

# Modelación de red hidráulica de alcantarillado sanitario. Caso de estudio en Mexicali, Baja California, México

*Hydraulic modeling of a sanitary sewer network. Case study in Mexicali, Baja California, Mexico*

Irma Lorena Villagrana-García<sup>1</sup>, Marco Antonio Montoya Alcaraz<sup>1</sup> , Carlos Salazar-Briones<sup>1</sup> , José Ruiz-Gibert<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, Baja California, México

## RESUMEN

A nivel mundial, el acceso a sistemas de alcantarillado adecuados representa un desafío, especialmente en ciudades de países en desarrollo y subdesarrollados. En este contexto, la modelación hidráulica de redes de alcantarillado se considera una herramienta clave para garantizar la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de los sistemas hidráulicos. La presente investigación tuvo como objetivo diagnosticar y proponer mejoras a la infraestructura de alcantarillado en un polígono representativo de la ciudad de Mexicali, Baja California, México, a través de simulación hidráulica. Como metodología, se recopiló información técnica sobre materiales, diámetros de tuberías, número y ubicación de pozos de visita, antigüedad de la red y vida útil estimada. Posteriormente, los datos fueron procesados y se utilizó un software especializado para simular el comportamiento del sistema. Los resultados permitieron identificar deficiencias operativas, zonas con riesgo de sobrecarga hidráulica y estimar la capacidad del sistema frente a futuras demandas. Además, se evidenció que la modelación hidráulica contribuye a optimizar recursos, reducir costos y mejorar la toma de decisiones. En conclusión, la simulación hidráulica no solo es útil en el diseño de redes, sino que también actúa como una herramienta estratégica para la gestión pública, el fortalecimiento del saneamiento y el desarrollo urbano sostenible.

**PALABRAS CLAVE:** alcantarillado sanitario; hidráulica; modelación de redes; infraestructura; optimización.

## ABSTRACT

Worldwide, access to adequate sewer systems represents a challenge, especially in cities in developing and underdeveloped countries. In this context, hydraulic modeling of sewer networks is considered a key tool to ensure the efficiency, safety, and sustainability of hydraulic systems. This research aimed to diagnose and propose improvements to the sewer infrastructure in a representative polygon of the city of Mexicali, Baja California, Mexico, through hydraulic simulation. As a methodology, technical information was collected on materials, pipe diameters, number and location of manholes, network age, and estimated service life. The data was subsequently processed, and specialized software was used to simulate system behavior. The results made it possible to identify operational deficiencies, areas at risk of hydraulic overload, and to estimate system capacity for future demands. Furthermore, it is evident that hydraulic modeling contributes to optimizing resources, reducing costs, and improving decision-making. In conclusion, hydraulic simulation is not only useful in network design but also acts as a strategic tool for public management, sanitation strengthening, and sustainable urban development.

**KEYWORDS:** sanitary sewerage; hydraulics; network modeling; infrastructure; optimization.

### Correspondencia:

**DESTINATARIO:** Marco Antonio Montoya Alcaraz  
**INSTITUCIÓN:** Universidad Autónoma de Baja California / Facultad de Ingeniería  
**DIRECCIÓN:** Blvd. Benito Juárez s/n, C. P. 21280, Mexicali, Baja California, México  
**CORREO ELECTRÓNICO:** marco.montoya@uabc.edu.mx

**Fecha de recepción:** 3 de diciembre de 2025. **Fecha de aceptación:** 3 de febrero de 2026. **Fecha de publicación:** 30 de abril de 2026.



## I. INTRODUCCIÓN

El alcantarillado sanitario constituye una infraestructura esencial en las ciudades modernas, al garantizar la gestión adecuada de las aguas residuales y la protección de la salud pública. Su implementación representa un reto clave para el desarrollo social y la mejora de la calidad de vida, además de contribuir a la preservación del medio ambiente, en concordancia con las metas de desarrollo sostenible de la ONU [1]. Por lo tanto, el alcantarillado sanitario tiene un impacto global al mejorar la salud pública, proteger el medio ambiente y favorecer la sostenibilidad urbana. Su adecuada gestión resulta decisiva para el desarrollo de las ciudades, el fortalecimiento de la economía y la prevención de enfermedades, contribuyendo directamente a la calidad de vida de la población [2].

En México, el sistema de alcantarillado sanitario enfrenta una serie de desafíos relacionados con la cobertura, el mantenimiento, la infraestructura envejecida y los problemas de financiamiento. Aunque el país ha logrado avances en la expansión de sus redes de alcantarillado en las últimas décadas, todavía existen desigualdades en el acceso al saneamiento y problemas ambientales significativos relacionados con la gestión de las aguas residuales [3].

Pese a la expansión de dicha infraestructura, muchos sistemas de alcantarillado sanitario en México presentan problemas de obsolescencia y fallas en el mantenimiento. Adicionalmente, es importante resaltar que dichas redes de alcantarillado fueron construidas hace varias décadas y han sufrido desgaste, lo que provoca frecuentes desbordamientos, contaminación de cuerpos de agua cercanos, así como problemas de salud para la población contigua a cualquier zona afectada, lo cual refleja la necesidad de analizar el problema de raíz. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es analizar el desempeño hidráulico y operativo del sistema de alcantarillado sanitario, utilizando herramientas de modelación hidráulica, con el fin de identificar y diagnosticar sus principales deficiencias en términos de capacidad de conducción, condiciones operativas y necesidades de mantenimiento.

### 1.1. CASO DE ESTUDIO

El municipio de Mexicali se encuentra situado en el noroeste del estado de Baja California, México, hace

frontera internacional al norte con Estados Unidos, especialmente con el estado de California, y al sureste colinda con el estado de Sonora, México (Figura 1). El territorio de este municipio incluye zonas urbanas amplias, así como áreas rurales y agrícolas en el valle de Mexicali.

