



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

Facultad de Ingeniería Civil



Programa de Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos

**“Anteproyecto del sistema de conducción de la Presa
Cointzio a la Planta Potabilizadora Vista Bella en la
ciudad de Morelia”**

TESIS

Para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería
de los Recursos Hídricos

Presenta:

Daniel Adrian Martinez Ayala
Ingeniero Civil

Director de Tesis:

Julio César Orantes Ávalos
Doctor en Ingeniería de Procesos Biológicos y Ambientales

Codirector de Tesis:

Aldo Alberto Rangel Torres
Doctor en Ingeniería Civil Hidráulica

Morelia, Michoacán, México – Noviembre 2025

RESUMEN

Uno de los aspectos más importantes para el desarrollo de la civilización es el aprovechamiento del agua para a uso y consumo humano. Esto se hace mediante infraestructura hidráulica llamada Sistema de Abastecimiento, la cual inicia en una fuente natural de agua y comprende la captación, conducción, almacenamiento, potabilización y distribución del recurso. Dicha infraestructura requiere la implementación de labores de mantenimiento preventivo y correctivo. Sin embargo, cuando estas acciones dejan de ser suficientes es necesario plantear alternativas que mejoren las condiciones del abastecimiento.

La ciudad de Morelia cuenta con un sistema que conduce agua de la presa Cointzio a la planta potabilizadora Vista Bella. Mismo que actualmente se ve envuelto en problemáticas como fugas, obstrucciones y extracciones clandestinas, producto de su antigüedad y del crecimiento urbano. El presente trabajo analiza y evalúa alternativas para optimizar la conducción de agua, esto es, mejorar su aprovechamiento y reducir pérdidas. La evaluación incluye la infraestructura existente, tres propuestas planteadas en un estudio previo y una alternativa adicional desarrollada con base en las condiciones actuales de urbanización.

Para esto se efectuaron visitas de campo, revisión topográfica y recopilación de información necesaria. La propuesta se evaluó mediante cálculos de pérdidas por fricción utilizando la ecuación de Darcy–Weisbach y mediante modelación en software especializado, considerando presiones, velocidades, pendientes y lineamientos establecidos por la Comisión Nacional del Agua.

Los resultados muestran que no es conveniente seguir haciendo uso de la infraestructura actual y que la alternativa diseñada en este estudio presenta menor distancia, comportamiento hidráulico estable y mejores condiciones en comparación con las alternativas planteadas con anterioridad. Concluyendo así que la mejor opción para el aprovechamiento del agua de la presa es la implementación de un nuevo sistema de conducción.

Palabras clave: Agua potable, sistemas de abastecimiento, tuberías a presión, sifón invertido, pérdidas por fricción, modelación hidráulica.

ABSTRACT

One of the most important aspects for the development of civilization is the use of water for human consumption. This is achieved through hydraulic infrastructure called the Water Supply System, which begins at a natural water source and includes the collection, conveyance, storage, treatment, and distribution of the resource. This infrastructure requires the implementation of preventive and corrective maintenance. However, when these actions are no longer sufficient, it is necessary to propose alternatives that improve supply conditions.

The city of Morelia has a system that conveys water from the Cointzio Dam to the Vista Bella water treatment plant. This system is currently plagued by problems such as leaks, blockages, and illegal water withdrawals, resulting from its age and urban growth. This paper analyzes and evaluates alternatives to optimize water conveyance, that is, to improve its use and reduce losses. The evaluation includes the existing infrastructure, three proposals presented in a previous study, and an additional alternative developed based on current urbanization conditions.

For this purpose, field visits, topographic surveys, and the collection of necessary information were carried out. The proposal was evaluated through friction loss calculations using the Darcy-Weisbach equation and through modeling in specialized software, considering pressures, velocities, slopes, and guidelines established by the National Water Commission.

The results show that it is not advisable to continue using the current infrastructure and that the alternative designed in this study presents a shorter distance, stable hydraulic behavior, and better conditions compared to the previously proposed alternatives. Therefore, it is concluded that the best option for utilizing the water from the dam is the implementation of a new conveyance system.

Keywords: Drinking water, supply systems, pressurized pipes, inverted siphon, friction losses, hydraulic modeling.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2.1	Aumento poblacional.....	3
2.2	Extracciones clandestinas	3
2.3	Causas de deterioro natural.....	4
3	JUSTIFICACIÓN.....	5
4	OBJETIVOS	6
4.1	Objetivo general	6
4.2	Objetivos específicos	6
5	DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	7
6	ANTECEDENTES.....	10
6.1	Historia del sistema de abastecimiento de agua en Morelia.....	10
6.2	Situación actual del sistema de conducción en Morelia	11
6.3	Estudios previos y alternativas analizadas	12
7	MARCO TEÓRICO.....	14
7.1	Abastecimiento de agua.....	14
7.2	Sistema de conducción	14
7.3	Canales	14
7.3.1	<i>Flujo Permanente</i>	15
7.3.2	<i>Flujo Uniforme</i>	18
7.3.3	<i>Flujo Gradualmente Variado (FGV)</i>	18
7.4	Tuberías	20
7.4.1	<i>Métodos de cálculo de pérdidas (Darcy-Weisbach)</i>	21
7.4.2	<i>Materiales de conducción: PVC, PEAD, hierro dúctil</i>	22
7.5	Software de modelación hidráulica.	25
7.5.1	<i>HEC-RAS</i>	26
7.5.2	<i>SWMM</i>	27
7.5.3	<i>EPANET</i>	28
8	METODOLOGÍA	30
8.1	Evaluación del sistema actual.....	30
8.2	Revisión de las propuestas de S.D.S.....	34
8.3	Propuesta de conducción presurizada.....	35
8.3.1	<i>Determinación de los diámetros máximo y mínimo</i>	36
8.3.2	<i>Obtención del Perfil de Elevaciones Topográficas</i>	36
8.4	Escenarios de Modelación	36

8.4.1	<i>Generalidades</i>	36
8.4.2	<i>Cálculo de Pérdidas por Fricción</i>	37
8.4.3	<i>Determinación del Gradiente Piezométrico</i>	38
8.4.4	<i>Verificación con EPANET</i>	38
9	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
9.1	Evaluación del sistema actual.....	40
9.2	Revisión de las propuestas de S.D.S.....	49
9.3	Propuesta de conducción presurizada.....	50
9.3.1	<i>Diámetros máximo y mínimo</i>	51
9.3.2	<i>Perfil de Elevaciones Topográficas</i>	52
9.4	Escenarios de Modelación.....	53
9.4.1	<i>Escenario 1 o base: NAA</i>	53
9.4.2	<i>Escenario 2: NAMINO</i>	61
9.4.3	<i>Escenario 3: Máxima sequía histórica</i>	63
9.4.4	<i>Escenario 4: NAMO</i>	66
9.4.5	<i>Escenario 5: Máxima carga estática - NAA</i>	68
9.4.6	<i>Escenario 6: Máxima carga estática - NAMO</i>	70
9.5	Discusión de resultados	72
10	CONCLUSIONES	74
11	RECOMENDACIONES	75
12	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
13	APÉNDICE A: CONDICIÓN EXTERNA DE LOS POZOS DE VISITA	79
14	APÉNDICE B: PLANOS DE LAS PROPUESTAS DE S.D.S.	85

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Asentamientos humanos sobre la línea de conducción.....	4
Figura 2.- Macrolocalización de la ciudad de Morelia, Michoacán.	7
Figura 3.- Pozos de extracción de agua bajo la supervisión de OOAPAS en Morelia, Michoacán.	8
Figura 4.- Ubicación de la Presa Cointzio y Manantial Mintzita al suroeste de Morelia.....	9
Figura 5.- Canal de conducción de la presa Cointzio a la Planta Potabilizadora Vista Bella	9
Figura 6.- Reinterpretación de la traza urbana de Valladolid en 1579 por el Arq. Enrique de Cervantes S.	10
Figura 7.- Representación de secciones transversales en canales (adaptado de Gardea, 1999)	15
Figura 8.- Esquematzación del flujo en canales abiertos.	17
Figura 9.- Esquematzación del flujo en tuberías.	21
Figura 10.- Sistema de unión "campana-espiga" en tuberías de PVC.....	23
Figura 11.- Diferentes diámetros del material plástico PEAD.	24
Figura 12.- Tubería bridada de hierro dúctil.....	25
Figura 13.- Ejemplo de una modelación en HEC-RAS.....	27
Figura 14.- Ejemplo de una modelación en SWMM.....	28
Figura 15.- Ejemplo de una modelación en EPANET.....	29
Figura 16.- MDE de INEGI que abarcan el canal de conducción actual.....	31
Figura 17.- Medición de tirante en el canal de conducción. Elaboró: EIC. Mario Castillo García (UMSNH).	32
Figura 18.- Medición de la velocidad en el canal de conducción. Elaboró: EIC. Mario Castillo García (UMSNH).	33
Figura 19.- Caso no deseado en una línea de conducción a gravedad.....	35
Figura 20.- Ejemplo de algunos pozos de visita común en el canal de conducción.....	40
Figura 21.- Pozos de visita de difícil acceso.	41
Figura 22.- Pozos y zonas del canal con extracciones clandestinas.	41
Figura 23.- Condición externa de los pozos de visita del canal de conducción actual.....	42
Figura 24.- Clasificación de las problemáticas del canal de Cointzio.....	43
Figura 25.- Limpieza y condiciones internas del pozo 9 al 20.	43
Figura 26.- Derrumbe localizado entre los pozos 18 y 19.....	44
Figura 27.- Limpieza y condiciones internas del pozo 27 al 32 y pozo 35	44
Figura 28.- Limpieza y condiciones internas del pozo 46 al 48.	45
Figura 29.- Margen topográfico para preservar las condiciones de funcionamiento del sistema actual de conducción.	46
Figura 30.- Estructura de la modelación del canal de Cointzio en HEC-RAS.....	48
Figura 31.- Estructura de la modelación del canal de Cointzio en SWMM.....	48
Figura 32.- Perfil hidráulico del canal de conducción en HEC-RAS.....	49
Figura 33.- Perfil hidráulico del canal de conducción en SWMM.....	49
Figura 34.- Propuestas diseñadas por la empresa Servicios, Desarrollos y Suministros (S.D.S.)	50

Figura 35.- Propuesta de trazo para el nuevo sistema de conducción de la presa Cointzio a la planta Vista Bella.	51
Figura 36.- Ejemplificación gráfica de los niveles de operación de la Presa Cointzio.	52
Figura 37.- Perfil topográfico del terreno natural donde se ubica el trazo de la nueva propuesta.....	53
Figura 38.- Perfil del proyecto, carga disponible y gradiente piezométrico.....	57
Figura 39.- Resultados de Presión y Velocidad proporcionados por la modelación en EPANET.....	57
Figura 40.- Modelo del proyecto en EPANET con vista en planta y seccionado en tres partes.	58
Figura 41.- Perfil topográfico de los nodos en la Modelación de EPANET con vista en planta.	58
Figura 42.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 1 (parte 1).	59
Figura 43.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 1 (parte 2).	59
Figura 44.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 1 (parte 3).	60
Figura 45.- Tabla de resultados del escenario 1 en EPANET: Caudales y velocidades.....	60
Figura 46.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 2 (parte 1).	62
Figura 47.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 2 (parte 2).	62
Figura 48.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 2 (parte 3).	63
Figura 49.- Tabla de resultados del escenario 2 en EPANET: Caudales y velocidades.....	63
Figura 50.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 3 (parte 1).	64
Figura 51.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 3 (parte 2).	64
Figura 52.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 3 (parte 3).	65
Figura 53.- Tabla de resultados del escenario 3 en EPANET: Caudales y velocidades.....	65
Figura 54.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 4 (parte 1).	66
Figura 55.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 4 (parte 2).	66
Figura 56.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 4 (parte 3).	67
Figura 57.- Tabla de resultados del escenario 4 en EPANET: Caudales y velocidades.....	67
Figura 58.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 5 (parte 1).	68
Figura 59.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 5 (parte 2).	68
Figura 60.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 5 (parte 3).	69
Figura 61.- Tabla de resultados del escenario 5 en EPANET: Caudales y velocidades.....	69
Figura 62.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 6 (parte 1).	70
Figura 63.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 6 (parte 2).	70
Figura 64.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 6 (parte 3).	71
Figura 65.- Tabla de resultados del escenario 6 en EPANET: Caudales y velocidades.....	71
Figura 66.- Condición externa de pozo 1 al 8 del canal de conducción	79
Figura 67.- Condición externa de pozo 9 al 30 del canal de conducción	80
Figura 68.- Condición externa de pozo 31 al 39 del canal de conducción	81
Figura 69.- Condición externa de pozo 47 al 54 del canal de conducción	82
Figura 70.- Condición externa de pozo 55 al 67 del canal de conducción	83
Figura 71.- Condición externa de pozo 71 al 82 del canal de conducción	84
Figura 72.- S.D.S. - Plano original de Propuesta No. 1.....	85

Figura 73.- S.D.S. - Plano original de Propuesta No. 2.....	86
Figura 74.- S.D.S. - Plano original de Propuesta No. 3.....	87



1 INTRODUCCIÓN

En todo asentamiento humano, el agua potable es de carácter prioritario para la supervivencia y es uno de los principales indicadores de la calidad de vida de los habitantes. Así mismo, el derecho al agua potable y el saneamiento es reconocido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) como un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos (ONU, 2010). En México esos derechos también fueron consagrados en el Artículo 4° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos desde 2012.

A nivel global, el agua dulce disponible está dispuesta en glaciares y nieve (68.9%); agua subterránea (30.8%) y superficial (0.3%) en forma de lagos, lagunas, ríos y humedales (Denzin et al., 2017). En México, las precipitaciones anuales alcanzan 1,500 km³, de los cuales 72.5% se evapora, 21.2% escurre por ríos, y 6.3% recarga los 653 acuíferos existentes. Actualmente, 40% del agua se dispone en el subsuelo y 60% proviene de las aguas superficiales (Instituto Mexicano para la Competitividad [IMCO], 2023).

Para su aprovechamiento se hace uso de sistemas de abastecimiento que tienen por objetivo desplazar el agua desde su fuente hasta el consumidor. Representa una de las infraestructuras básicas públicas más importantes y costosas; su objetivo principal es garantizar que este valioso recurso opere con la máxima eficiencia y el mínimo costo durante toda su vida útil de diseño (Haider et al., 2014). Una parte de esta infraestructura es el sistema de conducción, encargado de transportar el recurso hídrico desde su origen hasta un almacenamiento para su potabilización (National Research Council, 2006).

El acceso al agua potable es un reto global que afecta a millones de personas. Cerca de 2,200 millones de personas en el mundo carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de manera segura (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2023). Este desafío se agrava en regiones en desarrollo, donde la inversión en infraestructura hídrica es insuficiente, resultando en redes de distribución ineficaces y deterioradas.

A pesar de los avances significativos en la detección de fugas desde la década de 1990, la mayoría de los sistemas de abastecimiento en todo el mundo continúan experimentando altos niveles de pérdidas de agua, la mayoría de las cuales están casi seguramente por encima de su nivel económico. La infraestructura se deteriora naturalmente con el tiempo y, debido a los altos costos involucrados, en la mayoría de los casos, no se renueva ni reemplaza a un ritmo que pueda producir mejoras rápidas y significativas en las pérdidas reales (Lambert, 2002).

En México y en Morelia particularmente la situación no es ajena a estos problemas globales. Aunque el país ha hecho avances en la cobertura de agua potable, como el acceso a la misma de aproximadamente 96% de la población en 2020, no es suficiente debido a que también se detalló en un informe realizado por JMP que solo el 43% de habitantes (55,4 millones de personas) goza de ella de manera segura (Fernández et al., 2023). Además, gran parte de la infraestructura hídrica nacional se encuentra en mal estado debido a la antigüedad de las redes de distribución y la falta de mantenimiento adecuado.



En el estado de Michoacán, y específicamente en la ciudad de Morelia, estos problemas de deterioro de la infraestructura son evidentes. La red de conducción de agua potable de la ciudad ha alcanzado niveles críticos de deterioro que comprometen el suministro de agua para sus habitantes. A medida que la población crece y la demanda de agua aumenta, la necesidad de modernizar y reemplazar las líneas de conducción se vuelve urgente.



2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se estima que las pérdidas promedio en el sistema de agua potable en las ciudades mexicanas son aproximadamente del 36.4%, incluyendo cualquier punto en el sistema, como el interior de los hogares de los usuarios, conexiones domiciliarias, tanques de almacenamiento, redes de distribución y conducciones de agua (Ochoa Alejo & Bourguett Ortiz, 2001). Un caso particular es el sistema Cutzamala, un complejo de agua que abastece las áreas metropolitanas de Toluca y el Valle de México, y que presenta pérdidas estimadas por fugas del 45% (Comisión Nacional del Agua, 2015b).

El sistema de conducción de la presa Cointzio a la planta potabilizadora Vista Bella en su momento fue un hito de la ingeniería hidráulica por las condiciones que presentaba. Sin embargo, después de más de 70 años en funcionamiento (Ávila García, 2007), el sistema enfrenta problemas significativos debido al desgaste, infiltración, intrusión de raíces y otros factores antropogénicos, como asentamientos sobre el trayecto del canal y extracciones ilegales. Estas condiciones provocan pérdidas de agua y afectan la eficiencia hidráulica del sistema, afectando aproximadamente al 25% de los usuarios del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS) que dependen de esta fuente de abastecimiento. Esto último resalta la necesidad urgente de mejorar la infraestructura de conducción y asegurar la preservación sostenible de los recursos hídricos.

2.1 Aumento poblacional

El aumento poblacional en la región, ocasionó como resultado esperado, un igual aumento en la demanda del recurso de agua potable; lo que influye en cuestiones de logística para su distribución, esto es: la generación de infraestructura nueva para la distribución del recurso, y el mantenimiento y/o rehabilitación de la infraestructura existente. Lo anterior debido a que el agua disponible debe suministrarse a una mayor población.

Una solución de carácter temporal a la demanda antes mencionada, es el suministro intermitente, tanto a los nuevos asentamientos como a colonias más antiguas (mismas que antes tenían servicio las 24 horas), sin embargo, este tipo de solución terminará por ser insuficiente y quedará obsoleta, ante una población y demanda que continúan en crecimiento.

2.2 Extracciones clandestinas

Por otro lado, la invasión debida a la construcción de viviendas en las zonas aledañas al canal, facilita las condiciones para una extracción clandestina del recurso hídrico (Figura 1). Esto repercute en una reducción considerable del volumen de agua que llega a la planta “Vista Bella”, y el tomar acciones al respecto trae consigo la posibilidad de acrecentar problemáticas sociales graves con la población local, que utiliza el agua para el desarrollo de sus actividades. “El derecho humano al agua es el derecho de todos a disponer de agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal y doméstico” (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2002).

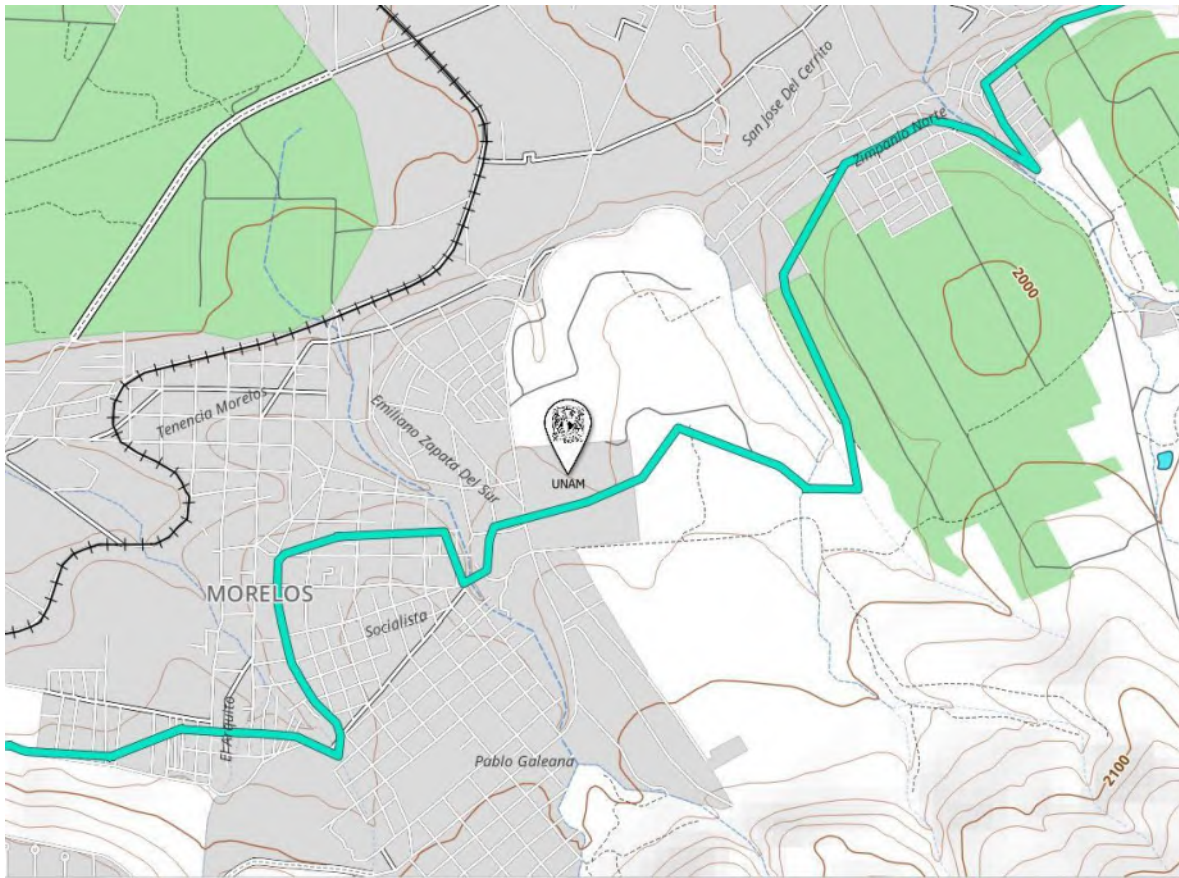


Figura 1.- Asentamientos humanos sobre la línea de conducción.

2.3 Causas de deterioro natural

Por otra parte, se tienen las causas naturales de deterioro de la estructura del sistema de conducción. El canal que transporta agua de la presa Cointzio a la Planta Potabilizadora Vista Bella fue construido alrededor del año 1948, es decir, tiene más de 70 años de estar en operación y por ende se tiene fugas e infiltraciones producto de la erosión.

También se presentan introducción de sedimento por aberturas existentes en las tapaderas de los pozos de visita. En otras secciones, hay raíces que han penetrado las paredes de concreto y se han alojado dentro del ducto. Lo que conlleva a una reducción significativa del área hidráulica por la que transita el agua.

Lo anterior acarrea la necesidad de un mantenimiento cada vez más frecuente. Actualmente las labores de limpieza se hacen cada año, y para efectuar el proceso de desazolve se debe interrumpir el suministro de agua, afectando de forma recurrente el suministro.

Por todas estas razones, es necesario replantear una línea de conducción de la fuente de abastecimiento a la Planta Potabilizadora que permita hacer más eficiente la conducción desde el punto de vista hidráulico, resolver los problemas socioterritoriales, tanto por las irregularidades en el derecho de vía de la línea de la conducción, como por las tomas clandestinas a lo largo de la línea de conducción.



3 JUSTIFICACIÓN

Un estudio realizado en Polonia concluyó que las intervenciones regulares por parte de las empresas han contribuido a reducir las pérdidas de agua. Una de estas intervenciones es el reemplazo sistemático de tuberías de acero y hierro fundido envejecidas, las cuales frecuentemente generan numerosas fugas que, a menudo, son difíciles de detectar, resultando en pérdidas significativas de agua (Ociepa et al., 2019).

Este tipo de soluciones puede ser complejo, particularmente en países en desarrollo como México. Sin embargo, la escasez de agua es un problema cada vez más urgente, y la necesidad de implementar esfuerzos para abordar esta situación crece cada año. Es esencial iniciar actividades en ubicaciones estratégicas donde ocurren las mayores pérdidas de recursos hídricos para enfrentar este desafío creciente.

En definitiva, el sistema de conducción de la presa Cointzio ya no presenta las condiciones óptimas de funcionamiento incluso con su mantenimiento anual, que se traduce en pérdidas de este vital recurso además de una mayor destinación de recursos para que continúe en operación.

Partiendo de lo anterior, surge la necesidad de llevar a cabo una rehabilitación y/o propuesta alterna de sección de conducción para la línea de estudio, que solucione los problemas antes mencionados.



4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Elaborar un anteproyecto del sistema de conducción de la presa Cointzio a la planta potabilizadora Vista Bella en la ciudad de Morelia.

4.2 Objetivos específicos

- Caracterización general de la topografía, deterioro actual de la zona de estudio.
- Análisis del sistema actual de conducción.
- Evaluar la factibilidad de la rehabilitación del sistema existente.
- Proponer y evaluar opciones de optimización para mejorar la eficiencia en la conducción de agua desde la presa Cointzio hasta la planta potabilizadora Vista Bella.
- Analizar las ventajas y desventajas de su rehabilitación o de la implementación de un nuevo sistema de conducción.

5 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La ciudad de Morelia en Michoacán (Figura 2), como capital del estado, representa una zona con una importante confluencia poblacional. La ciudad albergaba cerca de 743,275 habitantes; y tomando en cuenta tenencias y localidades que han sido integradas en su mancha urbana, se registran cerca de 849,053 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020).



Figura 2.- Macrolocalización de la ciudad de Morelia, Michoacán.

Para el suministro de agua potable a su población, se cuenta con dos diferentes tipos de fuentes de abastecimiento, estas son:

Fuentes subterráneas: El acuífero es explotado mediante una serie de pozos profundos (Figura 3), el *Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (OOAPAS) de Morelia, cuenta con aproximadamente 120 pozos distribuidos por la ciudad y actualmente producen en conjunto un estimado de $Q = 1.1 \text{ m}^3/\text{s}$.

