



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE LA COLONIA PIEDRA LISA, MORELIA – MICHOACÁN

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

PRESENTA

DANIEL ADRIÁN MARTÍNEZ AYALA

DIRIGIDA POR

DR. BENJAMÍN LARA LEDESMA

CODIRECTORES

M.C. IVÁN GONZÁLEZ ARREGUÍN

M.I. SERGIO EDUARDO CÁZAREZ RODRÍGUEZ

MORELIA – MICHOACÁN, ENERO, 2022



DEDICATORIA

A MIS PADRES:

María Eugenia Ayala Gutiérrez
Daniel Martínez Beltrán

A MI HERMANA:

Daniela Martínez Ayala

A MI NOVIA:

Brosia Naranjo Avila

A MI AMIGO DE TODA LA VIDA:

Gerardo Iribé Chaidez



AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de Hidráulica, a la Facultad de Ingeniería Civil y a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por toda mi trayectoria estudiantil y por la oportunidad de concluir esta etapa.

A mi asesor de tesis, el Dr. Benjamín Lara Ledesma por su valiosa experiencia y orientación en este proyecto.

A mis Coasesores, el M.C. Iván González Arreguín y el M.I. Sergio Eduardo Cázares Rodríguez por todo su apoyo, tiempo y consejos que me brindaron.

A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe por estar siempre al pendiente de mí y seguirme tratando como su alumno.

Y especialmente a mi madre, que siempre me ha guiado y apoyado en cada etapa de mi vida.



ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	1
ANTECEDENTES.....	2
UBICACIÓN GEOGRÁFICA	2
MACROLOCALIZACIÓN	2
MICROLOCALIZACIÓN	3
OROGRAFÍA	3
TOPOGRAFÍA.....	4
HIDROGRAFÍA	5
CLIMA	5
FLORA	6
FAUNA	6
OBJETIVOS	7
OBJETIVO GENERAL	7
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
MARCO TEÓRICO	7
AGUA POTABLE	7
SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE Y SUS PRINCIPALES COMPONENTES	7
<i>Fuente de abastecimiento.....</i>	<i>8</i>
<i>Obra de captación.....</i>	<i>8</i>
<i>Estación de bombeo.....</i>	<i>8</i>
<i>Conducción.....</i>	<i>9</i>
<i>Potabilización.....</i>	<i>9</i>
<i>Tanque de regulación.....</i>	<i>10</i>
<i>Red de distribución.....</i>	<i>10</i>
<i>Tomas domiciliarias</i>	<i>10</i>
HISTORIA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN LA CIUDAD DE MORELIA	11
RED DE MORELIA.....	13
OPERACIÓN DE LA COLONIA PIEDRA LISA	17
MODELACIÓN MATEMÁTICA DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE	19
EPANET	20
PROPUESTA DEL IMTA PARA MODELAR CON SUMINISTRO INTERMITENTE	22
MARCO METODOLÓGICO	23
LEVANTAMIENTO DE LA RED EXISTENTE	23
EXPORTACIÓN DE LA RED A EPANET	24
PREPARACIÓN DE LA RED EN ARCGIS.....	25
ESCENARIOS DE MODELACIÓN	28
ESCENARIO 1:	29
<i>Volumen requerido</i>	<i>29</i>
<i>Capacidad de la bomba</i>	<i>29</i>
<i>Demanda base</i>	<i>30</i>
<i>Coefficiente de variación horaria</i>	<i>33</i>
<i>Funcionamiento de la bomba y el tanque.....</i>	<i>33</i>



ESCENARIO 2:	35
ESCENARIO 3:	35
<i>Volumen requerido para la colonia</i>	35
<i>Capacidad de la bomba</i>	35
<i>Demanda base</i>	35
ESCENARIO 4	36
<i>Área de influencia</i>	36
<i>Sustitución de los nodos de demanda por depósitos pequeños</i>	37
<i>Curvas de volumen</i>	38
<i>Volumen requerido por zona de influencia</i>	38
<i>Demanda base</i>	38
<i>Diámetros equivalentes</i>	39
ESCENARIO 5	47
ESCENARIO 6	47
RESULTADOS	48
ESCENARIO 1	50
ESCENARIO 2	51
ESCENARIO 3	52
ESCENARIO 4	53
ESCENARIO 5	55
ESCENARIO 6	56
CONCLUSIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	60
ANEXO	62



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales y longitudes de la tubería existente en la ciudad de Morelia	14
Tabla 2. Distribución de Distritos Hidrométricos y Colonias por cada sector.	17
Tabla 3. Campos para agregar información a las tuberías en ArcGIS	26
Tabla 4. Campos para agregar información a los nodos en ArcGIS	26
Tabla 5. Longitud tributaria y demanda base de los nodos para el escenario 1	32
Tabla 6. Longitud tributaria y demanda base de los nodos para el escenario 3	36
Tabla 7. Volumen y demanda base por el número de usuarios de un área de influencia.	39
Tabla 8. Diámetro equivalente por el número de predios de un área de influencia.	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Macrolocalización de la zona de estudio.....	2
Figura 2. Microlocalización de la zona de estudio.....	3
Figura 3. Curvas de nivel a cada 5 metros de la colonia Piedra Lisa.....	4
Figura 4. Ubicación hidrológica de la colonia Piedra Lisa.....	5
Figura 5. Mapa conceptual de las diferentes obras de Captación	8
Figura 6. Plano de Valladolid en 1579	11
Figura 7. Acueducto de Morelia a finales del XIX	12
Figura 8. Distribución de pozos en la ciudad de Morelia	13
Figura 9. Disposición de la red de agua potable de la ciudad de Morelia	15
Figura 10. División de la ciudad de Morelia en sectores	16
Figura 11. Fuentes de abastecimiento de la estación de bombeo Santa Cecilia.....	17
Figura 12. Plano actualizado de la red de distribución de la colonia Piedra Lisa	23
Figura 13. Formato para ingresar datos a EPANET	24
Figura 14. Distribución de casas-habitación con contrato en OOAPAS (Color blanco)	29
Figura 15. Fragmento del modelo en EPANET.....	31
Figura 16. Controles simples utilizadas en la configuración de la modelación	33
Figura 17. Controles basados en reglas utilizados para la modelación.	34
Figura 18. Área de influencia de los nodos para los escenarios 4 y 5	37
Figura 19. Comprobación del método de Darcy-Weisbach para 2 tomas domiciliarias	43
Figura 20. Comprobación del método de Darcy-Weisbach para 5 tomas domiciliarias	43
Figura 21. Comprobación del método de Darcy-Weisbach para 8 tomas domiciliarias	44
Figura 22. Comprobación del método por aproximaciones para 2 tomas domiciliarias.....	44



Figura 23. Comprobación del método por aproximaciones para 5 tomas domiciliarias.....	45
Figura 24. Comprobación del método por aproximaciones para 8 tomas domiciliarias.....	45
Figura 25. Curva de mejor ajuste para los diámetros equivalentes restantes	46
Figura 26. Comparación de diámetros equivalentes obtenidos por ambos métodos	46
Figura 27. Área de influencia con la cantidad de usuarios en su interior para el escenario 6	47
Figura 28. Esquema del modelo para los escenarios 1, 2 y 3.	49
Figura 29. Esquema del modelo para los escenarios 4, 5 y 6.	49
Figura 30. Diagrama del comportamiento del tanque principal (t1) en el escenario 1.....	50
Figura 31. Modelo del escenario 1 con 48 horas y 45 minutos de simulación. (15 minutos antes del inicio del segundo suministro)	50
Figura 32. Diagrama del comportamiento del tanque principal (t1) en el escenario 2.....	51
Figura 33. Modelo del escenario 2 con 29 horas y 15 minutos de simulación.....	51
Figura 34. Diagrama del comportamiento del tanque principal (t1) en el escenario 3.....	52
Figura 35. Escenario 3 con 48 horas de simulación.....	52
Figura 36. Escenario 4: tanque principal vacío (4:33 hrs de simulación)	53
Figura 37. Tuberías con válvula check integrada.....	54
Figura 38. Comparación de presiones entre el depósito más favorecido “t2” (color verde) y el menos favorecido “t27” (color rojo).	54
Figura 39. Comparación de alturas entre el tanque “t26” (color rojo) y el nodo que lo abastece “n56” (color verde)	55
Figura 40. Comparación de alturas entre el tanque “t27” (color rojo) y el nodo que lo abastece “n52” (color verde)	55
Figura 41. Escenario 5: Tanque principal vacío (3:40 hrs de simulación).....	56
Figura 42. Escenario 6: Tanque principal vacío (8:20 hrs de simulación).....	57
Figura 43. Comparación de presiones entre el depósito más favorecido “t2” (color verde) y el menos favorecido “t27” (color rojo).	57
Figura 44. Interpretación de la traza urbana de Valladolid en 1579 por el Arq. Enrique Cervantes S.	62
Figura 45. Rugosidad de tuberías según el tipo de material.	62
Figura 46. Conducción del cárcamo de bombeo al tanque superficial Santa Cecilia.	63
Figura 47. Plano original de la colonia Piedra Lisa del sistema de catastro digital de OOAPAS	63
Figura 48. Área de influencia (MAPAS Libro 13: Modelación hidráulica y de calidad del agua en redes de distribución, CONAGUA, pág. 32).	64
Figura 49. Coeficientes de Variación Horaria para distintas ciudades de México (MAPAS Libro 4: Datos Básicos, CONAGUA, pág. 20).	64



RESUMEN

Un sistema de distribución de agua potable es el conjunto de obras de ingeniería que permiten la entrega de agua apta para el consumo humano a una población; el cual requiere de diversos análisis para su correcta ejecución. Uno de estos es el comportamiento hidráulico que presentará la red al momento de ser suministrada y que actualmente se hace con modelaciones matemáticas por medio de programas computacionales como EPANET, el cual fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estado Unidos. Por su sencilla interfaz, confiabilidad y fácil obtención es muy común hacer uso de este software, sin embargo las condiciones en las que fue creado son las de un país de primer mundo en donde no se presentan problemas de agua y los usuarios tienen suministro continuo, es decir, servicio de agua potable las 24 hrs, teniendo como resultado modelaciones dependientes de la demanda. Esto representa un problema para países como México, que tiene zonas que son operadas con suministro intermitente y por lo tanto los resultados calculados por este programa no son adecuados para la situación. La intención de este trabajo es buscar la forma de adaptar EPANET para crear modelos en función de la presión y el tiempo de servicio para que se ajuste a las condiciones de suministro intermitente y tener un mejor análisis del comportamiento hidráulico de zonas que no cuenten con suministro continuo.

Palabras clave: Comportamiento hidráulico, Sistema de distribución de agua potable, suministro intermitente, modelo matemático, modelo dependiente de la presión.

ABSTRACT

A drinking water distribution system is the set of engineering works that allow the delivery of water suitable for human consumption to a population; which requires various analyzes for its correct execution. One of these is the hydraulic behavior that the network will present when it is supplied and that is currently done with mathematical modeling through computer programs such as EPANET, which was developed by the United States Environmental Protection Agency. Due to its simple interface, reliability, and easy obtaining, it is very common to make use of this software, however, the conditions in which it was created are those of a first world country where there are no water problems and users have continuous supply, that is, 24-hour drinking water service, resulting in demand-dependent modeling. This represents a problem for countries like Mexico, which has areas that are operated with intermittent supply, and therefore the results calculated by this program are not adequate for the situation. This work intends to find a way to adapt EPANET to create models depending on the pressure and the service time so that it adjusts to the conditions of intermittent supply and to have a better analysis of the hydraulic behavior of areas that do not have a continuous supply.

Keywords: Hydraulic behavior, potable water distribution system, intermittent supply, mathematical model, pressure-dependent model.

ANTECEDENTES

Ubicación geográfica

La colonia Piedra Lisa se ubica en el Estado de Michoacán, en el sur de la ciudad de Morelia fuera de su circuito periférico en las coordenadas 19.667° latitud norte y 101.193° longitud oeste, con código postal 58096 y abarca una superficie aproximada de 111,031 metros cuadrados, aproximadamente un 0.107% de la superficie total de la ciudad de Morelia. Hay un total de 381 predios en la colonia de los cuales solo 172 tienen contrato con OOAPAS, es decir solamente el 45%. Tomando en cuenta un índice de hacinamiento de 3.7 se estima un total de 636 habitantes que tienen servicio de agua por medio del organismo operador.