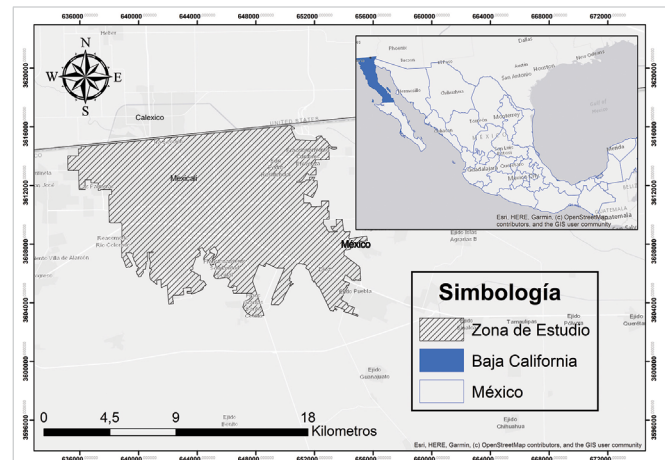


Figura 1. Ubicación de Mexicali, Baja California, México. Fuente: elaboración propia.

### 1.1.2. Problemática

El sistema de alcantarillado de Mexicali, la capital del estado de Baja California en México, es operado por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM). El total de tubería instalada para el sistema de alcantarillado sanitario en el municipio es de 3 141 993 metros lineales.

Dicho municipio enfrenta desafíos significativos en lo que respecta a la infraestructura de alcantarillado sanitario. A pesar de ser una ciudad importante y de rápido crecimiento, el sistema de alcantarillado sanitario presenta varias problemáticas relacionadas con la cobertura, el mantenimiento, la calidad del servicio y la gestión de aguas residuales [4].

### 1.1.3. Antecedentes

La Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM), como organismo operador de las redes de agua potable y alcantarillado sanitario, ha impulsado en los últimos años campañas de concientización ciudadana sobre el cuidado de la infraestructura. No obstante, la respuesta social no ha sido la esperada, lo que ha derivado en la persistente disposición inadecuada de desechos que generan obstrucciones en la red. Por tanto,

de no implementarse un plan de mantenimiento preventivo, estas prácticas pueden ocasionar afectaciones a la salud pública y acelerar el deterioro de las tuberías.

De acuerdo con el organismo operador, los cinco indicadores que más impactan en los problemas en la red del alcantarillado sanitario en el último año (2024), son los siguientes (Tabla 1):

TABLA 1  
INDICADORES ANUALES DE REPORTES DEL  
ALCANTARILLADO SANITARIO

ATENCIÓN	REPORTES
Drenaje Tapado	3329
Desazolve línea principal	177
Hundimiento	129
Reposición de tubería	27
Reposición de descargas sanitarias	457

Tal como se presenta en la Tabla 1, se han identificado una serie de indicadores clave que permiten evidenciar de manera objetiva el nivel de vulnerabilidad actual que tiene la red de alcantarillado sanitario en la ciudad. Estos indicadores han sido obtenidos a partir del análisis sistemático de los reportes ciudadanos registrados por el organismo operador mencionado, durante un periodo de evaluación comprendido entre noviembre de 2023 y noviembre de 2024.

La recopilación y procesamiento de estos reportes han permitido establecer patrones de incidencia, frecuencia y localización geográfica de los eventos relacionados con deficiencias en el sistema de alcantarillado, tales como obstrucciones, fugas, colapsos estructurales, brotes de aguas residuales y malos olores, entre otros. Estos problemas representan síntomas de fallas en el funcionamiento hidráulico, estructural o de mantenimiento de la red, y constituyen un insumo relevante para el diagnóstico técnico del estado del sistema.

Como resultado del análisis geoespacial de los datos, se identificaron las zonas urbanas con mayor concentración de reportes, lo cual evidencia una mayor recurrencia de problemáticas asociadas al sistema de alcantarillado en ciertas áreas específicas de la ciudad. En este sentido, se destacan particularmente las siguientes colonias como aquellas que presentan los índices más elevados de reportes ciudadanos (Figura 2), lo cual podría estar relacionado con factores como la antigüedad

de la infraestructura, la sobrecarga hidráulica, el crecimiento urbano no planificado o deficiencias en la operación y mantenimiento del sistema.

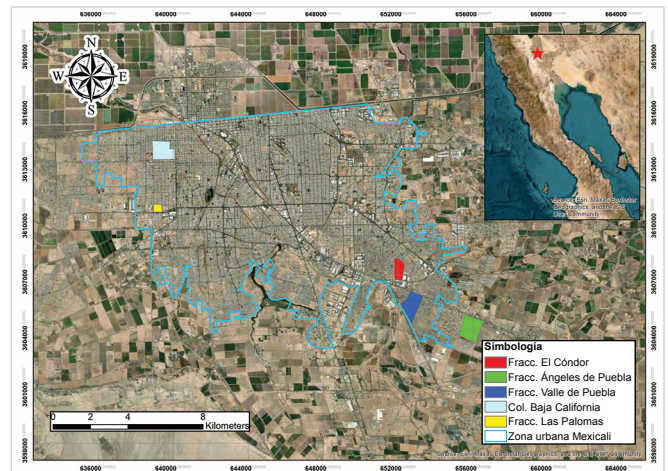


Figura 2. Colonias con mayor índice de reportes, Mexicali, Baja California., México. Fuente: elaboración propia.

