera una mayor fricción al paso del agua (Sandoval et al., 2020; Xia et al., 2021).

Para la representación numérica de la rugosidad, uno de los métodos más utilizados es el coeficiente de Manning (n), empleado ampliamente en la modelación de flujo en canales abiertos. Este coeficiente considera las condiciones superficiales del canal, el tipo de vegetación, las irregularidades del cauce y las características de los materiales de construcción (Fernández de Córdova et al., 2020).

Para este estudio, se consideraron los valores de coeficientes de Manning reportados por referencias técnicas, como CONAGUA (2010), Chow (1959), Sotelo Ávila (2002) y Mataix (2014), las cuales fueron comparadas para cada uno de los escenarios de restauración definidos. En la Tabla 1 se presenta un resumen comparativo entre los valores de rugosidad reportados y los coeficientes empleados en los modelos.

Tabla 1. Coeficientes de rugosidad de Manning.

Escenario	Descripción	CONAGUA	Chow	Sotelo	Mataix	Coef. empleado
Actual	Obstrucción por basura y falta de mantenimiento	0.025 - 0.035	0.018 - 0.020	0.02 - 0.025	0.022	0.022
1	Vegetación ligera. Especie: Papirio Enano	0.035 - 0.060	0.030 - 0.040	0.030 - 0.040	0.030	0.03
2	Pasto corto. Especie: Pasto Bermuda	0.022 - 0.030	0.025 - 0.035	-	0.018	0.025
3	Vegetación densa. Especie: Tule	0.050 - 0.080	0.050 - 0.070	0.050 - 0.070	0.050	0.05

3.4 Modelación hidráulica con HEC-RAS

3.4.1 Condiciones actuales del cauce

La modelación hidráulica es una herramienta clave para evaluar el comportamiento de un cauce bajo distintas condiciones de operación. En este estudio se empleó el software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), ampliamente utilizado para simular el flujo de agua en canales y ríos, tanto naturales como artificiales. Este programa ha demostrado ser eficaz en estudios de restauración fluvial, al permitir comparar escenarios y validar propuestas de intervención sostenible (Brunner, 2020; Baki et al., 2022).

En investigaciones previas se ha identificado que el río Tula enfrenta múltiples problemáticas, incluyendo inundaciones y contaminación del agua, sin que existan aún propuestas integrales que combinen herramientas de simulación con estrategias ecológicas de restauración (García Sánchez, 2019). En este contexto, la modelación hidráulica con HEC-RAS representa una oportunidad para analizar alternativas basadas en infraestructura verde y enfoques de bajo impacto. El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la funcionalidad hidráulica del canal Tlahuelilpan mediante la simulación de diferentes escenarios de restauración.

Para ello, se integró una base de datos topográfica y física del canal, levantada en campo, la cual se utilizó para construir los modelos en HEC-RAS. A partir de ello se analizó el comportamiento del flujo en condiciones actuales y bajo tres configuraciones alternativas con vegetación estabilizadora.

Esta metodología busca responder a la pregunta: *¿Qué tipo de intervención permite un mejor balance entre eficiencia hidráulica, sostenibilidad ambiental y viabilidad económica?*

Para responderla, se simularon perfiles hidráulicos y se analizaron parámetros como la velocidad del flujo, tirante y capacidad de conducción, en todos los escenarios.

3.4.2 Configuración y validación del modelo.

El Escenario Base, corresponde a las condiciones actuales que presenta el canal Tlahuelilpan y representa un cauce de geometría irregular con superficie lisa típica de terreno compactado, al cual se le asignó un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.035. La modelación hidráulica se realizó sobre un tramo de 620 metros de longitud, dividido en secciones transversales cada 20 metros, con una pendiente media del talud de 0.00124. Para evaluar el comportamiento hidráulico bajo distintos niveles de avenida, se simuló un caudal representativo de 8 m³/s, correspondiente a un periodo de retorno o escenario de diseño.

La Figura 4 muestra la vista de perfil del canal en condiciones actuales, simulando los gastos de 2, 4, 6 y 8 m³/s. Como se puede observar, la capacidad del canal varía a lo largo del cañamamiento, influida principalmente por la elevación que presentan sus márgenes derecha e izquierda. En algunos tramos, particularmente entre el cañamamiento 0+140 y 0+540, la capacidad hidráulica llega a ser inferior a 2 m³/s, debido a márgenes poco definidas y diferencias de altura que limitan el flujo contenido.