Macrolocalización

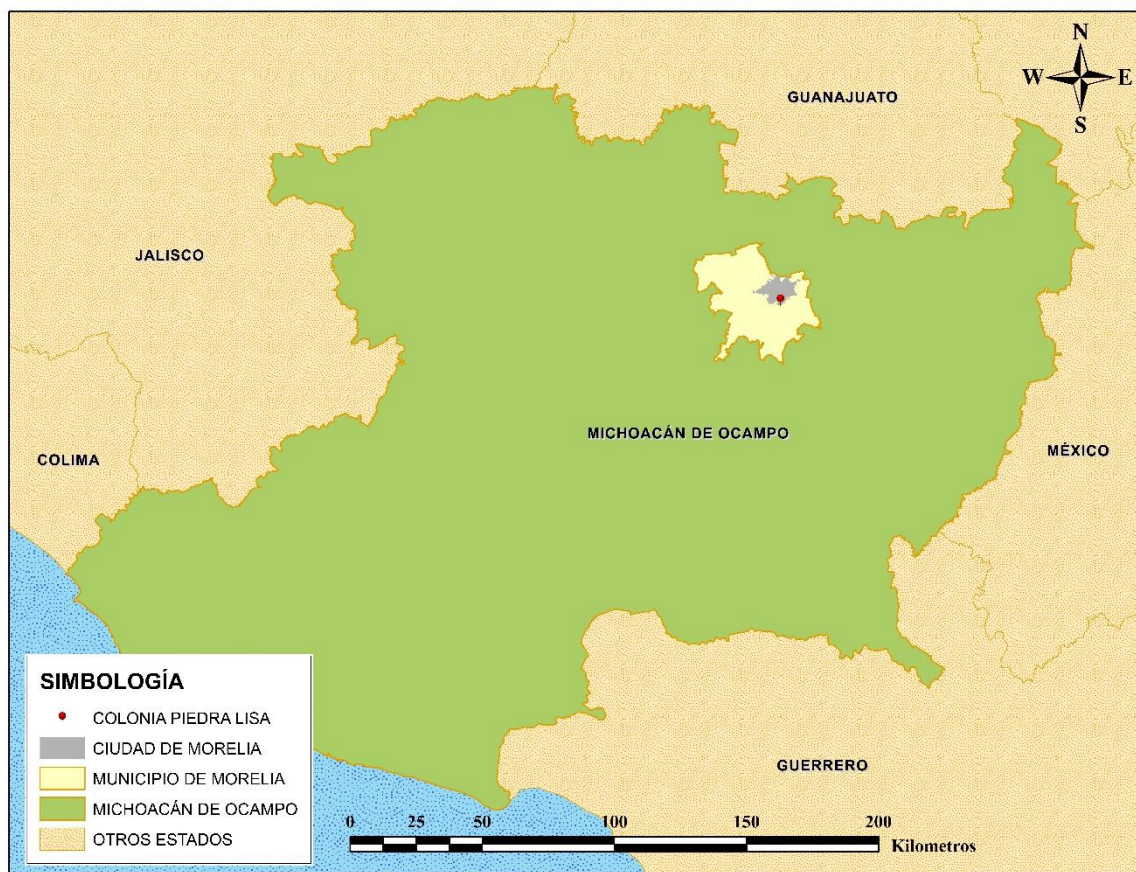


Figura 1. Macrolocalización de la zona de estudio

Microlocalización

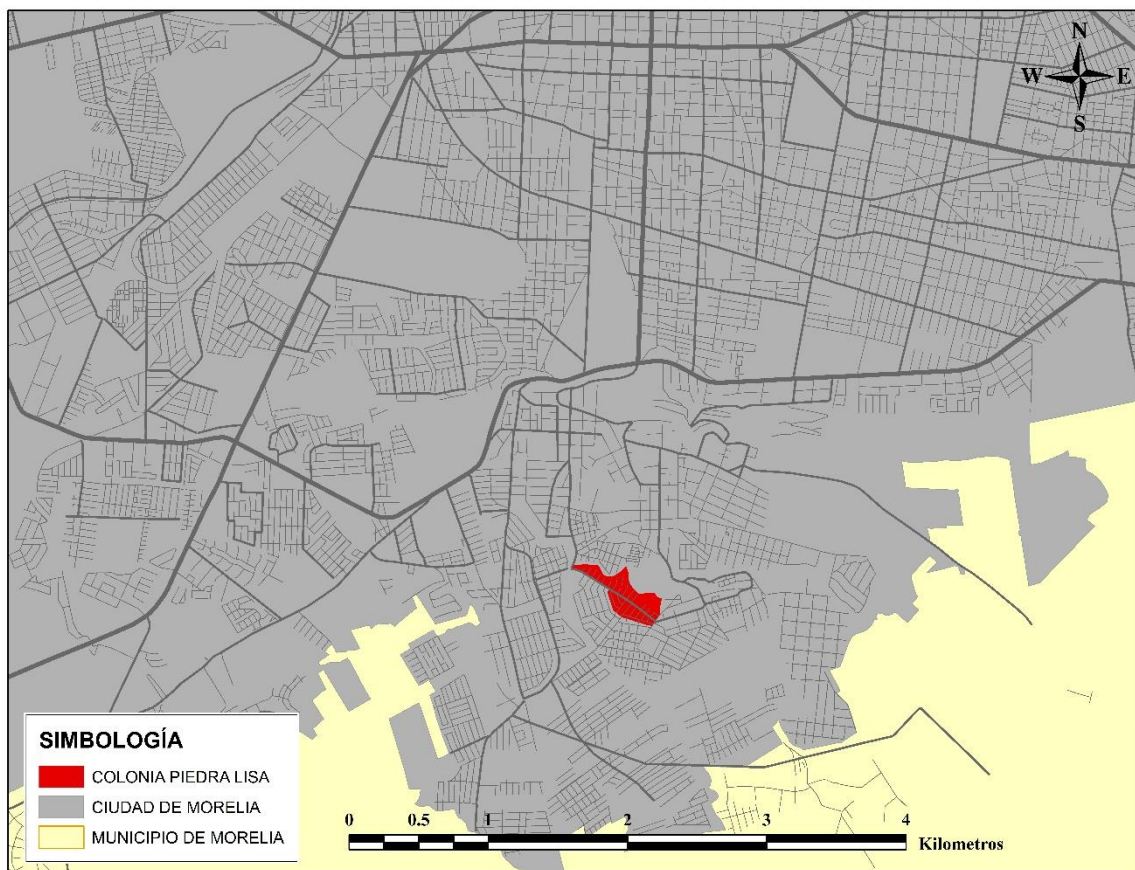


Figura 2. Microlocalización de la zona de estudio

Orografía

La superficie del municipio es muy accidentada. La región montañosa se extiende hacia el sur y forma vertientes bastante pronunciadas, que se internan al norte, sobresaliendo los cerros de Punhuato y las lomas antiguamente llamadas de El Zapote, que se unen en la región norte con la sierra de Otzumatlán. Al sur de la ciudad de Morelia se encuentran las lomas de Santa María de los Altos; adelante están los cerros de San Andrés, que se unen, en la parte noroeste, con el pico de Quinceo, la mayor altura en la zona, con 2,787 metros sobre el nivel del mar, que tienen conexión con las lomas de Tarímbaro y los cerros de Cuto y de Uruétaro, los cuales limitan al valle y los separan del lago de Cuitzeo. (INAFED, 2010)

Su composición fisiográfica en porcentaje de superficie municipal es la siguiente:

- **Provincia:**
 - Eje Neovolcánico: 98.40%
 - Sierra Madre del Sur: 1.60%
- **Subprovincia:**
 - Neovolcánica Tarasca: 50.68%

- Sierras y Bajíos Michoacanos: 25.14%
- Mil Cumbres: 22.14%
- Depresión del Balsas: 1.60%
- **Sistema de topoformas:**
 - Sierra volcánica con estrato volcanes continuo o aislado: 22.14%
 - Escudo volcanes: 20.06%
 - Sierra volcánica con estrato volcanes continuo o aislado con llanura: 16.58%
 - Llanura aluvial: 14.60%
 - Meseta basáltica con lomerío y malpaís: 11.12%

(INEGI, 2009, pág. 2).

Topografía

Los datos de las curvas de nivel son extraídos de los modelos digitales de elevación que proporciona el INEGI, obteniendo los siguientes resultados de la colonia:

- Elevación máxima: 2038 msnm.
- Elevación mínima: 1970 msnm.
- Elevación media: 2003 msnm.

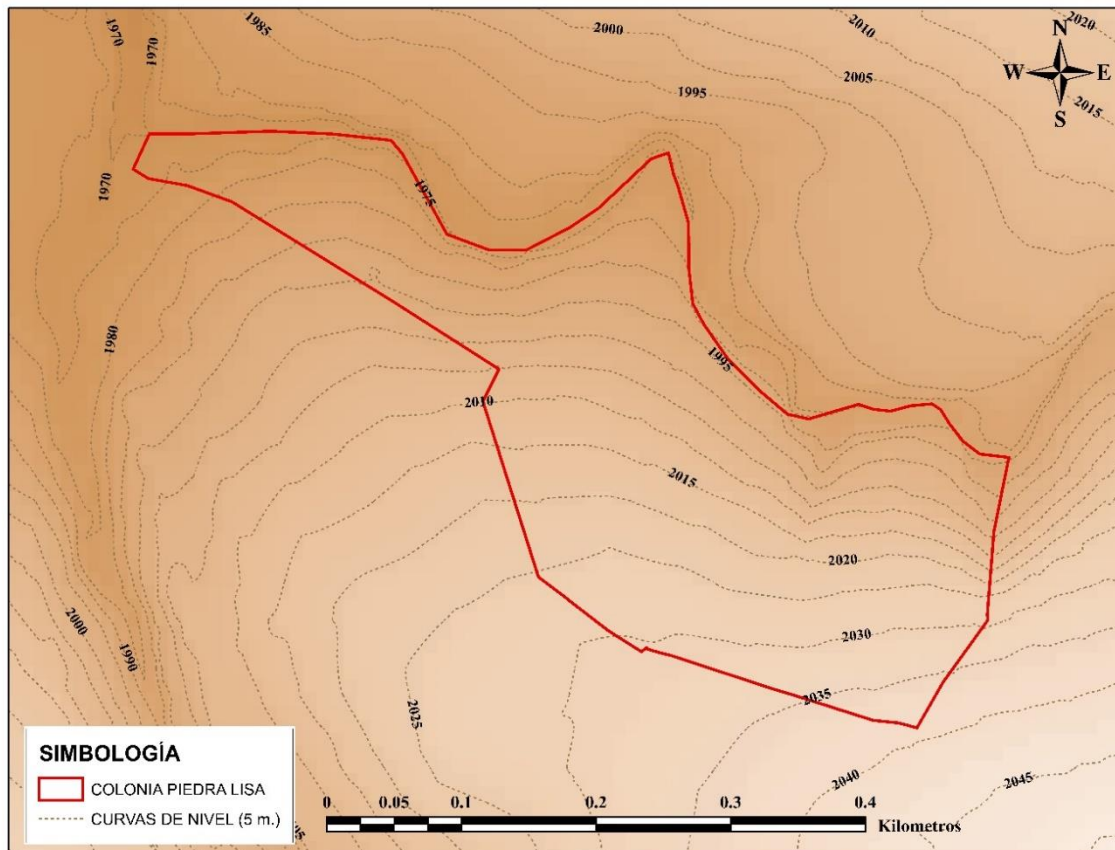


Figura 3. Curvas de nivel a cada 5 metros de la colonia Piedra Lisa

Hidrografía

El municipio se ubica en la región hidrográfica número 12, conocida como Lerma-Santiago, particularmente en el Distrito de Riego Morelia-Queréndaro. Forma parte del lago de Cuitzeo. Sus principales ríos son el Grande y el Chiquito. Sus arroyos más conocidos son la Zarza y la Pitaya. Su presa más importante es la de Cointzio, aunque cuenta con otras menores como las de Umécuaro, Laja Caliente y La Mintzita. También son importantes sus manantiales de aguas termales que son aprovechados como balnearios, figurando Cointzio, El Ejido, El Edén y Las Garzas. (INAFED, 2010).

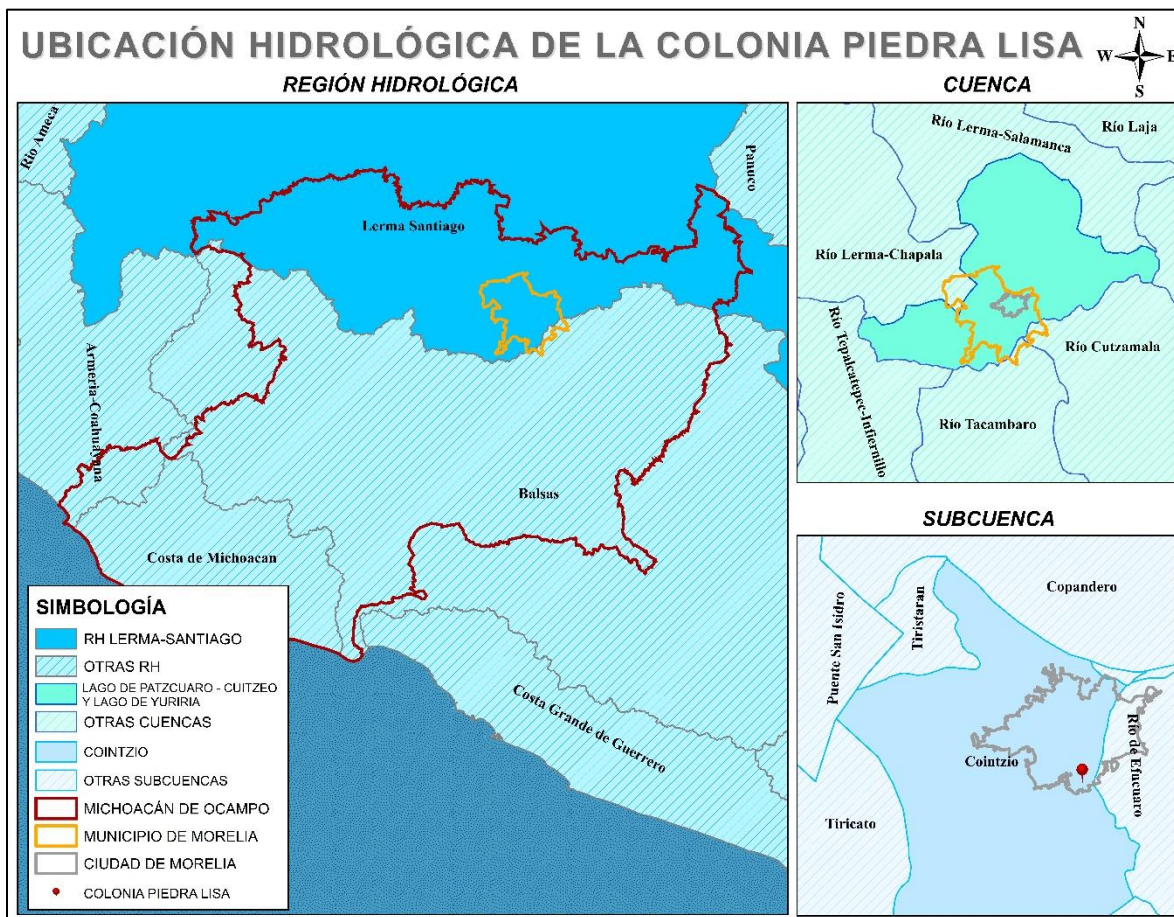


Figura 4. Ubicación hidrológica de la colonia Piedra Lisa

Clima

Predomina el clima del subtipo templado de humedad media, con régimen de lluvias en verano de 700 a 1,000 milímetros de precipitación anual y lluvias invernales máximas de 5 milímetros anuales promedio. La temperatura media anual es de 14° a 18° centígrados, aunque ha subido hasta 38° centígrados. Los vientos dominantes provienen del suroeste y del noroeste, con variables en julio, agosto y octubre, con intensidad de 2 a 14.5 km por hora. (INAFED, 2010).

Flora

El municipio de Morelia cuenta con diez tipos de vegetación principalmente, Además se tienen extensiones de uso agrícola y pastizales, que se desarrollan sobre áreas alteradas por el hombre y los animales domésticos, generalmente a partir del bosque de encino o del matorral subtropical que fueron expuestos a un pastoreo intenso, las cuales son; Mezquital (mezquite, huisache, maguey). Se ubica en la zona norte del municipio. Matorral subtropical (nogalillo, colorín, casahuate, parotilla, yuca, zapote prieto, puchote). Se localiza sobre terrenos poco empinados muy pedregosos o sobre roca volcánica a altitudes que oscilan entre 1800 y 2000 msnm, en las zonas norte, noreste.

- Selva media caducifolia (aguacatillo, laurel, ajunco, atuto, escobetilla, saiba).
- Selva baja caducifolia (copal, papelillo, tepehuaje, anona, sacalosúchitl).
- Bosque de encino (encino, acacia, madroño). Este tipo de vegetación se localiza en la falda de los cerros, entre los 2000 y 2400 msnm de altitud alrededor del valle de Morelia.
- Bosque de pino (pino pseudostrobus, pino michoacano, pino moctezuma, pino teocote). Ubicado en las zonas frías y montañosas del municipio, entre 2200 y 3000 msnm.
- Bosque de pino-encino. Localizado en la zona sur, suroeste y noreste.
- Bosque de galería (ahuehuete, fresno, aile, sauce). Actualmente en estado de extinción.
- Bosque mesófilo de montaña (moralillo, alie, jaboncillo, fresno, garrapato, pinabete).
- Bosque de oyamel (oyamel o pinabete).
- Agrícola (frijol, maíz, garbanzo): 28,58 % de la superficie municipal.
- Pastizal: 13,98 % de la superficie municipal.
- Bosque y selva: 40,80 % de la superficie municipal.
- Matorral y mezquital: 11,01 % de la superficie municipal.
- Otros: 5,63 % de la superficie municipal.

(UNAM, 2019).

Fauna

En el municipio de Morelia se tienen identificadas 62 especies de aves, 96 de mamíferos, 20 de reptiles y 9 de anfibios. Entre ellas están:

- Aves: Cuervo común, urraca, pinzón mexicano, búho cornudo, tecolote, zopilote, tórtola cola blanca, jilguero pinero, jilguero dominico, colorín, chipe, gorrión ceja blanca, gorrión casero, tecolote oriental, colibrí berilo, colibrí pico ancho, papamoscas cenizo.
- Mamíferos: Coyote, zorra gris, armadillo, zarigüeya (tlacuache), tuza, murciélago, rata de campo, comadreja, rata parda, rata gris, zorrillo de una banda, mapache, tejón, musaraña, ardilla.
- Reptiles: Falsa coralillo, alicante, hocico de puerco, cascabel oscura mexicana, cascabel acuática, casquito, llanerita, jarretera.
- Anfibios: Salamandra, salamandra michoacana, sapo meseta, ranita ovejera, ranita de cañada.

(UNAM, 2019).



OBJETIVOS

Objetivo general

Modelar una red de distribución de agua potable con suministro intermitente con la finalidad de obtener simulaciones con resultados que se apeguen lo más posible a la realidad.

Objetivos específicos

- Observar el comportamiento hidráulico de la red de agua potable de la colonia Piedra Lisa mediante la modelación.
- Conocer la forma en que se distribuye el agua a los usuarios de la colonia.
- Comparar el sistema de distribución de agua potable de la colonia entre un modelo dependiente de la demanda y un modelo dependiente de la presión, cada uno con diferentes escenarios.

MARCO TEÓRICO

Agua potable

El agua es uno de los recurso más importantes para la vida en el planeta, del cual los seres humanos dependemos de su disponibilidad para el consumo doméstico, funcionamiento y continuidad de las actividades agrícolas e industriales. (SEMARNAT, 2012)

Por su parte, el agua potable se considera como:

“Agua apta para el consumo humano, incolora e inodora, oxigenada, libre de bacterias patógenas y de compuestos de nitrógenos, y de un grado de dureza inferior a treinta” (CONAGUA, 2012)

Entendiéndose como agua para uso y consumo humano a aquella que no contiene contaminantes objetables, ya sean químicos o agentes infecciosos y que no causan efectos nocivos para la salud (CONAGUA, 2012).

Sistema de distribución de agua potable y sus principales componentes

Un sistema de distribución de agua potable es aquel que suministra agua apta para consumo humano mediante obras de ingeniería que la transportan desde su fuente de abastecimiento hasta una comunidad.