A partir del análisis de la información recopilada mediante los reportes ciudadanos y su sistematización espacial y temporal, se propone la realización de una modelación hidráulica detallada en una de las zonas identificadas con mayor recurrencia de incidencias. Esta modelación tiene como objetivo principal determinar si las problemáticas operativas detectadas en la red de alcantarillado sanitario se derivan de deficiencias inherentes al diseño hidráulico (subdimensionamiento, pendientes inadecuadas o trazado ineficiente) o si obedecen a factores externos, como la carencia de mantenimiento preventivo/correctivo, obstrucciones por sólidos, o deterioro estructural por antigüedad.

Tras realizar una evaluación comparativa entre las cinco colonias con mayor índice de reportes, se seleccionó como caso de estudio el Fraccionamiento Las Palomas (Figura 3), ubicado al poniente de la ciudad de Mexicali. La decisión se fundamentó en criterios logísticos y operativos, principalmente por logística respecto al monitoreo continuo, y la recopilación de información complementaria.

Esta delimitación territorial para el análisis permite desarrollar un modelo representativo de condiciones reales de operación, aplicable también como referencia para otras zonas con características similares dentro del municipio.

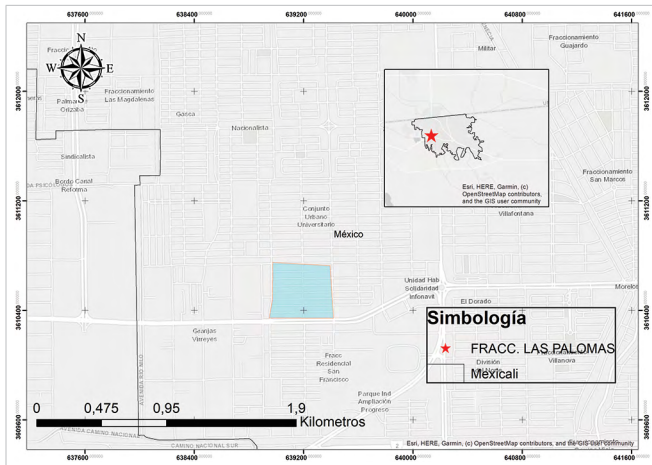


Figura 3. Área de enfoque. Fuente: elaboración propia.

El área de estudio seleccionada, correspondiente al Fraccionamiento Las Palomas, abarca una red de alcantarillado sanitario con una longitud de 5307 metros lineales de tubería, distribuido a lo largo del sistema de recolección y conducción de aguas residuales. Esta infraestructura está compuesta por distintos materiales y dimensiones que reflejan tanto la evolución constructiva del fraccionamiento como las decisiones técnicas adoptadas en diferentes etapas de su desarrollo.

En cuanto a la composición del material de las tuberías, se identifican tres tipos principales:

- PVC (Policloruro de Vinilo). Representa el 82 % del total de la red, lo cual es consistente con las tendencias modernas de urbanización, dado que este material ofrece alta resistencia química, bajo peso y facilidad de instalación.
- ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno). Abarca el 12 % de la red. Este material, aunque menos común actualmente, se ha utilizado en ciertos sectores como alternativa al PVC por su rigidez estructural y buena resistencia a impactos.
- Barro. Corresponde al 6 % del total de la infraestructura. Este material es característico de redes antiguas y, aunque cuenta con buena durabilidad, presenta mayores restricciones operativas en cuanto a juntas, asentamientos diferenciales y dificultad para mantenimiento.

Respecto a los diámetros nominales, la red presenta dos secciones principales:

- Diámetro de 8 pulgadas. Es el predominante en el sistema, con una cobertura del 97 % de la longitud total, lo que indica que la red está diseñada principalmente para servir áreas residenciales con cargas sanitarias moderadas.
- Diámetro de 12 pulgadas. Presente en tan solo el 3 % del sistema, probablemente en tramos con concentración de descargas mayores.

Este perfil técnico sugiere una red con características homogéneas en la mayor parte de su trazado, lo que facilita el modelado hidráulico. Sin embargo, la coexistencia de diferentes materiales y la presencia de tramos antiguos pueden representar puntos críticos en cuanto a comportamiento hidráulico y estructural, especialmente en situaciones de caudal elevado o ante la acumulación de sedimentos.

La caracterización detallada de estos elementos es fundamental para la construcción precisa del modelo hidráulico en el software HTP (Hidráulica Termo Plus), ya que permite asignar correctamente parámetros como la rugosidad de la tubería (coeficiente de Manning), condiciones de borde y variaciones en el comportamiento del flujo a lo largo de la red.

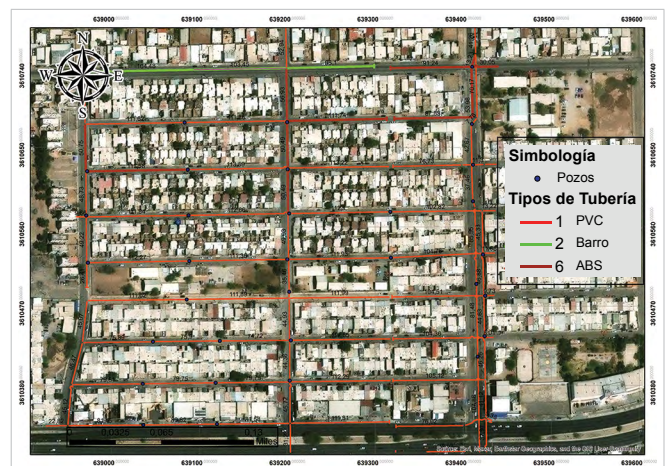


Figura 4. Representación de tubería en el área de enfoque. Fuente: elaboración propia.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo General

Analizar el desempeño hidráulico y operativo del sistema de alcantarillado sanitario en el área de estudio, mediante la aplicación de herramientas de modelación

hidráulica, con el fin de identificar y diagnosticar sus principales deficiencias en términos de capacidad de conducción, condiciones operativas y necesidades de mantenimiento.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Identificar zonas con mayores problemas en la ciudad de Mexicali, Baja California, y elegir un área representativa.
- Simular en un software una modelación hidráulica que presente el estado actual de la red de la zona de estudio.