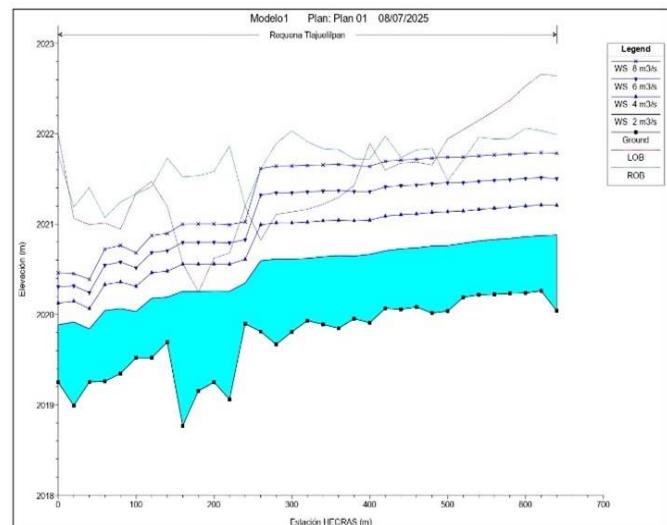


Figura 4. Perfil escenario base.

La Figura 5 presenta la vista isométrica del canal bajo condiciones actuales para un caudal de 8 m³/s, valor reportado como caudal máximo que genera desbordamientos en diversos puntos del tramo analizado.

La Figura 6 muestra con mayor detalle la sección transversal en el cañamamiento 0+380, seleccionada como representativa del canal. Para este caso, se observa que el desbordamiento ocurre en ambas márgenes, lo que confirma la la insuficiente capacidad hidráulica de la sección ante mayores gastos.

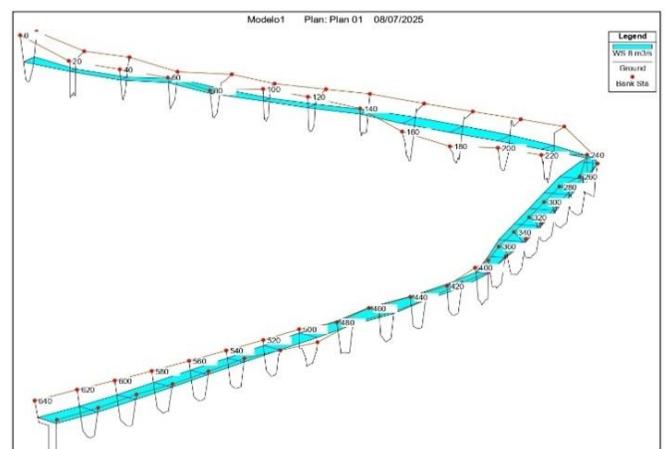


Figura 5. Perfil isométrico escenario base.

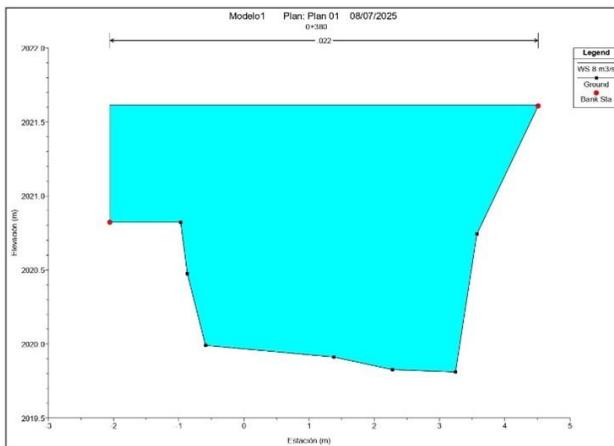


Figura 6. Sección 0+380.00 escenario base.

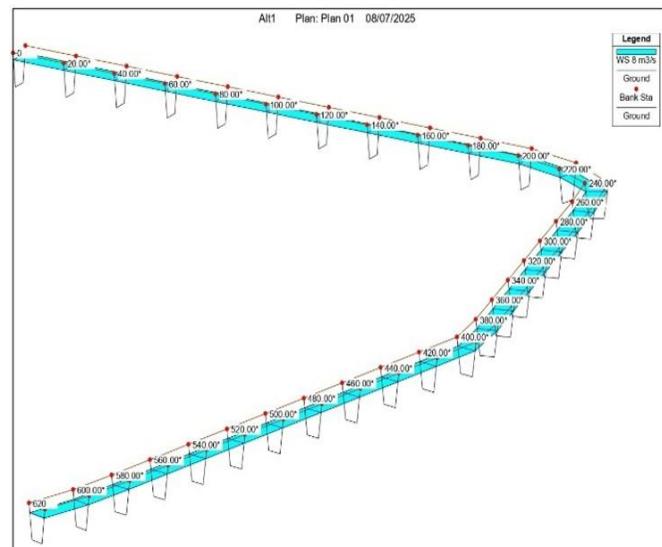


Figura 8. Perfil isométrico Escenario 1.

3.5 Diseño de escenarios de restauración con infraestructura de bajo impacto

3.5.1 Escenario 1: Bordo trapezoidal con vegetación ligera.

El Escenario 1 considera un canal trapezoidal revestido con vegetación ligera, específicamente *Cyperus papyrus* enano, representando condiciones de infraestructura verde básica.