Las principales partes que componen un sistema de abastecimiento de agua potable son:

- Fuente de abastecimiento
- Obra de captación
- Estación de bombeo
- Conducción
- Potabilización

- Tanque de regulación
- Red de distribución
- Tomas domiciliarias

Fuente de abastecimiento

Cuerpo de agua, subterráneo o superficial, desde la cual se toma el agua para suministrar al sistema de distribución (CONAGUA, 2015, pág. 7).

- Superficial: Ríos, lagos, arroyos y lagunas.
- Subterránea: Toda aquella que esté confinada en el subsuelo.

Obra de captación

Son obras de ingeniería que permiten la recolección del agua para su aprovechamiento, estas pueden ser una o varias en conjunto para obtener la cantidad necesaria que una población o un determinado sector requiere (SIAPA, 2014, pág. 4)

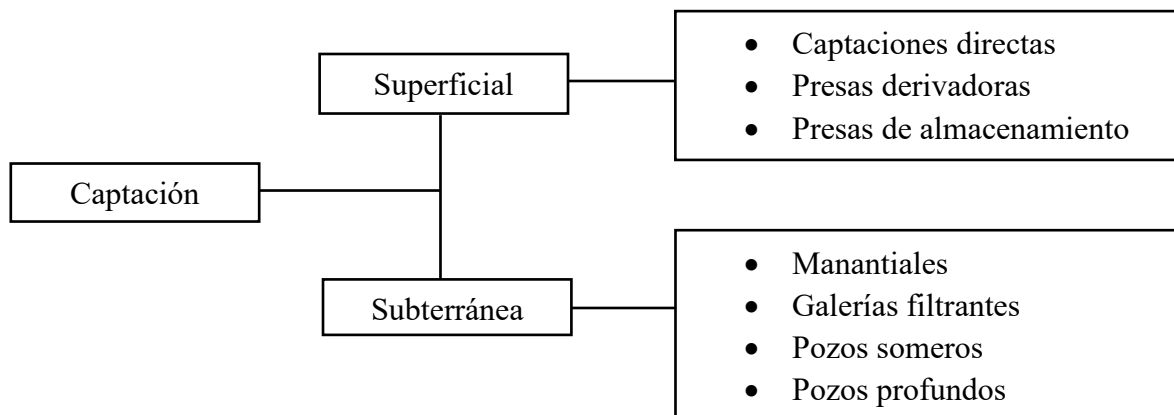


Figura 5. Mapa conceptual de las diferentes obras de Captación

Estación de bombeo

Es el sitio donde se encuentra el equipo mecánico destinado a elevar la carga hidráulica para que el agua llegue a su destino en caso de necesitarlo, esto se efectúa mediante bombas las cuales pueden ser verticales, horizontales o con motor sumergido.

Las estaciones de bombeo se pueden clasificar en:

- Primarias: Son las que extraen el agua de la fuente de abastecimiento para ser dispuesta a un almacenamiento, a la planta potabilizadora, a la red de distribución o una combinación de estas.
- Secundaria: También conocida como rebombeo, es una estación intermedia que ayuda a la estación primaria incrementando su presión o su gasto en caso de que la primera no proporcione la carga hidráulica necesaria. La alimentación de este tipo de estación no depende de una fuente de abastecimiento directamente sino de una estación de bombeo primaria.

(SIAPA, 2014, pág. 5)

Conducción

Es la parte del sistema que transporta el agua mediante tuberías, desde su captación hasta un tanque de regulación, planta potabilizadora o a un crucero determinado de la red (entrega directa).

La conducción se puede dar de las siguientes maneras:

- **Gravedad:** Cuando la fuente de abastecimiento se encuentra a una altura piezométrica mayor a la requerida en el punto de entrega, el transporte de fluidos se da por la diferencia de energía disponible. Esta forma aprovecha la topografía existente para lograr presiones adecuadas.
- **Bombeo:** Mediante un equipo electromecánico se adiciona energía para transportar el gasto de diseño cuando el punto de entrega tiene una mayor altitud que la fuente de abastecimiento, obteniendo la altura piezométrica requerida para vencer el desnivel topográfico.
- **Combinada:** Se presenta cuando la topografía del terreno obliga al trazo de la línea de conducción a cruzar por partes con mayor elevación, por lo que con ayuda de un tanque intermedio la primer parte de la conducción se da por bombeo y la segunda por gravedad.

(CONAGUA, 2015, págs. 1-3)

Potabilización

El agua en su naturaleza se le denomina “agua cruda” y es absolutamente indispensable someterla a un proceso de purificación para poder distribuirla a una población. Esto se debe a que en su estado natural se encuentra expuesta a contaminantes por estar en contacto con el suelo y la atmósfera durante su ciclo hidrológico. El agua puede transportar consigo agentes patógenos infecciosos que afectan la salud del ser humano como cólera, tifoidea, disentería, salmonelosis y amibiasis. Además de que puede contener elementos que son nocivos si se concentran en altas cantidades como el arsénico, bario, cadmio, cromo, plomo, flúor, cloro, sulfatos, cianuros y nitratos. A su vez para que esta agua pueda ser ingerible y utilizada por el ser humano en sus actividades cotidianas debe contener la cantidad suficiente de oxígeno, bióxido de carbono y sales minerales en pequeñas cantidades como el potasio, calcio, sodio y magnesio; además de que su temperatura debe oscilar entre los 10 y 15 °C para que sea nutritiva y agradable al uso.

Por estas razones sus características físicas, químicas, bacteriológicas, organolépticas y radiactivas deben cumplir con los límites permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano – Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”.

Para llevar esto a cabo se deben realizar estudios fisicoquímicos y biológicos al agua cruda para poder así determinar qué tipo de obra debe construirse para su respectivo tratamiento. Las más comunes son:

- **Plantas de filtración:** Mediante filtros granulares remueven calor, turbidez, bacterias y organismos dañinos para la salud.



- Plantas supresoras de hierro y magnesio: Convierte estos minerales en flóculos insolubles de fácil remoción por filtración o sedimentación.
- Plantas suavizadoras: Remueven cantidades excesivas de elementos que forman incrustaciones y consumen jabón.

Como paso final a estos procesos se le adiciona cloro para su desinfección y el agua estará lista para su distribución (Ochoa, 2014, pág. 26).

Tanque de regulación

Son utilizados como almacenamiento para garantizar la cantidad y la presión del agua disponible en la red, cuentan con conexiones a tuberías por separado, una de entrada (conducción) y otra de salida (distribución). Según su construcción puede ser elevado o superficial, si se dispone de un terreno elevado cerca de la zona. Ambos tipos cuentan con válvulas de altitud que emplean un flotador que determina el nivel del agua para poder cerrarse y con un rebosadero con la misma capacidad del tanque en donde se puede drenar el agua en caso de haber una falla en la válvula de altitud (SIAPA, 2014, pág. 34)

Red de distribución

Es el conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde el tanque de regulación hasta la toma domiciliaria para el consumo de los usuarios. Se compone generalmente de:

- Tubería: Son conductos de sección transversal circular con sus respectivas uniones. Según su función puede dividirse en red primaria y red secundaria. La primaria es aquella que tiene el mayor diámetro en la red, está conectada directamente al tanque y termina en conexiones a otras tuberías de menor diámetro, su función es alimentar a otras tuberías, por esta razón también se le conoce como líneas de alimentación. La red secundaria es aquella tubería de menor diámetro en el sistema que conecta la red primaria con las tomas domiciliarias.
- Piezas especiales: Son todos aquellos accesorios que se utilizan para crear ramificaciones, intersecciones, cambios de diámetro, cambios de dirección en el flujo, uniones de tuberías de diferente material, entre otros.
- Válvulas: Son aquellos accesorios que permiten el control del flujo en la red y según su función puede ser válvulas de seccionamiento, que cortan la circulación por ciertas partes de la red con el fin de revisar tramos de tubería sin que se presenten fugas o para hacer separaciones en la red para que el servicio se proporcione por zonas; o válvulas de control, que regulan el gasto o la presión en la red, facilitan la entrada de aire y salida de sedimentos o aire atrapados en la tubería.

(CONAGUA, 2015, págs. 1-2)

Tomas domiciliarias

Es el conjunto de piezas y tuberías que permiten la conexión de la red de distribución con el predio del usuario, así como la instalación de un medidor. Esta es la parte con la que se comprueba el consumo por parte del usuario, así como la eficiencia del sistema de

abastecimiento de agua potable ya que es la que abastece directamente al consumidor (SIAPA, 2014, págs. 38-42).

Historia de la distribución del agua en la ciudad de 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, se abastecía en algún punto del río Chico según un plano de la ciudad del año 1579 (ver Figura 44 para un mejor entendimiento de la Figura 6).

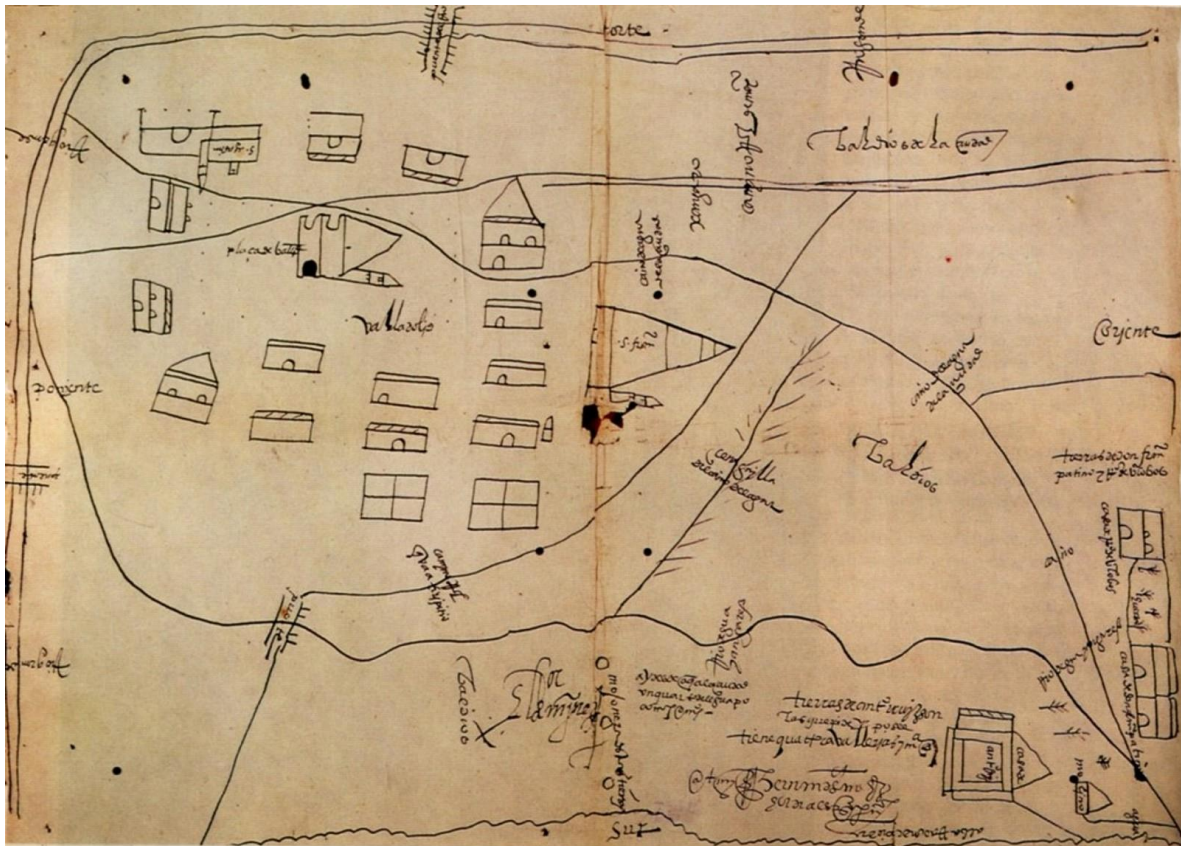


Figura 6. Plano de Valladolid en 1579

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 surtir 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.

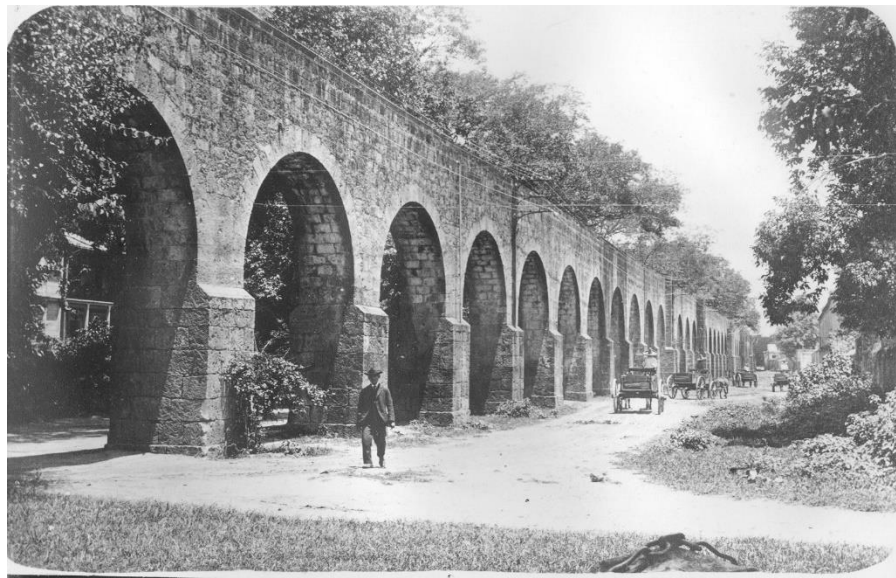


Figura 7. Acueducto de Morelia a finales del XIX

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 Tenencia de Santa María sustituyó en esta función a los filtros. (Cruz, 2015)

Red de Morelia

El sistema actual de distribución de agua potable de la ciudad de Morelia es a base de tuberías subterráneas que se alimentan principalmente de dos tipos de fuentes de abastecimiento. Subterránea, el cual es el acuífero de la ciudad que provee $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$ a través de 120 pozos.

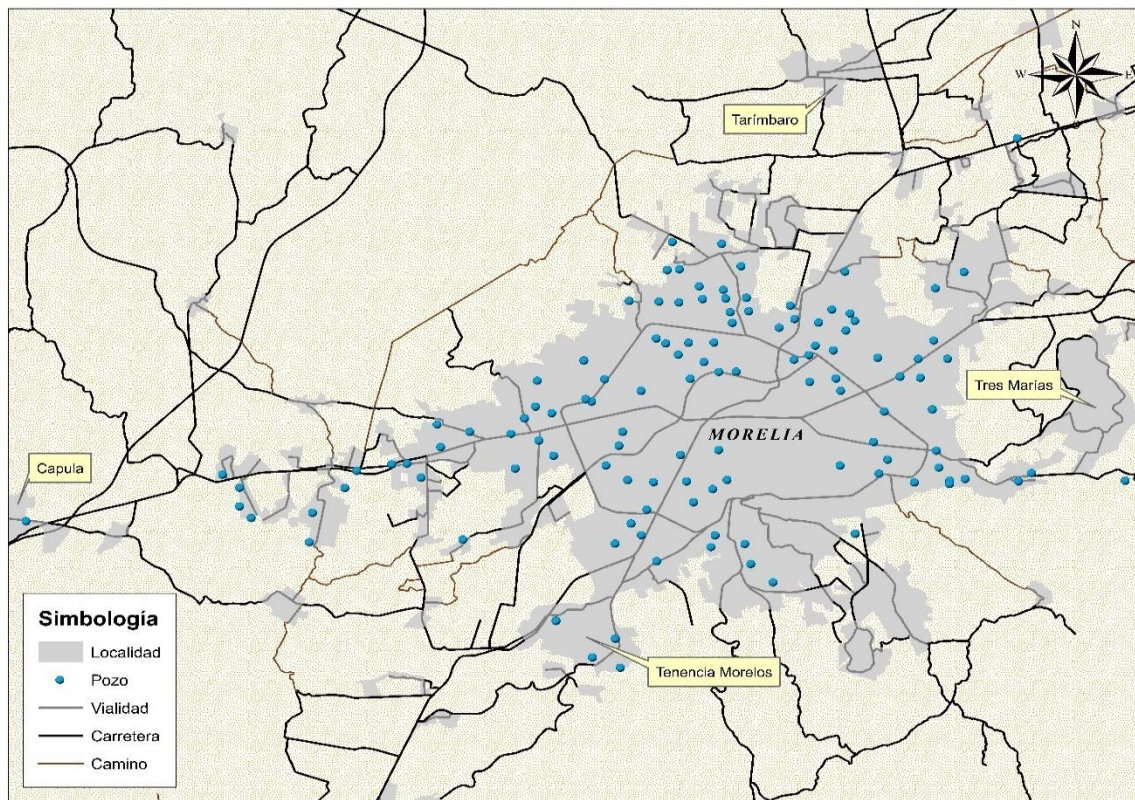


Figura 8. Distribución de pozos en la ciudad de Morelia

Estos pozos están repartidos por toda la mancha urbana de Morelia. La segunda fuente de abastecimiento es superficial y son dos. La primera proviene de la presa de Cointzio la cual da $0.63 \text{ m}^3/\text{s}$ y llega por gravedad a la planta potabilizadora de Vista Bella. La segunda pertenece al manantial La Mintzita que aporta un promedio de $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$ y llega por gravedad a un cárcamo de bombeo ubicado en el periférico de la ciudad a la altura de la colonia

Manantiales y es bombeada a la planta Vista Bella a través de una tubería de 8” conocida por OOAPAS como “Acuaférico”. Una vez llegada el agua se le da tratamiento y se manda a los tanques maestros 1 y 2, los cuales abastecen a gran parte de la población. Según los registros en el catastro virtual que maneja OOAPAS, a lo largo de la ciudad hay 310 tanques de regulación, 202 elevados y 108 superficiales, de diferentes capacidades y materiales. En total hay 2,001.49 Km de tubería que se encarga de conducir y distribuir el agua por toda la ciudad. El organismo operador la clasifica en 3 tipos según su función:

- **Conducción:** Todas aquellas que transportan el agua de la fuente de abastecimiento hasta la planta potabilizadora y a los tanques de regulación. El 11% de la red de la ciudad pertenece a las tuberías de conducción.
- **Primaria:** Es la tubería que sale del tanque de regulación y su función es alimentar a las tuberías secundarias, por lo que generalmente son de mayor diámetro y transportan un caudal más grande. El 11% de la red cumple con esta función.
- **Secundarias:** Son la continuación de las tuberías primarias, pero en menor diámetro y de estas se hacen las conexiones a las tomas domiciliarias de los usuarios. Este es el más abundante ya que representa el 78% del total de la red.