- Identificar y evaluar las principales problemáticas y deficiencias del sistema de alcantarillado sanitario en términos de capacidad, operación y mantenimiento.

## II. METODOLOGÍA

La metodología empleada para el desarrollo del presente estudio se estructuró integrando una revisión de literatura y, posteriormente, en dos etapas principales, criterios técnicos, operativos y de análisis computacional orientado a evaluar el desempeño del sistema de alcantarillado sanitario en el área de estudio ([Tabla 2](#) y [Figuras 5, 6, 7 y 8](#)).

TABLA 2  
REVISIÓN DE LITERATURA

REF.	ENFOQUE	MÉTODO	TIPO DE INDICADORES	LIMITACIÓN
[5]	Optimización del uso de la capacidad de sistemas de alcantarillado sanitario	Modelación hidráulica+ <i>machine learning</i>	Físicos, hidráulicos, del modelo	Escala de estudio, dependencia de datos
[6]	Identificar problemas de capacidad, deterioro y funcionamiento	Recopilación de información, trabajo en campo, caracterización del sistema, modelación hidráulica, análisis de resultados	Físicos de infraestructura, hidráulicos, operativos	Información incompleta o desactualizada, alcance local
[7]	Evaluar el comportamiento del sistema, identificar zonas vulnerables	Cuantitativo y aplicado	Hidrológicos, hidráulicos, estadísticos	Falta de datos históricos
[8]	Identificar tramos críticos y fallas hidráulicas, proponer mejoras en la infraestructura existente	Recopilación de información trabajo en modelación hidráulica	Hidráulicos, físicos, análisis de escenarios	Dependencia de información, limitaciones del modelo hidráulico
[9]	Enfoque aplicado, evaluar el sistema de la red existente, analizar la capacidad hidráulica, detectar problemas operativos, proponer mejoras futuras (25 años)	Método mixto, cuantitativo, técnico y computacional	Hidráulicos y de diseño	Falta de mediciones reales, dependencia de proyecciones teóricas, tiempo insuficiente para estudios más completos
[10]	Aplicado y técnico	Método cuantitativo, recopilación de información, modelación hidráulica, análisis de resultados	Hidráulicos, hidrológicos y de diseño	Dependencia de datos secundarios. Posible falta de validación con mediciones reales
[11]	Metodología para estimar el estado estructural de tuberías no inspeccionadas	Base-de datos, clasificación del estado estructural, validación del modelo	De predicción, físicos de la red	Generalización limitada, variables no consideradas, incertidumbre en predicciones
[12]	Procedimental (guía técnica paso a paso)	Enfoque técnico-operativo y normativo	De condición física, de funcionamiento, de mantenimiento	Ausencia de modelación o análisis predictivo, dependencia de inspección visual, enfoque general
[13]	Cuantitativo, aplicado y simulación hidráulica	Técnico-hidráulico aplicado. La modelación hidráulica de una red drenaje pluvial urbana	Hidrológicos, hidráulicos (del modelo SWMM), de desempeño del sistema	Dependencia de calidad de datos, simplificaciones del modelo
[14]	Integral aplicado, uso de modelos hidráulicos, aplicación en un caso real	Cuantitativo, mixto (hidrológico-hidráulico) y basado en simulación	Hidrológicos, hidráulicos, de riesgo, económicos	Limitaciones del modelo, limitaciones operativas

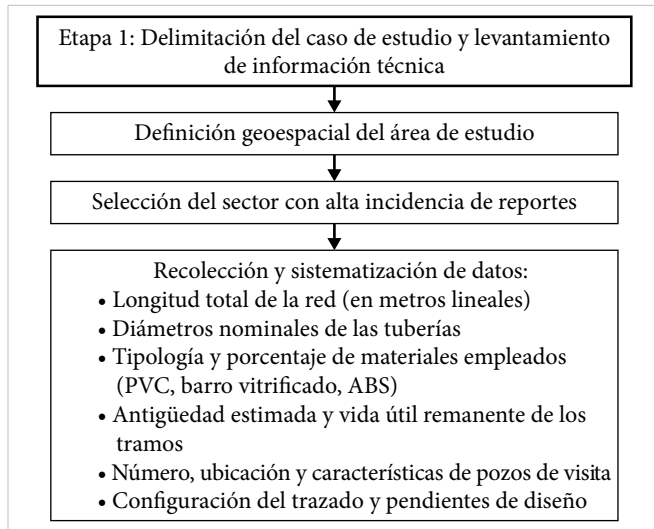


Figura 5. Etapa 1 de la metodología.

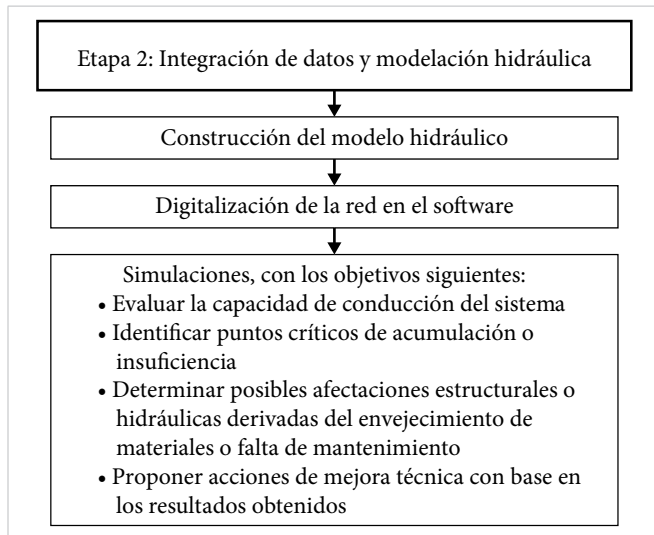


Figura 6. Etapa 2 de la metodología.