La sección transversal del canal se definió con una base inferior de 5 metros, una superior de 8 metros y una altura de 1.5 metros, con taludes de 1.5H:1V.

Para representar la fricción generada por la cobertura vegetal, se asignó un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.030 y, al igual que en el escenario base, se modeló un tramo de 620 metros, con secciones transversales espaciadas cada 20 metros y una pendiente longitudinal de 0.00124.

El comportamiento hidráulico del canal se evaluó bajo un caudal característico: 8 m³/s, correspondientes a un escenario de escurrimiento.

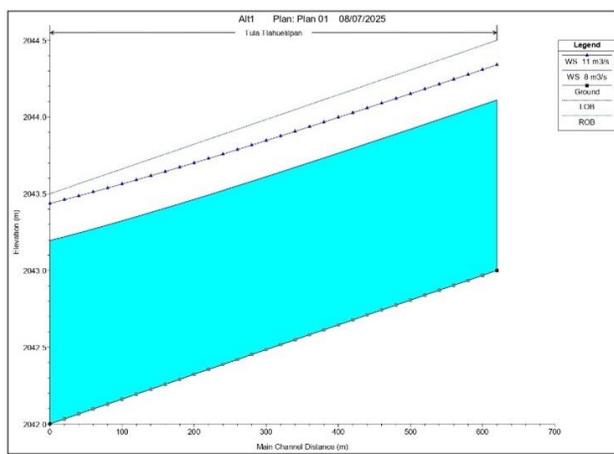


Figura 7. Perfil Escenario 1.

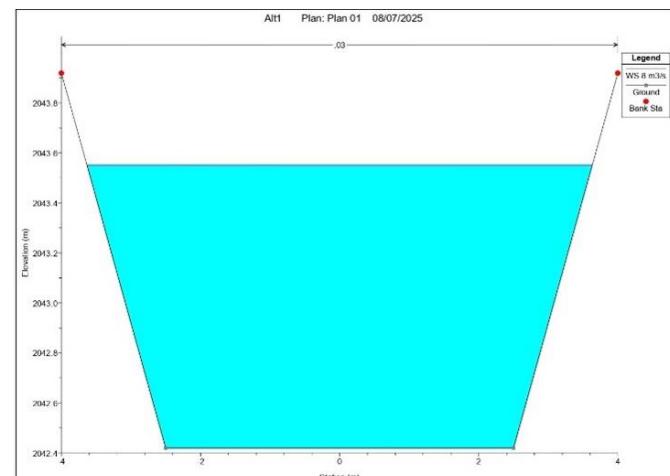


Figura 9. Sección 0+380.00 Escenario 1.

La Figura 7 muestra la vista de perfil del canal bajo las condiciones del Escenario 1, simulando los caudales de 8 m³/s (como gasto de referencia correspondiente a las condiciones actuales) y de 11 m³/s (como gasto máximo de operación).

Como puede observarse, la capacidad del canal se mantiene constante a lo largo del tramo analizado, debido a que las márgenes derecha e izquierda fueron diseñadas de forma uniforme, siguiendo la pendiente del fondo del canal.

La Figura 8 presenta una vista isométrica del canal en este mismo escenario, operando con un caudal de 8 m³/s, como gasto de referencia.

Por su parte, la Figura 9 muestra la sección transversal 0+380, seleccionada como representativa del canal, modelada para el gasto máximo de 11 m³/s.

3.5.2 Escenario 2: Bordo trapezoidal con cobertura de pasto corto

El Escenario 2 propone un canal trapezoidal revestido con pasto corto, lo cual representa una estrategia de estabilización mediante vegetación herbácea de bajo mantenimiento. Esta configuración tiene como objetivo optimizar la conducción

hidráulica al tiempo que se reduce el impacto ambiental y los costos operativos.

La geometría del canal considera una base inferior de 5.5 metros, una base superior de 7.10 metros y una altura de 1.7 metros, con taludes laterales de 1.7H:1V. Para simular la resistencia al flujo causada por la cobertura vegetal, se asignó un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025, valor comúnmente empleado para vegetación baja densa, como el pasto Bermuda (Xia et al., 2021).

El tramo modelado comprende 620 metros de longitud, dividido en secciones transversales cada 20 metros, con una pendiente longitudinal constante de 0.00124. La respuesta hidráulica del canal fue evaluada bajo un caudal representativo de 8 m³/s, lo cual permitió comparar su desempeño frente a los demás escenarios propuestos.

La Figura 10 muestra la vista de perfil del canal en condiciones del Escenario 2, para los gastos de 8 m³/s (como gasto de referencia) y 16 m³/s (como gasto máximo de operación).