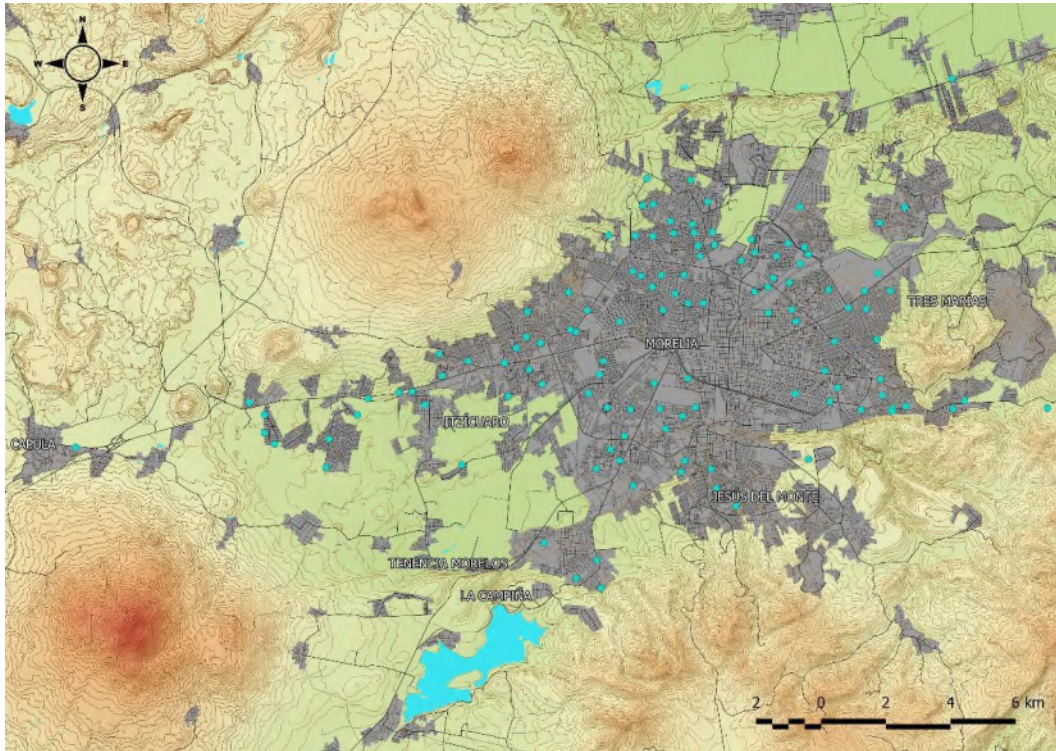


Figura 3.- Pozos de extracción de agua bajo la supervisión de OOAPAS en Morelia, Michoacán.

Fuentes superficiales: El manantial de La Mintzita y la presa de Cointzio se consideran como las dos principales fuentes de este tipo (Figura 4). El primero genera aproximadamente $Q = 1.2 \text{ m}^3/\text{s}$, de los cuales la empresa papelera Scribe tiene una concesión de 400 L/s, dejando un promedio de 800 L/s disponible para uso público. La segunda fuente, proveniente de la presa, ofrece un caudal estimado de 620 L/s (Comisión Nacional del Agua, 2024). Esto significa un aporte del 23.25 % del suministro requerido por la población según el Instituto Municipal de Planeación de Morelia (2021).

El agua es dispuesta en la planta potabilizadora “Vista Bella” para su tratamiento y distribución. El sistema que conecta la presa con la planta potabilizadora es un canal de concreto reforzado cuya sección es cerrada de tipo rectangular, conduce el agua en lámina libre por acción de la gravedad (Figura 5). Cuenta con 85 pozos de visita para labores de limpieza, distribuidos a lo largo de sus aproximados 13.6 km de extensión.

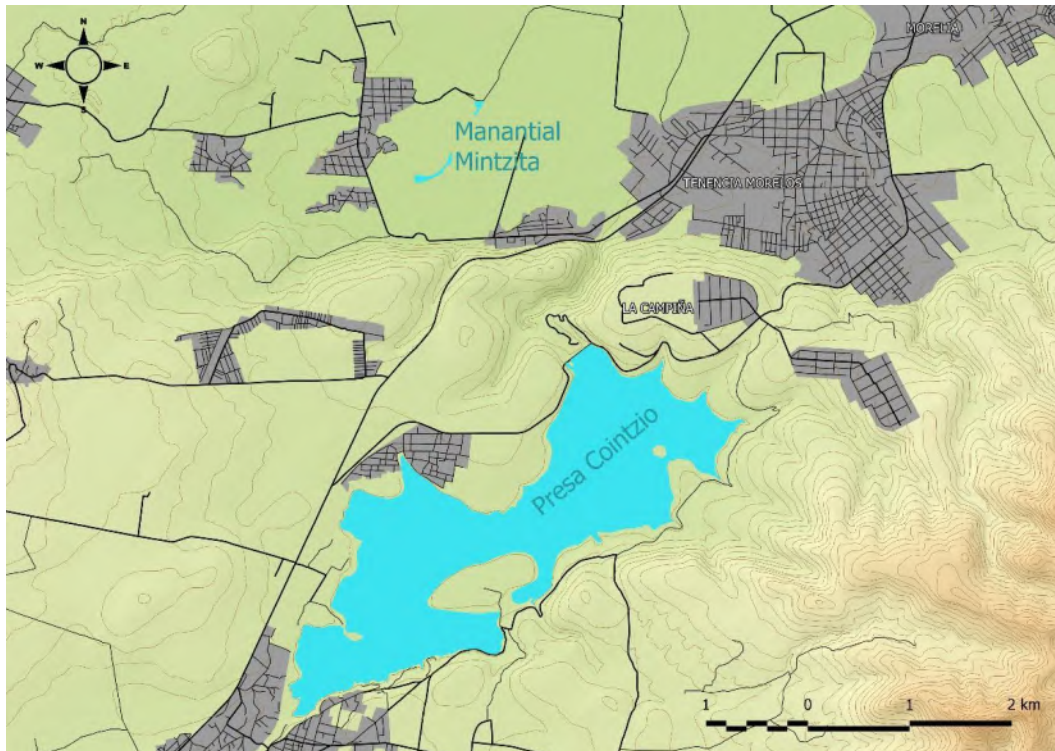


Figura 4.- Ubicación de la Presa Cointzio y Manantial Mintzita al suroeste de Morelia

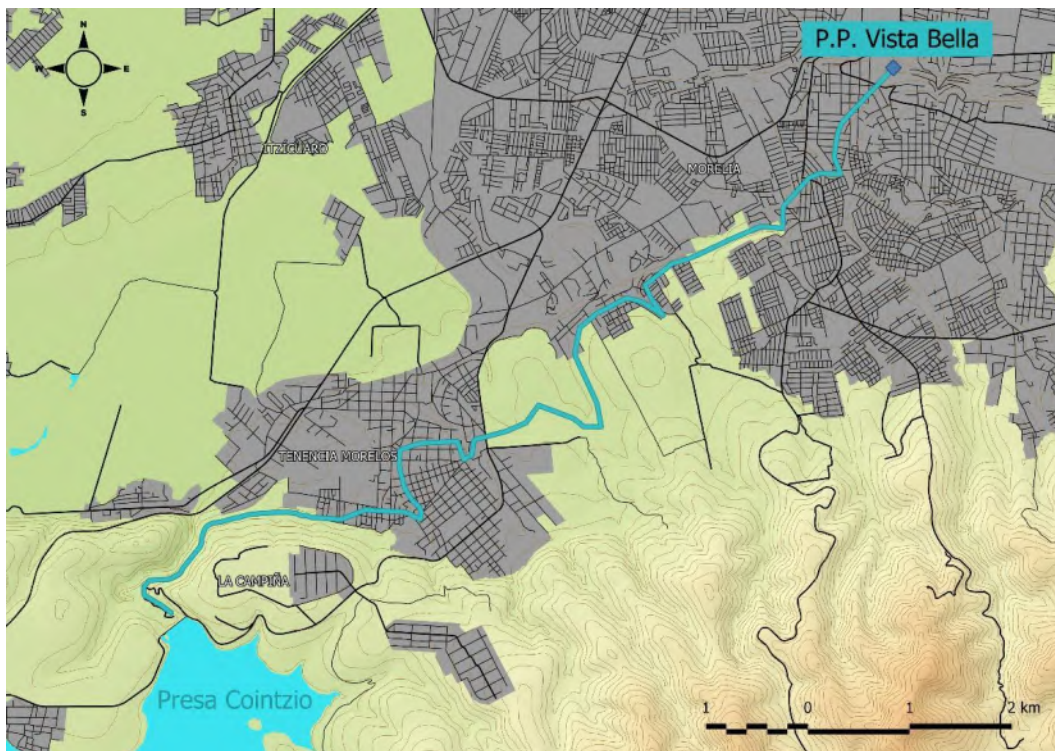


Figura 5.- Canal de conducción de la presa Cointzio a la Planta Potabilizadora Vista Bella

Anteproyecto del sistema de conducción de la presa Cointzio a la Planta Potabilizadora Vista Bella en la ciudad de Morelia

6 ANTECEDENTES

6.1 Historia del sistema de abastecimiento de agua en Morelia

El acueducto de Morelia es actualmente el monumento de mayor longitud que tiene esta ciudad, con aproximadamente 1600 metros de longitud. Es tal su importancia que se considera como un icono en todo el país y está representada en el reverso del billete de \$50, pero esta estructura originalmente fue un sistema de abastecimiento de agua para la ciudad. En sus orígenes, era un sistema muy rudimentario que se levantó en el año 1549, que resolvía la necesidad de recibir agua para la población de la ciudad, en aquel entonces llamada Valladolid. Fue una obra a base de horcones y terraplenes sobre los que se apoyaban las canoas, las cuales eran troncos largos tallados en el centro en forma de canal y que estaban unidas mediante clavos y cuñas. Este canal a cielo abierto, llamado Caño y Camino de agua a la ciudad (Figura 6), se abastecía en algún punto del río Chico según un plano de la ciudad del año 1579 (Espejel, 2024).

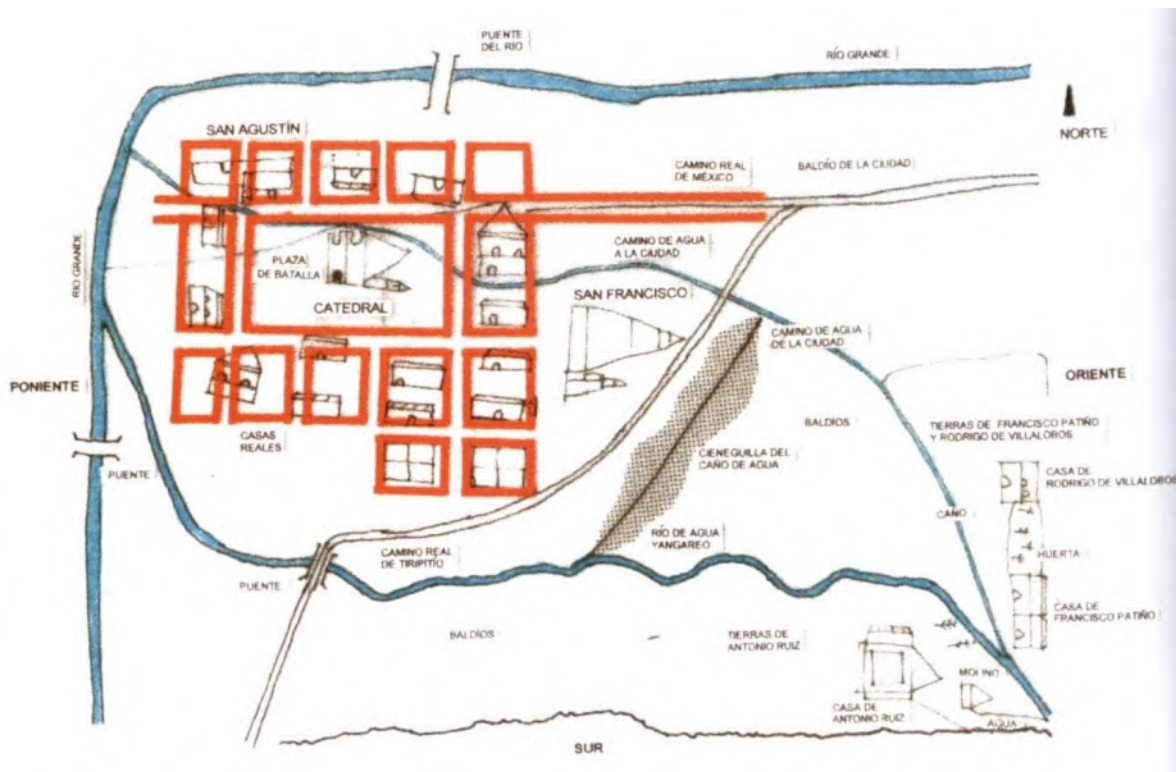


Figura 6.- Reinterpretación de la traza urbana de Valladolid en 1579 por el Arq. Enrique de Cervantes S.

Para 1598 se empezó a construir una cañería a base de cal y cantera que desembocará en la plaza principal de la ciudad, actualmente Plaza de Armas, en una pila para que las personas pudieran surtirse de agua. Sin embargo, este sistema tuvo que ser reparado en numerosas ocasiones, en los años 1615, 1643, 1657 y 1667. Pero no fue hasta el año 1677 que la distribución del agua se complicó tanto que fue sometida a una última reparación a cargo del alarife Pedro Nolasco, con la cual se alivió el problema del suministro de agua a la población,



según un testimonio del escribano Sebastián de Aragón que relato el buen estado del canal y el abasto suficiente del vital líquido. Para el siglo XVIII el obispo Manuel Escalante Colombres y Mendoza veía este sistema de distribución como obsoleto por su ineficiente servicio y como el origen de las enfermedades gastrointestinales que aquejaban a la población en aquel entonces. Por lo que en 1705 se ordenó sustituirlo por una arquería de cantera la cual se terminó en 1730 y posteriormente se construyó una cañería subterránea dentro del perímetro de la ciudad para conducir el nuevo caudal. Desafortunadamente la obra colapsó el 16 de mayo de 1784 con un total de 30 varas de atarjea y 22 arcos, dejando sin suministro de agua a la ciudad y el 21 de octubre de 1785, poco más de un año después, se dio como alta prioridad la reconstrucción del acueducto. Con ayuda del obispo Fray Antonio de San Miguel Iglesias la obra tuvo un mejor desarrollo, debido a que compró terrenos donde nacían los manantiales de Carindapaz, el Moral, San Miguel entre otros más; también proporcionó mano de obra indígena que se había mudado a la ciudad por problemas de sequía. La reconstrucción se llevó a cabo entre 1785 y 1789, resolviendo los problemas de sed y de hambre que asolaba a Valladolid (Espejel, 2024).

Durante todo el siglo XIX este sistema continuó abasteciendo a la ciudad de Valladolid, llamada Morelia a partir de 1828, tuvo algunas reparaciones menores y mantenimientos, pero comparado con el sistema anterior la población no sufrió de falta de agua. Fue hasta principios del siglo XX, concretamente el 30 de junio de 1909, que se contrató la ejecución de varias obras con el financiamiento de la compañía bancaria de Fomento y Bienes de México S.A., una de esas obras fue la distribución de agua potable para la ciudad. Se realizó un estudio técnico a cargo del Ing. Enrique Guzmán, quién dictaminó que el acueducto de Morelia ya no era útil para el abastecimiento de la población debido a que no tenía la capacidad de conducir un gasto de 367 litros por segundo, consumo máximo considerado en aquel entonces. En 1910 se estrenó una obra nueva que consistía en una planta potabilizadora que hoy en día se conoce como Filtros Viejos y una tubería de fierro que conducía el agua desde la planta hasta el bosque Cuauhtémoc, en aquel entonces llamado bosque de San Pedro. Esta Planta estuvo en servicio y abasteció a la ciudad hasta los años 60, cuando la planta potabilizadora Vista Bella ubicada en la colonia del mismo nombre sustituyó en esta función a los filtros (Espejel, 2024).

Actualmente el servicio de agua potable, alcantarillado y saneamiento en el municipio de Morelia es atendido por el OOAPAS, 4 Juntas Locales y varios Comités que en conjunto atienden a más de 290 localidades urbanas y rurales, con niveles diferentes de densidad de población y cobertura de los servicios. Los registros de INEGI, indican que al año 2020 dentro del territorio municipal, 91 de cada 100 viviendas, cuentan con una toma de agua en su interior. La ciudad de Morelia cuenta con cuatro plantas potabilizadoras asociadas a las aguas provenientes de la presa Cointzio y agua de manantiales, que en su conjunto tienen una capacidad instalada para 2,046 L/s (IMPLAN Morelia, 2021).

6.2 Situación actual del sistema de conducción en Morelia

Un sistema de conducción es el conjunto de tuberías, estaciones de bombeo y dispositivos de control que permiten el transporte del agua desde la fuente de abastecimiento hasta un punto



de entrega, donde posteriormente será tratada y distribuida en condiciones adecuadas de calidad, cantidad y presión (Comisión Nacional del Agua, 2015c).

Partiendo de la premisa anterior, la ciudad de Morelia tiene diferentes sistemas de conducción, sin embargo, los más destacables por su amplitud e importancia es el sistema del manantial de la Mintzita y de la presa Cointzio.

El agua proveniente de Mintzita es captada y conducida por una tubería de concreto de 60 pulgadas de diámetro a una profundidad promedio de 2 metros y tiene una longitud aproximada de 5,080 metros desde su captación hasta un cárcamo conocido como “Rebombero Mintzita”. A partir de este punto el agua es dirigida a dos zonas diferentes empleando tres tuberías de 16” para cada zona. En un sentido se manda entre 310 y 390 L/s hacia un cárcamo llamado Tzindurio, encargado de “rebombar” el agua a diferentes colonias de la parte norponiente de la ciudad, y en el otro sentido es desplazada hacia la planta potabilizadora Vista Bella entre 430 y 460 L/s. Es tal la importancia de este sistema de conducción que las propias tuberías de 16” son conocidas como “Acuaférico” por ubicarse a lo largo libramiento de Morelia llamado Periférico Paseo de la República”. La cantidad de agua extraída del manantial de la Mintzita destinada para uso urbano oscila entre los 740 y 850 L/s.

El otro sistema de conducción que aporta considerablemente agua a la ciudad procede de la presa Cointzio, consiste en un ducto rectangular de concreto con dimensiones 1.50 metros de altura, 0.90 metros de ancho y se extiende por poco más de 13 kilómetros. Conduce agua hasta la planta potabilizadora de Vista Bella una media de 600 L/s (este dato es variable a lo largo del tiempo por diversos factores que influyen en el conducto, llegando a reducirse notoriamente si no se le da mantenimiento). Si bien requiere de inversión constante para su limpieza, es importante para la ciudad por la cantidad de agua y el tipo de conducción. Mientras que en el acuaférico se requiere adicionar energía para generar el movimiento del agua, en el canal de conducción de Cointzio se utiliza la energía disponible y el flujo se da por gravedad, comportándose como un canal. Por lo tanto, la planta potabilizadora Vista Bella tiene ingreso de agua de dos fuentes de abastecimiento, el agua aquí es tratada para su purificación y distribuida a gran parte de la ciudad de Morelia.

6.3 Estudios previos y alternativas analizadas

Si bien ambos sistemas de conducción tienen deficiencias que deben ir mejorando para garantizar un buen aprovechamiento del recurso hídrico, el enfoque central de este trabajo es el sistema de conducción Cointzio – Vista Bella. Como se explicó anteriormente este sistema presenta ciertas deficiencias y actualmente no se ha hecho ninguna modificación ni se ha implementado alguna estrategia de mejora para la conducción, al grado de que actualmente se tienen zonas en peligro de colapso y llegará el punto en que su uso sea insostenible.

En el año 2008, el OOAPAS designó a la empresa S.D.S. (Servicios, Desarrollos y Suministros S.A. de C.V.) para resolver la problemática del canal de conducción, lo que resalta que desde hace más de 15 años surgió la necesidad de mejorar el sistema de conducción. En el año 2009 después de estudiar la zona, la empresa S.D.S. llegó a la



conclusión de que es inviable mejorar el canal actual, por lo que generó tres propuestas que mejorarían la conducción del agua proveniente de la presa considerando topografía, modificando el trazo del conducto para que se adaptara a la traza urbana de aquel entonces y manteniendo el principio de conducción por gravedad. Al final no se le dio seguimiento al proyecto por falta de recursos y actualmente las propuestas se consideran obsoletas por la cantidad de tiempo que se dejó pasar, las condiciones cambiaron además de no resolver el tema de la extracción clandestina debido a que las tres propuestas se siguen situando cerca de las zonas donde se lleva a cabo esta actividad.

7 MARCO TEÓRICO

7.1 Abastecimiento de agua

Un sistema de abastecimiento de agua es aquel que tiene por objeto evitar la propagación de enfermedades mediante el adecuado tratamiento de potabilización. Las partes que lo componen son fuente de captación, conducción, tratamiento de potabilización, regularización y distribución. La conducción es aquella parte del sistema constituida por el conjunto de conductos, obras y accesorios destinados a transportar el agua procedente de la fuente de abastecimiento, desde el lugar de captación hasta un punto que puede ser un tanque de regularización, un cárcamo para una segunda conducción, o una planta potabilizadora. Estos conductos pueden ser abiertos o cerrados y se suministra la energía necesaria por bombeo o por gravedad (Valdez, 1994).

7.2 Sistema de conducción

La conducción se caracteriza por el traslado del agua desde la fuente de abastecimiento hasta un punto de entrega que puede ser un tanque de regulación o una planta potabilizadora (Comisión Nacional del Agua, 2015a). Esta conducción se puede dar de las siguientes tres maneras:

- Conducción por bombeo: Es necesaria cuando se requiere adicionar energía para transportar el gasto de diseño. Este tipo de conducción se usa generalmente cuando la elevación del agua en la fuente de abastecimiento es menor a la altura piezométrica requerida en el punto de entrega. El equipo de bombeo adiciona energía necesaria al sistema para lograr el transporte del agua.
- Conducción por gravedad: se presenta cuando el transporte del fluido se logra por la diferencia de energías disponible debido a que la elevación del agua en la fuente de abastecimiento es mayor a la altura piezométrica requerida o existente en el punto de entrega del agua. Para esto se hace uso de la topografía existente de manera que la conducción se lleve a cabo sin necesidad de bombeo y se alcanza un nivel aceptable de presión.
- Conducción por Bombeo-Gravedad: También conocida como conducción mixta, es una combinación de las dos anteriores cuando surge la necesidad de colocar uno o varios tanques de regulación intermedio que funciona como instalaciones para implementar equipos de bombeo y poder librar las partes con mayor elevación que la superficie del agua.

7.3 Canales

En términos generales, un canal se define como una estructura que guía el flujo de líquido exclusivamente por acción de la gravedad, sin experimentar efectos de presurización debido a su exposición a la atmósfera y presenta una superficie libre del líquido. Es importante destacar que estas consideraciones no tienen en cuenta características geométricas específicas (Gardea, 1999). Por lo tanto, las secciones transversales representadas en la Figura 7 son clasificadas como canales desde una perspectiva hidráulica.

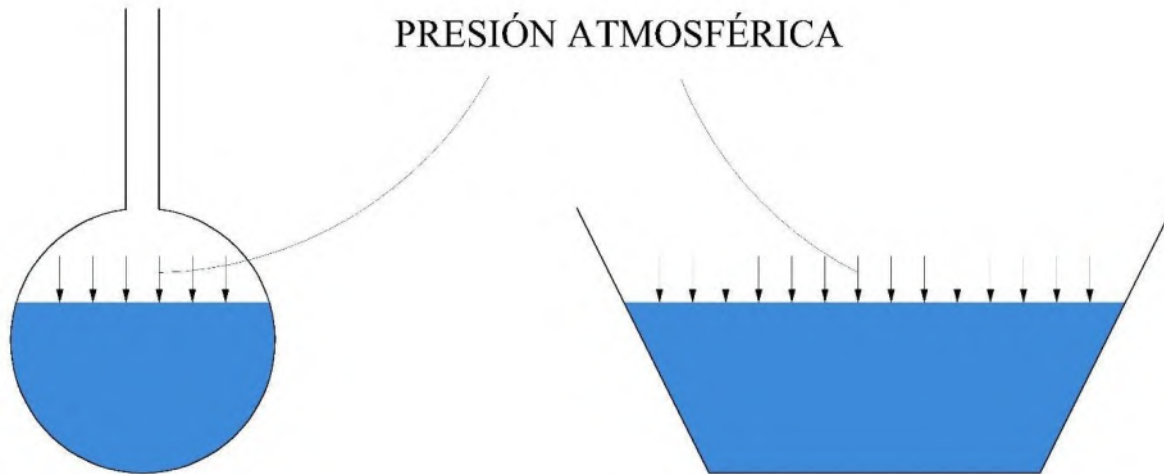


Figura 7.- Representación de secciones transversales en canales (adaptado de Gardea, 1999)

El funcionamiento hidráulico se refiere a cómo se comporta e interactúa el fluido dentro del canal tomando aspectos hidrodinámicos como la velocidad, tirante, caudal, energía, perfil del flujo entre otros. Considerando que se trata de un flujo unidimensional, su comportamiento se analiza mediante concepciones o modelos como lo son el flujo permanente y no permanente, en el que toma al tiempo como criterio; o flujo uniforme o variado, en donde se considera la utilización del espacio como punto de análisis (Sotelo, 2002).

7.3.1 Flujo Permanente

Esta clasificación tiene origen en torno al comportamiento del flujo utilizando el tiempo como criterio. En donde se considera que el flujo es permanente cuando la velocidad media V en una sección se mantiene constante en el tiempo o en un determinado lapso (Sotelo, 2002).

El flujo permanente es más sencillo de analizar con respecto al flujo no permanente debido a que no se tiene al tiempo como variable independiente, además de que en la práctica es poco común que se presente. Sin embargo, es posible estudiar una gran cantidad de problemas si se hace la suposición de que el flujo es permanente siempre y cuando el valor medio de cualquier característica prevalezca en un intervalo de tiempo razonable (Sotelo, 1994).

El flujo permanente se puede caracterizar mediante tres leyes físicas: Principio de conservación de masa (ecuación de continuidad), Teorema de Bernoulli (ecuación de la energía) y ley de impulso o de la cantidad de movimiento (Gardea, 1999).

A) Ecuación de continuidad:

Esta ecuación nos dice que la cantidad o volumen de flujo es igual al producto de la velocidad media del mismo por el área hidráulica de la sección transversal por la que transcurre.

$$Q = V * A \quad (1)$$

Donde:

- Q : Gasto m^3/s
- V : Velocidad m/s
- A : Área m^2

La condición de gasto siempre se mantiene igual en caso de haber un cambio de área (sección transversal) siendo compensado por la velocidad o viceversa cuando la velocidad cambia viéndose disminuido el tirante para compensar el gasto. Esta condición se da siempre y cuando no exista una salida o pérdida de energía considerable del flujo, esto es:

$$Q_1 = Q_2 \quad (2)$$

Sustituyendo la ecuación inicial del gasto se obtiene:

$$V_1 * A_1 = V_2 * A_2 \quad (3)$$

B) Ecuación de la energía:

La energía total por unidad de peso del agua en movimiento se expresa como la suma de su elevación z desde un plano de referencia, la carga de presión P/γ y la energía cinética local $V^2/2g$. Para el caso de canales (como se había mencionado antes) no está expuesto a presión por estar en contacto con la atmosfera, sin embargo, se considera que el fondo del canal si está expuesto a una presión ejercida por el propio líquido, la cual vale $y \cos \theta$ donde y es el tirante y θ es el ángulo de inclinación del canal (si $\theta \leq 8^\circ$ se puede considerar que $\cos \theta \cong 1$).

$$z_1 + y_1 \cos \theta_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + y_2 \cos \theta_2 + \alpha \frac{V_2^2}{2g} + H_f \quad (4)$$

En donde:

- z : Carga de posición o energía potencial de posición (m)
- $y \cos \theta$: Carga de presión o energía potencial de presión (m)
- $V^2/2g$: Carga de velocidad o energía cinética (m)
- H_f : Pérdida de energía entre la sección 1 y 2 (m)

Esta última está compuesta por pérdidas por fricción (h_f) y pérdidas locales (h_l).

$$H_f = h_f + h_l \quad (5)$$

Los elementos de la ecuación (4) se plasman en la Figura 8.