La literatura revisada confirma un avance significativo en la comprensión de los sistemas urbanos mediante herramientas analíticas y geoespaciales, sin embargo, una de las principales oportunidades para mejorar radica en la integración de datos, mediciones en campo y enfoques longitudinales, que permitan fortalecer la validez de los modelos actuales. Esta metodología permitió una evaluación integral y fundamentada del estado actual del sistema de alcantarillado sanitario, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones orientadas a su rehabilitación, optimización y gestión sostenible.

De acuerdo Llaguno *et al.* [14], los modelos hidráulicos permiten simular distintos escenarios de operación para analizar el comportamiento del sistema en términos de caudales, velocidades y niveles hidráulicos.

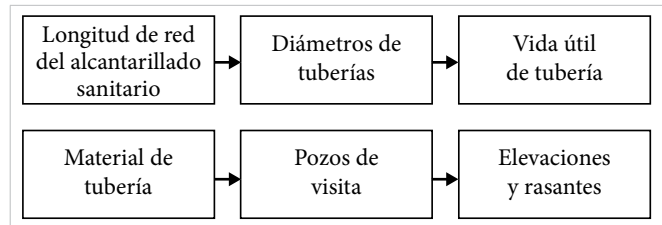


Figura 7. Datos técnicos para la modelación hidráulica.

El software utilizado en este estudio es Hidráulica Termo Plus (HTP), cuyo objetivo es facilitar el diseño, análisis y revisión de proyectos ejecutivos de alcantarillado sanitario, drenaje pluvial y agua potable bajo los criterios del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

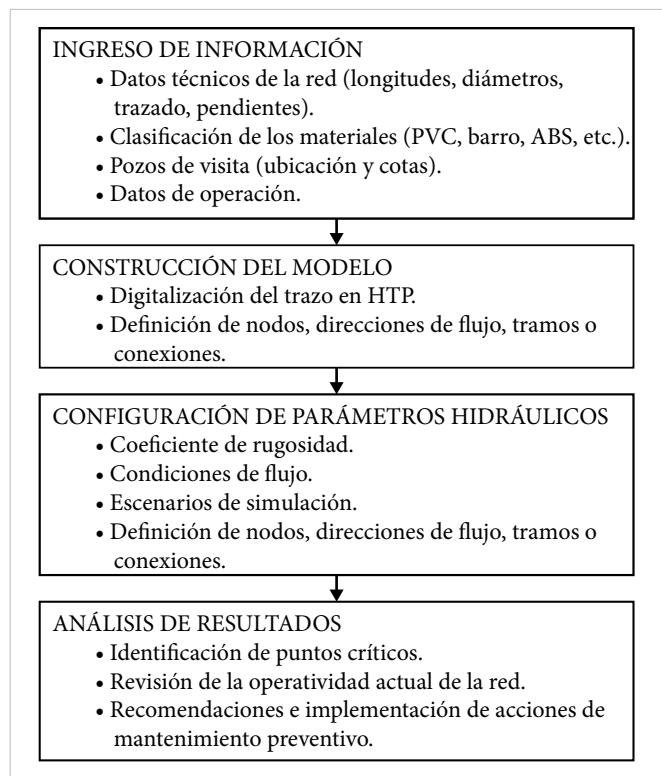


Figura 8. Actividades subsiguientes de la metodología.

Las fórmulas que incorporan a este software, son las siguientes:

Ecuación de Manning. Se utiliza para el flujo en tuberías con superficie libre (Ecuación 1) (y parcialmente lleno) para determinar velocidad, gasto, etc.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

donde  $V$  = velocidad (m/s),  $n$  = coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional),  $R$  = radio hidráulico (área

mojada / perímetro mojado) (m)° y  $S$  = pendiente del conducto (m/m).

Cálculo de diámetro requerido. Respecto al flujo permanente, tubo lleno, etc., se usaron fórmulas derivadas de Manning para encontrar un diámetro que permita conducir un caudal dado con pendiente y rugosidad dadas (Ecuación (2)), Por ejemplo:

$$D = \left(\frac{Qn}{C}\right)^{3/8} S^{-1/2} \quad (2)$$

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con base en la información técnica recopilada —que incluyó datos topográficos, geometría de la red, características físicas de las conducciones, cotas altimétricas, parámetros de diseño sanitario y datos demográficos— se procedió a la carga estructurada de dichos elementos en el módulo de Drenaje Urbano del software HTP (Hidráulica Termo Plus) [15]. Esta integración permitió la digitalización completa de la red de alcantarillado sanitario del área de estudio y la parametrización hidráulica de cada uno de sus componentes.

Durante la simulación, el sistema hidráulico fue evaluado bajo condiciones de flujo a superficie libre, lo que permitió analizar el comportamiento del sistema en diferentes condiciones de operación, en concordancia con lo señalado por Núñez, Ullauri y Barzola-Monteses [9], quienes destacan que la modelación hidráulica facilita identificar deficiencias en la capacidad de conducción y apoya la toma de decisiones para optimizar el sistema. La modelación consideró la geometría individual de los tramos (diámetro, longitud, pendiente y rugosidad) y las condiciones de carga sanitaria definidas por la población servida y las dotaciones unitarias estimadas.