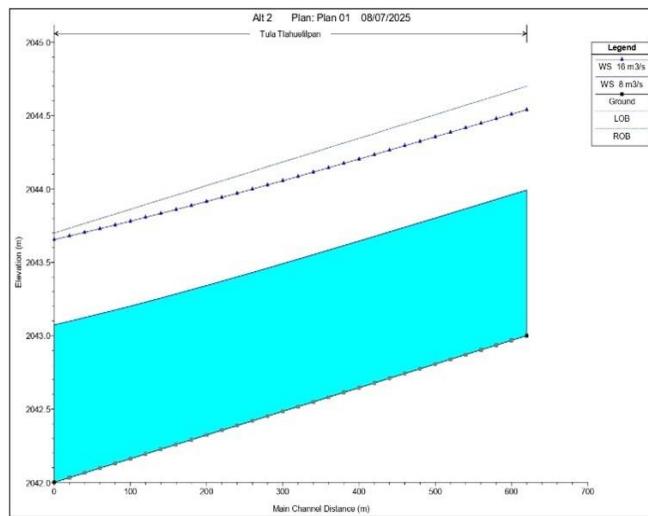
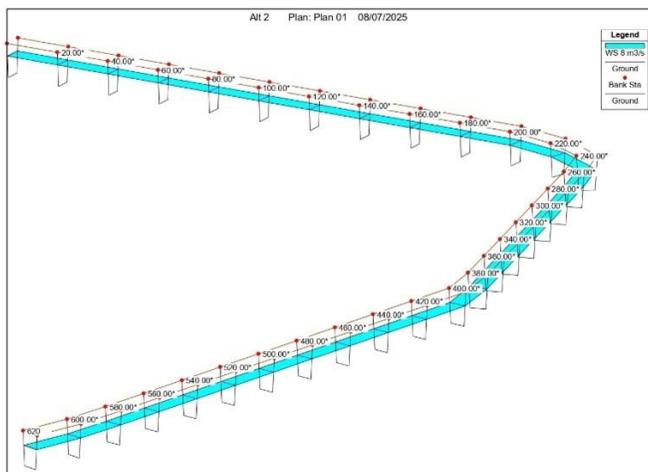


Figura 10. Perfil Escenario 2.

La Figura 11 muestra la vista isométrica del canal en condiciones actuales para el gasto de 10 m³/s, como gasto de referencia.



La Figura 14 muestra la vista isométrica del canal en condiciones actuales para el gasto de 8 m³/s, como gasto de referencia.

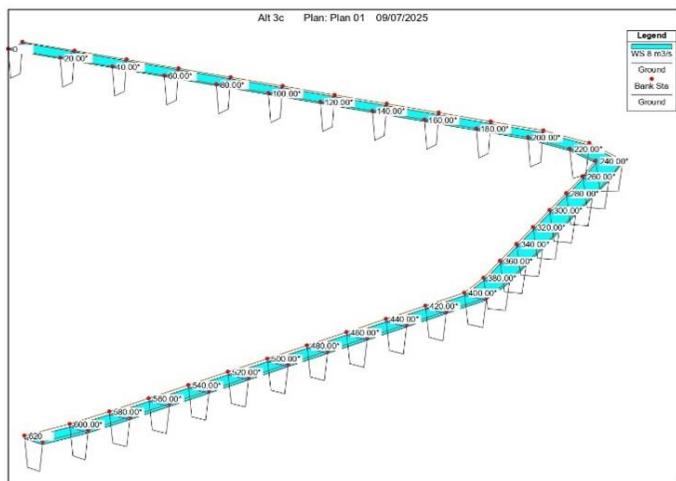


Figura 14. Perfil isométrico Escenario 3.

La Figura 15 muestra la sección 0+380, como sección representativa del canal, para el gasto máximo de 8 m³/s.

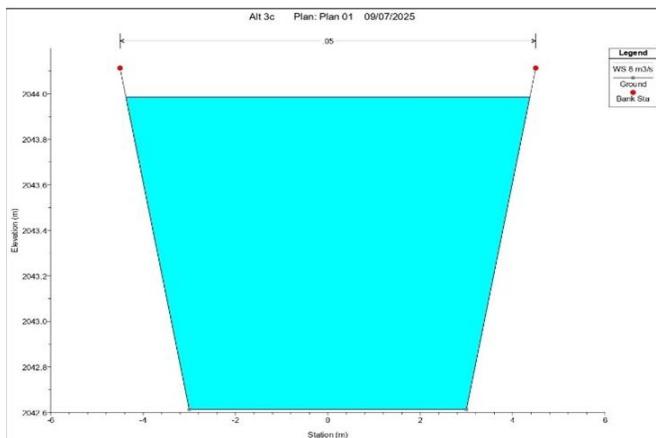


Figura 15. Sección 0+380.00 Escenario 3.