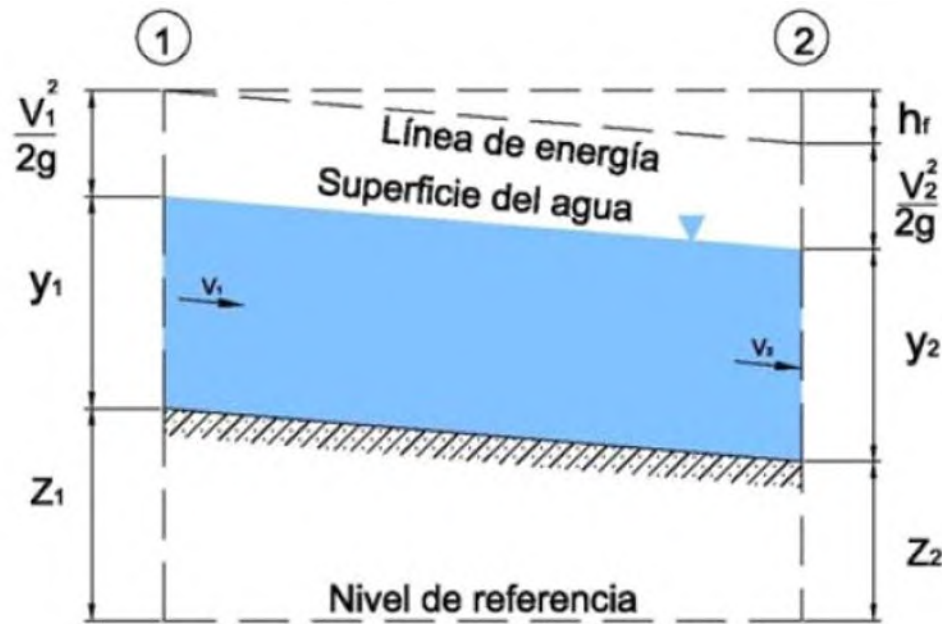


Figura 8.- Esquematización del flujo en canales abiertos.

A la suma $\left(z + \frac{p}{\gamma}\right)$ se le llama carga piezométrica y a $\left(\frac{p}{\gamma} + \frac{v}{2g}\right)$ se le conoce como carga hidrodinámica.

C) Ley de impulso o de la cantidad de movimiento:

La ecuación de cantidad de movimiento en un volumen de control se deriva de la segunda ley de Newton, es de carácter vectorial englobando fuerzas totales y condiciones externas, sin tomar en consideración la diferencia de energía.

$$F_p + F_t + F_c = \rho[(Q \beta V)_2 - (Q \beta V)_1] \quad (6)$$

Donde:

F_p : Fuerza resultante de presión (kgf)

F_t : Fuerza resultante del esfuerzo de fricción (kgf)

F_c : Fuerza resultante del peso propio del fluido (kgf)

ρ : Densidad del líquido (kg/m³)

Q : Gasto (m³/s)

V : Vector de velocidad media (m/s)

β : Coeficiente de Boussinesq (adimensional)

7.3.2 Flujo Uniforme

Hace referencia a que el vector velocidad es el mismo en diferentes puntos del flujo y, por ende, el tirante y su área hidráulica también son constantes. El flujo uniforme casi siempre es permanente donde el tirante no cambia con el tiempo, para que fuese no permanente la superficie libre del agua debe fluctuar de un instante a otro y sin dejar de ser paralelo al fondo del canal, lo cual difícilmente ocurre en la práctica. Además por sí solo el flujo uniforme es un estado ideal que rara vez se logra en la práctica si también se toman en cuenta factores como cambios de sección, diferencia de pendientes y la presencia de estructuras de control. Sin embargo, para canales rectos y largos, de sección, pendiente y rugosidad constantes es muy útil suponer este tipo de flujo porque simplifica el análisis y funciona como base para resolver problemas de “diseño”, determinar las características geométricas óptimas del canal para un gasto Q , pendiente S y rugosidad del material n deseado; o para efectos de “revisión”, estimando el gasto para propiedades geométricas, pendiente y rugosidad existente.

Para ambos casos se hace uso de la ecuación de Manning (o también conocida como ecuación de Chezy – Manning) despejando la variable que se desea conocer y para fines prácticos se deja expresada en términos del gasto Q :

$$Q = \frac{A}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Donde:

Q : Gasto (m^3/s)

A : Área hidráulica (m^2)

n : Coeficiente de rugosidad de Manning

S : Pendiente del canal (m/m)

R : Radio hidráulico (m)

El radio hidráulico R es el cociente del área hidráulica A y el perímetro mojado P_m :

$$R = \frac{A}{P_m} \quad (8)$$

7.3.3 Flujo Gradualmente Variado (FGV)

Cualquier otro flujo en un canal que no cumpla con las condiciones de equilibrio establecidas en el flujo uniforme se convierte en flujo variado dentro de un tramo del canal o en toda su longitud. Este cambio puede deberse a cambios en la pendiente, rugosidad, dimensiones de la sección o por estructuras construidas para control de tirante o gasto. Este tipo de flujo puede presentarse en cualquier canal, pero su tendencia será tratar de alcanzar las condiciones del flujo uniforme, esto puede suceder o no dependiendo de la rugosidad y longitud del canal. En el tratamiento del flujo gradualmente variado se considera que ocurren cambios pequeños del tirante en la dirección del movimiento y para su análisis se hace uso de la ecuación

dinámica de flujo, la cual es una expresión diferencial que indica la variación de la línea de la superficie libre del agua en un perfil de FGV:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_0 - S_f}{(1 - F_r^2) \cos \theta} \quad (9)$$

Donde:

S_0 : Pendiente del fondo del canal

S_f : Pendiente de fricción

θ : Ángulo de inclinación del canal ($\cos \theta = 1$ en canales de pendiente suave)

F_r : Número de Froude

Para el cálculo del número de Froude F_r se hace uso de la siguiente expresión:

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{g A \cos \theta / \alpha T}} \quad (10)$$

Para la clasificación del flujo se puede utilizar la establecida por Bakhmeteff y está basada en la pendiente del canal y la zona en que se aloja el perfil.

Para el caso de la pendiente:

- S_0 subcrítica, si $y_n > y_c$; perfiles tipo **M**
- S_0 crítica (S_c), si $y_n = y_c$; perfiles tipo **C**
- S_0 supercrítica, si $y_n < y_c$; perfiles tipo **S**

También se pueden llegar a dar otros casos en donde y_n no existe:

- S_0 horizontal; perfiles tipo **H**
- S_0 adversa; perfiles tipo **A**

Sin importar la pendiente, el gasto y la geometría de la sección del canal, las líneas que indican el nivel del tirante normal y_n y del tirante crítico y_c dividen la región de flujo en tres posibles zonas:

- Zona 1, arriba de la línea superior.
- Zona 2, entre las dos líneas.
- Zona 3, Entre la línea inferior y el fondo del canal.

En total existen 13 distintos tipos de perfiles de flujo gradualmente variado haciendo las combinaciones posibles que se pueden formar con perfiles tipo y zonas.

7.4 Tuberías

En la tubería el líquido está confinado mediante un conducto cerrado y por lo tanto hay presión ejercida en las paredes del contorno que envuelve al fluido. Esta presión está representada gráficamente por la altura que alcanza el líquido en un pequeño tubo conectado al conducto (piezómetro). Su sección transversal generalmente es circular pero también hay secciones cuadradas, rectangulares, etc. Pero forzosamente debe cumplir con los requisitos de ser una sección cerrada y que el flujo del líquido sea a “tubo lleno” para que el conducto esté a presión (Rocha, 2007).

A pesar de las diferencias que existen entre canales y tuberías, el funcionamiento hidráulico se rige bajo las mismas ecuaciones fundamentales, pero con adecuaciones para representar de mejor manera el fenómeno. En el caso del principio de conservación de masa o ecuación de continuidad no hay modificación alguna y se esquematiza con las ecuaciones (1), (2) y (3) mostradas en la sección de canales. Al considerar que las paredes que confinan el líquido son indeformables, es decir de área constante, se llega a la conclusión de que la variación de gasto solamente es compensada por la velocidad del fluido, a diferencia de flujo en canales en donde la variación del gasto si implica una variación tanto de velocidad como de área hidráulica.

En el principio de conservación de la energía utilizando la ecuación (4) del teorema de Bernoulli, se muestra a la carga de presión en función al tirante debido a que está en contacto con la atmosfera. Para poder aplicarse en tuberías se modifica la carga de presión, obteniendo la siguiente expresión:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (11)$$

En donde:

- z : Carga de posición o energía potencial de posición (m)
- P/γ : Carga de presión o energía potencial de presión (m)
- $V^2/2g$: Carga de velocidad o energía cinética (m)
- h_f : Pérdida de energía entre la sección 1 y 2 (m)

La Figura 9 representa visualmente cada componente de la ecuación (11).

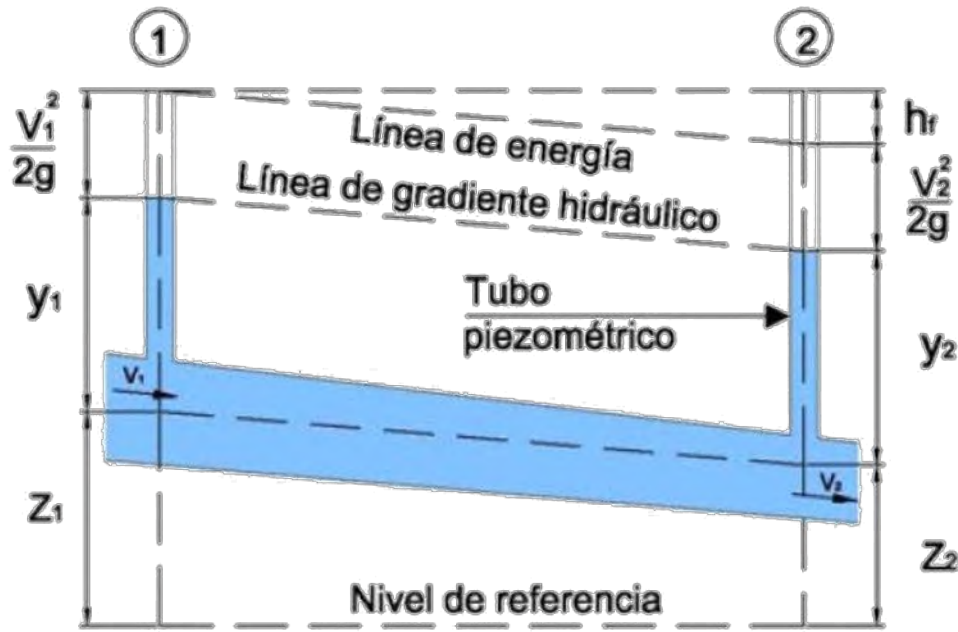


Figura 9.- Esquematzación del flujo en tuberías.

7.4.1 Métodos de cálculo de pérdidas (Darcy-Weisbach)

Cuando se tienen conducciones largas es imprescindible determinar la resistencia del flujo que se genera con las paredes que lo retienen, si bien es más común hacer este análisis en conductos a presión los canales no están exentos de presentar pérdidas por fricción (Rocha, 2007).

Para iniciar con el cálculo de pérdidas por fricción primero se debe hacer una distinción entre flujo laminar y turbulento. Osborne Reynolds fue el primero en proponer un criterio que consiste en un número adimensional (mismo que lleva su nombre) que permite evaluar la preponderancia de las fuerzas viscosas sobre las de inercia. En el caso de un conducto cilíndrico a presión, el número de Reynolds se define con la ecuación:

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (12)$$

Donde:

- V : Velocidad media (m/s)
- D : Diámetro del conducto (m)
- ν : Viscosidad cinemática del fluido (m)

Reynolds encontró que en un tubo el flujo laminar se vuelve inestable cuando R_e ha rebasado un valor crítico, para después convertirse en turbulento. Este límite ha adquirido distintos valores debido a los diferentes investigadores que han trabajado para su determinación, en donde puede ir desde los 2,000 hasta los 40,000 (Sotelo, 1994).

Además de número de Reynolds, también es necesario tener en cuenta el Radio hidráulico que es la relación entre el área hidráulica y el perímetro mojado mostrado en la ecuación (8).

Para el año de 1850 algunos científicos, entre ellos Darcy y Weisbach, dedujeron experimentalmente una fórmula para calcular en un tubo la pérdida por fricción:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad (13)$$

Donde:

- f : Factor de fricción (adimensional)
- g : aceleración de la gravedad (m/s^2)
- D : Diámetro (m)
- L : Longitud del tubo (m)
- V : Velocidad media (m/s)

El factor de fricción ha sido un trabajo acumulado de años a partir de resultados experimentales y deducciones matemáticas, donde contribuyeron científicos como Poiseuille, Blasius, Stanton y Pannell, Nikuradase, entre otros que han aportado de forma significativa en la determinación de este factor. Cada una de estas variantes para obtener f se consideran válidas, sin embargo, para términos de esta investigación se elige una modificación de la ecuación de Colebrook-White propuesta por Swamee-Jain para flujos turbulentos:

$$f = \frac{0.25}{\left(\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7 \cdot D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right)^2} \quad (14)$$

Donde:

- ε es la rugosidad relativa de la tubería (mm).
- D es el diámetro expresado en las mismas unidades que ε (mm).
- Re es el número de Reynolds (adimensional).

7.4.2 Materiales de conducción: PVC, PEAD, hierro dúctil

En la selección del material de la tubería intervienen características que garantizan la conducción del agua y dependen de las condiciones particulares de la zona en donde estará ubicada, es por ello que se analizan factores como la capacidad de conducción, durabilidad, resistencia mecánica y a la corrosión, facilidad de conexión y reparación, costo e incluso la conservación de la calidad del agua. Por ejemplo, la resistencia de la tubería debe ser superior a la máxima carga estática que se pueda presentar en el sistema, la durabilidad debe garantizar una vida útil prolongada y considerable para proveer un servicio satisfactorio acorde a la inversión económica debido a que está expuesto a suelos y agua que pueden llegar a ser agresivos con reacciones químicas con el material de la tubería. El factor económico en México es decisivo al momento de la toma de decisiones, considerando el costo de adquisición, transporte, instalación y en ocasiones facilidad para la obtención del material incluyendo la disponibilidad de las piezas especiales. De igual manera se toma en cuenta la

capacidad del material de mantener la calidad del agua sin añadir sabores, olores o sustancias químicas al líquido que transita en su interior.

En México se han utilizado diversos materiales, sin embargo, actualmente la fabricación de tubos está regida por normas y especificaciones con el fin de mejorar la calidad de los sistemas de conducción y distribución.

El uso de tuberías de plástico se ha popularizado en estos últimos años, sobre todo para sistemas de conducción por su fácil manejo, pero también se ha incrementado su implementación en sistemas de conducción en donde las condiciones de trabajo no son tan agresivas. La fabricación de tuberías de PVC (Policloruro de Vinilo) es en color blanco y con un sistema de unión denominado “espiga-campana” (Figura 10). En la Tabla 1 se muestra la clasificación de este material según su presión.

Tabla 1.- Presión máxima de trabajo en tuberías de PVC.

Clase	MPa	Kg/cm ²
5	0.5	5
7	0.7	7
10	1.0	10
14	1.4	14
20	2.0	20

La implementación de tubos de material PVC tiene ventajas como hermeticidad, bajo índice de rugosidad, resistencia a la corrosión, resistencia química, es un material ligero, flexible y presenta resistencia a la tensión. Sin embargo, es susceptible a daños durante su manejo e instalación, reduce su resistencia al impacto cuando está sometido a temperaturas menores a 0 °C y a temperaturas mayores de 25 °C se debe reducir la presión de trabajo. Además, la exposición prolongada a los rayos solares reduce su resistencia mecánica.

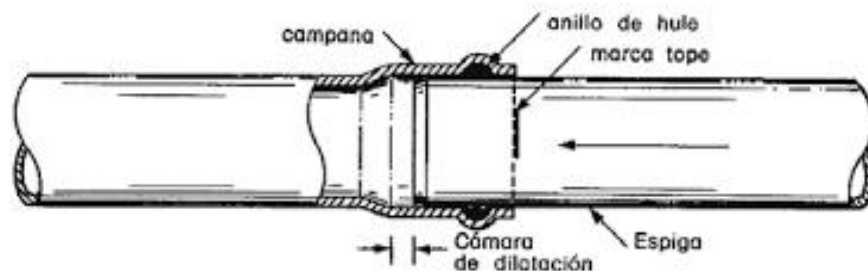


Figura 10.- Sistema de unión "campana-espiga" en tuberías de PVC.

Dentro de la gama considerada como material de plástico se encuentran también los tubos de polietileno (PE) y se clasifican en tres tipos:

- Tipo I: Polietileno de baja densidad (PEBD).
- Tipo II: Polietileno de media densidad (PEMD).
- Tipo III: Polietileno de alta densidad (PEAD).

De los tres tipos disponibles es recomendable utilizar el PEAD en la construcción de redes de distribución de agua potable y también, donde las presiones de trabajo lo permitan, en sistemas de conducción.

El Polietileno de alta densidad (Figura 11), además de tener las mismas ventajas que el PVC también se agrega a la lista la unión de tramos de tubería mediante la termofusión, aplicando calor. Las excavaciones en zanjas son más reducidas en comparación con las requeridas para otro tipo de tuberías por lo que se ahorran costos en zanjados y rellenos, agilidad en la instalación, compatibilidad con otros materiales gracias a la existencia de adaptadores especiales para cada tipo de unión, durabilidad con mantenimiento nulo. La principal desventaja que se podría tener con este material es el costo del material en comparación con otros, pero es cuestión de análisis y enfoque debido a que puede llegar a tener una vida útil de 50 años y 15 años de resistencia a la intemperie.



Figura 11.- Diferentes diámetros del material plástico PEAD.

Otro tipo de material que ha sido empleado es el hierro fundido, en México este material ha sido desplazado por los menores costos de otros tipos de tuberías, pero por su alta rigidez, resistencia al impacto y a la corrosión siguen siendo empleados en estaciones de bombeo o donde las condiciones de suministro sean extremas.

Originalmente este material tiene dos presentaciones: hierro gris y hierro dúctil. Este último se trata de una mejora al hierro gris mediante un tratamiento especial que lo dota de mayor dureza y resistencia. Por lo que poco a poco el hierro gris ha sido desplazado en el mercado.

Los tubos de hierro dúctil pueden ser unidos con varios tipos de juntas:

- Bridas: Consiste en la unión de dos anillos idénticos hechos del mismo material de la tubería y perforados para fijarse entre sí mediante tornillos (Figura 12). Este tipo de junta es práctica y sencilla de instalar, ampliamente utilizada en sistemas de tubería

expuestas donde se requiere rigidez, resistencia, facilidad de intercambio de tubos, así como la impermeabilidad de la junta.

- **Mecánica:** Caracterizadas por la unión de tubos con un extremo bridado y en disposición de campana con otro tubo de extremo espiga empleando una contrabrida y un anillo de sellado.
- **Enchufe-bola o submarinas:** Son utilizadas cuando se requiere que la tubería soporte fuertes deflexiones, como en el cruce de un río donde se dispone la tubería en el fondo ajustándose a su sección transversal.
- **Campana-espiga:** Es el mismo principio descrito para las tuberías de PVC y son las más comunes en este tipo de material.



Figura 12.- Tubería bridada de hierro dúctil.

Entre las ventajas que provee el hierro dúctil se encuentra una vida útil prolongada, alta resistencia mecánica como a impactos y cargas extraordinarias a la de diseño, alta resistencia a la corrosión, prácticamente libre de mantenimiento y puede ser soldado de forma económica. Por otro lado, puede sufrir corrosión eléctrica o química si no se protege de suelos ácidos o alcalinos y de aguas agresivas. Su manejo y transporte es complicado en comparación con otros materiales por su peso.

7.5 Software de modelación hidráulica.

Con los recursos hídricos urbanos cada vez más escasos, la ingeniería de control óptimo ha surgido como un enfoque prometedor para mejorar la eficiencia del uso del agua en el medio ambiente. Un modelo hidráulico es capaz de modelar y predecir con precisión los procesos hidrodinámicos complejos que ocurren dentro de un canal (Zhang et al., 2023).



Los modelos son genéricos con capacidad para resolver una gama de condiciones de flujo similares, con módulos adicionales para resolver otros fenómenos. Existen modelos unidimensionales en la que predomina la longitud del cauce y requiere de información topográfica e hidráulica que se introduce mediante secciones transversales. Estos modelos asumen por defecto que el flujo es perpendicular a la sección transversal, lo cual es una de sus limitaciones y son muy aplicados en tramos de ríos y canales muy largos, generalmente mayores a 20 veces su ancho (Vásquez, 2003).

En la modelación hidráulica, el objetivo es emplear la información más precisa disponible para que los resultados generados por el modelo reflejen con mayor exactitud los acontecimientos en la realidad. La información generada funciona como una herramienta esencial para la operación, mantenimiento, planificación y gestión entre otras aplicaciones (González-Ramírez & Bejarano-Salazar, 2019).

7.5.1 HEC-RAS

Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS) es un software que permite realizar cálculos de flujo permanente unidimensional, cálculos de flujo no permanente unidimensional y bidimensional, transporte de sedimentos/cálculos de lecho móvil y modelado de temperatura/calidad del agua. Este sistema de modelación fue desarrollado como parte de la "Nueva Generación" (NexGen) de software de ingeniería hidrológica del Centro de Ingeniería Hidrológica. El proyecto NexGen abarca varios aspectos de la ingeniería hidrológica, incluyendo: análisis de lluvia-escorrentía (HEC-HMS); hidráulica fluvial (HEC-RAS); simulación de sistemas de embalses (HEC-ResSim); análisis de daños por inundación (HEC-FDA y HEC-FIA); y pronóstico en tiempo real de ríos para operaciones de embalses (CWMS). Diseñado para uso interactivo en un entorno multitarea, incluye una interfaz gráfica de usuario (GUI), componentes de análisis separados, capacidades de almacenamiento y gestión de datos, herramientas gráficas, mapeo y generación de reportes (US Army Corps of Engineers, s/f).

HEC-RAS está diseñado para realizar cálculos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales para una red completa de canales naturales y construidos, áreas de desbordamiento/llanuras de inundación, áreas protegidas por diques, entre otros. Contiene los siguientes componentes para análisis de ríos:

- Cálculos unidimensionales de perfiles de superficie de agua en flujo permanente.
- Simulación de flujo no permanente unidimensional y/o bidimensional.
- Cálculos de transporte de sedimentos con frontera móvil en flujo cuasi no permanente o completamente no permanente (1D y 2D).
- Análisis de calidad del agua unidimensional.

Un elemento clave es que los cuatro componentes utilizan una representación común de datos geométricos y rutinas comunes para cálculos geométricos e hidráulicos. Además de los cuatro componentes de análisis de ríos, el sistema incluye varias funciones de diseño hidráulico que pueden activarse una vez que se calculan los perfiles de superficie del agua. HEC-RAS

también cuenta con un extenso sistema de integración y mapeo de datos espaciales (HEC-RAS Mapper).

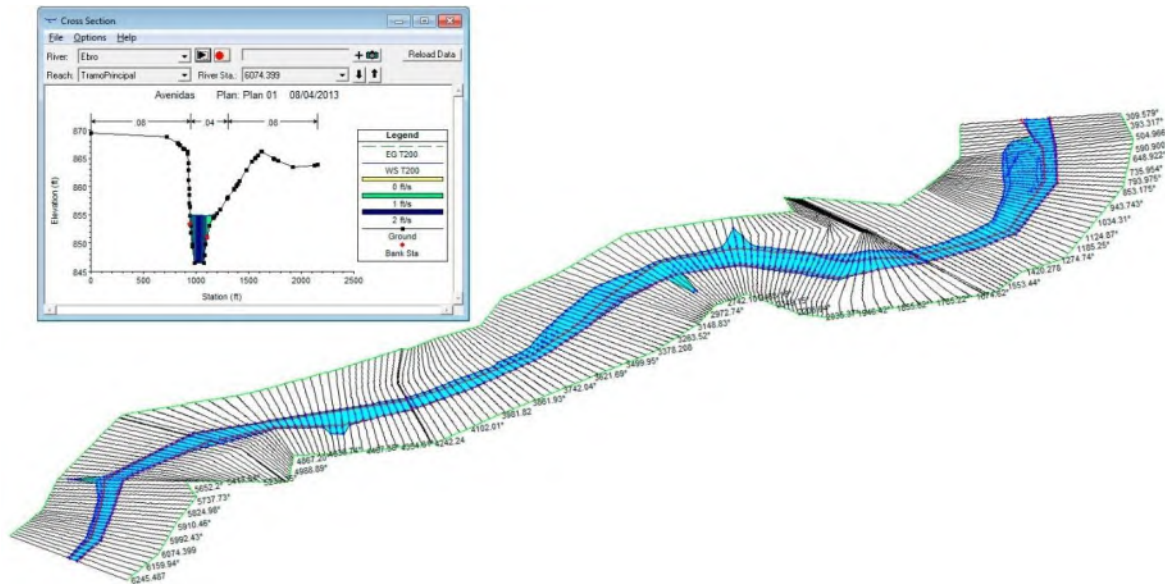


Figura 13.- Ejemplo de una modelación en HEC-RAS.

7.5.2 SWMM

El Modelo de Gestión de Aguas Pluviales o SWMM por sus siglas en inglés (Storm Water Management Model) de la EPA ayuda a predecir la cantidad y calidad de la escorrentía en sistemas de drenaje. Se utiliza en todo el mundo para la planificación, análisis y diseño relacionados con la escorrentía de aguas pluviales, sistemas combinados y sanitarios, y otros sistemas de drenaje. Puede emplearse para evaluar estrategias de control de aguas pluviales mediante infraestructura gris, como tuberías y desagües pluviales, y es una herramienta útil para desarrollar soluciones híbridas de control de aguas pluviales rentables que combinen infraestructura verde y gris. Es un programa de escritorio basado en Windows de código abierto y está disponible de forma gratuita en todo el mundo y fue desarrollado para respaldar los objetivos de gestión de aguas pluviales con el fin de reducir la escorrentía a través de la infiltración y retención, y para ayudar a disminuir las descargas que generan deterioro en los cuerpos de agua (Environmental Protection Agency, s/f-b).