Tras la ejecución de la simulación hidráulica en el módulo de Drenaje Urbano del software HTP, se procedió al análisis detallado de variables críticas de operación, tales como velocidad del flujo, radio hidráulico, porcentaje de llenado, capacidad de conducción por tramo y condiciones de desfogue en el punto de descarga. Estas variables permitieron caracterizar el comportamiento hidráulico del sistema bajo condiciones representativas de carga sanitaria (Tabla 3).

TABLA 3  
REVISIÓN DE LITERATURA

TUBO LLENO		RELACIÓN DE GASTOS		RELACIÓN VELOCIDAD		RELACIÓN TIRANTES		VELOCIDAD		TIRANTE		LLENADO DE TUBERÍA (%)
QII (l/s)	VII (m/s)	Qmín/QII	Qmáx/QII	Vmín/VII	Vmáx/VII	ymín/D	ymáx/D	Vmín (m/s)	Vmáx (m/s)	ymín (cm)	ymáx (cm)	
23.70	0.79	0.042	0.042	0.495	0.495	0.140	0.140	0.393	0.393	2.730	2.730	14.0
26.67	0.89	0.037	0.037	0.478	0.478	0.132	0.132	0.426	0.426	2.574	2.574	13.2
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
81.98	2.74	0.012	0.012	0.340	0.340	0.077	0.077	0.932	0.932	1.502	1.502	7.7
81.98	2.74	0.012	0.012	0.340	0.340	0.077	0.077	0.932	0.932	1.502	1.502	7.7
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.104	0.506	0.647	0.145	0.218	0.370	0.473	2.828	4.251	21.8
21.83	0.73	0.046	0.140	0.506	0.704	0.145	0.252	0.370	0.514	2.828	4.914	25.2
21.83	0.73	0.046	0.182	0.506	0.759	0.145	0.288	0.370	0.555	2.828	5.616	28.8
21.83	0.73	0.046	0.217	0.506	0.798	0.145	0.316	0.370	0.584	2.828	6.162	31.6
21.83	0.73	0.046	0.261	0.506	0.840	0.145	0.384	0.370	0.614	2.828	6.786	34.8
21.83	0.73	0.046	0.298	0.506	0.872	0.145	0.374	0.370	0.638	2.828	7.293	37.4
33.35	1.12	0.030	0.030	0.445	0.445	0.118	0.118	0.497	0.497	2.301	2.301	11.8
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
69.27	2.32	0.014	0.014	0.356	0.356	0.083	0.083	0.826	0.826	1.619	1.619	8.3
58.41	1.96	0.017	0.017	0.378	0.378	0.091	0.091	0.739	0.739	1.775	1.775	9.1
23.60	0.79	0.042	0.042	0.495	0.495	0.140	0.140	0.391	0.391	2.730	2.730	14.0
29.32	0.98	0.034	0.034	0.464	0.464	0.126	0.126	0.455	0.455	2.457	2.457	12.6
44.47	1.49	0.022	0.022	0.409	0.409	0.103	0.103	0.609	0.609	2.009	2.009	10.3
37.10	1.24	0.027	0.027	0.431	0.431	0.112	0.112	0.535	0.535	2.184	2.184	11.2

TABLA 3 (CONT.)  
 REVISIÓN DE LITERATURA

TUBO LLENO		RELACIÓN DE GASTOS		RELACIÓN VELOCIDAD		RELACIÓN TIRANTES		VELOCIDAD		TIRANTE		LLENADO DE TUBERÍA (%)
QII (l/s)	VII (m/s)	Qmín/QII	Qmáx/QII	Vmín/VII	Vmáx/VII	ymín/D	ymáx/D	Vmín (m/s)	Vmáx (m/s)	ymín (cm)	ymáx (cm)	
44.87	1.50	0.022	0.022	0.409	0.409	0.103	0.103	0.614	0.614	2.009	2.009	10.3
46.85	1.57	0.021	0.021	0.404	0.404	0.101	0.101	0.633	0.633	1.970	1.970	10.1
21.83	0.73	0.046	0.069	0.506	0.572	0.145	0.177	0.370	0.418	2.828	3.452	17.7
31.67	1.06	0.032	0.032	0.452	0.452	0.121	0.121	0.480	0.480	2.360	2.360	12.1
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
22.85	0.76	0.044	0.044	0.500	0.500	0.142	0.142	0.382	0.382	2.769	2.769	14.2
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
25.81	0.86	0.039	0.039	0.482	0.482	0.134	0.134	0.417	0.417	2.613	2.613	13.4
24.53	0.82	0.041	0.041	0.489	0.489	0.137	0.137	0.401	0.401	2.672	2.672	13.7
44.63	1.49	0.022	0.022	0.409	0.409	0.103	0.103	0.611	0.611	2.009	2.009	10.3
35.27	1.18	0.028	0.028	0.438	0.438	0.115	0.115	0.517	0.517	2.243	2.243	11.5
48.89	1.64	0.020	0.020	0.399	0.399	0.099	0.099	0.653	0.653	1.931	1.931	9.9
37.55	1.26	0.027	0.027	0.431	0.431	0.112	0.112	0.542	0.542	2.184	2.184	11.2
21.83	0.73	0.046	0.335	0.506	0.900	0.145	0.398	0.370	0.658	2.828	7.761	39.8
65.43	2.19	0.015	0.015	0.364	0.364	0.086	0.086	0.798	0.798	1.677	1.677	8.6
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
25.20	0.84	0.040	0.040	0.484	0.484	0.135	0.135	0.409	0.409	2.633	2.633	13.5
96.63	3.24	0.010	0.010	0.322	0.322	0.071	0.071	1.043	1.043	1.385	1.385	7.1
21.83	0.73	0.046	0.046	0.506	0.506	0.145	0.145	0.370	0.370	2.828	2.828	14.5
23.34	0.78	0.043	0.043	0.497	0.497	0.141	0.141	0.389	0.389	2.750	2.750	14.1

Proyecto: Simulación Hidráulica Fraccionamiento Las Palomas. Localidad: Mexicali, Baja California. Municipio: Mexicali. Estado: Baja California. Fecha: 19/08/2024.