Esta red está compuesta por distintos diámetros que van desde 1 pulgada hasta 60 pulgadas y los materiales de los que están hechos las tuberías son muy diversos, pero para fines prácticos se pueden resumir en PVC, Asbesto-Cemento (AC), acero, concreto, poliuretano de alta densidad (PeAD), fibra de vidrio (FV) y manguera; este último es utilizado para suministrar agua potable a ciertos usuarios que sus condiciones solo les permite ser abastecidos por medio de hidrantes. Las tuberías de mayor abundancia son de PVC, debido a que las más antiguas, que en su mayoría eran de AC y FV, fueron remplazadas por este material.

Tabla 1. Materiales y longitudes de la tubería existente en la ciudad de Morelia

PATRIMONIO DE INFRAESTRUCTURA DE OOAPAS - TOTAL DE TUBERÍAS EXISTENTES EN LA CIUDAD DE MORELIA (KILOMETROS)									
DIÁMETRO (PULGADAS)	MATERIAL DE TUBERÍA								TOTAL
	ACERO	ASBESTO-CEMENTO	CONCRETO	FIBRA DE VIDRIO	MANGUERA	PEAD	PVC	DESCONOCIDO	
1					0.21		0.06	0.08	0.35
1.5	0.05						2.83		2.88
2	3.87	1.82		0.06			255.50	6.35	267.60
2.5	0.52	19.74					386.66	6.08	412.99
3	3.19	99.58					523.25	10.79	636.82
4	5.09	23.91				1.04	283.33	5.83	319.21
6	6.15	31.05		1.61		2.27	136.35	6.55	183.99
8	4.81	30.55				0.69	38.97	1.65	76.65
10	1.26	6.59					10.43	1.86	20.14
12	4.36	10.00					0.90	0.51	15.78
14	8.50	1.64					0.71		10.85
16	25.76	2.40					4.50		32.66
18	0.64	1.15							1.79
20	3.62	1.77						0.02	5.42
24	4.50	4.74					0.01		9.26
30	0.02								0.02
60			5.08						5.08
TOTAL	72.35	234.95	5.08	1.67	0.21	3.99	1,643.52	39.73	2,001.49

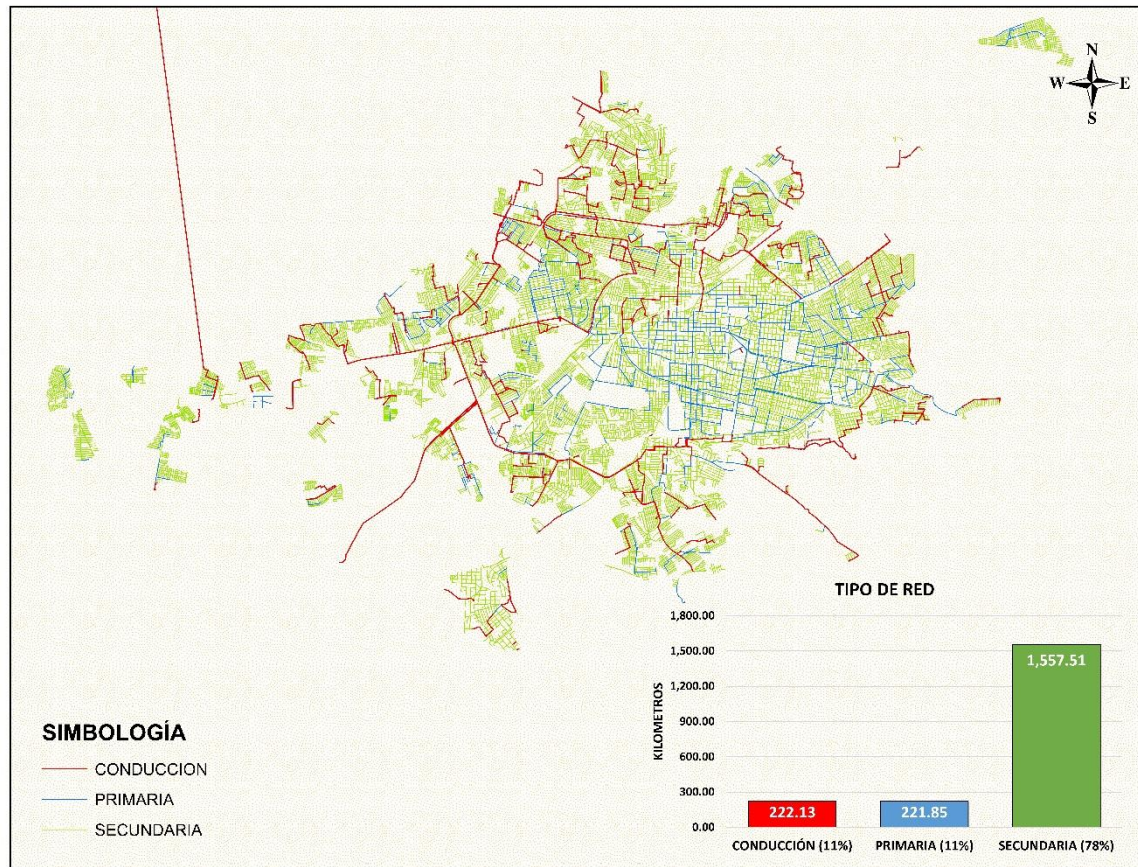


Figura 9. Disposición de la red de agua potable de la ciudad de Morelia

Para operar la red de agua potable de la ciudad se requiere un constante análisis, sin embargo, hacerlo en su totalidad es muy complejo además de ineficiente pues detectar fugas y realizar evaluaciones del funcionamiento hidráulico sería demasiado tardado y por ende se dificulta encontrar soluciones a posibles problemas que se presenten. Es por esta razón que el organismo operador divide a la ciudad de Morelia en 8 sectores, cada uno con un ingeniero a cargo de su supervisión. Estos sectores tienen una numeración y nombre, los cuales son:

- Sector 1 – Centro
- Sector 2 – Independencia
- Sector 3 – Revolución Norte
- Sector 4 – Revolución
- Sector 5 – Nueva España
- Sector 6 – Independencia Poniente
- Sector 7 – República
- Sector 8 – República Norte

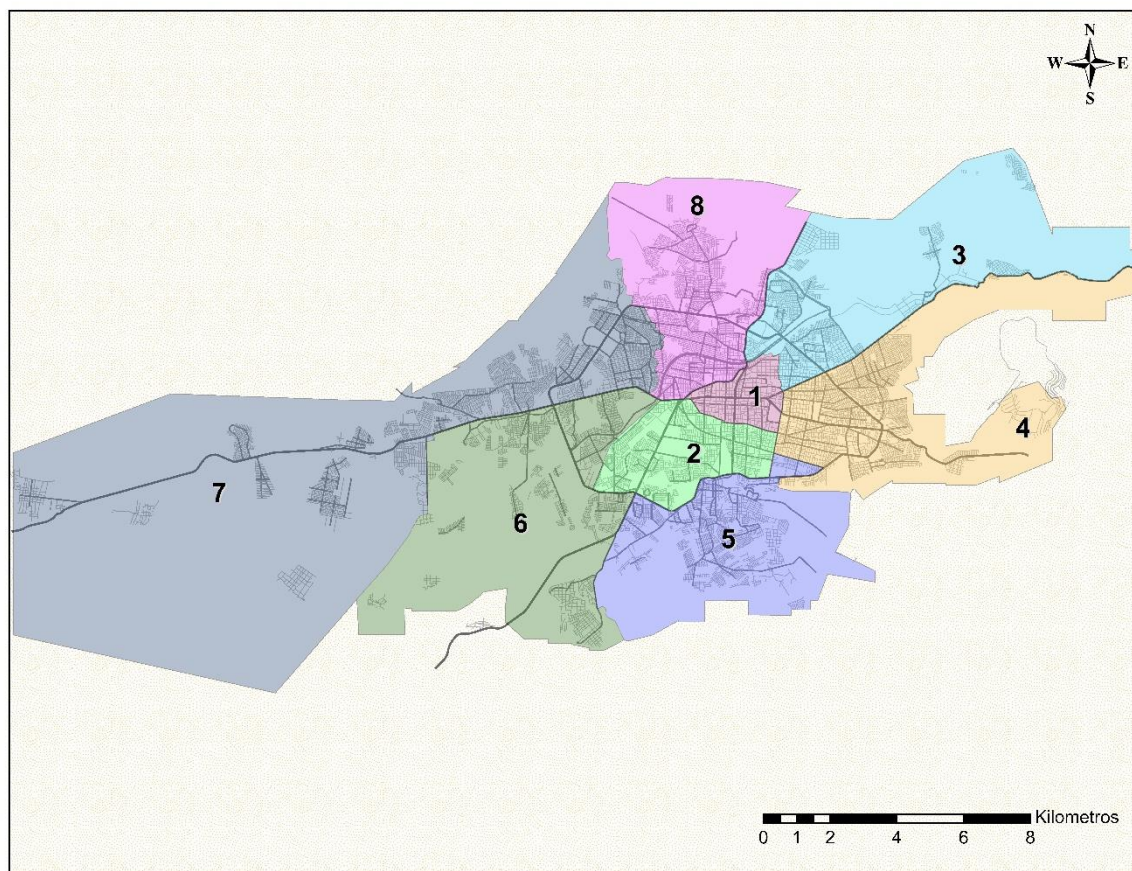


Figura 10. División de la ciudad de Morelia en sectores

A su vez dentro de estos sectores están divididos por Distritos Hidrométricos (DH) para hacer más pequeña la zona de análisis, teniendo un mejor control de la red. Aproximadamente el 81% de los DH que maneja OOAPAS abarcan de 1 a 4 colonias para cumplir con este propósito, sin embargo, hay DH que tienen hasta un área de influencia de 29 colonias, es decir, son demasiado extensos por lo que se deben redistribuir para un mejor control. Actualmente del sistema de catastro digital con el que cuenta OOAPAS se puede extraer la siguiente información:

Existen un total de 635 colonias operadas por este organismo, de los cuales 52 de estas colonias no tienen un Distrito Hidrométrico asignado. También se tiene un registro de 190 Distritos Hidrométricos distribuidos entre los 8 sectores de Morelia, sin embargo 176 de estos si cuentan con la información de las colonias que abarca mientras que los 14 restantes existen pero no se sabe que colonias abarca. Por lo que se tomara como total 176 DH y 583 colonias. Los sectores están aislados de forma física y permanentemente en la red, dentro de ellos los DH también se encuentran aislados pero mediante válvulas, por lo que no son permanentes y pueden ser modificados. La finalidad de los DH es realizar evaluaciones de fugas, consumos y pérdidas de agua.

Tabla 2. Distribución de Distritos Hidrométricos y Colonias por cada sector.

NÚMERO	NOMBRE	DISTRITOS HIDROMÉTRICOS	COLONIAS
1	CENTRO	5	6
2	INDEPENDENCIA	17	72
3	REVOLUCIÓN NORTE	20	44
4	REVOLUCIÓN	30	91
5	NUEVA ESPAÑA	17	108
6	INDEPENDENCIA PONIENTE	18	80
7	REPÚBLICA	39	104
8	REPÚBLICA NORTE	30	78
		176	583

Esta técnica de dividir la red de distribución de agua potable en áreas pequeñas y aisladas hidráulicamente entre sí fue propuesta en 1980 por la industria de agua potable del Reino Unido con el documento llamado “Report 26 Leakage Control Policy & Practice” (UK Water Authorities Association, 1980), en donde a las áreas divididas las llamaron “Distric Metered Area” (DMA), en español “Distritos Hidrométricos”.

Operación de la colonia Piedra Lisa

La colonia está ubicada en el sector 5 y por sí sola es un Distrito Hidrométrico con nombre homónimo al de la colonia. Cuenta con su propio tanque elevado de regulación con una capacidad aproximada de 100 m³.

La colonia recibe agua por medio de la estación de bombeo “Santa Cecilia”, esta se suministra de dos fuentes, la primera proviene de la Planta Potabilizadora de OOAPAS ubicada en la calle Rey Tangaxoan S/N en la colonia Vista Bella que a su vez se abastece del manantial “La Mintzita” por medio de bombeo y de la presa de Cointzio por gravedad. La segunda fuente de abastecimiento es el pozo llamado “Santa Cecilia” que se ubica dentro de la estación de bombeo. Esta estación cuenta con dos bombas, una se encarga de bombear el agua y la otra queda como reserva en caso de algún desperfecto o mantenimiento de la primer bomba, cada una tiene un manómetro para efectuar mediciones de presión.

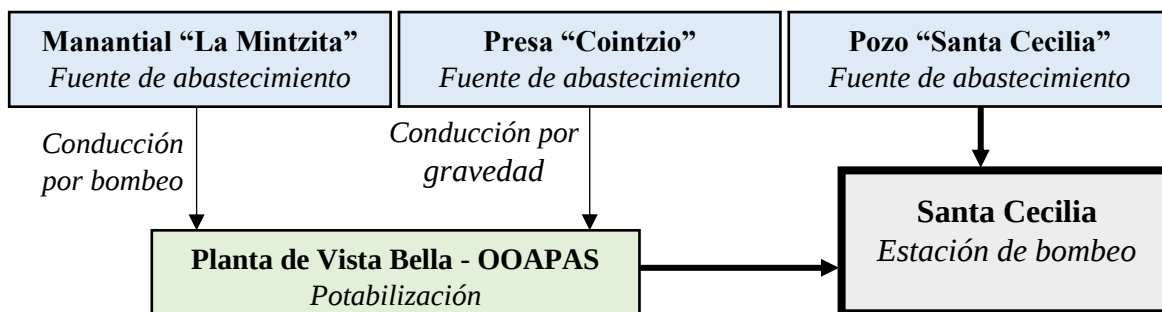


Figura 11. Fuentes de abastecimiento de la estación de bombeo Santa Cecilia



También hay dos medidores, uno mide el gasto de extracción del pozo, que está en 2.1 LPS; el otro mide el gasto que se bombea al tanque superficial “Santa Cecilia” y al tanque elevado “Piedra Lisa”. Siendo este último de interés para el análisis. Su conducción es una tubería PVC RD-26 de 6” de diámetro que pasa por las calles Arcadio Zentella Priego, Cenobio Paniagua y Miguel Lerdo de Tejada, abarcando una longitud de 1,523 metros aproximadamente, esta llega directamente al taque superficial “Santa Cecilia” que tiene una capacidad de 500 m³ (Ver Figura 46). Para el tanque elevado “Piedra Lisa” hay una derivación por parte de una tubería de PVC RD-26 de 4” de diámetro con longitud aproximada de 55 metros, esta tubería se conecta a la línea de 6” a la altura de la calle Piedra China, llegando así al tanque elevado.