SWMM permite simular la cantidad y calidad de la escorrentía en sistemas de drenaje urbanos y no urbanos. Sus capacidades incluyen:

- Modelado hidráulico: Manejo de redes de drenaje complejas, simulación de flujos dinámicos y elementos especiales como bombas y vertederos.
- Procesos hidrológicos: Considera infiltración, evaporación, almacenamiento superficial, flujo intermedio y prácticas de infraestructura verde.
- Cargas de contaminantes: Estima la acumulación, lavado y tratamiento de contaminantes en sistemas de drenaje.

- Herramientas complementarias: Integra proyecciones de cambio climático (SWMM-CAT) y diseña tormentas con distribuciones de lluvia estándar.
- Aplicaciones: Diseño de sistemas de drenaje para control de inundaciones, protección de calidad de agua, mapeo de zonas inundables, control de escorrentía y evaluación de BMPs y prácticas LID.

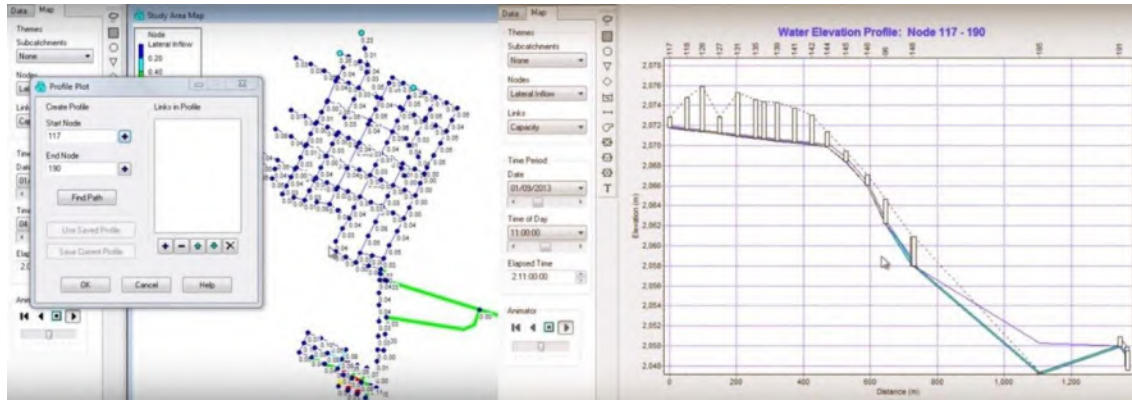


Figura 14.- Ejemplo de una modelación en SWMM

7.5.3 EPANET

EPANET (Environmental Protection Agency Network Evaluation Tool) es una aplicación de software utilizada en todo el mundo para modelar sistemas de distribución de agua. Fue desarrollada como una herramienta para comprender el movimiento y el destino de los componentes del agua potable dentro de los sistemas de distribución y puede emplearse en diversos tipos de análisis de estos sistemas. En la actualidad, ingenieros y consultores utilizan EPANET para diseñar y dimensionar nuevas infraestructuras de agua, modernizar infraestructuras envejecidas, optimizar la operación de tanques y bombas, reducir el consumo de energía, investigar problemas de calidad del agua y prepararse para emergencias. También puede emplearse para modelar amenazas de contaminación y evaluar la resiliencia ante amenazas de seguridad o desastres naturales (Environmental Protection Agency, s/f-a).

Esta herramienta digital permite realizar simulaciones hidráulicas y de calidad del agua en redes de tuberías presurizadas, que incluyen tuberías, nodos, bombas, válvulas, tanques de almacenamiento y reservorios. Permite rastrear el flujo de agua en las tuberías, presión en los nodos, altura del agua en los tanques, concentración de químicos, antigüedad del agua y trazado de fuentes.

Dentro de sus características principales están:

- Interfaz gráfica: Editor visual para construir y editar modelos de redes, con herramientas para reportes y visualización (mapas codificados por color, tablas de datos, gráficos de series de tiempo, etc.).
- Modelado hidráulico: Analiza demandas dependientes de presión, pérdidas por fricción (Hazen-Williams, Darcy-Weisbach, Chezy-Manning), operación de bombas y válvulas, energía y costos de bombeo, entre otros.

- Modelado de calidad del agua: Simula reacciones químicas, antigüedad del agua, movimientos de trazadores no reactivos, y efectos de reacciones en flujo y en paredes de tuberías.
- Seguridad y resiliencia: Extensiones como EPANET-MSX modelan interacciones químicas complejas, y EPANET-RTX incorpora datos operativos en tiempo real para análisis y calibración.

EPANET se utiliza para diseñar programas de muestreo, evaluar estrategias de mejora de calidad del agua, minimizar energía, analizar caudales contra incendios, estudiar vulnerabilidades y planificar el desempeño hidráulico de sistemas. Ideal para ingenieros, consultores y operadores de sistemas de distribución de agua potable.

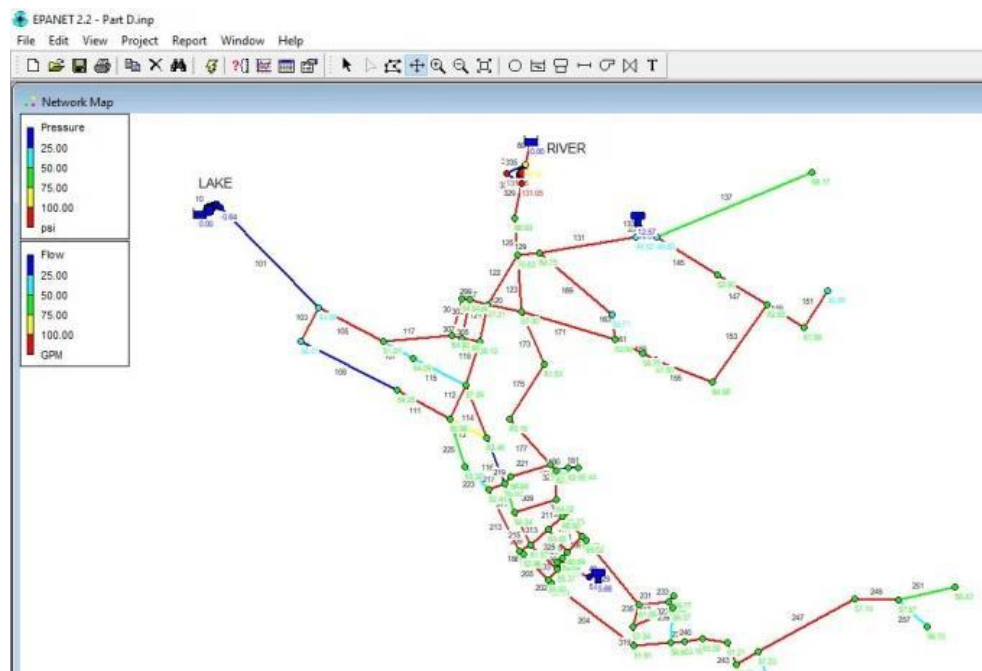


Figura 15.- Ejemplo de una modelación en EPANET.



8 METODOLOGÍA

8.1 Evaluación del sistema actual

Constará de un análisis tanto cualitativo como cuantitativo del funcionamiento del canal de conducción de Cointzio. Esto con la intención de obtener un panorama integral de sus condiciones para determinar si es viable o no implementar acciones de rehabilitación en las zonas que aún puedan ser de utilidad y detectar las zonas en donde se requiera una reubicación de su trazo.

Para realizar la evaluación cualitativa del estado actual de la línea de conducción, se plantean dos fases:

1. Realizar un recorrido a lo largo del canal de conducción desde la Presa Cointzio hasta la planta potabilizadora Vista Bella con la intención de registrar las condiciones de los pozos de visita, identificar las zonas de extracción clandestina, así como demás asentamientos humanos que interfieren con el funcionamiento del sistema de conducción.
2. Aprovechar las maniobras de limpieza y mantenimiento para efectuar un análisis interno de la estructura del canal de por lo menos un tramo (de aproximadamente uno a dos kilómetros) que se identifique con mayor vulnerabilidad según lo observado en la primera fase.

En cuanto al análisis cuantitativo se buscará la generación de un modelo numérico para el cual se precisan de datos como la topografía del terreno, dimensiones de la estructura de conducción y el gasto en diferentes puntos del canal.

En el caso de la topografía, debido a que las condiciones del trazo del canal no son las adecuadas para efectuar mediciones con el uso de herramientas como estación total, se optó por implementar Modelos Digitales de Elevación (MDE) disponibles en el sitio web oficial del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) con clave E14A23a4 y E14A23b3, ambos de tipo terreno con precisión a 5 metros, de proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) y datum ITRF08 época 2010.0. Esta elección se considera adecuada por ser la mejor resolución disponible y de extensión suficiente.



Figura 16.- MDE de INEGI que abarcan el canal de conducción actual.

Las dimensiones internas del canal se obtendrán de la fase dos de la evaluación cualitativa. Para la obtención del gasto en diferentes zonas se aplicará el método indirecto “Área – Velocidad”, debido a que no es posible tomar medidas directas del gasto, aplicando la ecuación (1) de continuidad.

Iniciando con la estimación del área se debe conocer el tirante o nivel de la superficie libre del agua del canal. La medición de los diferentes tirantes se efectuará mediante la inmersión de una vara de longitud conocida (Figura 17), a la cual se le restará la longitud sobresaliente con ayuda de un flexómetro.

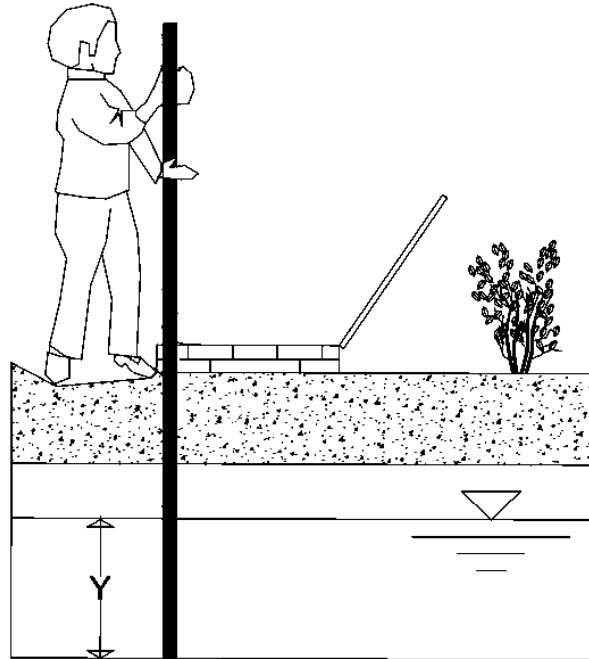


Figura 17.- Medición de tirante en el canal de conducción.
Elaboró: EIC. Mario Castillo García (UMSNH).

Esta acción será realizada en tres ocasiones y se tomará como tirante el promedio, en caso de tener diferencias considerables se realizará una cuarta medición y se descartará aquella que presente mayor diferencia entre las muestras. También se tomará la medida del extremo sobresaliente al nivel del terreno natural, la diferencia entre la longitud total de la vara y esta medida es el nivel de profundidad (ΔL) del fondo canal con respecto al nivel del suelo.

El cálculo del área provendrá de la siguiente ecuación:

$$A = b \cdot y \quad (15)$$

Donde:

b : Ancho del canal (m).

y : Tirante o altura de la superficie libre del agua (m).

Seguidamente se procede a encontrar los valores de la velocidad media del flujo, esta se puede obtener mediante el uso de dispositivos como molinetes, propelas, tubos Pitot, aparatos ultrasónicos o equipos electromagnéticos.

Sin embargo y dadas las condiciones actuales, la implementación de estos equipos resulta ser, además de económicamente inviable para compra o renta, casi imposible debido al difícil acceso de los puntos de medición (pozos de visita) producto de la configuración del sistema de conducción.

Por lo tanto, se optará por el método del flotador para efectuar las mediciones. Este procedimiento consta de utilizar cuerpos más ligeros que el agua para ser conducidos en

suspensión por la corriente, adquiriendo una velocidad similar a la superficial. Lo recomendado es que el flotador esté semisumergido, es decir, que se aloje ligeramente por debajo de la superficie del agua. Para este método también se requiere de una cinta métrica para medir la longitud de desarrollo, misma que se recomienda sea de un número cerrado (5, 10, 15, 20, 30 metros) y con ayuda de un cronómetro se tomará el tiempo que tardó el flotador en recorrer la distancia marcada.

A este método se le hacen ciertos ajustes, al tratarse de una sección cerrada no se ve el flotador y se perderá dentro del canal. Para evitar esto se sujeta el flotador a un soporte mediante una cuerda que permita una longitud de desarrollo de 10 metros, una vez que la cuerda se tense indicará que el objeto se trasladó la distancia marcada y se registra el tiempo (Figura 18). Esta misma cuerda servirá para recuperar el flotador, el cual consta de una botella de agua de 500 ml llena casi en su totalidad, aproximadamente un 95%, lo suficiente para que se comporte como un objeto semisumergido.

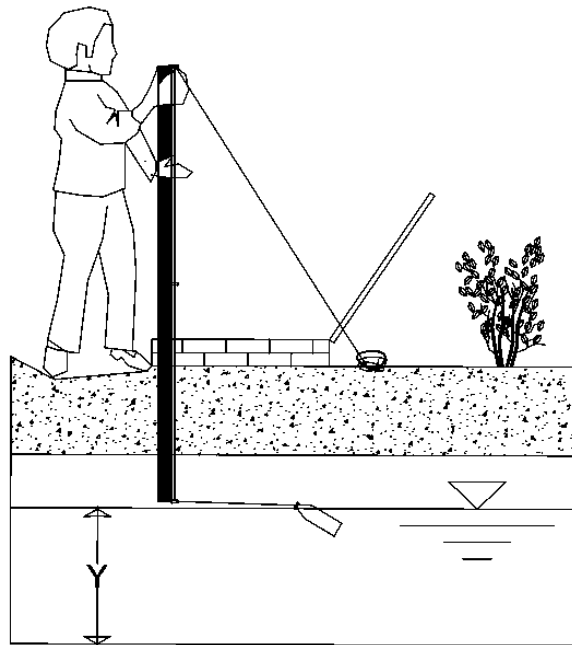


Figura 18.- Medición de la velocidad en el canal de conducción.

Elaboró: EIC. Mario Castillo García (UMSNH).

La distribución de velocidades en un canal depende de las características de la sección transversal, rozamiento, viscosidad, tensión superficial y alineación de la corriente. A grosso modo se considera que la velocidad media se presenta a un 60% de profundidad, también se puede obtener con la media aritmética de las velocidades a un 20% y 80% de profundidad. Para fines prácticos, se tiene en cuenta que la velocidad media es aproximadamente el 90% de la velocidad superficial.

Al igual que la obtención del tirante, el tiempo a utilizar para el cálculo de la velocidad será el promedio de 3 mediciones y se aplicará la siguiente ecuación:

$$V = 0.9 * V_{sup} = 0.9 * (D/t) \quad (16)$$

Donde:

V_{sup} : Velocidad superficial (m/s)

D : Distancia (10 m)

t : Tiempo que tardó en tensarse la cuerda (s)

Con la obtención de la información recabada en campo se procederá con la creación del dominio computacional en dos *softwares*, HEC-RAS y SWMM. Se consideran ambos por la forma en la que trabaja cada uno, siendo el primero ideal para simular flujos en canales en donde se presenta una superficie libre del agua y por otro lado SWMM funciona para modelar sistemas de alcantarillado pluvial, que podría ser una alternativa de análisis para el canal de conducción.

Una vez creado el dominio computacional, se procede con la evaluación numérica del funcionamiento hidráulico del sistema actual con el uso de los *softwares* HEC-RAS y SWMM. La modelación nos permite conocer datos hidráulicos como tirante, velocidad, gasto en zonas donde no se tomaron medidas, así como perfiles hidráulicos y pérdida de energía. Para garantizar la validez del modelo se iniciará el proceso de validación, en el que los resultados proporcionados por los modelos reflejen la realidad o se aproximen. Esto con la finalidad de evaluar la eficiencia del sistema de conducción y localizar las zonas que requieran de correcciones.

8.2 Revisión de las propuestas de S.D.S

Las propuestas diseñadas por la empresa “Servicios, Desarrollos y Suministros” en 2009, se componen de un total de tres trazos alternativos para una nueva línea de conducción, por el tiempo transcurrido es necesario evaluar si actualmente funcionan como una solución a la problemática de la conducción de la presa Cointzio a la planta potabilizadora Vista Bella. Los planos originales están a disposición del organismo operador, cada uno tiene dimensiones de 90 centímetros de ancho y 60 centímetros de alto. Su esquematización para ser proyectada y analizada en un sistema de información geográfico es complicada debido a que no muestra referencias claras de su trayectoria.

Por tal motivo se procederá de la siguiente manera:

1. Escaneo del plano; al no tener acceso a un escáner que abarque tales dimensiones se optó por una aplicación de smartphone especializada en escaneos (CamScanner).
2. Vectorización del trazo; una vez digitalizado en plano completo en formato “.jpeg” se vectoriza para poder trabajarse con otros *softwares*.
3. Reorientar y escalar; la imagen vectorizada en este punto no cuenta con las dimensiones y orientación adecuada por la naturaleza de su obtención, por lo que se utiliza el programa Civil 3D para realizar este procedimiento con dos puntos

- georreferenciados (inicio de la obra de toma en la presa Cointzio y el punto de llegada en la planta potabilizadora Vista Bella).
4. Conversión a archivo tipo *shapefile*; para su posterior análisis en un sistema de información geográfico.
 5. Comparación con un mapa base; el trazo presenta ciertas deformaciones que no corresponden a la idea original que se intentó plasmar a pesar de haberse seguido los pasos anteriores. Por lo tanto, es necesario compararlo con referencias de la zona mostradas con un mapa base.
 6. Reajuste del trazo de propuesta alternativa para poder acceder a detalles de su información espacial (coordenadas), que será de utilidad a futuro.
 7. Se repiten los pasos del 1 al 6 para cada una de las propuestas realizadas por la empresa S.D.S.

8.3 Propuesta de conducción presurizada

Se analizará la implementación de un sistema de conducción que funcione a presión con la energía hidráulica provista por el propio embalse, dicho sistema actuará como un sifón invertido que procurará seguir la topografía del terreno siempre y cuando la carga piezométrica lo permita (Figura 19).

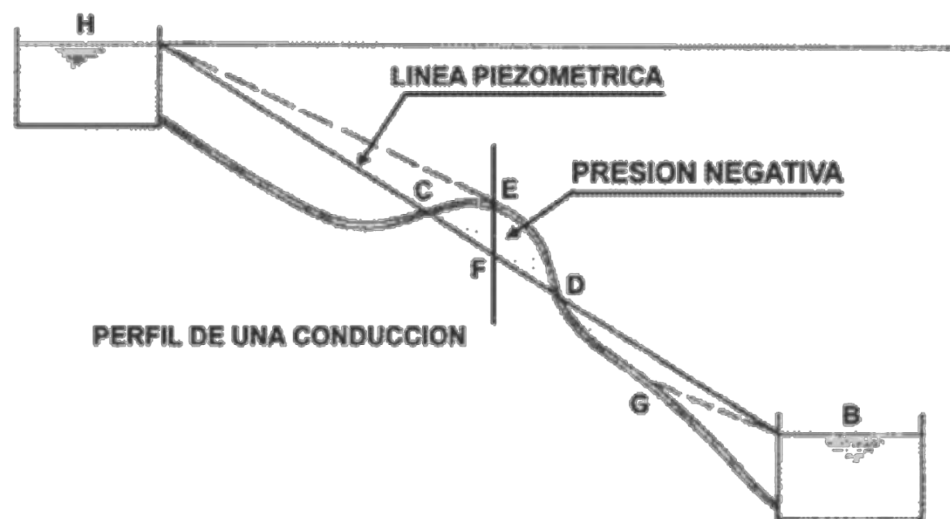


Figura 19.- Caso no deseado en una línea de conducción a gravedad.

Para la elección de esta ruta influirá predominantemente la traza urbana, buscando que la nueva ubicación del sistema de conducción sea en vialidades principales y bien definidas con la intención de eliminar el riesgo a futuro de asentamientos urbanos sobre su trazo, como pasó con el canal actual por el crecimiento poblacional.

Para obtener un diseño robusto y optimizado del sistema de conducción como sifón invertido, se aplicará la siguiente metodología que tiene como fin último asegurar que se cumplan las especificaciones hidráulicas y operativas requeridas.

8.3.1 Determinación de los diámetros máximo y mínimo

Se considera una longitud de conducción de varios kilómetros, que buscará conducir un caudal de 630 L/s.

Para determinar los diámetros máximos y mínimos permitidos en base a las velocidades mínimas y máximas en tuberías, se aplican las siguientes ecuaciones:

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V_{\max}}} \quad (17)$$

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V_{\min}}} \quad (18)$$

Donde:

- Q es el caudal de diseño (m^3/s).
- $V_{\max}$ es la velocidad máxima permitida.
- $V_{\min}$ es la velocidad mínima permitida.

8.3.2 Obtención del Perfil de Elevaciones Topográficas

Se utilizan los mismos Modelos Digitales de Elevaciones que en la sección 8.1 Evaluación del sistema actual, debido a que la extensión es lo suficientemente amplia para abarcar la propuesta de conducción.

Se realiza el procesamiento y análisis de los MDE utilizando en conjunto los *softwares* ArcGIS v10.5 y QGIS v3.28 para obtener el perfil de elevaciones topográficas a lo largo de la longitud de la tubería.

Otro dato requerido es la energía total H disponible en el sistema, el cual es el nivel actual en m.s.n.m. de la superficie libre del agua de la presa de Cointzio, esta cota es obtenida del sistema de monitoreo de presas de la CONAGUA, en dónde continuamente se están actualizando los niveles de las principales presas de México.

8.4 Escenarios de Modelación

8.4.1 Generalidades

Con el objetivo de analizar el comportamiento del sistema de conducción, se realiza una evaluación de diferentes situaciones hipotéticas que se podrían llegar presentar a lo largo de su vida útil y que es importante conocer para establecer reglas de operación.

Existen variables que son necesarias de analizar en el diseño de la obra, como lo son la rugosidad del material y el diámetro de la tubería. Sin embargo, una vez definidas y ejecutado

el proyecto, dichas variables pasan a ser constantes que no generan cambios en el funcionamiento del sistema de conducción a través del tiempo.

Por otro lado, los escenarios de modelación se pueden establecer en torno a los niveles de operación de la Presa de Cointzio que, al estar sujeto al ciclo hidrológico, presenta cambios en distintas épocas del año todos los años. Es una variable que finalmente establece la energía con la que se moverá el fluido y por consecuencia define la velocidad y presiones a lo largo de la tubería en ese instante.

Por tal motivo se plantean los siguientes escenarios de modelación con la finalidad de abarcar todas las posibilidades que se puedan llegar a presentar en el sistema de conducción:

- Escenario 1 o base: Consiste en tomar el Nivel de Agua Actual (NAA) como dato de partida, en este modelo se realizarán los cálculos de Pérdidas por fricción, el gradiente Piezométrico y la obtención de gasto, velocidad y presiones en función de diferentes materiales y diámetros. Finalmente se efectuará una validación en EPANET para corroborar los resultados, dicha modelación servirá para recrear los demás escenarios.
- Escenario 2, NAMINO: Se realizará la modelación en función al Nivel de Aguas Mínimas de Operación, pensando en el hipotético caso de energía disponible y gasto más bajo que se pueda llegar a presentar dentro del rango de operatividad de la Presa Cointzio.
- Escenario 3, Máxima Sequía: En esta situación esquematizada se pretende evaluar el funcionamiento hidráulico de conducción en el supuesto más probable de falta de agua que se ha llegado a presentar. Para este escenario se realizará una comparativa histórica de todos los niveles de la presa a lo largo del tiempo hasta donde se tenga registro.
- Escenario 4, NAMO: Para este caso, se evaluarán las presiones y la velocidad que se pueden llegar a tener tomando en consideración que en la presa se presenta el Nivel de Aguas Máximas Ordinarias.
- Escenario 5, Máxima Carga Estática con el NAA: En este supuesto, se recrea la situación en la que por alguna cuestión se debe cerrar la válvula que está a la llegada de la Planta Potabilizadora, presentándose así la máxima carga posible en el instante del Nivel de Agua Actual. La finalidad es conocer la situación crítica más probable de sobrepresión en el sistema de conducción.
- Escenario 6, Máxima Carga Estática con el NAMO: Es este último escenario se pretende recrear la situación más crítica posible de sobrepresión pensando en que se requiere cerrar desde la Planta Potabilizadora mientras que en la Presa Cointzio se cuenta con el Nivel de Aguas Máximas Ordinarias.

8.4.2 Cálculo de Pérdidas por Fricción

Se efectuarán los cálculos para diferentes diámetros y materiales de tuberías con la finalidad garantizar una selección óptima. Para su obtención se aplicará el método de Darcy-Weisbach, aplicando la ecuación (13) mostrada en la sección 7.4.1 Métodos de cálculo de pérdidas (Darcy-Weisbach):

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Para poder obtener h_f se debe seguir un proceso iterativo entre V , f y Re aplicando las siguientes fórmulas detalladas a continuación.

Para estimar la velocidad se aplicará la siguiente ecuación, la cual proviene de despejar el término de la velocidad del teorema de Bernoulli aplicado a este tipo de situaciones:

$$V = \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{1 + \frac{f \cdot L}{D}}} \quad (19)$$

Donde:

- h_1 y h_2 son la cota inicial (S.L.A del embalse) y cota final (punto de entrega del agua).

Para determinar el factor de fricción f , se empleará la ecuación (14) de Colebrook-White modificada por Swamee-Jain:

$$f = \frac{0.25}{\left(\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7 \cdot D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right)^2}$$

El número de Reynolds se estimará con la ecuación (12):

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Donde la viscosidad cinemática del agua (ν) tendrá $1.007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ como valor.

8.4.3 Determinación del Gradiente Piezométrico

Se utiliza la ecuación (11) de Bernoulli para determinar el gradiente piezométrico a lo largo del sistema de tuberías, considerando las cotas de elevación, presiones, velocidades del flujo y las pérdidas por fricción:

$$h_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{(V_1)^2}{2g} = h_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{(V_2)^2}{2g} + h_f$$

8.4.4 Verificación con EPANET

Los cálculos del diámetro y material considerados como óptimos se verifican utilizando el *software* EPANET debido a su capacidad para la simulación de flujo y presión de sistemas de abastecimiento de agua en redes de tuberías complejas.



Se introducen los datos obtenidos del análisis previo en EPANET y se comparan los resultados de presión y caudal para asegurar la validez de los cálculos teóricos.