4. Resultados

4.1 Comparación de variables hidráulicas (tirante, velocidad, capacidad de conducción)

El análisis de los escenarios se basó en la comparación de variables clave como la velocidad máxima, el tirante máximo, el área hidráulica y el gasto máximo conducido. Estos parámetros permitieron evaluar tanto la capacidad hidráulica como la eficiencia del canal, entendida esta última como la aptitud del sistema para transportar caudal con mínimas pérdidas de energía y sin generar desbordamientos.

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en HEC-RAS para el caudal máximo permisible en cada escenario.

Tabla 2. Variables hidráulicas utilizadas en las simulaciones

Escenario	Q (m ³ /s)	Velocidad máxima (m/s)	Tirante máximo (m)	Área hidráulica (m ²)
Actual	2	0.9	0.7	2.22
1	8	1.17	1.12	6.86
	11	1.28	1.36	8.6
2	8	1.33	1	6.01
	16	1.64	1.56	9.78
3	8	0.79	1.38	10.11

El escenario base (actual) muestra una capacidad hidráulica limitada a menos de 2 m³/s, razón por la cual las simulaciones se restringieron a ese caudal. Aunque en ciertos tramos el canal puede alcanzar capacidades de hasta 8 m³/s, se identificó una reducción crítica entre los cadenamientos 0+140 y 0+540, siendo el punto más restrictivo el cadenamiento 0+180, donde el caudal conducido descende por debajo de los 2 m³/s. Esta condición se asocia a la pérdida de definición en los márgenes del cauce, atribuida a factores como erosión, falta de mantenimiento y obstrucciones, lo que genera inestabilidad lateral y disminuye la sección útil para el flujo.

El Escenario 3, correspondiente a la alternativa con vegetación densa, fue considerado como referencia mínima de capacidad, ya que logra conducir hasta 8 m³/s sin desbordamiento. A partir de este valor se definieron los caudales máximos de evaluación para los escenarios 1 y 2.

4.2 Efecto de la vegetación en el comportamiento hidráulico del cauce.

La incorporación de vegetación en cada escenario provocó variaciones significativas en el comportamiento hidráulico del canal. Las coberturas consideradas (pasto corto, vegetación ligera y vegetación densa) modificaron la rugosidad superficial (coeficiente de Manning), lo que incide directamente en la eficiencia de conducción.

La Figura 16 muestra la capacidad máxima de gasto alcanzada en cada alternativa, mencionadas a continuación:

- Alternativa 2 (pasto corto, n = 0.025): 27 m³/s
- Alternativa 1 (vegetación ligera, n = 0.030): 20 m³/s
- Alternativa 3 (vegetación densa, n = 0.050): 15 m³/s

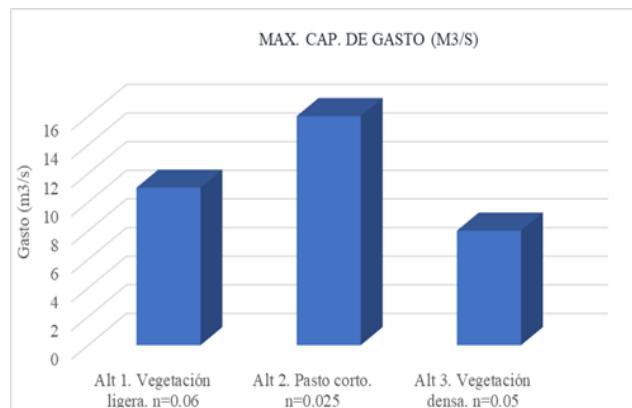


Figura 16. Gráfica de máxima capacidad de gasto por escenario

Estos resultados corroboran que una menor rugosidad superficial se asocia con mayor eficiencia hidráulica, en concordancia con estudios previos (Xia et al., 2021; Ghimire et al., 2022).

La Alternativa 2 (Escenario 2), configurada con una sección trapezoidal optimizada y cobertura de pasto corto, presentó el mejor desempeño hidráulico. En términos comparativos, su capacidad de conducción fue un 31 % superior a la de la Alternativa 1 (vegetación ligera) y un 50 % mayor que la de la Alternativa 3 (vegetación densa). Estas diferencias también se reflejan en las velocidades máximas del flujo, con incrementos del 22 % y 52 %, respectivamente, respecto a las alternativas mencionadas.

Por otro lado, la Alternativa 3 presentó la mayor área hidráulica, siendo un 15 % superior a la de la Alternativa 1 y un 3 % mayor que la de la Alternativa 2. Este comportamiento responde a la interacción entre la geometría del canal y la vegetación, donde un mayor tirante y sección húmeda compensan parcialmente el efecto de una mayor rugosidad, aunque sin lograr una eficiencia hidráulica superior.

4.3 Evaluación económica por escenario

El análisis económico de las alternativas propuestas para el diseño del canal considera las variaciones en los costos de construcción y mantenimiento, los cuales fueron evaluados en conjunto con el desempeño hidráulico, con el objetivo de identificar la opción más eficiente desde el punto de vista técnico-económico.