Para que el tanque elevado de Piedra Lisa pueda recibir agua se debe abrir la válvula que esta sobre la línea de 4” ubicada sobre la calle Piedra China esquina con Arcadio Zentella Priego. De esta forma toda el agua bombeada se destina a este tanque y el tanque Santa Cecilia deja de recibir agua por diferencia de alturas, estando este último a una altura mayor. El operador de esta zona comentó que la tubería que lleva a la distribución de la colonia se cierra antes de suministrar el agua al tanque, se deja llenando 2 horas, pasando este lapso se abre la válvula que permite la distribución a la colonia y se continúa bombeando agua por otros 15 minutos.

El día 28 de agosto del 2020 se monitoreo las condiciones de bombeo al abrir y cerrar la válvula que permite la llegada del agua al tanque, sin abrir la válvula que permite la distribución, obteniendo los siguientes datos:

- Antes de abrir la válvula:
 - Presión: 10.6 Kg/cm²
 - Gasto: 648 Lts/min = 10.8 LPS
 - Se confirma que el tanque elevado se encuentra completamente vacío
- Al abrir la válvula:
 - Hora: 10:18 am
 - El manómetro marcó una presión de 8.6 Kg/cm²
 - Se registra un gasto de 746.4 Lts/min.
- Tanque lleno:
 - A las 12:19 pm se registró un incremento de presión en el manómetro, el cual indica que el tanque ya se llenó y la presión aumenta para para abastecer el tanque Santa Cecilia de debido a que tiene una mayor altitud que el tanque de Piedra Lisa.
 - A las 12:27 se tiene una lectura de gasto igual a 647.5 lts/min , similar al gasto inicial, antes de empezar a bombear al tanque elevado.

Con estas observaciones que se hicieron en la estación de bombeo se pueden obtener los siguientes datos:

- El gasto que se bombea al tanque elevado de Piedra Lisa:

$$746.4 \text{ Lts/min} = 12.44 \text{ Lts/seg}$$



- Tiempo de bombeo:
A las 10:18 hrs se abrió la válvula y las 12:19 hrs el manómetro mostro cambios de presión, indicativo de que el tanque se llenó.

$$Tiempo\ Total = 121\ min$$

- Volumen bombeado:

$$Vol = Q * t$$

$$Vol = (746.4 \frac{lbs}{min}) * (121\ min)$$

$$Vol = 90,314.40\ Lts = 90.31\ m^3$$

Considerando el tiempo de bombeado que se le da normalmente (2 hrs con 15 min)

$$Vol = (746.4 \frac{lbs}{min}) * (135\ min)$$

$$Vol = 100,764\ Lts = 100.76\ m^3$$

Modelación matemática de una red de distribución de agua potable.

El uso de modelos matemáticos para el análisis de sistemas de distribución de agua potable fue propuesto por vez primera por Hardy Cross en 1936. Actualmente, los modelos de simulación son sistemas completos de fácil manejo que permiten a los usuarios analizar y mostrar los parámetros hidráulicos y de calidad del agua dentro de un sistema de distribución de agua potable. Es posible clasificarlos de acuerdo con el objetivo que persigan o los criterios que se establezcan:

- Aplicaciones
 - Planificación
 - Operacionales o de diseño
- Grado de detalle
 - Estratégicos o arteriales
 - Detallados

- Variación en el tiempo
 - Estáticos o de flujo permanente
 - Dinámicos o de flujo no permanente
 - Inerciales
 - Elásticos
 - Rígidos
 - No inerciales (de simulación en período extendido)
- Variables del sistema
 - Hidráulicos
 - Calidad del agua

(CONAGUA, 2015, págs. 7-10)

El utilizar este tipo de herramientas facilitan las modelaciones ahorrando cálculos y tiempo para quien este diseñando o revisando el funcionamiento hidráulico de un red, no obstante, se debe ser cuidadoso con la obtención e introducción de los datos, tener conocimiento de las normas vigentes que rigen el país, las condiciones y características de la zona de estudio (altitud, temperatura, topografía, etc.), así como criterio para interpretar los resultados arrojados por el software y discernir si estos se apegan a la realidad o no. Estas herramientas prácticamente son una calculadora que facilitan la resolución de operaciones matemáticas. En una calculadora puedes introducir datos para multiplicarlos como $5,075 * 785$, la calculadora hace las operaciones y arroja como resultado 3,983,875, sin embargo solamente el que introdujo los datos sabe lo que significa esta cifra y para que la utilizará, si desea saber cuántos segundos tiene un año este resultado no es el que busca y la selección de los datos no fue la adecuada. Actualmente existen softwares para cálculos de redes hidráulicas como EPANET, InfoWorks, WaterCAD, ScadRed, REDES, WaterGEMS, H2OMap entre muchos otros. El que se utilizará para el desarrollo de este proyecto será EPANET.

EPANET

EPANET es un programa computacional que realiza simulaciones en periodos prolongados del comportamiento hidráulico y de la calidad de agua en redes de distribución de agua potable.

Los componentes físicos que utiliza el programa son:

- Nodos: Puntos de la red donde se conectan o terminan las tuberías, a través de los nodos el agua en la red puede salir, entrar o simplemente circular.
- Embalses: Son elementos tipo nodo que representan una fuente de abastecimiento de cualquier tipo, presas, ríos, lagos, acuíferos, etc. con la consideración que dicha fuente de alimentación externa es ilimitada.
- Depósitos: Elementos tipo nodo que tienen la función de un tanque de regulación o cualquier estructura con cierta capacidad de almacenamiento que tiene variaciones de volumen con respecto al tiempo que transcurre durante la simulación.
- Tuberías: Son las líneas que transportan el agua de un nodo a otro, el software asume que las tuberías siempre están llenas y que el flujo es a presión.



- **Bombas:** Son elementos tipo línea que adiciona energía al fluido elevando su altura piezométrica.
- **Válvulas:** Son líneas que limitan el caudal o la presión en un punto determinado de la red. Las válvulas que maneja EPANET son; Reductoras de Presión (PRV), Sostenedoras de Presión (PSV), Rotura de Carga (PBV), Limitadoras de Caudal (FCV), de Regulación (TCV), de Propósito General (GPV).

También tiene tres tipos de componentes no físicos; curvas de comportamiento, curvas de modulación y leyes de control. Estos sirven para describir el comportamiento y modo de operación del sistema.

1. **Curvas de comportamiento:** Contienen pares de datos ordenados que representan una relación entre dos magnitudes. Hay diferentes tipos:
 - Curva característica: Es empleada en bombas y representa la relación entre la altura comunicada al fluido y el caudal de paso.
 - Curva de rendimiento: También es usado en bombas y refleja la relación del porcentaje de rendimiento de la bomba con respecto al caudal de paso.
 - Curva de cubicación: También conocida como curva de volumen y relaciona el volumen almacenado en un depósito con el nivel de agua en el mismo.
 - Curvas de pérdidas: Es aplicada en Válvulas de Propósito General (GPV) y relaciona la pérdida de carga en dicho tipo de válvula con respecto al caudal de paso.
2. **Curvas de Modulación:** También llamadas “Patrones”, son un conjunto de factores multiplicativos que siguen una secuencia de 24 intervalos representando las horas que tiene un día. Esta secuencia es aplicada a un valor base para obtener variaciones con el respecto al tiempo. Los patrones se asocian a las demandas en los nodos, alturas en los embalses, velocidad de giro en las bombas, inyecciones de contaminantes en la red y al precio de la energía.
3. **Leyes de control:** Son reglas que determinan el modo de operación de la red durante la simulación. Estas leyes se pueden clasificar en dos tipos:
 - Leyes de Control Simples: Cambian el estado o la consigna de un componente físico en base a:
 - El nivel de agua en un depósito
 - La presión en un nodo
 - El instante de la simulación
 - La hora del día
 - Leyes de Control basadas en Reglas: Permite controlar el estado o la consigna de los componentes físicos en base a una combinación situaciones, como las descritas en el punto anterior, que se puedan presentar en la red.

El modelo de simulación hidráulica de EPANET calcula alturas piezométricas en los nodos y caudales en las líneas en base a los niveles iniciales de los depósitos y embalses; y la sucesión en el tiempo de las demandas aplicadas a los nodos. Estos niveles se van actualizando de un intervalo a otro conforme a los caudales calculados, las demandas en los nodos y los niveles en los embalses con respecto a su curva de modulación. Para obtener las

alturas y caudales en un determinado instante se resuelven simultáneamente las ecuaciones de conservación del caudal en los nodos y las ecuaciones de pérdidas en todos los tramos de la red. Se puede elegir entre las ecuaciones de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Chezy-Manning para calcular las pérdidas por fricción, el más utilizado es el de Darcy-Weisbach. Este proceso es conocido como “equilibrio hidráulico” y requiere el uso de métodos iterativos para resolver las ecuaciones de tipo no lineal involucradas. EPANET emplea a tal fin el “Algoritmo del Gradiente”.

Para más detalles consultar el manual del usuario de este software (EPANET, 2017).

Propuesta del IMTA para modelar con suministro intermitente

El suministro intermitente se da cuando el servicio de distribución de agua potable tiene una duración menor a las 24 horas al día y los usuarios tienen depósitos de almacenamiento dentro de su domicilio, aljibe y/o tinaco. Este tipo de servicio es muy común en países en vías de desarrollo y genera problemas como: distribución inequitativa del recurso entre los usuarios; contaminación, pérdida y desperdicio del agua; costos elevados y daños físicos a las tuberías. Complica la logística de operación y se requiere de un mayor número de personal para realizar los movimientos de válvulas para distribuir el agua, el incremento de la frecuencia con la que se manipulan los elementos de seccionamiento genera un aumento en la necesidad del mantenimiento de estos equipos. También crea una tendencia de los usuarios a almacenar más agua de la que necesitan.

El suministro intermitente es un problema que puede ser atacado desde dos puntos de vista:

- Se asume que existe una fuente de agua suficiente para el servicio continuo y que la intermitencia se debe a una falla en el servicio de agua, por lo que debe ser tratada con todos los recursos disponibles hasta restaurar el suministro continuo.
- El suministro intermitente es una realidad y que los países con este tipo de servicio no tienen la capacidad, a corto o mediano plazo, de lograr abastecer las 24 horas. Por lo que hace énfasis en la necesidad de proporcionar métodos apropiados de análisis, diseño y operación que puedan minimizar los impactos negativos de la intermitencia en los usuarios.

Estas dos formas de ver el problema pueden ser aceptadas como válidas dependiendo de las condiciones locales de cada población. Sin embargo el segundo punto de vista es más certero para países en desarrollo, sobre todo cuando se requiere la modelación de sistemas existentes con servicio intermitente.

Es común realizar modelaciones para sistemas que operan con intermitencia utilizando herramientas computacionales que asumen un suministro continuo, por lo que estos modelos presentan errores en la dinámica de la distribución de agua. Este tipo de programas, como el caso de EPANET, fueron creados en países desarrollados que no presentan intermitencia y son normalmente “modelos dependientes de la demanda”, por lo que la dotación de agua es igual a la demanda y esta última siempre se satisface, en el modelo se obtienen presiones y gastos según la demanda dada. Totalmente contrario para el caso de sistemas que no son continuos, debido a que estos solo operan por un tiempo limitado y la cantidad de agua que pueden captar los usuarios depende de la presión disponible en el sistema y la duración del

servicio, por lo que se deben crear “modelos dependientes de la presión”. Estos modelos tomarían en cuenta el tiempo que tarda en llenarse y vaciarse las tuberías de la red, que usuarios reciben primero el recurso y cuáles son los primeros en quedarse sin agua. Sin embargo es muy común que las redes de agua potable sean diseñadas con suministro continuo y sean operadas con intermitencia, existiendo una diferencia entre el análisis del modelo y el comportamiento real del sistema. (Cabrera-Béjar, 2012).

MARCO METODOLÓGICO

Levantamiento de la red existente

La colonia Piedra lisa tuvo una remodelación de su sistema de distribución de agua potable, se instaló tubería nueva y algunos diámetros fueron modificados. Sin embargo el sistema de catastro de OOAPAS no tiene la información actualizada de la nueva red (Ver Figura 47). Por lo que se hizo una visita de campo para registrar estos cambios con ayuda del encargado del orden de la colonia, el Sr. Benjamín Carmona, y el jefe del sector 5, el ing. Rubén Márquez; ambos supervisaron la remodelación.

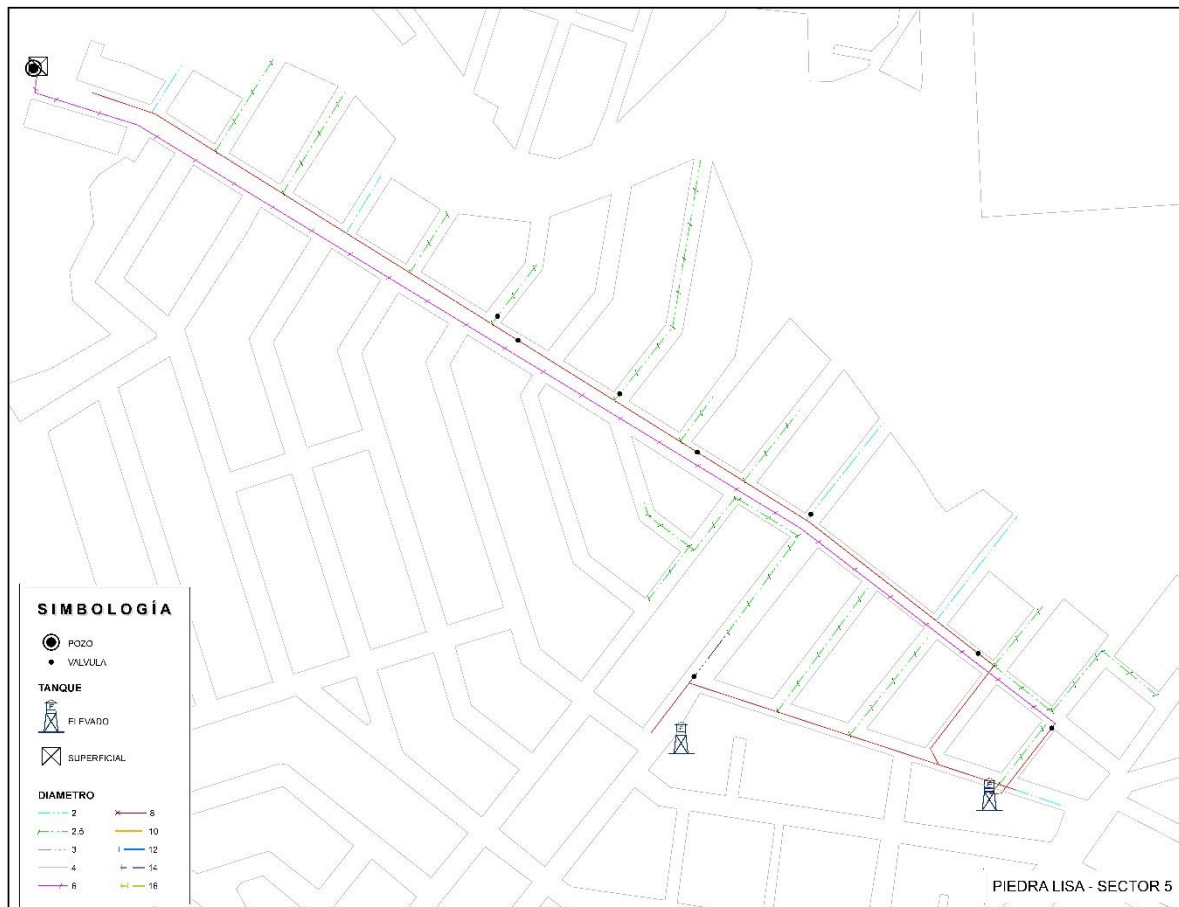


Figura 12. Plano actualizado de la red de distribución de la colonia Piedra Lisa

Exportación de la red a EPANET

La red hidráulica fue recreada en el software ArcGIS por su sencillez de dibujo además de que se tiene información previa proporcionada por OOAPAS de las manzanas y los predios de la colonia. Sin embargo recrear este sistema de distribución o cualquier otro en EPANET resulta ser laborioso si se quiere dibujar manualmente, pero es posible. Se puede tomar una foto a escala y utilizarla como base, agregar los diámetros, rugosidades, longitudes, elevaciones a los nodos y otros datos necesarios para el modelo; sin embargo el tiempo para hacerlo es considerablemente mayor. Una alternativa para esto es utilizar un programa llamado EPACAD, que se encarga de convertir archivos “.dwg” (como los que utiliza AutoCAD) en “.inp” compatibles con EPANET, por lo que solo se necesita agregar la información de elevaciones a los vértices, que sería el equivalente de los nodos pero en ArcGIS, y exportarlos a AutoCAD de forma que este interprete las elevaciones asignadas y de aquí exportarlos a EPANET con este programa. Sin embargo, con EPACAD solo se pueden exportar los nodos con sus respectivas elevaciones, lo que resulta de gran ayuda acortando el tiempo de esquematización de la red, pero aun así se tendría que dibujar las tuberías con su respectiva información.