9 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

9.1 Evaluación del sistema actual

Los resultados de la primera fase del análisis cualitativo se pueden ver reflejados en las Figuras 20, 21 y 22 en donde se muestran algunos ejemplos de las condiciones de los pozos de visita del canal de conducción. Resaltando a simple vista la problemática a la que se enfrenta este sistema día con día; como el ingreso de materia orgánica, basura y demás contaminantes de cualquier tipo dentro del canal; las complicaciones de acceder para efectuar las labores de limpieza; y la facilidad con la que habitantes cerca de la infraestructura pueden hacer uso del agua de manera ilegal.



Figura 20.- Ejemplo de algunos pozos de visita común en el canal de conducción.



Figura 21.- Pozos de visita de difícil acceso.



Figura 22.- Pozos y zonas del canal con extracciones clandestinas.

Se fotografió a cada pozo de visita y se relacionó con su ubicación espacial en un mapa (Figura 23) con la finalidad de identificar la distribución de las diferentes condiciones que presenta el canal en toda su extensión. De esta manera se obtiene un panorama amplio de la zona y su principal problemática. Cabe señalar que hubo zonas en donde no fue posible el acceso. Un ejemplo de esto fue en las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.) campus Morelia, debido a que el canal atraviesa este predio y se requiere de una autorización por parte del campus para que personas ajenas al OOAPAS puedan ingresar para revisarlo. También se tuvo el caso de zonas en donde no había comunicación peatonal o se requería rodear toda una colonia y por fines de recorrido se decidió omitir.

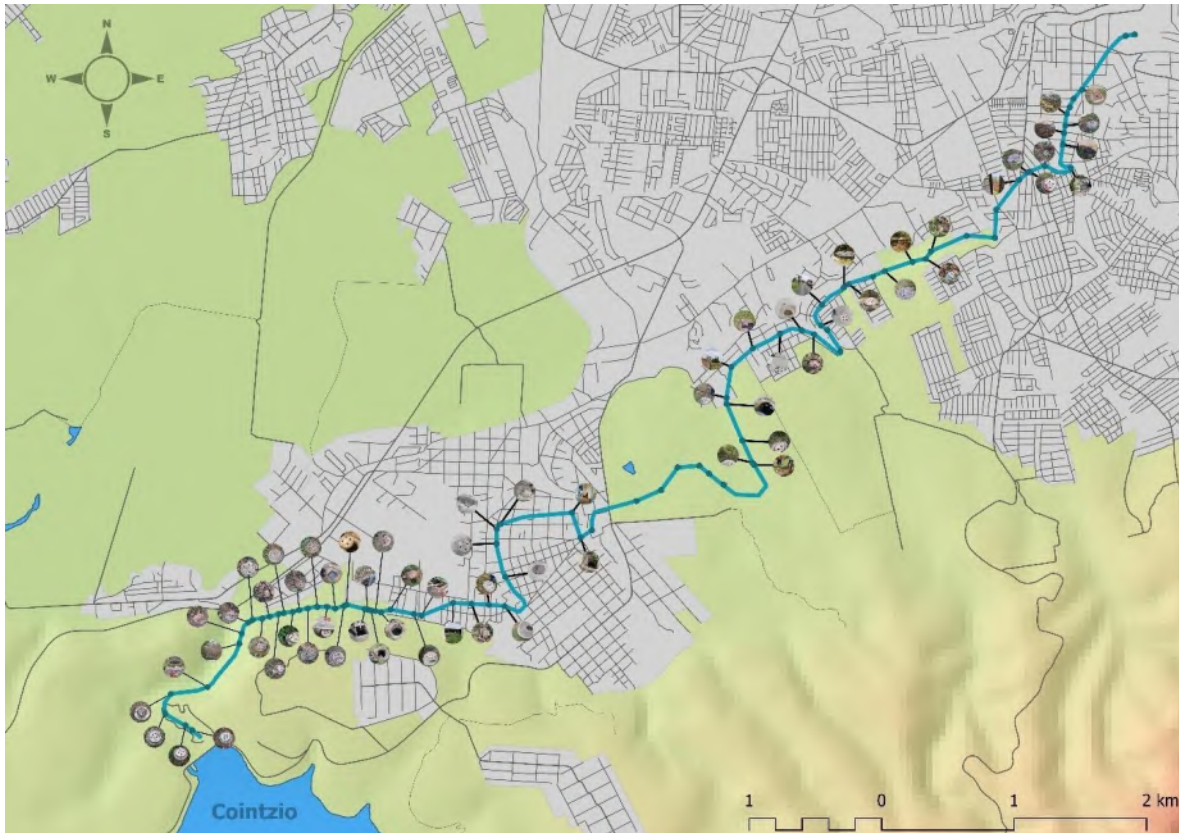


Figura 23.- Condición externa de los pozos de visita del canal de conducción actual.

Finalmente se clasifica el canal de conducción por zonas (Figura 24) con la finalidad de visualizar en que puntos la infraestructura aún puede seguir utilizándose con una adecuada rehabilitación y en que partes se requerirá un replanteamiento de su trazo para su posterior construcción e incorporación con las zonas aprovechables.

Con respecto a la evaluación interna del canal de conducción, se ingresó el día 22 de noviembre del 2024 durante las labores de mantenimiento y limpieza coordinadas por el OOAPAS, en donde se registraron zonas con taponamientos, losas caídas y demás materiales como raíces que obstaculizaban el flujo del agua (Figuras 25, 26, 27 y 28)

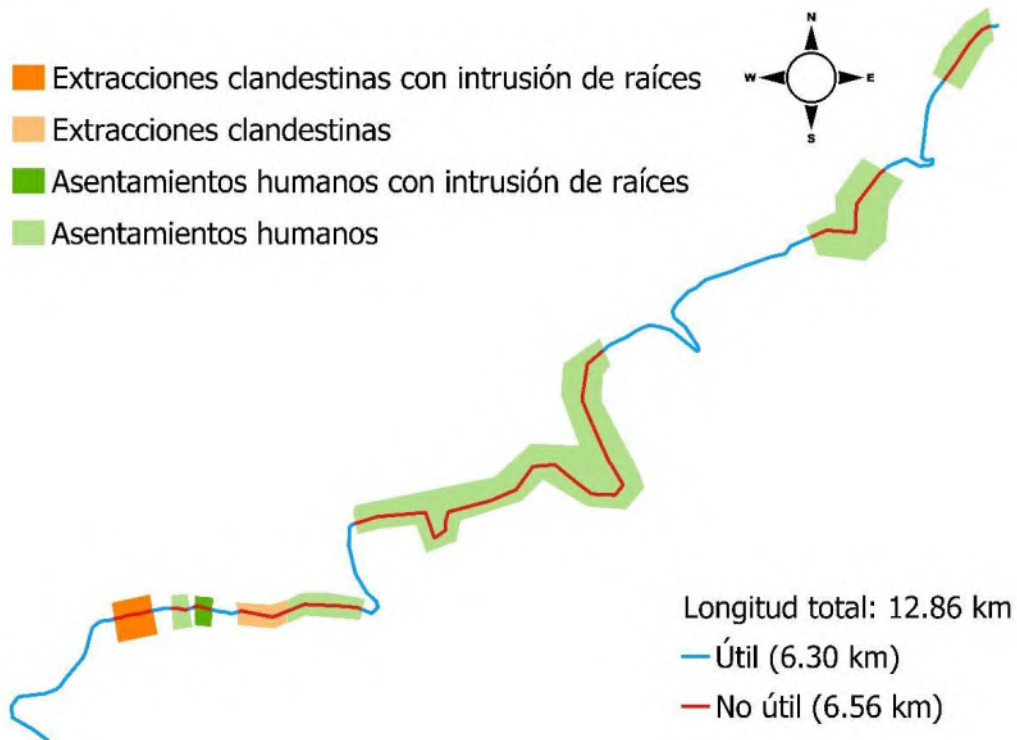


Figura 24.- Clasificación de las problemáticas del canal de Cointzio.



Figura 25.- Limpieza y condiciones internas del pozo 9 al 20.



Figura 26.- Derrumbe localizado entre los pozos 18 y 19



Figura 27.- Limpieza y condiciones internas del pozo 27 al 32 y pozo 35



Figura 28.- Limpieza y condiciones internas del pozo 46 al 48.

A pesar de que solo se muestre el registro fotográfico de algunas zonas del canal, se sabe que hay otras zonas que están en las mismas condiciones y otras donde se tiene riesgo inminente de colapso. Trabajos posteriores se realizan para evitar el colapso total del canal de conducción, sin embargo, son cada vez más las zonas que presentan la necesidad de rehabilitación. Además de representar una carga adicional para el Organismo Operador, llegará el punto en que estas acciones de preventivas y correctivas serán insostenibles.

Es por tal motivo que se obtiene un mapa, derivado de los MDE de INEGI, con las curvas de nivel señalando una franja del terreno que podría ser aprovechable para el replanteamiento del trazo del canal (Figura 29). Dicha franja o margen topográfico es considerado como el límite superior e inferior para construcción de nuevos tramos y que se preserve las condiciones del comportamiento actual del canal, es decir, flujo a gravedad y en lámina libre.

También se consideró una superposición con la Figura 24 para la facilidad de reubicación de los tramos del canal, considerando que se requieren de 14 empalmes para aprovechar todas las zonas útiles, aunque también existe la posibilidad de descartar los tramos pequeños considerados como “útiles” para reducir el número de empalmes y facilitar el proceso de replanteamiento de trazos nuevos del canal. Esto dependerá del análisis comparativo completo de todas las alternativas expuestas para elegir la opción que se considere como factible entre lo óptimo y lo económico.

Sin embargo, analizando la Figura 29, se deduce que las condiciones del terreno y la configuración actual de los asentamientos humanos no dan lugar a la alternativa de sustituir

algunos tramos. Se tomó como cota máxima la elevación de 1985 msnm por ser aproximadamente el nivel al que se encuentra la superficie libre del agua en el embalse y la cota mínima se optó por la elevación de 1960 msnm que sería la profundidad más baja a la que podría llegar a la planta potabilizadora. En total se tiene un rango de 25 metros de desnivel, desafortunadamente la mayor parte de esta zona es territorio donde se suscitan las extracciones clandestinas. Sobrepasar esta zona implica efectuar maniobras de excavación o relleno excesivo que demandaría mayor inversión económica.

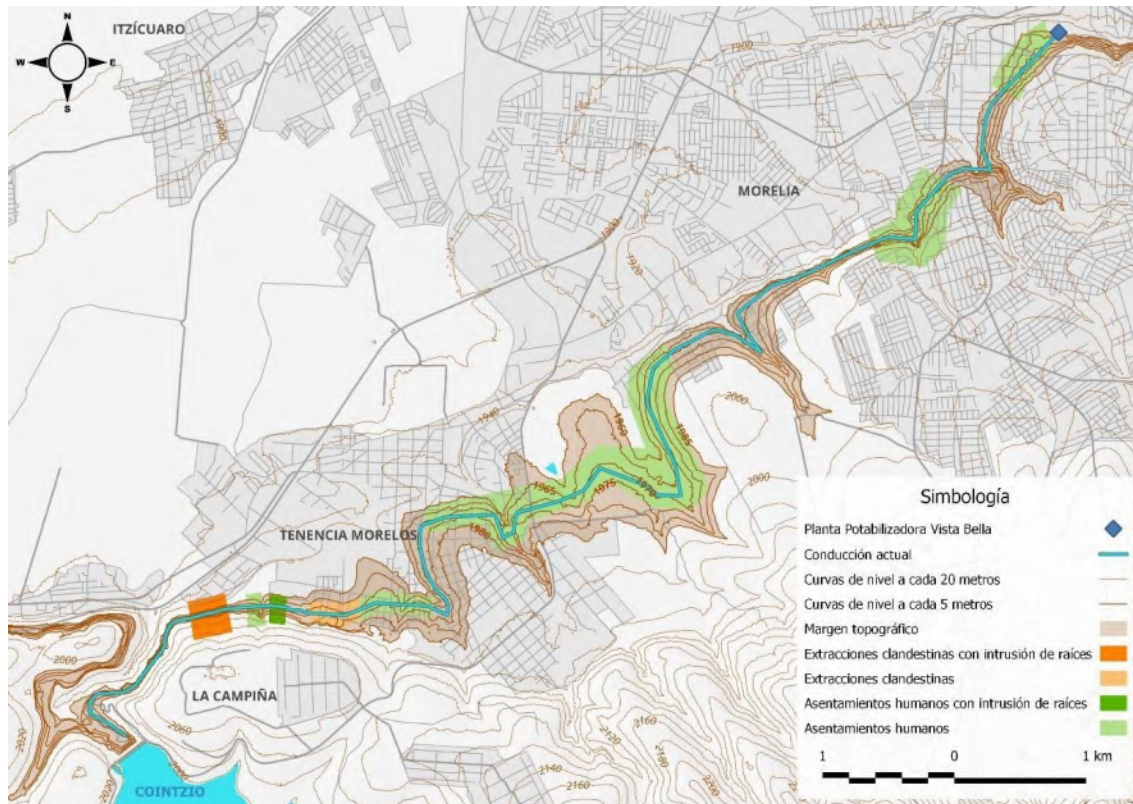


Figura 29.- Margen topográfico para preservar las condiciones de funcionamiento del sistema actual de conducción.

Continuando con los resultados de la evaluación del sistema existente pero ahora correspondientes a la fase del análisis cuantitativo se muestra en la Tabla 2 las mediciones efectuadas en los pozos de visita 1, 2, 3, 12, 19, 21, 39 y 84 del canal de conducción.

Tabla 2.- Mediciones de tirante (y), profundidad (ΔL) y tiempo (t_1 , t_2 y t_3) tomadas en campo.

Parámetro	Pozo 1	Pozo 2	Pozo 3	Pozo 12	Pozo 19	Pozo 21	Pozo 39	Pozo 84
t_1 (s)	18.17	-	16.82	25.07	36.11	36.71	18.68	15.36
t_2 (s)	21.47	-	17.22	22.01	36.08	45.03	17.77	17.45
t_3 (s)	21.14	-	16.24	23.52	36.38	42.88	16.65	16.66
y (m)	1.1	1.25	1.25	1.3	1.42	1.41	1.075	1.1
ΔL (m)	2.52	3.62	4.18	2.28	1.42	2.41	2.83	2.85

*Nota: Únicamente para pozo 3 se utilizó una longitud de desarrollo de 8 metros.

En la Tabla 3 se muestran los resultados de las ecuaciones (1), (15) y (16); tomando como dato de partida el tirante (y) y el promedio de los intervalos t_1 , t_2 y t_3 de la Tabla 2.

Tabla 3.- Estimaciones de velocidad, área y gasto en los pozos de visita medidos.

Pozo	y (m)	t (s)	V_{sup} (m/s)	V (m/s)	A (m ²)	Q (m ³ /s)
1	1.1	20.26	0.49	0.44	0.99	0.44
2	1.25	-	-	-	1.13	-
3	1.25	16.76	0.48	0.43	1.13	0.48
12	1.3	23.53	0.42	0.38	1.17	0.45
19	1.42	36.19	0.28	0.25	1.28	0.32
21	1.41	41.54	0.24	0.22	1.27	0.27
39	1.075	17.70	0.56	0.51	0.97	0.49
84	1.1	16.49	0.61	0.55	0.99	0.54

En la Figura 30 y 31 se aprecia la estructura de la modelación de la línea de conducción en HEC-RAS y SWMM respectivamente. Cuenta con las secciones transversales correspondientes a los pozos de visita medidos en campo, así como secciones transversales generadas a cada 50 metros. El método de ambas herramientas considera un comportamiento del flujo en 1D (una dimensión), por lo que su representación pudo haber sido como una línea recta, sin embargo, se optó por respetar las curvas del canal de conducción para que al modelarse se pueda identificar fácilmente cualquier zona donde se presente un comportamiento crítico y de esta forma tener mayor comodidad al momento de interpretar los resultados.

Con relación a la modelación numérica, se representan en las Figuras 32 y 33 el perfil hidráulico del canal de conducción producto de las modelaciones en HEC-RAS y SWMM respectivamente.

Finalmente, en la Tabla 4 se muestran los resultados de tirantes y velocidades de los pozos medidos en comparación con los resultados arrojados por los softwares.

Tabla 4. Comparación de tirantes y velocidades obtenidas por las mediciones, HEC-RAS y SWMM.

Pozo	Mediciones		HEC-RAS		SWMM	
	y (m)	V (m/s)	y (m)	V (m/s)	y (m)	V (m/s)
1	1,10	0,44	0,37	1,91	0,33	2,91
2	1,25	-	0,27	2,63	0,4	2,09
3	1,25	0,43	1,03	0,68	1,13	1,00
12	1,30	0,38	0,56	1,26	0,77	0,98
19	1,42	0,25	0,37	1,88	1,31	0,6
21	1,41	0,22	1,23	0,57	2,13	0,51
39	1,08	0,51	1,59	0,44	2,25	0,51
84	1,10	0,55	0,77	0,91	0,62	1,13

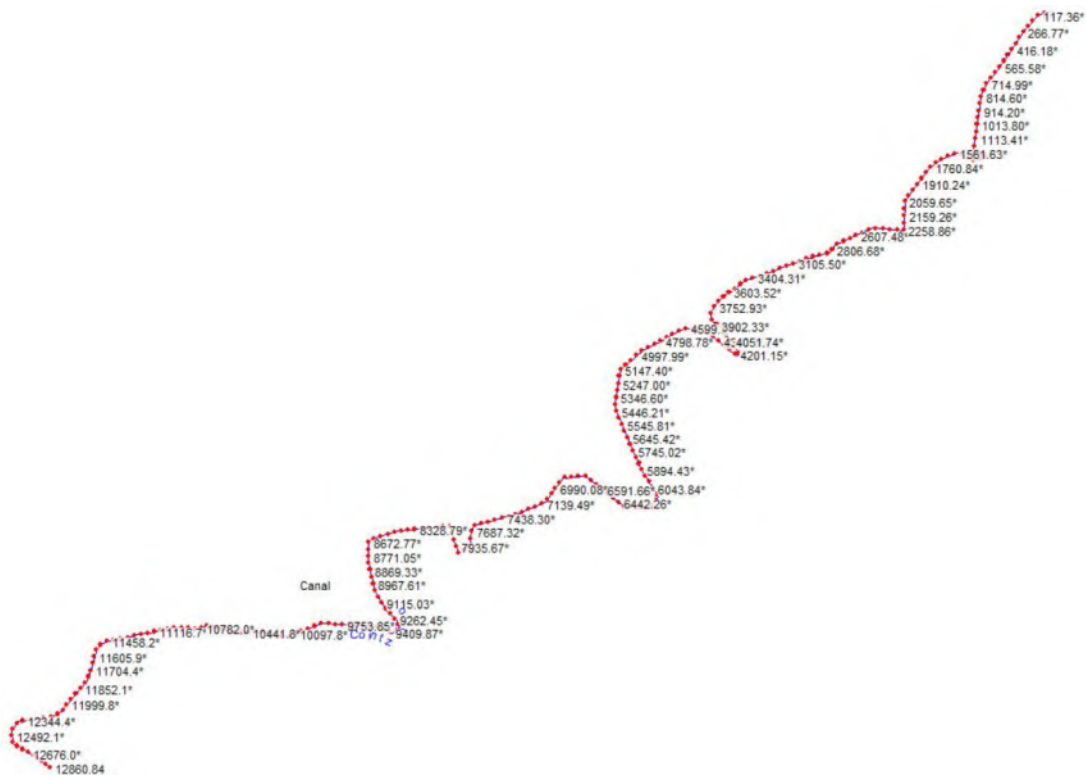


Figura 30.- Estructura de la modelación del canal de Cointzio en HEC-RAS.

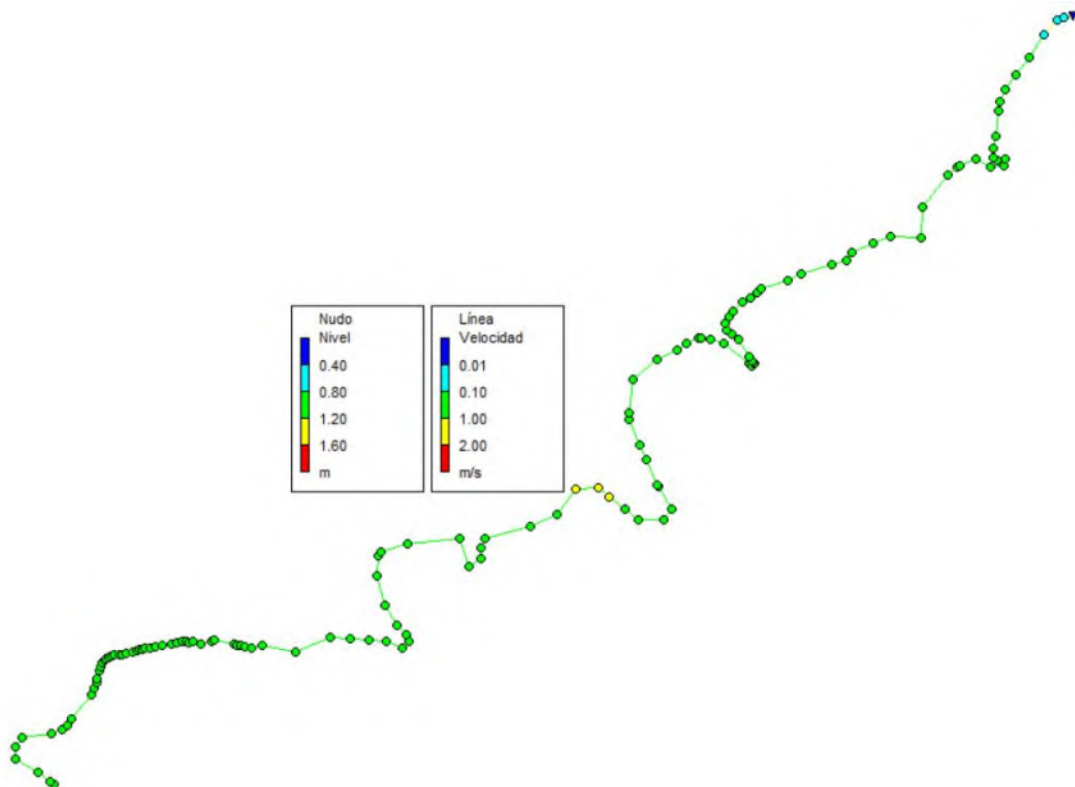


Figura 31.- Estructura de la modelación del canal de Cointzio en SWMM.

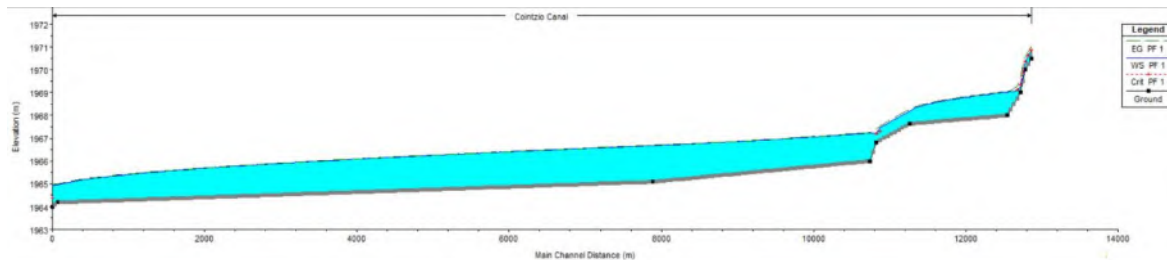


Figura 32.- Perfil hidráulico del canal de conducción en HEC-RAS.

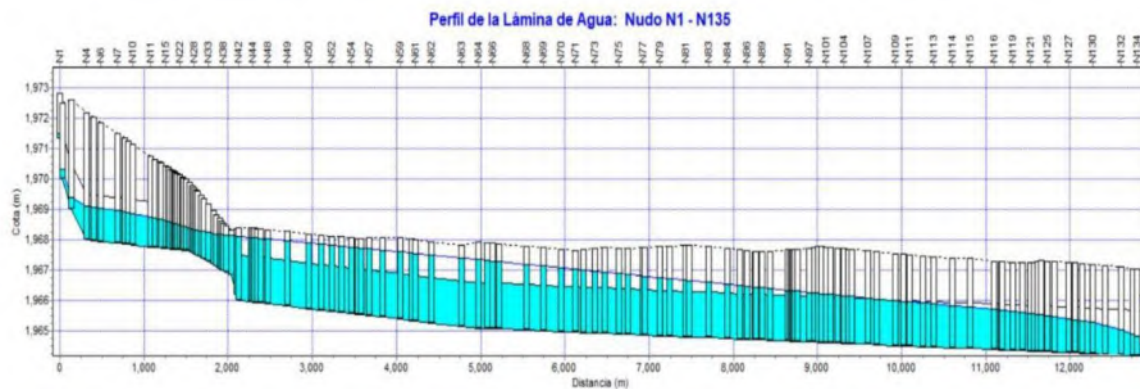


Figura 33.- Perfil hidráulico del canal de conducción en SWMM.

9.2 Revisión de las propuestas de S.D.S.

En total se crearon tres propuestas alternas (Figura 34) tomando en cuenta la topografía y traza urbana de aquel entonces, además de factores como impacto social y económico. En general las propuestas son muy similares entre sí, compartiendo el mismo trazo en gran parte de su diseño.

Al final de su análisis, la empresa SDS llegó a la conclusión de que el diseño óptimo es la alternativa tres debido a que recibe y conjuga de manera favorable los factores hidráulicos, económicos y político-sociales requeridas para llevar a cabo la conducción.

En cuanto a material y diámetro, S.D.S. deja en claro que la mejor alternativa es utilizar hierro dúctil con un diámetro nominal de 1000 mm., con una cota de arranque de 1,973.44 m.s.n.m. y pérdidas por fricción del orden de 9.91 m. El gasto de diseño que considera es de 927 L/s, lo cual es discutible por la capacidad de tratamiento de la planta potabilizadora Vista Bella que a lo mucho puede llegar a los 700 L/s, por lo que se considera en primera instancia como sobrado y teniendo un costo en aquel entonces (2009) de 152.628 millones de pesos.