Para ello, se elaboró el presupuesto detallado correspondiente a la construcción del canal pluvial en el tramo comprendido entre los cadenamientos 0+000.00 y 0+620.00, considerando los siguientes conceptos generales de obra:

- Trazo y nivelación en presencia de agua, incluyendo equipo topográfico, materiales auxiliares (pintura, cal, estacas, hilo) y mano de obra.
- Desmonte, deshierbe y limpieza general del área de construcción, con retiro de vegetación acuática y residuos.
- Excavación y corte en material tipo B para la conformación de la caja del canal, utilizando maquinaria especializada.
- Despalme para conformación de bordos que delimitan la sección hidráulica.
- Carga y acarreo de materiales (arena, grava, productos de excavación) tanto para el primer kilómetro como para kilómetros subsecuentes, en diversos tipos de terreno (brecha, lomerío, terracería y pavimento).
- Suministro y colocación de cobertura vegetal con espesor de 10 cm, según cada escenario propuesto.
- Mantenimiento del canal, incluyendo limpieza, desazolve y retiro de sedimentos, maleza y residuos sólidos.

Con base en estos elementos, se obtuvo la siguiente comparativa de costos (ver Figura 17):

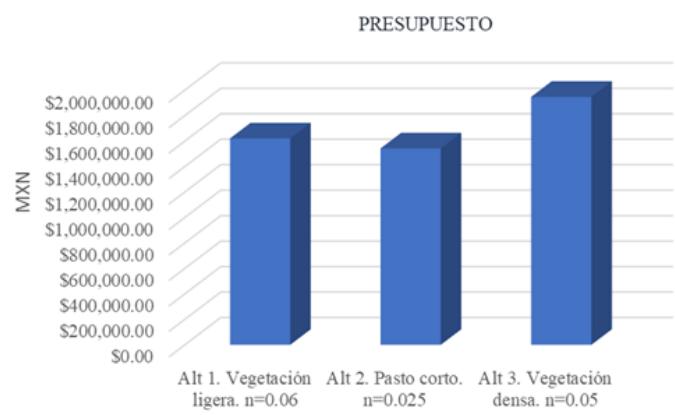


Figura 17. Gráfica de presupuesto.

Los resultados permiten concluir que la Alternativa 2 representa la solución óptima, al integrar la mayor capacidad hidráulica con el menor costo de inversión, lo que la convierte en la opción más eficiente desde una perspectiva integral. En contraste, la Alternativa 3 no solo presenta la menor capacidad de conducción, sino que además implica el mayor coste de ejecución, lo que limita su viabilidad técnica y económica.

5. Discusión

5.1. Análisis técnico y metodológico.

La modelación hidráulica con HEC-RAS se consolidó como una herramienta eficaz para simular el comportamiento del canal Tlahuelilpan ante distintas configuraciones de vegetación y geometría. El enfoque empleado compuesto por las etapas de topografía levantada con dron, perfiles transversales detallados y coeficientes de Manning basados en bibliografía especializada permitió establecer un marco técnico riguroso.

Este tipo de aplicación ha sido validado en diversos estudios recientes por su precisión en simular efectos de vegetación en canales naturales y artificiales (Ghimire et al., 2022; Brunner, 2020). Sin embargo, es importante señalar que la herramienta no considera de forma explícita la evolución temporal del canal (crecimiento vegetal, sedimentación progresiva), lo que representa una limitante en estudios a largo plazo. Además, el modelo trabaja bajo régimen permanente, lo que impide captar picos dinámicos en eventos extremos —algo que estudios como Baki et al. (2022) recomiendan complementar con modelación hidrológica no permanente.

5.2 Interpretación de variables y efectos

El comportamiento de variables clave como el tirante hidráulico, la velocidad del flujo y la capacidad de conducción reflejó una relación inversa con la rugosidad del canal. Cuanto mayor el coeficiente de Manning (n), menor la eficiencia hidráulica del sistema. Esto coincide con los hallazgos de Xia et al. (2021), quienes documentaron reducciones del 35 al 60%

en capacidad hidráulica en canales con vegetación densa no gestionada.

La geometría también fue determinante: el canal trapezoidal optimizado con vegetación baja (Alternativa 2) ofreció el mejor balance entre eficiencia y seguridad, maximizando el caudal conducido sin riesgo de desbordamiento. Esta configuración se alinea con enfoques de infraestructura verde sostenible promovidos por Muñoz et al. (2023), quienes destacan la importancia de diseños que equilibren ingeniería y ecología.