Otra manera que ofrece EPANET de crear redes en su interfaz es utilizando archivos tipo texto, que deja abierta la posibilidad de usar Excel y guardar el archivo como tipo “texto (delimitado por tabulaciones)”.

Para que EPANET pueda leer dicho archivo debe tener el siguiente formato:

[TITLE]								
[JUNCTIONS]								
;ID	Elev	Demand	Pattern					
x	x	x	x	;				
[RESERVOIRS]								
;ID	Head	Pattern						
x	x	x	;					
[TANKS]								
;ID	Elevation	InitLevel	MinLevel	MaxLevel	Diameter	MinVol	VolCurve	
x	x	x	x	x	x	x	x	;
[PIPES]								
;ID	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss	Status	
x	x	x	x	x	x	x	x	;
[COORDINATES]								
;Node	X-Coord	Y-Coord						
x	x	x						
[BACKDROP]								
DIMENSIONS	x	x	x	x				
UNITS	x							
FILE	x							
OFFSET	x	x						
[END]								

Figura 13. Formato para ingresar datos a EPANET

En donde la “x” representa la información correspondiente para el modelo, lo que resulta conveniente debido a que en ArcGIS se puede descargar la información de sus archivos en formato de texto. Solamente es necesario tener la información de los elementos como las coordenadas y elevaciones de los nodos; longitudes, diámetros y las coordenadas iniciales y finales de las tuberías. Las cuales son muy sencillas de obtener en este software, para el caso de las elevaciones se requiere de un modelo digital de elevaciones de la zona, el cual se puede descargar de INEGI con precisión a 5 metros. Una vez teniendo esta información se exporta en formato de texto y se modifica en Excel para que las coordenadas iniciales y finales coincidan con las coordenadas de los nodos, se le asignan sus respectivos ID para cada tipo de elemento y se acomoda conforme al formato que solicita EPANET para poder ser leído. Tal vez esta forma de modelar parezca en primera instancia igual o más laboriosa que las otras anteriormente mencionadas y deja la sensación de que el método más eficiente para exportar la información sea con EPACAD, pero si se deja una hoja de Excel programada para las relaciones tuberías-nodo y con ayuda una macro para ordenar y acomodar los datos, la esquematización del modelo se puede hacer en cuestión de minutos y se ahorraría más tiempo en comparación con cualquier otro método de exportación a EPANET, convirtiéndose en el método más eficiente sobre todo si se requiere hacer modelos para diferentes sistemas de distribución de agua potable.

Preparación de la red en ArcGIS

Lo primero que se debe hacer con la red una vez dibujada en ArcGIS es dividirla por tramos, en EPANET las tuberías se conectan de nodo a nodo por lo que estos representan las uniones que existen en un cambio de dirección o una intersección entre tuberías. En ArcGIS el equivalente a los nodos son los vértices pero, a diferencia de EPANET, en una misma línea puede haber dos o más vértices que la compongan. Por esto la red debe ser dividida por tramos a través de todos sus vértices con la herramienta “Split Line At Vertices” ubicada en la caja de herramientas (ArcToolbox >> Data Management Tools >> Features >> Split Line At Vertices). Se abrirá un cuadro de diálogo, en “Input Features” se coloca la red existente y en “Output Feature Class” se selecciona la ubicación y el nombre con el que se guardará en nuevo Shapefile. De esta forma nos aseguramos que los vértices trabajen de la misma forma que los nodos, es decir, que las líneas estén conectadas de vértice a vértice.

El siguiente paso será convertir los vértices de las líneas en archivo shapefile de tipo punto, esto con la herramienta llamada “Feature Vertice To Point” con la misma ubicación de la herramienta anterior (ArcToolbox >> Data Management Tools >> Features >> Feature Vertice To Point). Una vez abierto el cuadro de diálogo se coloca el shapefile de la red dividida por sus vértices en “Input Features”, en “Output Features Class” se selecciona la ubicación de guardado y se le asigna nombre al nuevo archivo; y en la casilla “Point Type” se selecciona la opción “ALL” que significa todos.

Después de esto, se deben modificar las tablas de atributos de los archivos shapefile, OOPAS tiene mucha información en la tabla de atributos de los shapefiles de la red que tienen en su inventario digital, sin embargo solo dejaremos los campos llamados “DIAMETRO” y “MATERIAL” que contienen la información que se necesitará. Después se crearán nuevos campos que contendrán lo siguiente:

Tabla 3. Campos para agregar información a las tuberías en ArcGIS

Nombre	Tipo	Características
LONGITUD	Double	Distancias de las tuberías en metros.
TIPO	Text	Tipo de servicio que presta la tubería y solo serán dos opciones, “CONDUCCION” y “DISTRIBUCION”, es importante no escribir mal ninguna de estas dos palabras o de lo contrario la hoja de Excel presentará errores.
Xi	Double	Coordenadas UTM iniciales en X.
Yi	Double	Coordenadas UTM iniciales en Y.
Xf	Double	Coordenadas UTM finales en X.
Yf	Double	Coordenadas UTM finales en Y.

El archivo de puntos generado a partir de las líneas que representan la red tendrá automáticamente los mismos campos e información, pero ninguno será útil por lo que se eliminan todos y se crean los siguientes campos:

Tabla 4. Campos para agregar información a los nodos en ArcGIS

Nombre	Tipo	Características
X	Double	Coordenadas UTM en X.
Y	Double	Coordenadas UTM en Y.
TIPO	Text	En este campo se pondrá el tipo de nodo que representaría en EPANET y serían: “NODO”, “TANQUE” y “RESERVORIO”

Ya que se tengan los campos listos en las tablas de atributos de los dos archivos shapefile se procede a calcular la información espacial que se requiere para trabajar en EPANET (distancias y coordenadas UTM). Esto se hace de manera sencilla ya que ArcGIS tiene la opción de calcular las coordenadas y longitudes de forma automática, en la tabla de atributos se da clic derecho en el encabezado de lo que se quiere calcular y se selecciona “Calculate Geometry”, se abrirá un cuadro de diálogo que mostrará una casilla llamada “Property” se escoge la opción deseada. Para el caso de los puntos solo son dos, coordenadas en “X” y “Y”; para las líneas se tienen las opciones de calcular longitud, coordenadas en “X” y “Y” del punto medio, inicial y final de la línea (un total de 7 opciones), de los cuales se descarta el cálculo de las coordenadas en “X” y “Y” del punto medio. Las unidades deben estar en metros y en ambos casos el sistema de coordenadas debe coincidir con el de la zona de estudio, en este caso es el “PCS: WGS 1984 UTM Zone 14N”.

Para el caso de los campos tipo texto se seleccionan los elementos que compartan la misma característica, una vez seleccionado se da clic derecho en el campo llamado TIPO y en esta ocasión se hace clic en “Field Calculator”, en el cuadro de diálogo que aparece se marca la opción “String” en la sección “Type” y en la parte inferior se escribe entre comillas el tipo de nodo o tipo de servicio (“NODO”, “TANQUE”, “RESERVORIO”, “CONDUCCION” o “DISTRIBUCION” según sea el caso).



Al haber transformado los vértices en puntos habrá repeticiones, esto ocurre debido a que el punto final de una línea es el punto inicial de la línea siguiente generando dos puntos en un mismo lugar. Para corregir esto utilizamos la herramienta llamada “Delete Identical” (ArcToolbox >> Data Management Tools >> General >> Delete Identical). En donde se coloca el archivo de puntos en “Input Dataset” y en la sección de “Field(s)” se marcan los recuadros “X” y “Y” que corresponde a las coordenadas UTM, borrando así los puntos que tengan coordenadas iguales.

Ya solo queda asignar las elevaciones a los nodos, esto se hace con ayuda de un Modelo Digital de Elevaciones o también conocido como DEM (Digital Elevation Model), en la página de INEGI se pueden descargar de forma gratuita. En la sección de Mapas seleccionamos “Relieve Continental” y se dirigirá a un mapa interactivo de la República Mexicana, solo basta con ubicar la zona de estudio y seleccionar la escala que deseemos, en este caso se seleccionó la escala 1:10,000 la cual ofrece una mayor precisión (5 metros), para este proyecto la calve de la zona es “E14A23b3” y se descarga el formato “BIL”, el cual es un archivo que ArcGIS reconoce como tipo raster. Una vez obtenido y cargado en el Software, se abre la caja de herramientas y se selecciona “Add Surface Information” (3D Analyst Tools >> Functional Surface >> Add Surface Information). En la casilla “Input Feature Class” se carga el archivo shapefile tipo punto, en “Input Surface” se coloca el archivo tipo raster descargado de INEGI y en “Output Property” se deja marcada la opción Z. Una vez hecho esto se creará un nuevo campo llamado “Z” con las elevaciones correspondientes en cada nodo, pero se procede a hacer un nuevo campo con el nombre “ELEVATION” y será de tipo “Float”, se le da clic derecho sobre el encabezado y se selecciona la opción “Field Calculator”. Una vez ahí en la casilla “Fields” se le da doble clic sobre el encabezado “Z” de tal forma que en la parte inferior aparezca “ELEVATION = [Z]”, esto hará que se copien exactamente los mismos datos pero en un campo especial para las elevaciones y, si se decide exportar a algún programa CAD, estas pueden ser interpretadas con sus respectivas elevaciones en 3D. El campo llamado “Z” se elimina y el proceso de preparación de la red hidráulica quedó terminado.

Ya por último se descargan los datos en archivos tipo texto, para esto en la tabla de atributos se abre “Table Options” y se selecciona “Export”, al abrirse el cuadro de diálogo se le asigna un nombre y una ubicación para guardar el archivo en la casilla “Output table”. Con esta información y con una hoja de Excel programada la exportación a EPANET está lista, solo se debe revisar el sistema una vez abierto en EPANET para cerciorar que todo esté en el orden correcto, incluso también se puede programar para que se calcule la demanda base de los nodos por cualquier método que proporciona CONAGUA en su Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) No. 13 “Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Distribución”.



Escenarios de modelación

Un escenario está conformado por todas aquellas condiciones y variables que rigen el comportamiento de un sistema para representar una determinada situación. El sistema puede tener una gran cantidad de posibilidades dependiendo de las variables que posea y sus diferentes combinaciones, pero solamente se selecciona una o una de cada tipo.

En este caso la cantidad de agua que se ingrese al sistema afectará el comportamiento de la red, por esta razón se plantean tres escenarios para su análisis.

1. Se considera la red para un total de 172 usuarios, los cuales tendrán una dotación y demanda igual a 150 Lts/hab/día.
2. Para 172 usuarios se considera una demanda de 150 Lts/hab/día y la dotación real, obtenida del cárcamo de bombeo Santa Cecilia (12.44 LPS durante 2 hrs. con 15 min.)
3. Una dotación y demanda igual a 150 Lts/hab/día pero considerando que todos los predios tengan contrato con OOAPAS (381 usuarios).

Estos tres escenarios serán probados en dos sistemas de modelación:

- Modelación dependiente de la demanda.
- Modelación dependiente de la presión.

El primero se podría decir que es la modelación tradicional con la que trabaja EPANET, el segundo es una propuesta del IMTA para modelar redes con servicio intermitente, forzando al software a trabajar en base a las presiones disponibles en los nodos y no en las demandas. Quedando un total de 6 escenarios a desarrollar:

1. 172 usuarios con dotación y demanda igual a 150 Lts/hab/día, con modelación dependiente de la demanda.
2. 172 usuarios con demanda de 150 Lts/hab/día y dotación real, con modelación dependiente de la demanda.
3. 381 usuarios con dotación y demanda igual a 150 Lts/hab/día, con modelación dependiente de la demanda.
4. 172 usuarios con dotación y demanda igual a 150 Lts/hab/día, con modelación dependiente de la presión.
5. 172 usuarios con demanda de 150 Lts/hab/día y dotación real, con modelación dependiente de la presión.
6. 381 usuarios con dotación y demanda igual a 150 Lts/hab/día, con modelación dependiente de la presión.

En este caso, toda la red de la colonia Piedra Lisa es de material PVC por lo que por default en EPANET se utiliza una rugosidad de $\epsilon = 0.0015$ mm. (Ver Figura 45).

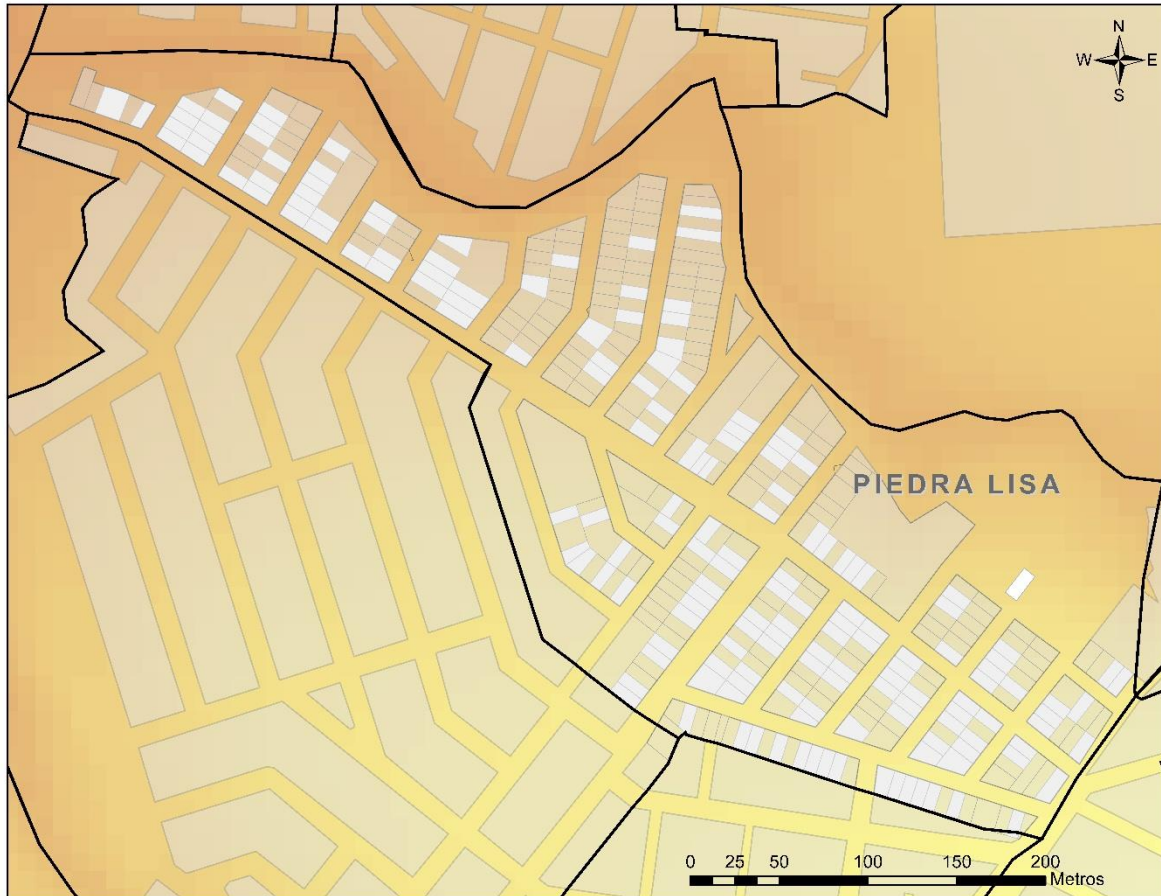


Figura 14. Distribución de casas-habitación con contrato en OOAPAS (Color blanco)

Escenario 1:

Se consideran 172 usuarios con dotación y demanda igual a 150 Lts/hab/día. Con modelación dependiente de la demanda.