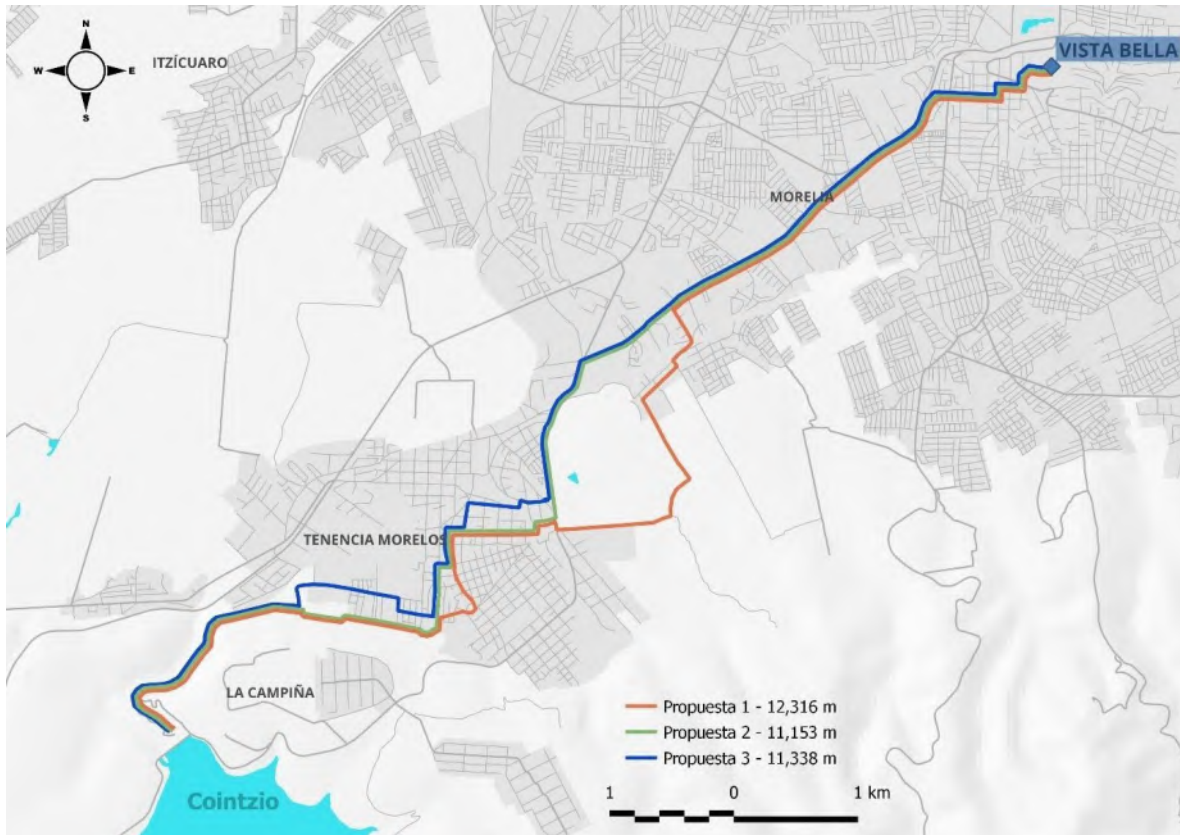


Figura 34.- Propuestas diseñadas por la empresa Servicios, Desarrollos y Suministros (S.D.S.)

Un detalle a tomar en cuenta de la propuesta número tres recomendada por la empresa S.D.S. es el alto riesgo de pérdidas por tomas ilícitas, debido a la cercanía que presenta su trazo con los pobladores que actualmente aprovechan el recurso de forma irregular, además de que algunas de las vialidades por las que pretende instalarse son estrechas, lo que dificulta su proceso constructivo; y su configuración implica un gran número de vueltas, recordando que cada cambio abrupto de dirección implica la caída del gradiente piezométrico por pérdidas locales.

Por tales motivos se considera inviable la propuesta recomendada por S.D.S. y no se continuará con la comprobación de sus cálculos hidráulicos (porque no presentó memoria de cálculo en su proyecto ejecutivo ni definió las ecuaciones de pérdida por fricción a utilizar, solo compiló los resultados).

9.3 Propuesta de conducción presurizada

Tomando en cuenta los factores antes mencionados como traza urbana, ubicación del sistema de conducción en vialidades principales o bien definidas y que perfil topográfico no supere la cota 1980 msnm, se llegó al trazo mostrado en la Figura 35 y que se extiende en una longitud aproximada de 10.924 km.

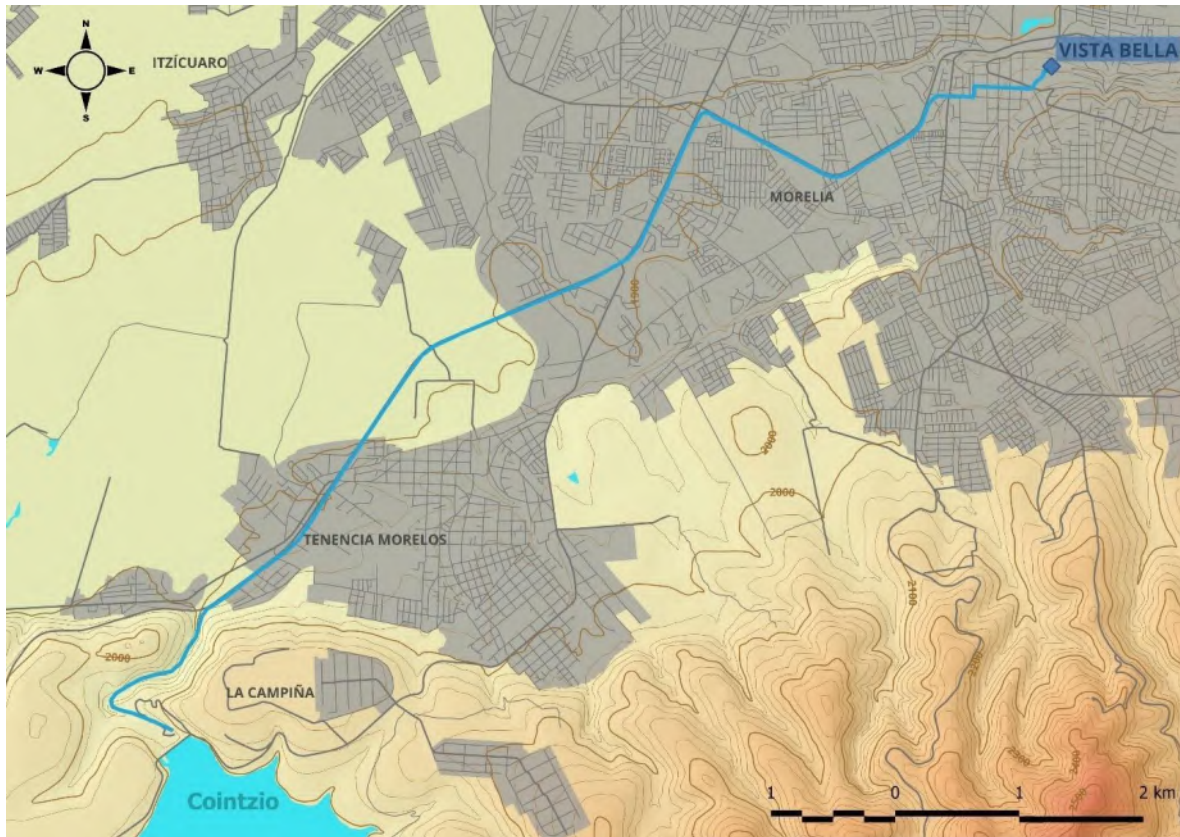


Figura 35.- Propuesta de trazo para el nuevo sistema de conducción de la presa Cointzio a la planta Vista Bella.

9.3.1 Diámetros máximo y mínimo

Para la obtención de los diámetros, se estableció que las velocidades para efectuar los cálculos son 0.30 m/s como mínima y 5.00 m/s como máxima. Obteniendo los siguientes resultados:

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot (0.63)}{\pi \cdot (5.00)}} = 0.401 \text{ m}$$

$$D_{\max} = \sqrt{\frac{4 \cdot (0.63)}{\pi \cdot (0.30)}} = 1.635 \text{ m}$$

Considerando las tuberías comerciales, no existen aquellas con Diámetro Nominal (DN) que se acerque a los 1.635 m, en su lugar, las tuberías de gran diámetro suelen estar en el orden de hasta 1.20 m. Por lo tanto, para cumplir con las características de velocidad (máxima y

mínima) y disponibilidad en el mercado se considera el rango entre 400 y 1,200 mm (16"-48") en términos de DN.

9.3.2 Perfil de Elevaciones Topográficas

En cuanto a la energía total H , se obtuvieron los datos de las cotas proporcionadas por CONAGUA en su programa de Monitoreo Nacional de Presas que se muestran en la Tabla 5 y se ejemplifican en la Figura 36.

Tabla 5.- Niveles de operación de la Presa Cointzio.

Nivel	Altura (msnm)	Volumen (hm ³)	Área (ha)
Corona	2,002.82	88.57	640.21
NAME	2,001.32	79.23	604.74
NAMO	1,999.47	68.51	551.28
Cresta del vertedor	1995.97	50.83	463.28
NAA (24/08/2025)	1995.30	47.80	-
NAMINO	1,973.31	0.90	47.48

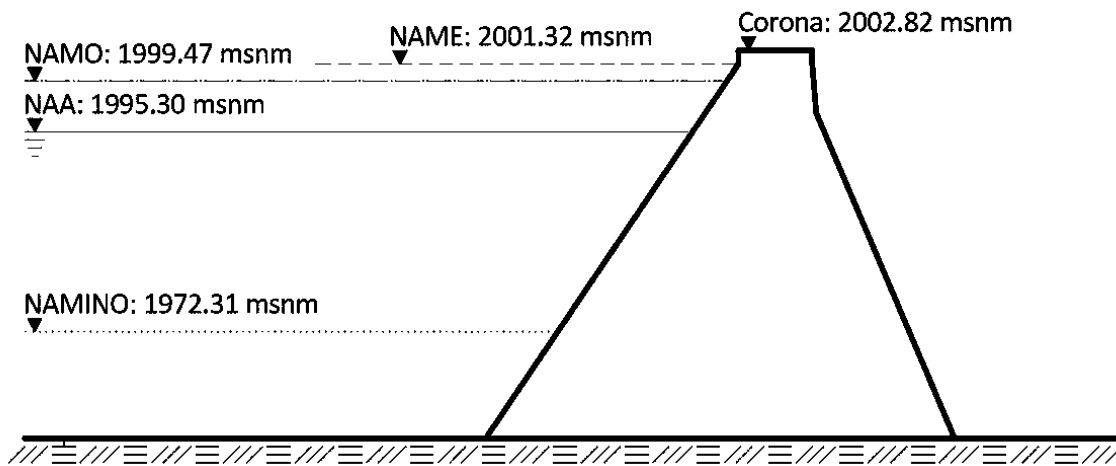


Figura 36.- Ejemplificación gráfica de los niveles de operación de la Presa Cointzio.

Obtenido del MDE proporcionado por INEGI, se estima que el punto de llegada a la planta potabilizadora está ubicado en la cota 1966 msnm. Por lo tanto, h_1 es igual a 1995.30 y h_2 toma el valor de 1966; indicando que la energía total es de:

$$H = h_1 - h_2 = 1995.30 - 1966 = 29.30 \text{ m}$$

El perfil topográfico resultante (utilizando los MDE y la herramienta QGIS.) se muestra en la Figura 37. De forma inmediata se puede observar que el punto más alto del terreno natural no sobrepasa el punto de la obra de toma y el nivel del embalse parece proveer buena presión

al sistema. Más adelante se analizará la energía disponible es suficiente para entregar el agua en la planta potabilizadora.

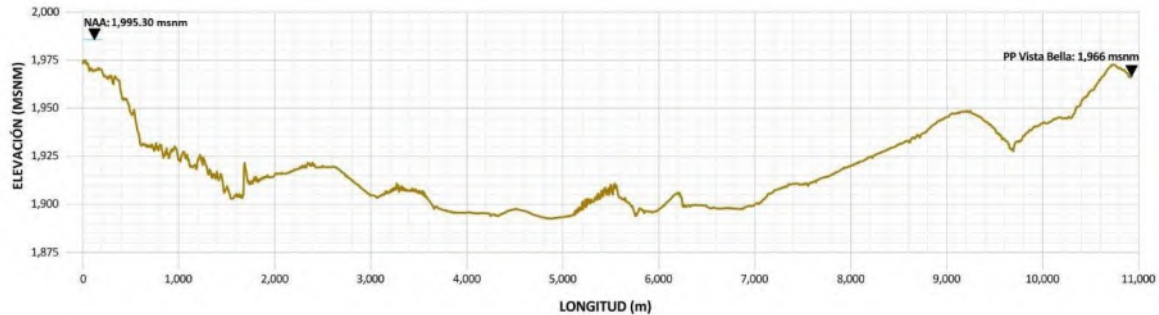


Figura 37.- Perfil topográfico del terreno natural donde se ubica el trazo de la nueva propuesta.

9.4 Escenarios de Modelación

9.4.1 Escenario 1 o base: NAA

Se decidió probar con los diámetros nominales 700, 800 y 900 mm para los materiales PVC, PEAD y hierro dúctil, siendo estos materiales los más habituales para usarse en infraestructura hidráulica.

A continuación, se muestran los datos conocidos para poder iniciar con el proceso iterativo de cálculo mostrado en la sección 8.4.2 Cálculo de Pérdidas por Fricción, para obtener el factor de fricción f correspondiente para la ecuación de Darcy-Weisbach:

- $h_1 = 1995.30$ m.s.n.m.
- $h_2 = 1966.00$ m.s.n.m.
- $f = 0.01$ (valor inicial propuesto para la primera iteración).
- $L = 10,924.54$ m.
- $D = 674.8$ mm (diámetro interior de tubería PVC de 28").
- $\varepsilon = 0.0015$ mm (rugosidad absoluta para material PVC).
- $\nu = 1.007 \cdot (10^{-6})$ m²/s

Iteración 1 – $f = 0.01$, aplicando la ecuación (19):

$$V = \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{1 + \frac{f \cdot L}{D}}} = \sqrt{\frac{2(9.81)(1995.30 - 1966.00)}{1 + \frac{(0.01) \cdot (10,924.54)}{0.6748}}} = 1.879 \text{ m/s}$$

Este resultado de velocidad se empleará en la ecuación (12) para obtener el número de Reynolds:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{(1.879) \cdot (0.6748)}{1.007 \cdot (10^{-6})} = 1,258,860.63$$

Finalmente recalculamos el factor de fricción f con la ecuación (14):

$$f = \frac{0.25}{\left(\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7 \cdot D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right)\right)^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left(\log_{10} \left(\frac{(0.0015)}{3.7 \cdot (674.8)} + \frac{5.74}{(1,258,860.63)^{0.9}} \right)\right)^2} = 0.011235$$

Obteniendo el valor adimensional de 0.011235, mismo que es distinto al inicial propuesto (0.010000). Para el valor del factor de fricción se tomarán en cuenta 6 dígitos después del punto y el proceso de iteración se detendrá cuando el valor inicial de f sea igual al valor final.

Iteración 2 – $f = 0.011235$:

$$V = \sqrt{\frac{2(9.81)(1995.30 - 1966.00)}{1 + \frac{(0.011235) \cdot (10,924.54)}{0.6748}}} = 1.773 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{(1.773) \cdot (0.6748)}{1.007 \cdot (10^{-6})} = 1,188,071.39$$

$$f = \frac{0.25}{\left(\log_{10} \left(\frac{(0.0015)}{3.7 \cdot (674.8)} + \frac{5.74}{(1,188,071.39)^{0.9}} \right)\right)^2} = 0.011340$$

Iteración 3 – $f = 0.011340$:

$$V = \sqrt{\frac{2(9.81)(1995.30 - 1966.00)}{1 + \frac{(0.011340) \cdot (10,924.54)}{0.6748}}} = 1.765 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{(1.765) \cdot (0.6748)}{1.007 \cdot (10^{-6})} = 1,182,578.04$$

$$f = \frac{0.25}{\left(\log_{10} \left(\frac{(0.0015)}{3.7 \cdot (674.8)} + \frac{5.74}{(1,182,578.04)^{0.9}} \right) \right)^2} = 0.011348$$

Iteración 4 – $f = 0.011348$:

$$V = \sqrt{\frac{2(9.81)(1995.30 - 1966.00)}{1 + \frac{(0.011348) \cdot (10,924.54)}{0.6748}}} = 1.764 \text{ m/s}$$

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{(1.764) \cdot (0.6748)}{1.007 \cdot (10^{-6})} = 1,182,137.76$$

$$f = \frac{0.25}{\left(\log_{10} \left(\frac{(0.0015)}{3.7 \cdot (674.8)} + \frac{5.74}{(1,182,137.76)^{0.9}} \right) \right)^2} = 0.011349$$

Iteración 5 – $f = 0.011349$:

$$V = \sqrt{\frac{2(9.81)(1995.30 - 1966.00)}{1 + \frac{(0.011349) \cdot (10,924.54)}{0.6748}}} = 1.764 \text{ m/s}$$

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{(1.764) \cdot (0.6748)}{1.007 \cdot (10^{-6})} = 1,182,102.38$$

$$f = \frac{0.25}{\left(\log_{10} \left(\frac{(0.0015)}{3.7 \cdot (674.8)} + \frac{5.74}{(1,182,102.38)^{0.9}} \right) \right)^2} = 0.011349$$

Como se muestra en la quinta iteración, el coeficiente inicial es igual al final, por lo que se toma el factor de fricción igual a 0.011349 y velocidad de 1.764 m/s para calcular la pérdida por fricción con la ecuación de Darcy-Weisbach (ecuación (13):

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} = (0.011349) \cdot \left(\frac{10,924.54}{0.6748} \right) \cdot \left(\frac{(1.764)^2}{2(9.81)} \right) = 29.141 \text{ m}$$

En la Tabla 6 se registraron todos los resultados obtenidos para cada uno de los materiales y diámetros propuestos:

Tabla 6.- Velocidad, gasto y pérdidas por fricción para los diferentes diámetros y materiales propuestos para la tubería de conducción.

Material	ε (mm)	DN (mm)	D_{Int} (mm)	V (m/s)	Q (L/s)	h_f (mca)
PVC	0.0015	700	674.8	1.76	630.89	29.141
		800	760.4	1.90	863.66	29.116
		900	855.4	2.05	1,176.62	29.086
PEAD	0.007	700	605.8	1.63	470.22	29.164
		800	692.4	1.77	668.15	29.140
		900	779.0	1.91	910.50	29.114
Hierro dúctil	0.03	700	713.2	1.75	697.75	29.145
		800	814.0	1.90	986.27	29.117
		900	914.0	2.04	1,335.55	29.089

Los valores de las pérdidas por fricción son muy similares entre sí. En cuestión económica es más favorable utilizar PEAD para la tubería, pero teniendo una visión a largo plazo de la infraestructura el hierro dúctil ofrece mayor seguridad debido a sus propiedades mecánicas, además de su fácil instalación y reparaciones eventuales debido a la existencia de accesorios estándar. Seleccionado así el hierro dúctil como material con un DN 800 mm.

En la Figura 38 se muestra el perfil de la tubería, dispuesto de manera que sigue el perfil del terreno y a la vez que se cumpla con una profundidad mínima de 0.90 m con excepción de la última parte a la llegada de las instalaciones de la planta potabilizadora por restricción de la línea piezométrica. Se empleo una reducción en la escala horizontal de 1:20 para mejorar la visualización de los detalles en el perfil.

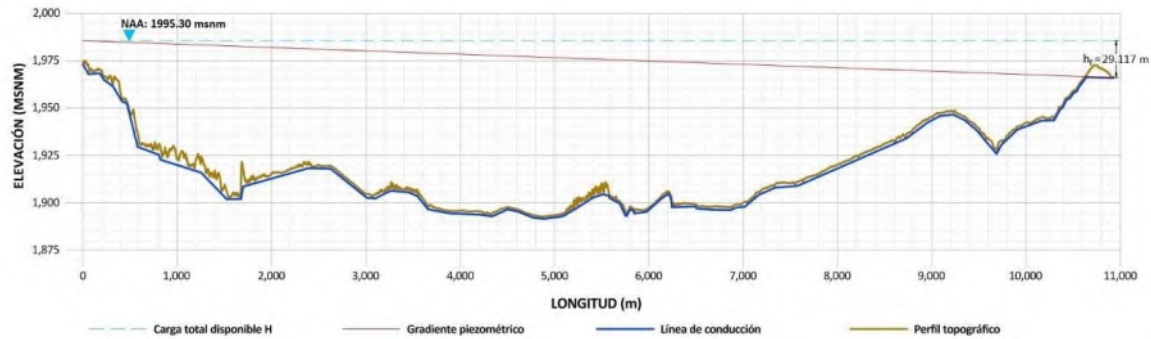


Figura 38.- Perfil del proyecto, carga disponible y gradiente piezométrico.

Siguiendo este mismo perfil, pero respetando las distancias correspondientes, se creó la modelación en EPANET de este sistema de conducción para corroborar los cálculos realizados. En la Figura 39 se puede comprobar que, para una tubería de DN 800 mm de hierro dúctil con ϵ de 0.03 mm, el sistema no presenta presiones negativas, indicador de que la conducción es posible a la Planta Potabilizadora.

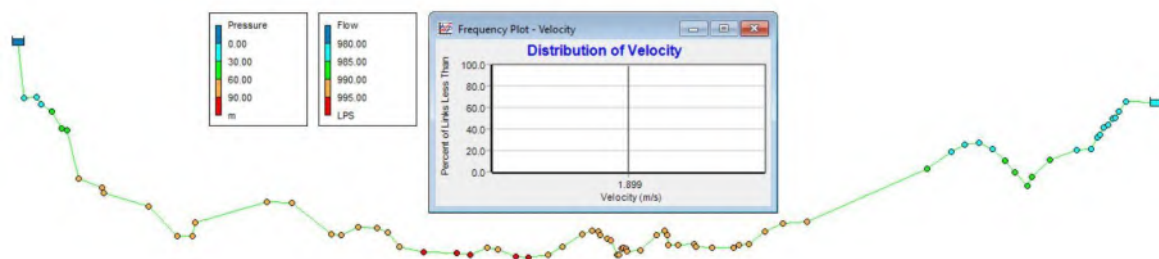


Figura 39.- Resultados de Presión y Velocidad proporcionados por la modelación en EPANET.

Esta modelación del proyecto de conducción con vista en perfil es muy útil para visualizar el comportamiento del flujo, zonas que se deben reforzar por altas presiones, lugares óptimos para la colocación de válvulas de admisión y expulsión de aire entre otras cuestiones. No obstante, también es de importancia realizar este mismo modelo con vista en planta para tener referencia geográfica de todo lo analizado en el sistema de conducción.

En la Figura 40 se muestra la modelación con vista satelital, en donde se puede apreciar que los resultados de velocidad, presión y gasto son consistentes con los mostrados en la modelación con vista en perfil (Figura 39). Así mismo, también se presenta una división del trazo en tres partes para posteriormente tener una mejor visualización de la modelación.

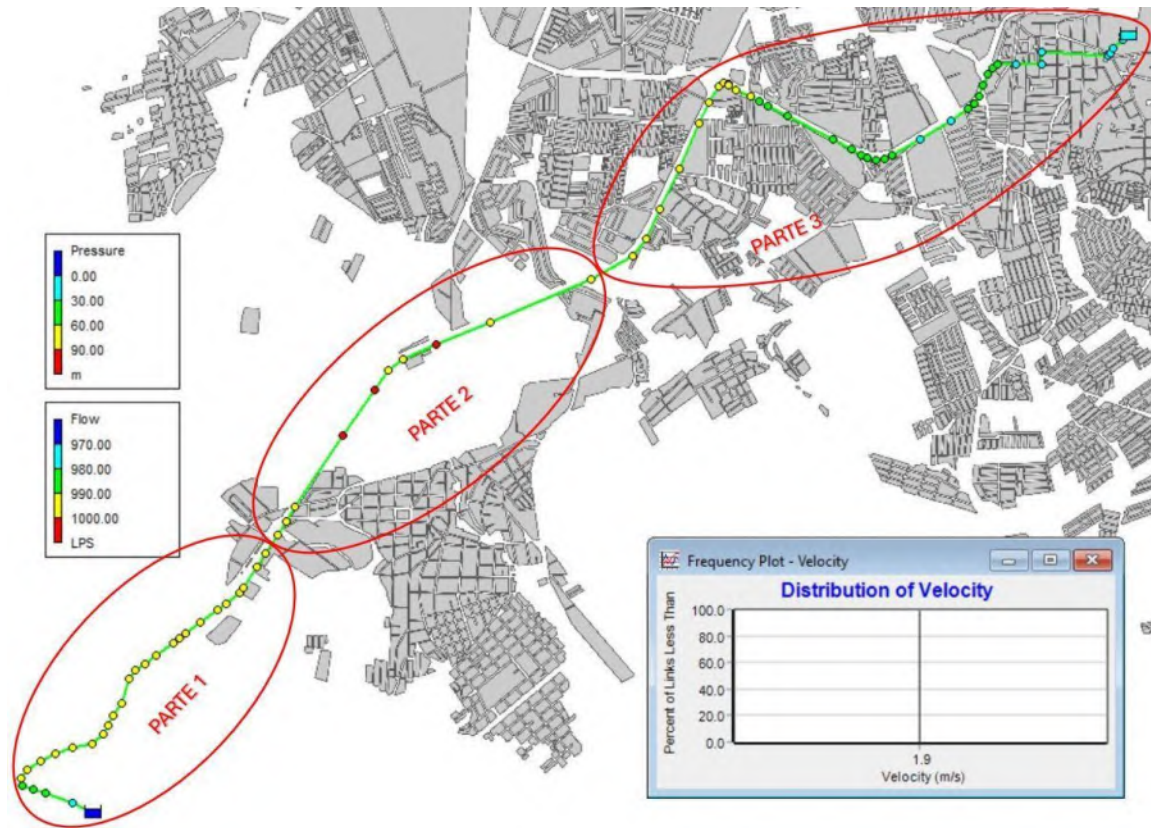


Figura 40.- Modelo del proyecto en EPANET con vista en planta y seccionado en tres partes.

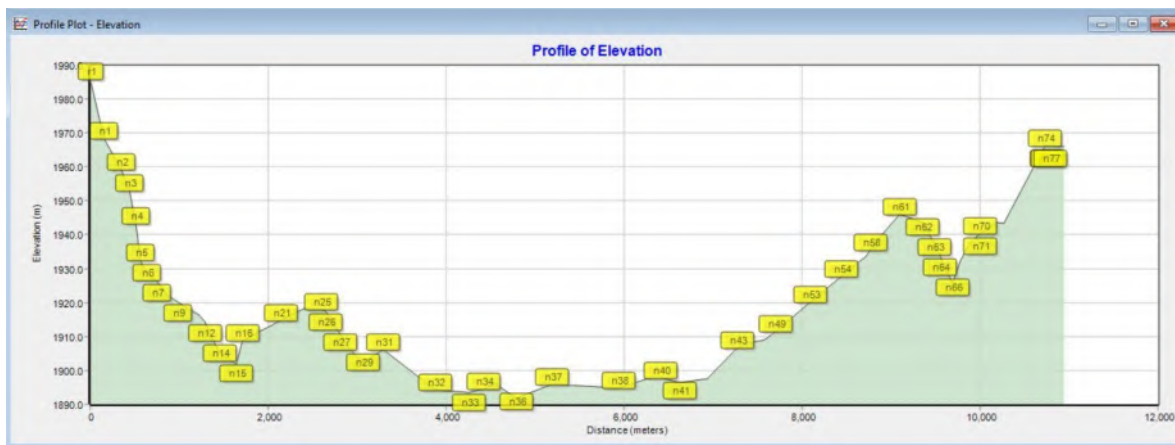


Figura 41.- Perfil topográfico de los nodos en la Modelación de EPANET con vista en planta.