5.3 Limitaciones y sesgos del estudio

Si bien este estudio proporciona una evaluación integral de alternativas para la restauración del canal mediante modelación hidráulica y análisis económico, es necesario señalar algunos aspectos que delimitan su alcance, sin comprometer la validez de los resultados obtenidos:

- Enfoque en condiciones hidráulicas de diseño: El análisis se centró en escenarios representativos bajo régimen permanente, sin incluir variaciones estacionales ni eventos hidrológicos extremos. Sin embargo, los caudales simulados corresponden a condiciones críticas comúnmente empleadas en estudios de diseño preliminar.
- Uso de coeficientes promedio de rugosidad vegetal: La rugosidad hidráulica fue definida a partir de valores de referencia ampliamente documentados en literatura técnica. Aunque no se midió *in situ*, esta aproximación es consistente con prácticas aceptadas para estudios de prefactibilidad.
- Presupuesto estimado a nivel preliminar: Los costos considerados reflejan precios unitarios de mercado y estimaciones típicas para obras de esta naturaleza. No se incluyeron costos de mantenimiento de largo plazo, los cuales podrían ajustarse en etapas posteriores de planeación ejecutiva.
- Base topográfica puntual: La información topográfica proviene de un levantamiento único, suficiente para modelación a escala de diagnóstico. No obstante, para diseño ejecutivo, se recomienda complementar con monitoreos estacionales que permitan capturar posibles variaciones morfológicas.
- Condiciones geotécnicas no modeladas: Las propuestas geométricas, especialmente en los taludes del canal, deben ser validadas mediante estudios geotécnicos específicos. La estabilidad del terreno es un factor clave que puede influir en la viabilidad de pendientes laterales más pronunciadas.

Estas consideraciones no restan solidez a los resultados obtenidos, sino que definen el nivel de resolución del estudio y abren líneas claras para su fortalecimiento en etapas futuras de diseño e implementación.

5.4 Implicaciones para la gestión fluvial

Desde una perspectiva aplicada, los resultados ofrecen directrices claras para el diseño de canales con vegetación estabilizadora en contextos agrícolas y urbanos. La Alternativa 2 no sólo mejora la seguridad hidráulica en zonas pobladas cercanas a Tlahuelilpan, sino que facilita la distribución del agua en las planicies agrícolas de forma eficiente y sostenible.

Estas soluciones pueden ser replicadas en otras regiones del Valle de México y Cuenca del Pánuco, siempre que se realicen ajustes geomorfológicos y se consideren variables locales. A su vez, la posibilidad de integrar vegetación nativa con fines hidráulicos permite co-beneficios ecosistémicos como la reducción de islas de calor, el aumento de biodiversidad marginal y la mejora de la calidad del agua (Nardini et al., 2021).

6. Conclusiones

El presente estudio evaluó alternativas de restauración fluvial en el Canal Tlahuelilpan mediante modelación hidráulica en HEC-RAS, considerando el efecto de diferentes coberturas vegetales y configuraciones geométricas.

A través de la integración de datos de campo, simulaciones numéricas y análisis de costos, se logró determinar la opción más eficiente y viable desde los puntos de vista hidráulico, económico y ambiental.

Los principales hallazgos evidencian que el uso de vegetación herbácea de bajo mantenimiento, como el pasto corto, combinado con una geometría trapezoidal optimizada, mejora significativamente la capacidad de conducción del canal, reduce el riesgo de inundaciones y disminuye los costos de implementación. Este enfoque representa una solución de infraestructura verde replicable en entornos similares.

La originalidad del trabajo radica en la incorporación de criterios de rugosidad vegetal en la toma de decisiones hidráulicas, así como en la combinación de criterios técnicos y económicos dentro de un enfoque integral de restauración ecológica para zonas agrícolas y urbanas.

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentran la falta de análisis estacional, la omisión de crecimiento vegetativo a largo plazo y la no inclusión de condiciones hidrológicas no permanentes, que podrían modificar los resultados bajo eventos extremos.

Como líneas futuras de investigación se propone integrar herramientas de modelación hidrológica no permanente, incorporar monitoreos estacionales del canal, evaluar la eficiencia de especies vegetales nativas específicas para estabilización de márgenes, así como realizar análisis de percepción social sobre la aceptación de estas soluciones naturales.

Referencias

- C Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (2020). *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains*. U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/wsp/2339/report.pdf>
- Baki, A. B. M., Hoque, M. M., & Imteaz, M. (2022). Assessment of hydraulic performance of vegetated channels using HEC-RAS and SWMM. *Journal of Environmental Hydrology*, 30(2), 1–12. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2040294>
- Beechie, T., Sear, D., Olden, J., Pess, G., Buffington, J., Moir, H., Roni, P., & Pollock, M. (2010). Process-based principles for restoring river ecosystems. *BioScience*, 60(3), 209–222. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.3.7>