Volumen requerido

El volumen total de agua requerido por la colonia para 2 días es de:

$$Vol = 2 * Dotación * Usuarios * Índice de hacinamiento$$

$$Vol = 2 * (150)(172)(3.7) = 190,920 \text{ Lt} = 190.92 \text{ m}^3$$

Este volumen es el que debe ser almacenado por el tanque de regulación de la colonia, por lo que con ayuda de una curva de volumen se manejará un tanque con capacidad de 200 m³ y tendrá una altura de 5 m.

Capacidad de la bomba

La bomba está conectada del reservorio “r1” al nodo “n1”, tomando en cuenta que esta solo se activa durante 2 horas con 15 minutos (8,100 segundos), debe bombear un gasto de:

$$Q = \frac{190,920}{8,100} = 23.57 \text{ LPS}$$

Así mismo, debe librar el desnivel topográfico que existe entre el reservorio y el tanque de regulación. La elevación del reservorio es de 1973.42 msnm; el suelo donde está asentado el tanque tiene una cota de 2036.02 msnm, se considera que el tanque elevado tiene una altura de 15 m y aparte tiene una altura propia 5 m. Quedando un desnivel topográfico de:

$$\Delta h = (2036.02 + 15 + 5) - (1973.42) = 82.60 \text{ m}$$

Esta sería la altura que debe librar la bomba, sin considerar las pérdidas por fricción y pérdidas locales de las tuberías de conducción. Estos cálculos se efectúan para conocer la potencia exacta de la bomba pero como la intención es analizar el comportamiento de la tubería de distribución; es decir, la tubería que está entre el tanque de regulación y las tomas domiciliarias, no se calcularán estas pérdidas. En su lugar se asignará una curva con gasto de 25 LPS y una altura de bombeo de 100 m., esto producirá un gasto de llegada al tanque mayor al necesario por lo que será instalada una Válvula Limitadora de Caudal (FCV por sus siglas en inglés) en la que se le asignará una consigna (setting) de 23.57, esto hará que el flujo de salida de la válvula sea de 23.57 LPS, garantizando el caudal deseado de llegada al tanque.

Demanda base

El método empleado es el de “Asignación de consumos unitarios por calle” descrito en el MAPAS No. 13, el cual consiste en multiplicar el consumo unitario (qu) por la longitud tributaria de cada nodo para obtener la demanda base (qb) de cada nodo.

Demanda total:

$$Demanda = \frac{Usuarios * \text{Índice de hacinamiento} * \text{Dotación (Lts/hab/día)}}{\text{segundos que tiene un día}}$$

$$Demanda = \frac{(172)(3.7)(150)}{86,400} = 1.10 \text{ LPS}$$

Consumo unitario:

$$qu = \frac{Demanda \text{ total}}{Long. \text{ total de tuberías}}$$

Para la longitud total de tuberías solo se tomaron en cuenta las tuberías de distribución, debido a que las de conducción como tal no están conectadas a las tomas domiciliarias, por

lo que estas tuberías no presentan consumos. La longitud total de tuberías de distribución es 2,152.48 metros. Por lo que...

$$qu = \frac{1.10}{2,152.48} = 0.0005133 \text{ LPS}/m$$

La longitud tributaria se calcula sumando la longitud total de las tuberías que estén conectadas a un mismo nodo y, considerando que estas tuberías también suministran a nodos contiguos, se divide entre dos.

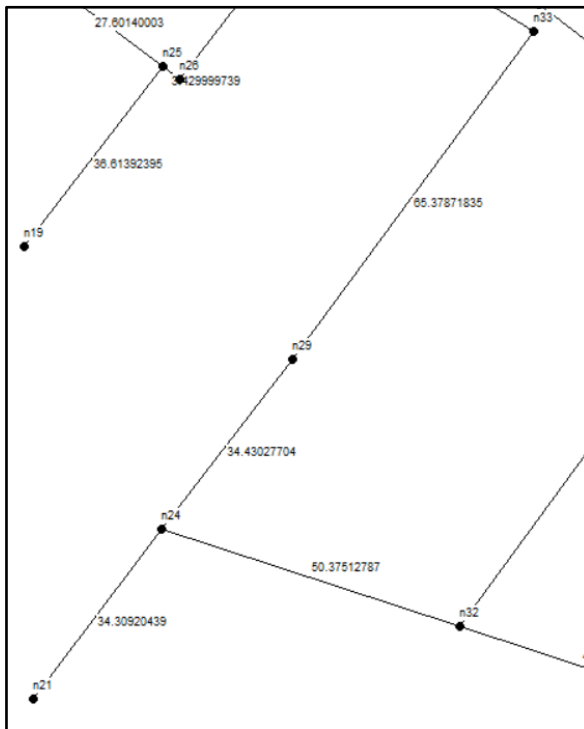
$$L_{nodo} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n}{2}$$

Dónde:

L_{nodo} : Longitud tributaria de las tuberías que se conectan en un mismo nodo (m).

L : Longitud total de la tubería conectada al nodo (m).

La longitud tributaria en los nodos “n24”, “n29” y “n21” es la siguiente:



$$L_{n24} = \frac{34.43 + 34.31 + 50.38}{2} = 59.56 \text{ m}$$

$$L_{n29} = \frac{34.43 + 65.38}{2} = 49.90 \text{ m}$$

$$L_{n21} = \frac{34.31}{2} = 17.15 \text{ m}$$

Este procedimiento se realiza para cada nodo de la red. Cabe mencionar que los nodos que pertenecen a las tuberías de conducción no se calculan.

Figura 15. Fragmento del modelo en EPANET



Por último, la longitud tributaria correspondiente de cada nodo se multiplica por el consumo unitario (qu). por lo que la demanda base de los nodos será:

$$qb_{n24} = (59.56)(0.0005133) = 0.03057 \text{ LPS}$$

$$qb_{n29} = (49.90)(0.0005133) = 0.02562 \text{ LPS}$$

$$qb_{n21} = (17.15)(0.0005133) = 0.00881 \text{ LPS}$$

Tabla 5. Longitud tributaria y demanda base de los nodos para el escenario 1

Nodo	Longitud tributaria	Demanda base	Nodo	Longitud tributaria	Demanda base
n1	0	0	n29	49.90	0.02562
n2	17.06	0.00876	n30	38.42	0.01972
n3	0	0	n31	65.27	0.03350
n4	33.43	0.01716	n32	87.58	0.04496
n5	20.32	0.01043	n33	52.93	0.02717
n6	15.33	0.00787	n34	24.81	0.01274
n7	70.65	0.03627	n35	0	0
n8	29.78	0.01529	n36	54.64	0.02805
n9	75.13	0.03856	n37	44.75	0.02297
n10	59.20	0.03039	n38	80.94	0.04154
n11	33.16	0.01702	n39	41.66	0.02138
n12	18.38	0.00943	n40	33.72	0.01731
n13	65.65	0.03370	n41	34.62	0.01777
n14	18.93	0.00972	n42	33.43	0.01716
n15	85.92	0.04410	n43	99.71	0.05118
n16	20.24	0.01039	n44	47.81	0.02454
n17	85.86	0.04407	n45	89.41	0.04589
n18	4.02	0.00206	n46	50.43	0.02589
n19	18.31	0.00940	n47	0	0
n20	17.82	0.00915	n48	18.89	0.00970
n21	17.15	0.00881	n49	35.86	0.01840
n22	71.65	0.03678	n50	20.81	0.01068
n23	57.38	0.02945	n51	20.69	0.01062
n24	59.56	0.03057	n52	41.70	0.02140
n25	33.82	0.01736	n53	0	0
n26	19.90	0.01021	n54	13.86	0.00711
n27	46.28	0.02376	n55	40.72	0.02090
n28	15.86	0.00814	n56	19.12	0.00982

Los nodos que tienen longitud y demanda base igual a 0 son los nodos de las tuberías de conducción. Una de las tuberías que se conecta al nodo “n46” se conecta con el tanque de regulación, esta longitud es la única que no se divide entre dos, debido a que el tanque no tiene demanda base por lo que toda su longitud recae completamente en el nodo “n46”.

Coeficiente de variación horaria

Este coeficiente tiene el objetivo de cambiar el régimen de suministro, que normalmente es constante, a un régimen de demandas, que se adapta al consumo de los usuarios el cual es variable. Estos coeficientes fueron medidos por la CONAGUA y el IMTA para distintos casos, el que se utilizará para este análisis será el “Coeficiente de variación horaria para distintas ciudades de México” que se encuentra en el MAPAS No. 4: Datos básicos (Ver Figura 49). Estos coeficientes se simulan en EPANET con un patrón de demanda, asignado a todos los nodos de la red.

Funcionamiento de la bomba y el tanque

Para simular las condiciones de operación de la bomba y el tanque se depende del tiempo, en el cual se define el encendido y apagado de la bomba, el cierre y apertura del tanque de regulación; y la cantidad de días en las que se correrá el modelo. Este último, por los tiempos de suministro que imperan en la colonia, se considerará de 10 días de modelación para observar su comportamiento, recordando que el inicio del suministro de agua potable se da cada 48 hrs. El día tendrá como inicio a las 9:00 am para tener una hora de diferencia con el inicio del bombeo, que comienza a las 10:00 am.

Para la dinámica de cierre y apertura del tanque basta con indicar el estatus de su tubería de salida, es decir abierta o cerrada, en este caso la tubería que sale del tanque es la “p5”. Considerando lo anterior mencionado, se hará un uso mixto de los controles de EPANET que regirán en la bomba “b1” y la tubería “p5”, es decir, controles simples y controles basados en reglas. Para los controles simples se utilizarán los siguientes comandos:

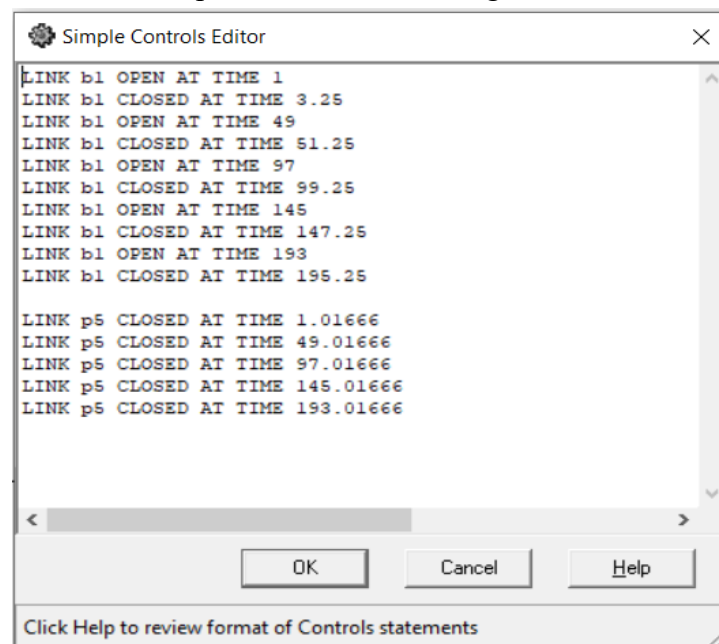


Figura 16. Controles simples utilizadas en la configuración de la modelación

En el caso de los controles basados en reglas se emplearán los siguientes comandos:

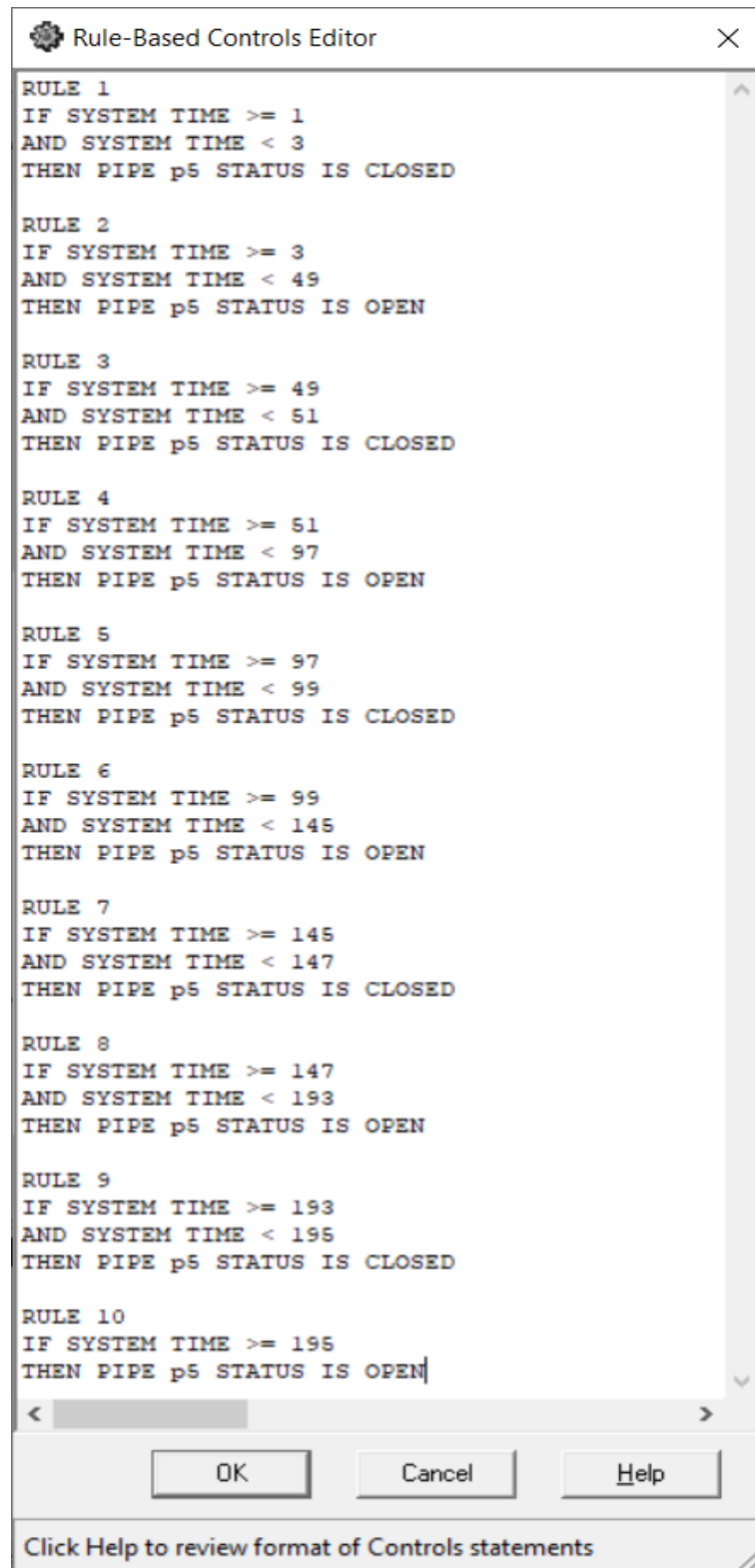


Figura 17. Controles basados en reglas utilizados para la modelación.



Estas indicaciones están basadas en el tiempo transcurrido de la modelación, es decir, “LINK b1 OPEN AT TIME 1” significa que la bomba “b1” se encenderá transcurrida una hora de modelación y “LINK b1 CLOSED AT TIME 3.25” significa que la bomba “b1” se cerrará a las 3.25 hrs de transcurrida la modelación (3 horas con 15 minutos). Para que funcione adecuadamente se debe dejar indicado que el estado inicial de la bomba “b1” esta apagado (closed) y el estado inicial de la tubería “p5” es abierto (open).

Escenario 2:

Se consideran 172 usuarios con demanda de 150 Lts/hab/día y una dotación igual a la real, 12.44 LPS, con modelación dependiente de la demanda. Para este escenario se siguen los mismo pasos que en el escenario 1, con la única diferencia de que en la válvula que está a la entrada del tanque se le cambiará la consigna de 23.57 a 12.44 para garantizar que al tanque le llega una dotación igual a la medida en el cárcamo Santa Cecilia.

Escenario 3:

Se consideran 381 usuarios con dotación y demanda igual a 150 Lts/hab/día, con modelación dependiente de la demanda. Para este escenario se debe recalcular el volumen requerido para la colonia entera, la capacidad de la bomba y la demanda base.

Volumen requerido para la colonia

El volumen total de agua requerido por la colonia para 2 días es de:

$$Vol = 2 * (150)(381)(3.7) = 422,910 \text{ Lt} = 422.91 \text{ m}^3$$

En función de este nuevo volumen se modifica la curva de volumen a 500 m³ de almacenamiento y la altura se mantiene de 5 m.