Las Figuras Figura 42, Figura 43 y Figura 44 son los resultados por partes del sistema de conducción (cada parte definida en la Figura 40) utilizando tubería de acero con diámetro nominal de 800 mm (32"). Como se puede apreciar para la modelación con el Nivel de Agua Actual correspondiente a la cota 1995.30, se puede distinguir que no se presentan presiones

negativas y la presión más alta se genera en la parte dos (Figura 43), misma que no supera los 91 m.c.a. (9.1 Kg/cm²)

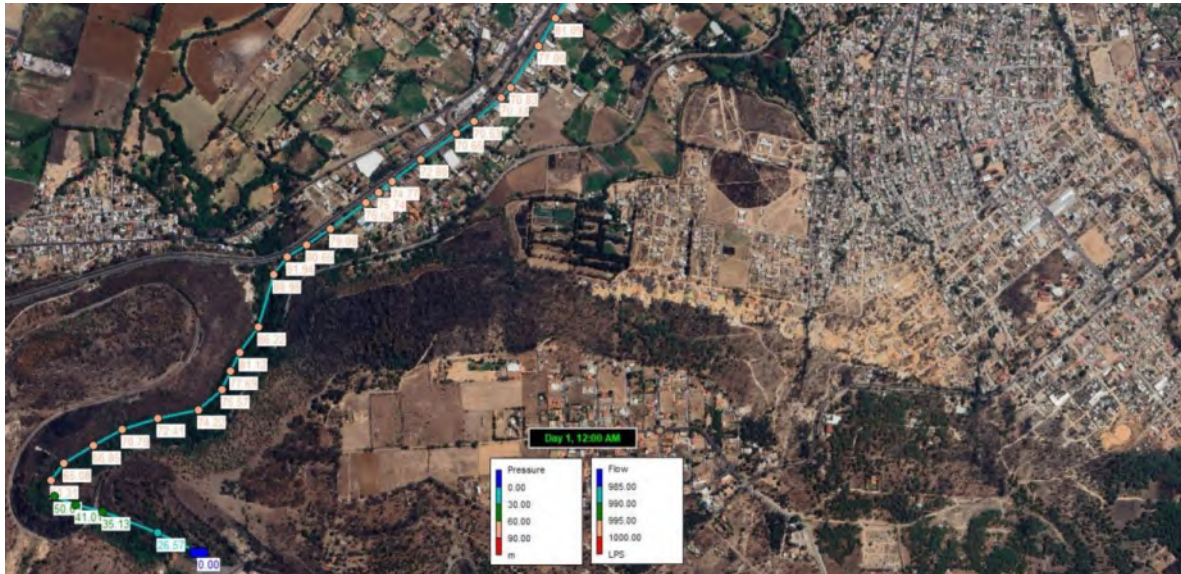


Figura 42.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 1 (parte 1).



Figura 43.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 1 (parte 2).



Figura 44.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 1 (parte 3).

De igual forma los demás cálculos del *software* se pueden encontrar en la Figura 45. Donde *Unit Headloss* es la pérdida de carga (Pérdida por fricción más la carga de velocidad) expresada en m/km, es decir, la altura en metros dividida entre la longitud total de la tubería en kilómetros. Por lo tanto, la pérdida de carga que estima EPANET es de:

$$h_{f_{EPANET}} = (2.68 \text{ m/km}) \cdot (10.924 \text{ km}) = 29.276 \text{ m}$$

Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness mm	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor	Status
Pipe p65	61.17220279	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open
Pipe p66	76.3766157	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open
Pipe p67	82.2491869	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open
Pipe p68	56.08810017	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open
Pipe p69	40.73102174	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open
Pipe p70	128.4098803	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open
Pipe p71	2.357084852	814	0.03	988.99	1.90	2.72	0.012	Open
Pipe p72	169.667931	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open
Pipe p73	85.91718617	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open
Pipe p74	453.6397291	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open
Pipe p75	20.08217603	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open
Pipe p76	8.326541899	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open
Pipe p77	37.1236675	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open
Pipe p78	85.44660692	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open
Pipe p79	36.93718848	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open
Pipe p80	30.09305784	814	0.03	988.99	1.90	2.68	0.012	Open

Figura 45.- Tabla de resultados del escenario 1 en EPANET: Caudales y velocidades.

Partiendo de los resultados obtenido mediante los resultados de las formulaciones descritas en el apartado de metodología:

$$\text{Unit Headloss} = \frac{\frac{V^2}{2g} + hf}{\frac{L}{1000}} = \frac{\frac{(1.895)^2}{2(9.81)} + 29.117}{\frac{10,924.54}{1000}} = \frac{0.183 + 29.117}{10.924} = 2.682 \text{ m/km}$$

El gasto, velocidad, pérdidas por fricción y demás datos calculados por el software de EPANET y los obtenidos con anterioridad (Tabla 6) para el diámetro y material seleccionado, se contrastan en la Tabla 7.

Tabla 7.- Comparación de resultados analíticos y de modelación numérica.

Parámetro	Formulación manual	Resultados en EPANET
Caudal (L/s)	986.27	988.99
Velocidad (m/s)	1.895	1.900
Factor de fricción	0.011851	0.012
h_f (m.c.a)	29.117	-
Unit Headloss (m/km)	2.682	2.68
Presión máxima (m.c.a) en el nodo con cota 1,891.91 msnm a 4,792.06 metros del embalse	90.427	90.53
Presión mínima (m.c.a) en el nodo con cota 1,966.04 msnm a 10,894.45 metros del embalse	0.0402	0.04

9.4.2 Escenario 2: NAMINO

Para este escenario se contempla el funcionamiento del sistema de conducción cuando la presa este en su Nivel de Agua Minino de Operación (NAMINO) correspondiente a la elevación 1,972.31 m.s.n.m.

Para este escenario se llegan a presentar presiones negativas como se muestra en la Figura 48 , un resultado esperable ante la situación modelada.

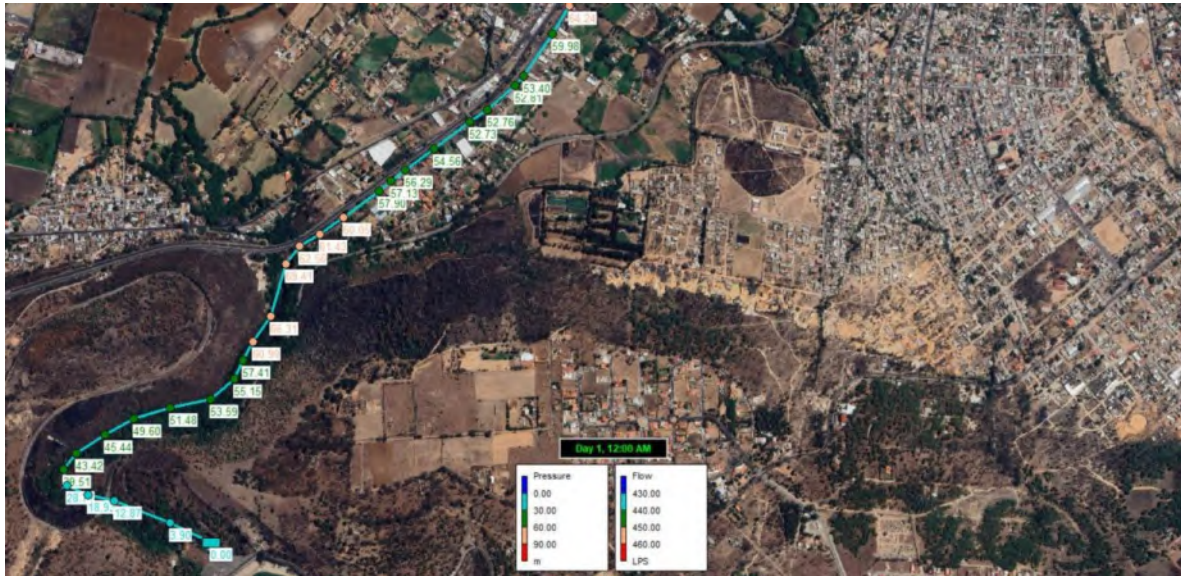


Figura 46.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 2 (parte 1).



Figura 47.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 2 (parte 2).



Figura 48.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 2 (parte 3).

Network Table - Links								
Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness mm	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor	Status
Pipe p65	61.17220279	814	0.03	436.8	0.84	0.58	0.013	Open
Pipe p66	76.3766157	814	0.03	436.8	0.84	0.58	0.013	Open
Pipe p67	82.2491869	814	0.03	436.8	0.84	0.58	0.013	Open
Pipe p68	56.08810017	814	0.03	436.8	0.84	0.58	0.013	Open
Pipe p69	40.73102174	814	0.03	436.8	0.84	0.58	0.013	Open
Pipe p70	128.4098803	814	0.03	436.8	0.84	0.58	0.013	Open
Pipe p71	2.357084852	814	0.03	436.8	0.84	0.57	0.013	Open
Pipe p72	169.667931	814	0.03	436.8	0.84	0.58	0.013	Open
Pipe p73	85.91718617	814	0.03	436.8	0.84	0.58	0.013	Open
Pipe p74	453.6397291	814	0.03	436.8	0.84	0.58	0.013	Open
Pipe p75	20.08217603	814	0.03	436.8	0.84	0.58	0.013	Open
Pipe p76	8.326541899	814	0.03	436.8	0.84	0.57	0.013	Open
Pipe p77	37.1236675	814	0.03	436.8	0.84	0.58	0.013	Open
Pipe p78	85.44660692	814	0.03	436.8	0.84	0.58	0.013	Open
Pipe p79	36.93718848	814	0.03	436.8	0.84	0.58	0.013	Open
Pipe p80	30.09305784	814	0.03	436.8	0.84	0.58	0.013	Open

Figura 49.- Tabla de resultados del escenario 2 en EPANET: Caudales y velocidades.

9.4.3 Escenario 3: Máxima sequía histórica

Para este escenario se realizó un análisis histórico de la presa de Cointzio con datos de CONAGUA en su Sistema Nacional de Monitores de Presas. En total se analizaron 24 años desde el 2000 hasta el 2024, encontrando que la fecha con mayor sequía se presentó el 29 de junio del 2024 con un nivel del embalse de 1983.91 m.s.n.m.



Figura 50.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 3 (parte 1).



Figura 51.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 3 (parte 2).



Figura 52.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 3 (parte 3).

Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness mm	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor	Status
Pipe p65	61.17220279	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p66	76.3766157	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p67	82.2491869	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p68	56.08810017	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p69	40.73102174	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p70	128.4098803	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p71	2.357084852	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p72	169.667931	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p73	85.91718617	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p74	453.6397291	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p75	20.08217603	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p76	8.326541899	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p77	37.1236675	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p78	85.44660692	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p79	36.93718848	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open
Pipe p80	30.09305784	814	0.03	762.26	1.46	1.64	0.012	Open

Figura 53.- Tabla de resultados del escenario 3 en EPANET: Caudales y velocidades.

Mostrando que, a pesar de ser el momento de mayor sequía del cual se tiene registro, no se presentan presiones negativas y, por ende, la conducción hacia la Planta Potabilizadora se sigue llevando a cabo, con un caudal de 762.26 L/s.

9.4.4 Escenario 4: NAMO



Figura 54.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 4 (parte 1).



Figura 55.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 4 (parte 2).



Figura 56.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 4 (parte 3).

Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness mm	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor	Status
Pipe p65	61.17220279	814	0.03	1060.84	2.04	3.06	0.012	Open
Pipe p66	76.3766157	814	0.03	1060.84	2.04	3.06	0.012	Open
Pipe p67	82.2491869	814	0.03	1060.84	2.04	3.06	0.012	Open
Pipe p68	56.08810017	814	0.03	1060.84	2.04	3.06	0.012	Open
Pipe p69	40.73102174	814	0.03	1060.84	2.04	3.06	0.012	Open
Pipe p70	128.4098803	814	0.03	1060.84	2.04	3.06	0.012	Open
Pipe p71	2.357084852	814	0.03	1060.84	2.04	3.03	0.012	Open
Pipe p72	169.667931	814	0.03	1060.84	2.04	3.06	0.012	Open
Pipe p73	85.91718617	814	0.03	1060.84	2.04	3.06	0.012	Open
Pipe p74	453.6397291	814	0.03	1060.84	2.04	3.06	0.012	Open
Pipe p75	20.08217603	814	0.03	1060.84	2.04	3.07	0.012	Open
Pipe p76	8.326541899	814	0.03	1060.84	2.04	3.06	0.012	Open
Pipe p77	37.1236675	814	0.03	1060.84	2.04	3.06	0.012	Open
Pipe p78	85.44660692	814	0.03	1060.84	2.04	3.06	0.012	Open
Pipe p79	36.93718848	814	0.03	1060.84	2.04	3.07	0.012	Open
Pipe p80	30.09305784	814	0.03	1060.84	2.04	3.06	0.012	Open

Figura 57.- Tabla de resultados del escenario 4 en EPANET: Caudales y velocidades.

Para este escenario lo de mayor relevancia, al tener mayor cantidad de agua disponible, es la presión máxima a la que se pueda llegar en la línea de conducción, la cual es de 93.14 m.c.a. (9.3 kg/cm²) en condiciones que se encuentran dentro de los niveles de operación de la Presa de Cointzio.

9.4.5 Escenario 5: Máxima carga estática - NAA

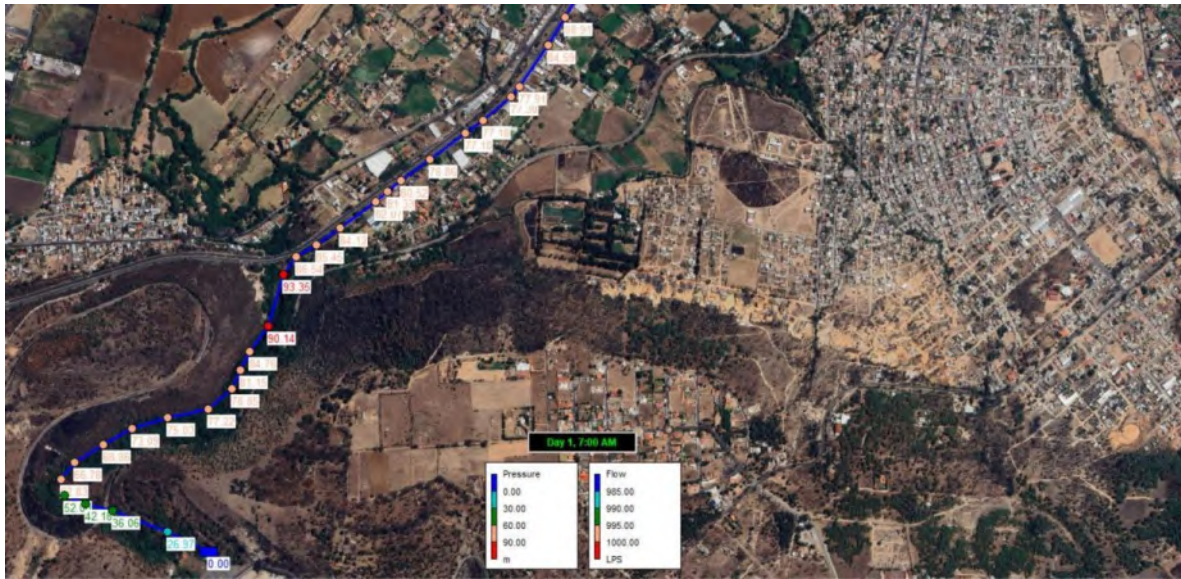


Figura 58.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 5 (parte 1).



Figura 59.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 5 (parte 2).



Figura 60.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 5 (parte 3).

Network Table - Links at 7:00 Hrs								
Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness mm	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor	Status
Pipe p65	61.17220279	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p66	76.3766157	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p67	82.2491869	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p68	56.08810017	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p69	40.73102174	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p70	128.4098803	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p71	2.357084852	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p72	169.667931	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p73	85.91718617	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p74	453.6397291	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p75	20.08217603	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p76	8.326541899	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p77	37.1236675	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p78	85.44660692	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p79	36.93718848	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p80	30.09305784	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Closed

Figura 61.- Tabla de resultados del escenario 5 en EPANET: Caudales y velocidades.

Como se muestra en la Figura 59, la máxima presión a la que se encuentra sometida el sistema de conducción con el Nivel Actual de Agua es de 103.38 m.c.a., es decir, que un cierre abrupto en la planta potabilizadora por cualquier eventualidad, representa un aumento de presión en la tubería de conducción logrando sobrepasar los 10 kg/cm².

9.4.6 Escenario 6: Máxima carga estática - NAMO

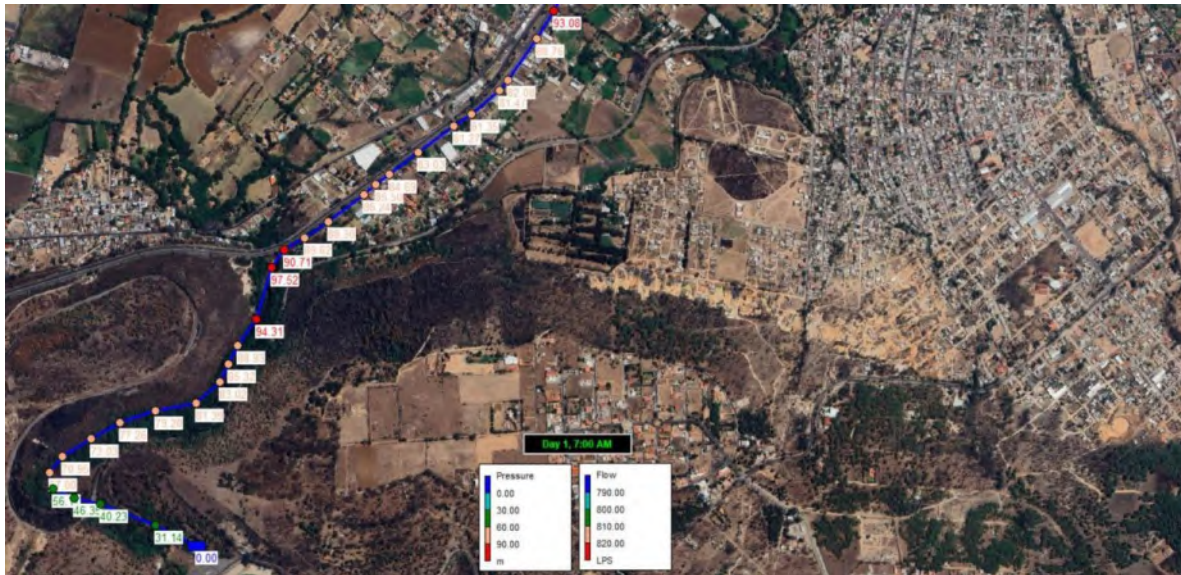


Figura 62.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 6 (parte 1).



Figura 63.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 6 (parte 2).



Figura 64.- Resultados de la modelación en EPANET para el escenario 6 (parte 3).

Network Table - Links at 7:00 Hrs								
Link ID	Length m	Diameter mm	Roughness mm	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Friction Factor	Status
Pipe p65	61.17220279	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p66	76.3766157	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p67	82.2491869	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p68	56.08810017	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p69	40.73102174	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p70	128.4098803	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p71	2.357084852	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p72	169.667931	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p73	85.91718617	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p74	453.6397291	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p75	20.08217603	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p76	8.326541899	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p77	37.1236675	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p78	85.44660692	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p79	36.93718848	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Open
Pipe p80	30.09305784	814	0.03	0.00	0.00	0.00	0.000	Closed

Figura 65.- Tabla de resultados del escenario 6 en EPANET: Caudales y velocidades.

En este último escenario que representa la situación más desfavorable en cuanto la presión máxima posible que se pudiera llegar a tener el sistema de conducción, misma que no sobrepasa los 11 kg/cm² (107.55 m.c.a.), sin embargo, son más nodos los que presentan un incremento mayor a los 10 kg/cm² (Figura 63). Esto se debe tener en consideración al momento de la selección de la resistencia del material y tener identificado las zonas que requieren de reforzamiento a la hora de la ejecución de la obra. Todos estos elementos nos permiten considerar como viable la propuesta aquí presentada.

9.5 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos reflejan la importancia de realizar simulaciones cuidadosas y respaldadas por datos precisos para la evaluación de sistemas hidráulicos. Si bien las modelaciones realizadas en HEC-RAS y SWMM proporcionaron un entendimiento inicial del comportamiento del sistema de conducción, se identificaron limitaciones significativas debido a la calidad de las mediciones empleadas, las cuales fueron realizadas con métodos rudimentarios y debido a las restricciones de acceso a la línea de conducción. Esto subraya la necesidad de una calibración exhaustiva que permita obtener simulaciones fiables. En este sentido, se considera que SWMM ofrece una representación más adecuada del comportamiento hidráulico del sistema, en comparación con HEC-RAS. Por ello, los esfuerzos futuros deberán enfocarse en la calibración de este software, lo cual posibilita obtener resultados más precisos para replantear y optimizar zonas críticas del sistema.

Sin embargo, el análisis de las zonas no útiles dentro del sistema actual mostró que su reemplazo generaría un total de 14 empalmes. Este número, además de incrementar la complejidad constructiva, podría elevar los costos de mejoramiento. Esto plantea la necesidad de realizar un análisis costo-beneficio que permita decidir entre tres posibles alternativas: reemplazar todas las zonas no útiles, reducir el número de empalmes al mínimo y dejar en desuso parte de la infraestructura, o implementar un sistema completamente nuevo. Este último enfoque es el que se consideró más viable, dada la posibilidad de diseñar un sistema que opere bajo condiciones optimizadas desde su concepción.

La propuesta de un sistema de conducción nuevo se fundamentó en el funcionamiento presurizado de tubería que trabaja a gravedad con el principio de sifón invertido, pero a gran escala, su análisis realizado de forma manual con las ecuaciones fundamentales y respaldado por medio de una simulación con EPANET. Los resultados obtenidos mostraron que el diseño basado en un sifón invertido permite una conducción continua a gravedad sin necesidad de equipos de bombeo, lo que supone un ahorro significativo en costos operativos. A pesar de esta ventaja, se identificaron presiones bajas al final del sistema, en el rango de 0.11 a 0.12 m.c.a., lo cual podría limitar la capacidad de realizar ajustes posteriores en las tuberías. Este comportamiento se atribuye a factores como la diferencia de niveles entre la presa y la planta potabilizadora, la longitud total del sistema y el perfil del terreno.

En términos de diseño hidráulico, se exploraron posibles soluciones para mitigar las bajas presiones, como modificar el diámetro de las tuberías o emplear materiales con distinta rugosidad. No obstante, los cálculos indicaron que las pérdidas por fricción no se ven significativamente afectadas por estas modificaciones, lo que sugiere que las bajas presiones son inherentes a las características geométricas y topográficas del sistema. Por lo tanto, para mejorar la viabilidad del diseño, es fundamental verificar las cotas del último tramo de conducción y ajustar las excavaciones necesarias para evitar sobrepasar la línea piezométrica, asegurando además la correcta llegada del flujo a través de la caseta de precloración en la planta potabilizadora.



Cabe resaltar que las bajas presiones en los nodos cercanos a la llegada de la Planta Potabilizadora se deben también por la manera en que se está analizando el modelo, en el cual se considera que existe una llegada libre (en EPANET modelado como un reservorio). Una variante efectuada en la modelación, en donde se sustituye en la sección final el reservorio por un nodo al cual se le asigna una demanda base menor a la que puede conducir la tubería (en el caso del escenario uno, en el cual el gasto obtenido fue de 988.99 L/s), al disminuir el caudal, disminuye la velocidad y por conservación de energía se incrementa la presión. En este caso se modelo con una demanda base de 900 L/s en el nodo final, disminuyendo la velocidad de 1.90 m/s a 1.73 m/s y la presión en el penúltimo nodo pasó de 0.04 a 4.82 m.c.a. Esto de manera real podría representarse con un dispositivo que regule el flujo de llegada a la Planta Potabilizadora como una Válvula de Reguladora de Caudal o una Válvula de Compuerta parcialmente cerrada y calibrada para que deje pasar el gasto designado. Esto también se puede extrapolar a los demás escenarios, sobre todo en el escenario dos donde se tiene presiones negativas en el resultado de la modelación.



10 CONCLUSIONES

El objetivo general de este proyecto consistía en elaborar un anteproyecto del sistema de conducción de la presa Cointzio a la planta potabilizadora Vista Bella en la ciudad de Morelia. Con base los resultados comparativos de diversos escenarios analizados en el proyecto, se puede concluir que:

- Existe la factibilidad técnica de implementar el anteproyecto planteado, consistente en la alternativa un nuevo sistema de conducción basado en el principio del sifón invertido. Esto no solo resolvería las limitaciones del sistema actual, sino que también ofrecería una alternativa más eficiente y sostenible desde el punto de vista tanto económico, como operativo.
- La propuesta de un sistema completamente nuevo representa la alternativa más viable, ya que podría operar bajo condiciones optimizadas desde su concepción.
- Los resultados obtenidos mostraron que el diseño basado en un sifón invertido permite una conducción continua a gravedad sin necesidad de equipos de bombeo, lo que supone un ahorro significativo en costos operativos.
- La modelación con SWMM ofrece una representación más realista del comportamiento hidráulico del sistema, en comparación con HEC-RAS.



11 RECOMENDACIONES

Adicionalmente a las propuestas realizadas y para complementar este proyecto en futuras investigaciones o proyectos relacionados, se recomendaría:

- Realizar un análisis más detallado de las condiciones topográficas, verificando en particular las cotas del último tramo de conducción y ajustar las excavaciones necesarias para evitar sobrepasar la línea piezométrica, asegurando además la correcta llegada del flujo a través de la caseta de precloración en la planta potabilizadora y mejorar así la viabilidad del diseño.
- Realizar una recopilación de datos en mayor cantidad de muestras y realizando mediciones más precisas, y así proceder a una mejor validación de los modelos hidráulicos.
- Analizar la incorporación de dispositivos que adicionen energía al sistema, sin recurrir a fuentes externas de electricidad, como arietes hidráulicos, sifones mejorados o sistemas de bombeo solar térmico. Estos dispositivos podrían complementar el diseño propuesto y mejorar su desempeño sin incrementar los costos operativos de forma significativa. Pero de ser correcto el diseño no sería necesario puesto que no es requisito que el agua llegue con mucha presión a la planta potabilizadora.
- Realizar un análisis económico a mayor profundidad para garantizar la implementación exitosa del sistema propuesto, considerando los costos socioeconómicos que la implementación de este proyecto implicaría, dada la responsabilidad del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia, con su población.