Los resultados obtenidos indican que, desde una perspectiva hidráulica y de diseño, la red de alcantarillado sanitario evaluada no presenta deficiencias estructurales ni operativas significativas. Los caudales actuales, combinados con las pendientes y características geométricas de los tramos, permiten una operación estable y dentro de los márgenes aceptables definidos por la normativa técnica vigente. En ningún tramo se observó un llenado del 100 % ni condiciones de sobrecarga hidráulica o contrapendiente, lo cual confirma la suficiencia del diseño original en términos de capacidad de conducción.

Este resultado técnico permite descartar fallas asociadas al diseño hidráulico o estructural de la red como causa de las problemáticas reportadas en campo, especialmente en el contexto urbano de Mexicali, Baja California. Por lo tanto, se plantea como hipótesis principal que las afectaciones observadas (taponamientos,

brotos o retornos) derivan de una deficiente gestión de mantenimiento preventivo y correctivo, más que de un error en la concepción del sistema. En este sentido, los hallazgos obtenidos orientan a la necesidad de fortalecer las estrategias de mantenimiento operativo, incluyendo rutinas de limpieza, desazolve programado y rehabilitación de tramos con pérdida de capacidad por incrustaciones o sedimentación.

Las Figuras 9 y 10 ilustran los resultados generados por el modelo hidráulico, mostrando el comportamiento del flujo en distintos tramos de la red simulada. En ambos casos se confirma que el porcentaje de llenado se mantiene por debajo del umbral crítico, validando la hipótesis de que el sistema, desde su configuración hidráulica, cumple con los requerimientos de diseño y permite una operación eficiente bajo las condiciones actuales de carga.

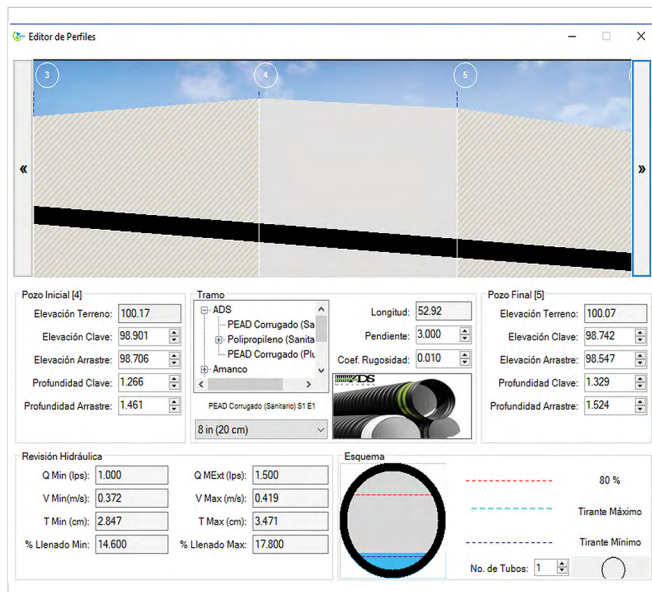


Figura 9. Modelación de red hidráulica en HTP: pozo inicial 4.

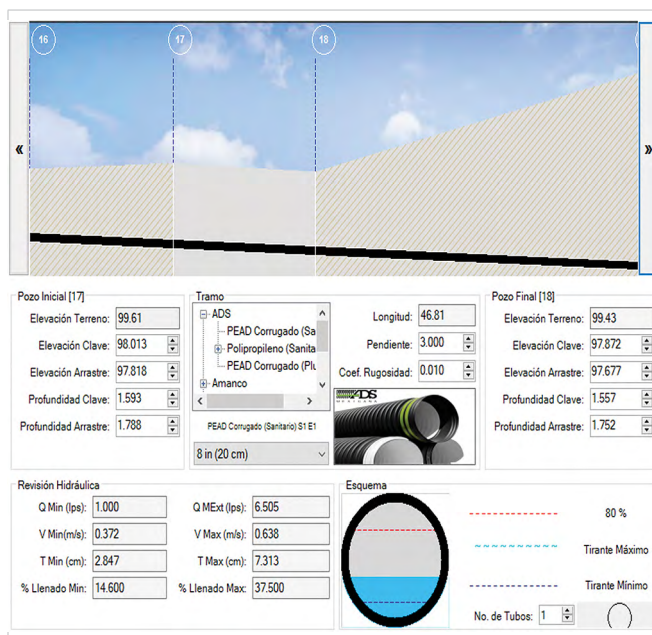


Figura 10. Modelación de red hidráulica en HTP: pozo inicial 17.

que indica que la infraestructura es adecuada para manejar las cargas actuales.

- Las pendientes y condiciones de desfogue permiten una operación buena de la red en condiciones normales.
- Dado que el diseño es adecuado, los problemas sanitarios observados en campo se deben probablemente a factores operativos, como acumulación de sedimentos, obstrucciones o fallas en el mantenimiento.

Se recomienda destinar maquinaria especializada de uso exclusivo para labores de mantenimiento preventivo y desazolve en la red de alcantarillado sanitario. También, es fundamental contar con personal técnico capacitado en operación y mantenimiento de sistemas de drenaje, el cual debe estar asignado de manera permanente a estas actividades específicas.