- Bernhardt, E. S., Palmer, M. A., Allan, J. D., Alexander, G., Barnas, K., Brooks, S., ... & Sudduth, E. (2005). Synthesizing U.S. river restoration efforts. *Science*, 308(5722), 636–637.
- Binns, A. D., Simões, F. J., & Gessler, D. (2022). Modeling the effect of vegetation on channel conveyance using HEC-RAS. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148(4), 04022008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001936](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001936)
- Brunner, G. W. (2020). *HEC-RAS River Analysis System: User's Manual, Version 6.0*. U.S. Army Corps of Engineers. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hec-ras/home>
- City of Chicago, Department of Transportation. (2010). *Green Alley Handbook*. Chicago: CDOT. https://www.chicago.gov/content/dam/city/depts/cdot/Green_Alley_Handbook.pdf
- CONAGUA. (2010). *Manual de Diseño de Obras Civiles - Diseño Hidráulico*. Comisión Nacional del Agua, <https://www.gob.mx/conagua/documentos/manual-de-diseno-de-obras-civiles>
- Cruz-Ruiz, J. A., González-González, A., & Martínez, L. (2020). Urban flooding and green infrastructure: A case study in Mexico City. *Sustainability*, 12(3), 1005. <https://doi.org/10.3390/su12031005>
- Fernández de Córdova, F., López, R., & Gómez, M. (2020). Influence of channel roughness on flow resistance: A case study with vegetation types. *Water*, 12(4), 1123. <https://doi.org/10.3390/w12041123>
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., ... & Dagenais, D. (2015). SUDS, LID, BMPs and more—The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525–542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- García Sánchez, F. (2019). Diagnóstico del comportamiento hidráulico del río Tula. *Revista Mexicana de Hidráulica*, 18(2), 45–56.
- Ghimire, B., Liu, Y., & Yu, M. (2022). Impact of vegetation type and distribution on hydraulic roughness and channel performance. *Journal of Hydrology*, 608, 127629. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127629>
- Hernández-Espinosa, A. (2021). Impactos socioambientales de las inundaciones del río Tula. *Boletín Hidráulico*, 90(1), 27–33.
- Julien, P. Y. (2018). *Erosion and Sedimentation* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Kondolf, G. M. (2006). River restoration and meanders. *Journal of River Restoration*, 22(3), 133–145. <https://doi.org/10.1002/rra.928>
- Mataix, C. (2014). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas* (3^a ed.). McGraw-Hill.
- Muñoz, P., Hernández, L., & Soto, J. (2023). Nature-based solutions in urban flood management: Integrating hydraulic efficiency and ecosystem services. *Water Resources Management*, 37(3), 565–581. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03489-x>
- Naiman, R. J., Decamps, H., & McClain, M. E. (2005). *Riparia: Ecology, Conservation, and Management of Streamside Communities*. Elsevier Academic Press.
- Nardini, A., Gurnell, A., & Pettitt, N. (2021). Vegetation–hydrology feedback in river restoration: Challenges and opportunities. *River Research and Applications*, 37(6), 1012–1025. <https://doi.org/10.1002/rra.3807>
- Palmer, M. A., Bernhardt, E. S., Allan, J. D., Lake, P. S., Alexander, G., Brooks, S., ... & Galat, D. L. (2005). Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology*, 42(2), 208–217. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01004.x>
- Pollen-Bankhead, N., Simon, A., & Thomas, R. (2016). The role of root-reinforcement in controlling bank erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(1), 17–27. <https://doi.org/10.1002/esp.3782>
- Richardson, D. M. (2007). Plant invasions: Merging the concepts of species invasiveness and community invasibility. *Progress in Physical Geography*, 31(4), 409–431. <https://doi.org/10.1177/0309133307081296>
- Rodríguez et al. (2020). Restauración ecológica de sistemas fluviales en América Latina. *Ecología Aplicada*, 19(2), 45–54. <https://doi.org/10.21754/ecoap.v19i2.567>
- Rodríguez-González, P. M., Ferreira, M. T., & Formigo, N. (2023). Bioengineering-based river restoration in agricultural landscapes. *Ecological Engineering*, 186, 106855. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106855>
- Salazar, J. L., & Morales, C. A. (2018). Evaluación de la vegetación ribereña como infraestructura verde. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 22(1), 39–51.
- Sandoval, J., Pérez, M., & López, J. (2020). Evaluación de rugosidad en canales revestidos y naturales. *Ingeniería Hidráulica en México*, 35(1), 21–30.
- Schulz, K., & Mart, L. (2020). Hidrosistemas resilientes en cuencas urbanas: Diagnóstico y estrategia. *Ingeniería Ambiental*, 28(3), 48–55.
- SEMARNAT. (2019). *Diagnóstico ambiental del río Tula*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/semarnat>
- Simon, A., & Collison, A. J. C. (2002). Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(5), 527–546. <https://doi.org/10.1002/esp.325>
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de Canales*. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Wohl, E., Brierley, G., Cadol, D., & Merritt, D. (2015). Building an ecogeomorphology of rivers. *Geomorphology*, 251, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.010>