12 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ávila García, P. (2007). Agua, ciudad y medio ambiente (1a ed.). UNAM.
- Comisión Nacional del Agua. (2015a). Conducciones (MAPAS). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. www.conagua.gob.mx
- Comisión Nacional del Agua. (2015b). Diagnóstico para el manejo integral de las subcuencas Tuxpan, El Bosque, Ixtapan del Oro, Valle de Bravo, Colorines-Chilesdo y Villa Victoria pertenecientes al Sistema Cutzamala. <https://documents.worldbank.org/pt/publication/documents-reports/documentdetail/309801468189248037/cutzamala-diagnostico-integral>
- Comisión Nacional del Agua. (2015c). Obras de captación superficiales (MAPAS). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. www.conagua.gob.mx
- Comisión Nacional del Agua. (2024). Sistema de Seguridad de Presas. https://presas.conagua.gob.mx/inventario/tuso_agua_display.aspx?DSP,2202
- Denzin, C., Taboada, F., & Pacheco-Vega, R. (Eds.). (2017). El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica (1a ed.). Friedrich-Ebert-Stiftung.
- Environmental Protection Agency. (s/f-a). EPANET - Application for Modeling Drinking Water Distribution Systems. <https://www.epa.gov>. Recuperado el 14 de agosto de 2024, de <https://www.epa.gov/water-research/epanet>
- Environmental Protection Agency. (s/f-b). Storm Water Management Model (SWMM). <https://www.epa.gov>. Recuperado el 6 de agosto de 2024, de <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Espejel, R. (2024, febrero 7). El Acueducto de Valladolid - Morelia. Michoacán histórico. <https://www.michoacanhistorico.com/el-acueducto-de-valladolid-morelia/>
- Fernández, D., Muntañez, A., & Sarmanto, N. (2023). Diagnóstico de la prestación de los servicios de agua potable y alcantarillado en México. <https://hdl.handle.net/11362/49001>
- Gardea, H. (1999). Hidráulica de Canales (3a ed.). UNAM Facultad de Ingeniería.
- González-Ramírez, E. A., & Bejarano-Salazar, E. (2019). Sistemas de información geográfica y modelado hidráulico de redes de abastecimiento de agua potable: estudios de caso en la provincia de Guanacaste, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 2(63), 293–318. <https://doi.org/10.15359/rgac.63-2.11>



- Haider, H., Sadiq, R., & Tesfamariam, S. (2014). Performance indicators for small- and medium-sized water supply systems: a review. *Environmental Reviews*, 22(1), 1–40. <https://doi.org/10.1139/er-2013-0013>
- IMPLAN Morelia. (2021, junio 25). Agua potable y saneamiento. Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano. <https://implanmorelia.org/site/datos-tema/agua-potable-saneamiento/>
- Instituto Mexicano para la Competitividad. (2023, febrero 7). Situación del agua en México. <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/>
- Instituto Municipal de Planeación de Morelia. (2021, febrero 13). Fuentes de Abastecimiento. Agua Potable y Saneamiento. Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano. <https://implanmorelia.org/site/datos-tema/agua-potable-saneamiento/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. <https://www.inegi.org.mx/app/cpv/2020/resultadosrapidos/default.html?texto=Morelia>
- Lambert, A. O. (2002). International Report: Water losses management and techniques. *Water Supply*, 2(4), 1–20. <https://doi.org/10.2166/ws.2002.0115>
- Nacional Research Council. (2006). Drinking water distribution systems: Assessing and reducing risks. The National Academies Press. <http://www.nap.edu/catalog/11728.html>
- Ochoa Alejo, L. H., & Bourguett Ortiz, V. J. (Eds.). (2001). Reducción integral de pérdidas de agua potable (2a ed.). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <http://repositorio.imta.mx/>
- Ociepa, E., Mrowiec, M., & Deska, I. (2019). Analysis of Water Losses and Assessment of Initiatives Aimed at Their Reduction in Selected Water Supply Systems. *Water*, 11(5), 1037. <https://doi.org/10.3390/w11051037>
- Organización de las Naciones Unidas. (2002). Observación general No. 15. El derecho al agua. Comité de Derecho Económicos, Sociales y Culturales.
- Organización de las Naciones Unidas. (2010). Resolución adoptada por la Asamblea General el 28 de julio de 2010: El derecho humano al agua y al saneamiento (A/RES/64/292). <https://undocs.org/es/A/RES/64/292>
- Organización Mundial de la Salud. (2023, septiembre 13). Agua para consumo humano - OMS. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Rocha, A. (2007). Hidráulica de tuberías y canales. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Sotelo, G. (1994). Hidráulica General, Fundamentos (Vol. 1). LIMUSA.



- Sotelo, Gilberto. (2002). Hidráulica de canales (1a ed.). UNAM Facultad de Ingeniería.
- US Army Corps of Engineers. (s/f). HEC-RAS User's Manual. <https://www.hec.usace.army.mil>. Recuperado el 16 de agosto de 2024, de <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/latest>
- Valdez, E. C. (1994). ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE (4a ed.). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Vásquez, J. A. (2003). Modelación Numérica en Hidráulica. www.researchgate.net. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.oocities.org/hidropiura/ModelNum.pdf>
- Zhang, L., Wang, C., Yu, Y., Duan, C., Lei, X., Chen, B., Wang, H., Zhang, R., & Wang, Y. (2023). Real-time optimization of urban channel gate control based on a segmentation hydraulic model. *Journal of Hydrology*, 625, 130029. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130029>

13 APÉNDICE A: CONDICIÓN EXTERNA DE LOS POZOS DE VISITA

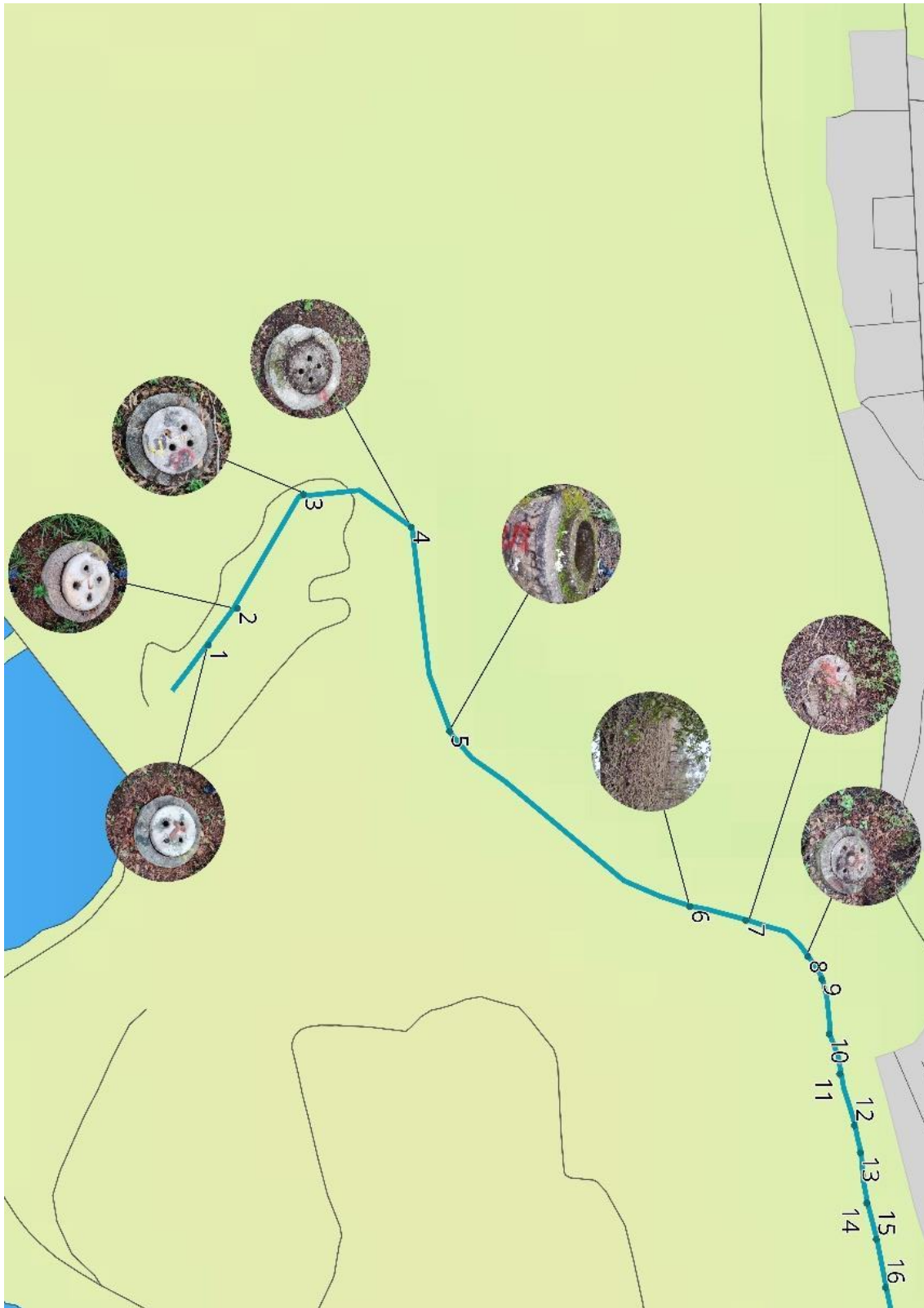


Figura 66.- Condición externa de pozo 1 al 8 del canal de conducción



Figura 67.- Condición externa de pozo 9 al 30 del canal de conducción

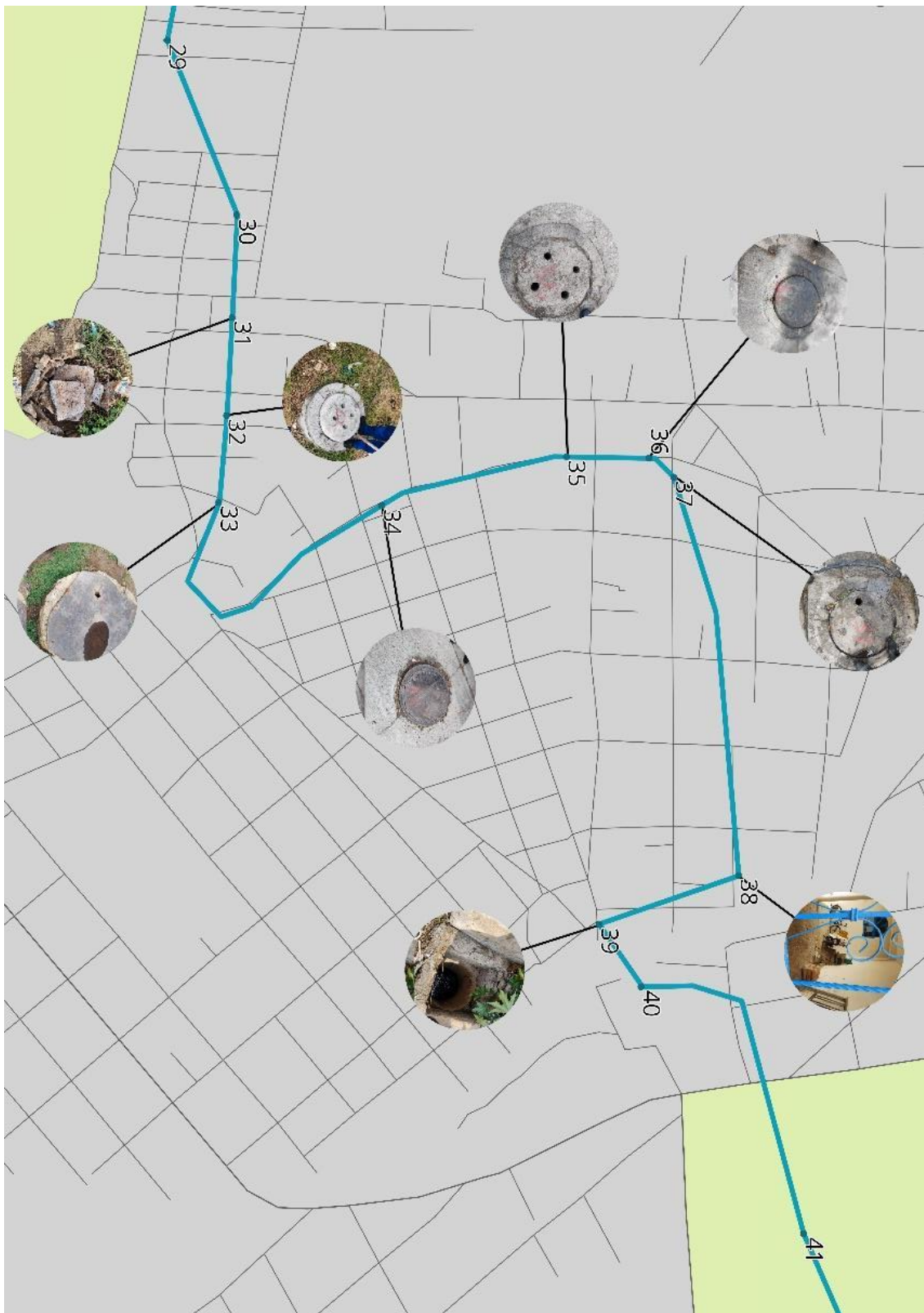


Figura 68.- Condición externa de pozo 31 al 39 del canal de conducción

Anteproyecto del sistema de conducción de la presa Cointzio a la Planta Potabilizadora Vista Bella en la ciudad de Morelia

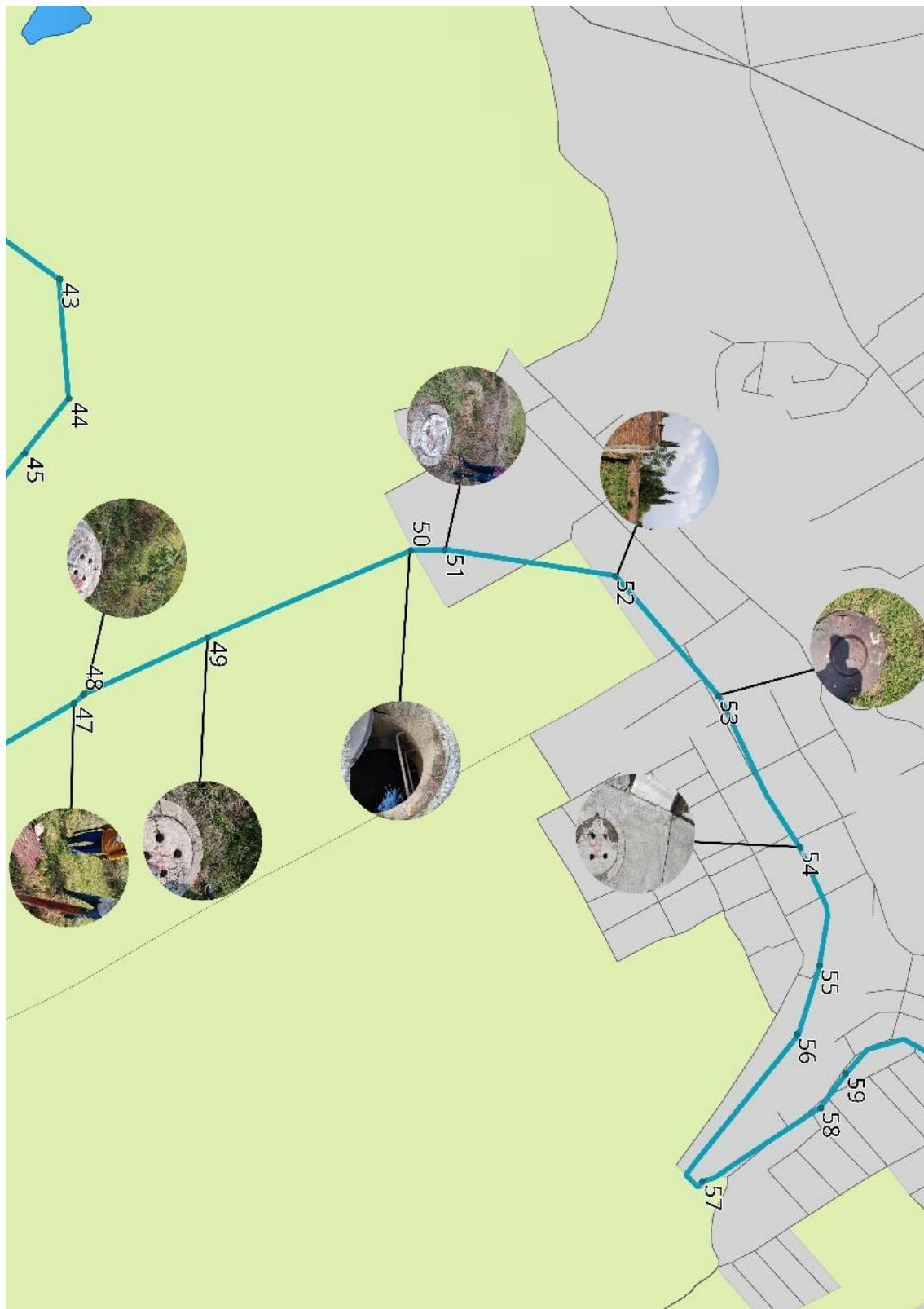


Figura 69.- Condición externa de pozo 47 al 54 del canal de conducción

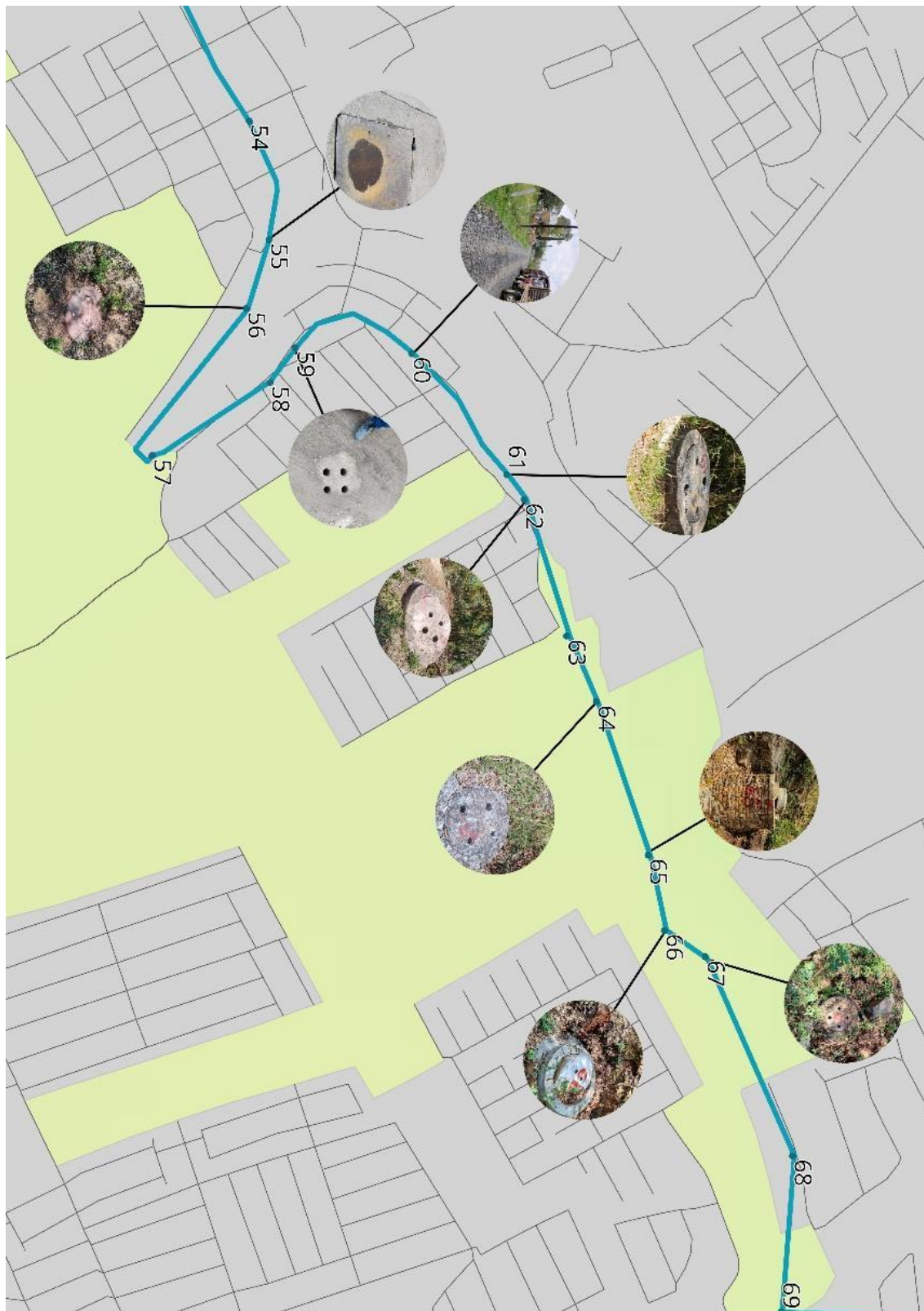


Figura 70.- Condición externa de pozo 55 al 67 del canal de conducción



Figura 71.- Condición externa de pozo 71 al 82 del canal de conducción

14 APÉNDICE B: PLANOS DE LAS PROPUESTAS DE S.D.S.

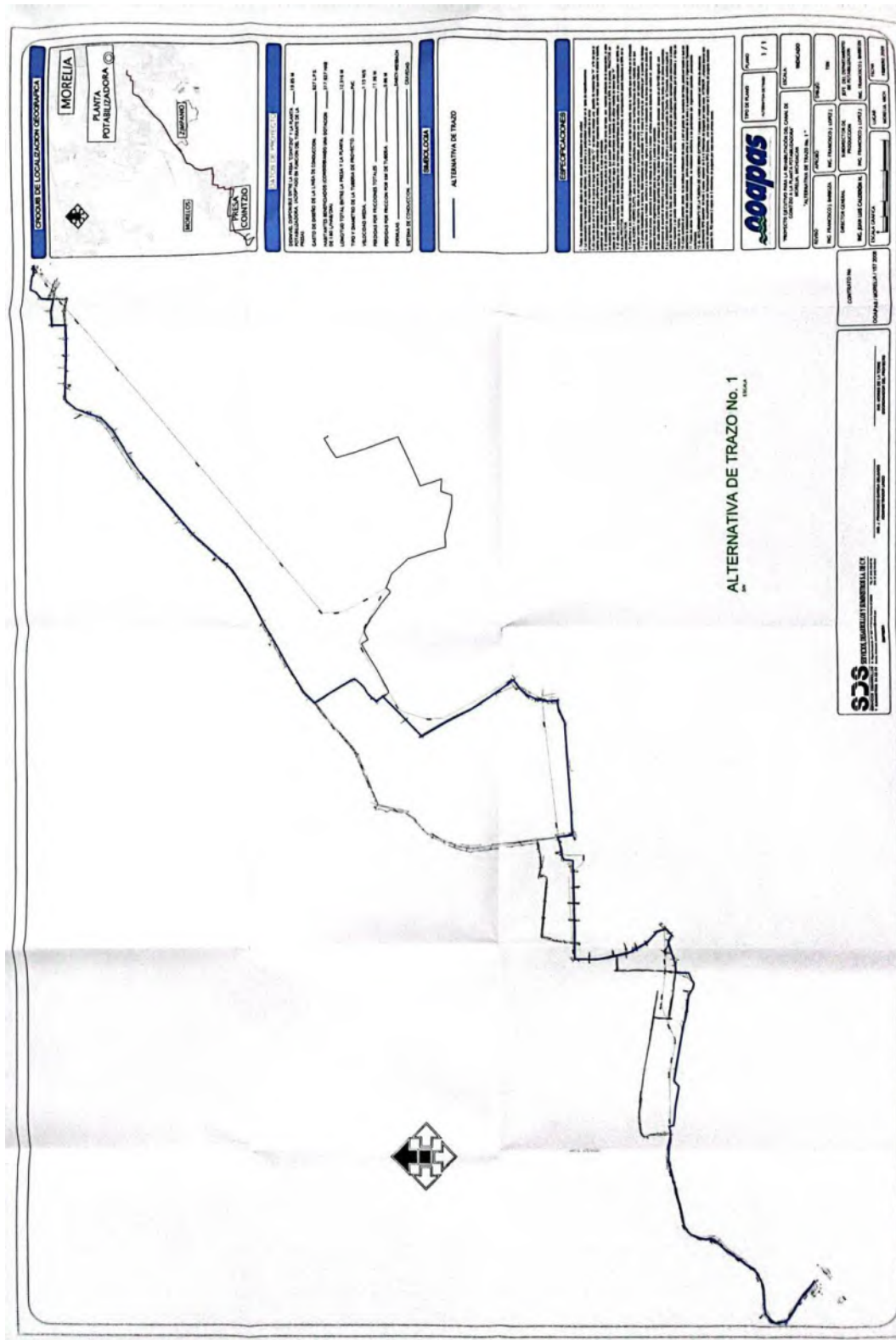
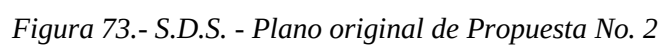
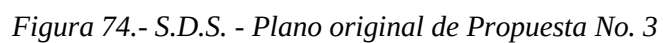


Figura 72.- S.D.S. - Plano original de Propuesta No. 1





Daniel Adrian Martinez Ayala

Anteproyecto del sistema de conducción de la presa Cointzio a la planta potabilizadora Vista Bella en la ciudad de Morelia.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:526420050

Fecha de entrega

11 nov 2025, 9:41 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

11 nov 2025, 9:57 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Anteproyecto del sistema de conducción de la presa Cointzio a la planta potabilizadora Vista Bell....pdf

Tamaño del archivo

10.0 MB

76 páginas

19.029 palabras

95.435 caracteres

14% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 14%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos	
Título del trabajo	Anteproyecto del sistema de conducción de la Presa Cointzio a la Planta Potabilizadora Vista Bella en la ciudad de Morelia	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	DANIEL ADRIAN MARTINEZ AYALA	1422493x@umich.mx
Director	JULIO CESAR ORANTES AVALOS	julio.orantes@umich.mx
Codirector	ALDO ALBERTO RANGEL TORRES	aldo.rangel@umich.mx
Coordinador del programa	SONIA TATIANA SANCHEZ QUISPE	quispe@umich.mx

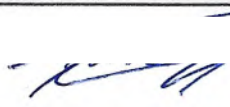
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	NO	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	NO	
Traducción a otra lengua	NO	
Revisión y corrección de estilo	NO	
Análisis de datos	NO	
Búsqueda y organización de información	NO	
Formateo de las referencias bibliográficas	NO	
Generación de contenido multimedia	NO	
Otro	NO	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	DANIEL ADRIAN MARTINEZ AYALA 
Lugar y fecha	MORELIA, MICHOACAN - 11 DE NOVIEMBRE DEL 2025