La implementación de estos recursos permitirá diseñar e implementar un programa sistemático de mantenimiento preventivo, con una planificación estructurada que garantice la atención progresiva de la totalidad del sistema. Bajo este enfoque, es factible que, en un horizonte de corto a mediano plazo, se logre cubrir el mantenimiento preventivo del 100 % de la red, optimizando su funcionamiento, reduciendo el costo en reparaciones o problemas agravados y, asimismo, reduciendo el riesgo de fallas operativas y prolongando la vida útil de la infraestructura sanitaria.

Además, se recomienda hacer el monitoreo continuo para la detección pronta de obstrucciones y otros signos de deterioro en los conductos, así como promover campañas ciudadanas para evitar el vertido de sólidos y grasas en el sistema que podría generar taponamientos.

## IV. CONCLUSIONES

Con base en los resultados arrojados del análisis hidráulico del sistema de alcantarillado sanitario, en la ciudad de Mexicali, Baja California, como caso de estudio, se puede establecer los siguientes puntos:

- La simulación hidráulica muestra que la red actual cumple con los parámetros técnicos establecidos y que, asimismo, no se detectaron fallas estructurales ni errores de diseño en los tramos modelados, lo

## REFERENCIAS

- [1] J. O. Castillo y A. X. Castillo, “Diseño de un sistema de aguas servidas para la comuna Nueva Vida 1, ubicada en el km 19 vía a la costa”, trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador, 2025. [En línea]. Disponible: <https://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/30877/1/UPS-GT006496.pdf>
- [2] Organización Mundial de la Salud. *Planificación de la seguridad del saneamiento: Manual para el uso y la eli-*

- minación seguros de aguas residuales, aguas grises y excretas. (2019). [En línea]. Disponible: <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549240>
- [3] CONAGUA, *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, edición 2020*. Ciudad de México: SEMARNAT, 2021. [En línea]. Disponible: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/680584/DSAPAS\\_2020.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/680584/DSAPAS_2020.pdf)
- [4] Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM), “Informe sobre inversiones y proyectos en servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento en Mexicali”, Mexicali, 2024.
- [5] D. Zhang, G. Lindholm, N. Martinez y H. Ratnaweera, H. “Exploiting capacity of sewer system using unsupervised learning algorithms combined with dimensionality reduction”, 2018, *arXiv:1811.03883*.
- [6] J. S. Soto y E. R. Polanía, “Modelación hidráulica de la red de alcantarillado del centro poblado El Cedral del municipio de Tello mediante el uso del software libre EPA SWMM, trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia, 2017. [En línea]. Disponible: <https://repository.ucc.edu.co/entities/publication/718dc43e-4bd1-46da-9d83-0020c4a846c3>
- [7] J. F. Sanjuan y K. A. Guillen, “Catastro de redes y modelación hidráulica del sistema de alcantarillado tipo sanitario del área urbana del municipio de San Martín, departamento – Cesar”, trabajo de grado, Universidad Francisco de Paula Santander, San José de Cúcuta, Colombia, 2018.
- [8] M. Cortés-Zambrano, W. E. Amaya-Tequia y D. S. Gamba-Fernández, “Modelización hidráulica de drenaje urbano. Implementación en sector, nororiental, Tunja-Boyacá”, *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, n.º 101, pp. 74-83, jul. 2020, doi: [10.17533/udea.redin.20200798](https://doi.org/10.17533/udea.redin.20200798).
- [9] J. Núñez, J. Barzola y A. Ullauri, “Diagnóstico, Modelación y Determinación de la Capacidad Hidráulica de sistemas de Alcantarillado”, *Revista Ciencia e Investigación*, vol. 3, n.º extra 3, pp. 88-101, 2018.
- [10] L. R. Carbajal y W. Córdova, “Modelación hidráulica de la red de alcantarillado y drenaje pluvial mediante el uso del modelo numérico SWMM”, tesis de licenciatura, Universidad Peruana Unión, Lima, Perú, 2021.
- [11] N. Hernández, M. A. Cañón y A. Torres, “Methodology for Classifying the Structural State of Uninspected Pipes in Sewer Networks Based on Support Vector Machines”, *Ing. Investig.*, vol. 42, n.º 2, jun. 2022, doi: [10.15446/ing.investig.v42n2.85917](https://doi.org/10.15446/ing.investig.v42n2.85917).
- [12] OPS/CEPIS. *Operación y mantenimiento de sistemas de alcantarillado sanitario en el medio rural*. (2005). [En línea]. Disponible: <https://iris.paho.org/server/api/core/bitstreams/00dd2bf0-829f-441d-9d1e-c7bd1f459ab9/content>
- [13] C. L. Herrera, “Modelación hidráulica mediante la utilización del software SWMM para una red pluvial ubicada en Fila Alta, provincia de Jaén 2021”, tesis de grado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Perú, 2023. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.usat.edu.pe/items/b0018a8e-bfbf-40a2-a3d2-a789143b3b5f>
- [14] O. J. Llaguno, J. M. Rodríguez, J. Maldonado, V. H. Alcocer y M. A. Jiménez, “Use of hydraulic models for the solution of sanitary and pluvial problems: Case study Chetumal, Quintana Roo, Mexico”, *North American Water Conference*. [En línea]. Disponible: [https://www.researchgate.net/publication/331634614\\_Water\\_for\\_a\\_rising\\_population\\_in\\_a\\_changing\\_world](https://www.researchgate.net/publication/331634614_Water_for_a_rising_population_in_a_changing_world)
- [15] Termo Plus. *Hidráulica Termoplus. Manual de Usuario. Software HTP. Drenaje Urbano*, ver. 2021 (2021). [En línea]. Disponible: [https://termoplus.mx/ingenieria/assets/Manual\\_Drenaje\\_Urbano.pdf](https://termoplus.mx/ingenieria/assets/Manual_Drenaje_Urbano.pdf)