Capacidad de la bomba

$$Q = \frac{422,910}{8,100} = 52.21 \text{ LPS}$$

Este será el nuevo gasto que debe conducir la bomba, pero como en el caso del escenario 1, se mandará un gasto mayor al requerido y se regulará con la válvula puesta antes de la llegada al tanque. Quedando una curva de bombeo con gasto de 150 LPS y una altura de 100 m. y la válvula tipo FCV se configura para que libere un gasto de 52.21 LPS al tanque de regulación.

Demanda base

Demanda total:

$$Demanda = \frac{(381)(3.7)(150)}{86,400} = 2.45 \text{ LPS}$$

Consumo unitario:

$$qu = \frac{2.45}{2,152.48} = 0.0011370 \text{ LPS}/m$$



Este nuevo consumo unitario se multiplica por las longitudes tributarias de cada nodo, obtenidas en el escenario 1.

Tabla 6. Longitud tributaria y demanda base de los nodos para el escenario 3

Nodo	Longitud tributaria	Demanda base	Nodo	Longitud tributaria	Demanda base
n1	0	0	n29	49.90	0.05674
n2	17.06	0.01940	n30	38.42	0.04369
n3	0	0	n31	65.27	0.07422
n4	33.43	0.03801	n32	87.58	0.09958
n5	20.32	0.02311	n33	52.93	0.06018
n6	15.33	0.01743	n34	24.81	0.02821
n7	70.65	0.08033	n35	0	0
n8	29.78	0.03386	n36	54.64	0.06213
n9	75.13	0.08543	n37	44.75	0.05088
n10	59.20	0.06731	n38	80.94	0.09203
n11	33.16	0.03770	n39	41.66	0.04737
n12	18.38	0.02090	n40	33.72	0.03834
n13	65.65	0.07464	n41	34.62	0.03936
n14	18.93	0.02153	n42	33.43	0.03801
n15	85.92	0.09770	n43	99.71	0.11337
n16	20.24	0.02301	n44	47.81	0.05436
n17	85.86	0.09762	n45	89.41	0.10166
n18	4.02	0.00457	n46	50.43	0.05734
n19	18.31	0.02082	n47	0	0
n20	17.82	0.02026	n48	18.89	0.02148
n21	17.15	0.01951	n49	35.86	0.04077
n22	71.65	0.08146	n50	20.81	0.02366
n23	57.38	0.06524	n51	20.69	0.02353
n24	59.56	0.06772	n52	41.70	0.04741
n25	33.82	0.03846	n53	0	0
n26	19.90	0.02263	n54	13.86	0.01575
n27	46.28	0.05262	n55	40.72	0.04630
n28	15.86	0.01803	n56	19.12	0.02174

Los coeficientes de variación horaria y el funcionamiento de la bomba y el tanque permanecen igual que en la modelación del escenario 1.

Escenario 4

Para este escenario se tomarán las mismas características que el escenario 1 pero ahora la modelación será dependiente de la presión en el sistema.

Área de influencia

Para recrear este tipo de modelo primero se debe establecer el área de influencia de cada nodo (Ver Figura 48), esto es, la zona delimitada por los usuarios que son abastecidos por un

mismo nodo, buscando siempre referirlo al más cercano o al que se puede considerar que abastece al usuario.

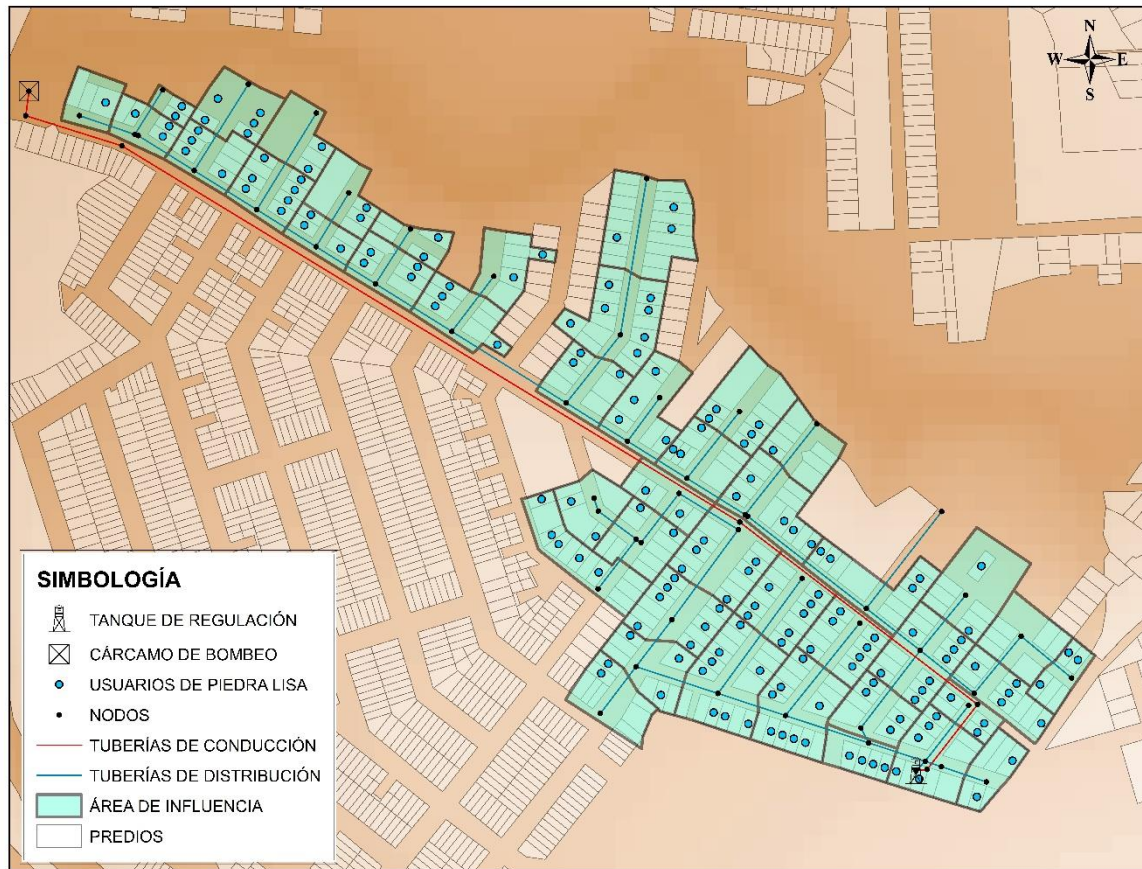


Figura 18. Área de influencia de los nodos para los escenarios 4 y 5

Sustitución de los nodos de demanda por depósitos pequeños

En los escenarios anteriores cada nodo tenía su demanda asignada dependiendo de la longitud tributaria y del gasto unitario, para este caso todas las demandas nodales tendrán como valor cero y en su lugar, a cada nodo que tenga usuarios dentro de su área de influencia, se colocarán tanques que simularán los depósitos intradomiciliarios de los usuarios (tinacos y aljibes), el hacer un depósito para cada usuario es muy preciso pero demasiado laborioso por lo que en este caso se considera un tanque que represente al total de tinacos y aljibes de los usuarios dentro del área. Estos tanques deberán tener una altura igual a la que se presenta en la realidad, sin embargo esto no aplica debido a que un tanque en el modelo puede representar dos o más tanques. Por lo que se opta a tener una altura estándar de 15 metros sobre el nivel del suelo, esto con la intención cumplir con la presión mínima requerida para zonas urbanas de acuerdo con la normatividad de la CONAGUA, la cual es 15 metros columna de agua. Estos depósitos estarán conectados con los nodos mediante nuevas tuberías que representan las tomas domiciliarias, la longitud puede ser tomada como igual a la altura de los depósitos con respecto del suelo. Dichas tuberías que representan las tomas domiciliarias deben tener

una restricción para evitar que el agua que ingresó en el tanque se regrese a la red, la cual consiste en configurar a la tubería para que el comportamiento del flujo sea unidireccional. Esto se puede hacer de dos formas:

- Seleccionando la opción “CV” en el apartado “Initial Status” de la sección de propiedades de la tubería. CV (Check Valve) significa Válvula de Control y evita que la dirección del flujo dentro de la tubería cambie debido a diferencia de presiones.
- Agregando nuevos controles simples y/o compuestos para cerrar las tuberías y abrirlas ya sea cuando el nivel del tanque principal sea cero o a una hora determinada.

La elección de cualquiera de estas dos formas de evitar que los depósitos intradomiciliarios regresen agua a la red dependerá de cómo trabaje EPANET, en algunas ocasiones con un método puede comportarse de forma irracional y con el otro este comportamiento no se presenta.

Para simular el llenado y vaciado de los depósitos intradomiciliarios también será necesario agregar una tubería de salida, la cual estará conectada del tanque hacia un nuevo nodo, en el cual simulará la demanda de agua de los usuarios, estos serán los únicos nodos que tendrán demanda asignada.

Curvas de volumen

Cada depósito debe tener asignados niveles máximos y mínimos, de tal manera que el flujo hacia o desde él se convierta en cero cuando dichos niveles sean alcanzados. Sin embargo los depósitos abastecen una cantidad distinta de usuarios, lo que genera diferentes capacidades de almacenamiento. Para una mejor interpretación de los resultados, todos los tanques tendrán los mismos niveles, un metro como nivel máximo y cero como nivel mínimo. El volumen de dichos depósitos cambiará mediante la implementación de curvas que respetará los niveles máximos y mínimos antes mencionados. La configuración será la siguiente: cuando esté a una altura igual a cero metros le corresponde un volumen igual a cero y cuando la altura sea un metro el volumen será el correspondiente a la cantidad de usuarios que dependen de ese depósito. Con esto se tendrá una curva de volumen para una cantidad determinada de usuarios, en el caso de este escenario se realizaron en total 8 curvas debido a que la máxima cantidad de usuarios dentro de un área de influencia es de 8.

Volumen requerido por zona de influencia

El cálculo del volumen se hará en base a la cantidad de usuarios en la zona de influencia y tomando en cuenta que esa cantidad de agua debe durar para dos días. Por ejemplo, si se tienen 5 usuarios:

$$Vol = 2 * (150)(5)(3.7) = 5,550 \text{ Lt} = 5.5 \text{ m}^3$$

Demanda base

Esta demanda base solo se asignará a las nuevos nodos creados para las tuberías de salida de los tanques. Esta demanda se calculará por el método “Asignación nodo por nodo” descrito en el MAPAS No. 13, el cual consiste en asignar al nodo un consumo correspondiente a la

cantidad de usuarios beneficiados. Siguiendo con el ejemplo anterior, para un área de influencia con 5 usuarios se tiene una demanda de:

$$Demanda = \frac{(5)(3.7)(150)}{86,400} = 0.03212 \text{ LPS}$$

Tabla 7. Volumen y demanda base por el número de usuarios de un área de influencia.

NO. DE USUARIOS	VOLUMEN REQUERIDO (m ³)	DEMANDA BASE (LPS)
1	1.11	0.00642
2	2.22	0.01285
3	3.33	0.01927
4	4.44	0.02569
5	5.55	0.03212
6	6.66	0.03854
7	7.77	0.04497
8	8.88	0.05139

Diámetros equivalentes

Se debe tener especial cuidado para seleccionar los parámetros de las tuberías que simulan las tomas domiciliarias ya que de estos dependerá el flujo de llegada a los depósitos, uno de estos parámetros es el diámetro. OOAPAS utiliza un diámetro de 0.5 pulgadas (25 mm) para sus tomas domiciliarias, el detalle es que este diámetro solo aplica para un usuario, para los depósitos que abastecen a dos o más usuarios no se puede utilizar este diámetro. Para resolver esta problemática no se puede hacer una simple multiplicación del diámetro por la cantidad de usuarios. Parecería lógico obtener el área de la tubería de media pulgada, multiplicarla por el número de predios correspondiente y obtener el diámetro en base a esta área, pero se estaría despreciando las pérdidas por fricción por lo que tampoco es la solución. EPANET calcula las pérdidas por fricción con la ecuación de Darcy-Weisbach:

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

Donde:

h_f : Pérdidas por fricción (m).

f : Factor de fricción (adim).

L : Longitud de la tubería (m).

D : Diámetro de la tubería (m).

g : Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).

V : Velocidad (m/s)



El factor de fricción se calcula dependiendo del régimen del flujo (laminar, transitorio o turbulento), el cual es definido con el número de Reynolds:

- $Re < 2000$ es flujo laminar
- $2000 < Re < 4000$ es flujo transitorio
- $Re > 4000$ es flujo turbulento

El número de Reynolds se calcula con la siguiente fórmula:

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

Donde:

Re: No. De Reynolds (adim).

V: Velocidad (m/s).

D: Diámetro (m).

ν : Viscosidad cinemática ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para una temperatura de 20°C).

Para ambas ecuaciones se requiere conocer la velocidad, la cual se puede calcular, sin embargo no es necesario si las ecuaciones se dejan en función del gasto. Para esto se despeja la velocidad de la ecuación de continuidad:

$$Q = V * A$$

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{Q}{\frac{\pi * D^2}{4}} = \frac{4 * Q}{\pi * D^2}$$

A diferencia del diámetro y el área de la tubería, el gasto si puede multiplicarse por el número de usuarios que hay en un área de influencia. Para esto se calculará el gasto que demanda un usuario:

$$Q = \frac{(1)(3.7)(150)}{86,400} = 0.006424 \text{ LPS} = 6.424 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Después se calcula el número de Reynolds sustituyendo la velocidad con la ec. de continuidad en función del gasto:

$$Re = \frac{V * D}{\nu} = \frac{\left[\frac{4 * Q}{\pi * D^2}\right] * D}{\nu} = \frac{4 * Q}{\pi * \nu * D}$$

$$Re = \frac{4(6.424 * 10^{-6})}{\pi(1.007 * 10^{-6})(0.0125)} = 649.76 \therefore \text{Flujo laminar}$$

El factor de fricción para $Re < 2000$ es:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{649.76} = 0.0985$$

Una vez calculado el factor de fricción se procede a calcular las pérdidas por fricción (h_f), sustituyendo nuevamente la velocidad por la ec. de continuidad en función del gasto, y recordando que L es la longitud de la toma domiciliaria, es decir, 15 metros.

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} = f * \frac{L}{D} * \frac{\left[\frac{4 * Q}{\pi * D^2}\right]^2}{2g} = \frac{8 * f * L * Q^2}{g * \pi^2 * D^5}$$

$$h_f = \frac{8(0.0985)(15)(6.424 * 10^{-6})^2}{(9.81)(\pi^2)(0.0125)^5} = 0.0165 \text{ m}$$

Despejando el diámetro de la ecuación de Darcy-Weisbach que está en función del gasto queda la siguiente ecuación:

$$h_f = \frac{8 * f * L * Q^2}{g * \pi^2 * D^5} \rightarrow D = \sqrt[5]{\frac{8 * f * L * Q^2}{g * \pi^2 * h_f}}$$

Con esta ec. se puede calcular el diámetro equivalente para un mayor número de usuarios, solo basta con multiplicar el gasto de un usuario por el número total que hay en una misma área. Por ejemplo, para calcular el diámetro equivalente de un depósito que abastece a 5 usuarios, primero se calcula el gasto equivalente:

$$Q_e = (6.424 * 10^{-6}) * 5 = 3.212 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Este gasto equivalente se sustituye en la ecuación para obtener el diámetro equivalente:

$$D_e = \sqrt[5]{\frac{8 * f * L * Q_e^2}{g * \pi^2 * h_f}}$$

$$D_e = \sqrt[5]{\frac{8(0.0985)(15)(3.212 * 10^{-5})^2}{(9.81)(\pi^2)(0.0165)}} = 0.0238 \text{ m} = 23.8 \text{ mm}$$

Con estos diámetros equivalentes se espera que el comportamiento real de llenado y vaciado de un conjunto de depósitos intradomiciliarios esté representado en el modelo con un solo tanque.

Tabla 8. Diámetro equivalente por el número de predios de un área de influencia.

Usuarios	Q equivalente m ³ /s	D equivalente m	D equivalente mm	D equivalente in
1	6.424×10^{-6}	0.0125	12.50	0.50
2	1.285×10^{-5}	0.0165	16.49	0.66
3	1.927×10^{-5}	0.0194	19.40	0.78
4	2.569×10^{-5}	0.0218	21.76	0.87
5	3.212×10^{-5}	0.0238	23.80	0.95
6	3.854×10^{-5}	0.0256	25.60	1.02
7	4.497×10^{-5}	0.0272	27.22	1.09
8	5.139×10^{-5}	0.0287	28.72	1.15

Antes de aplicarlos se decidió primero comprobar si estos diámetros equivalentes funcionan, para esto se creó un modelo que permite visualizar su comportamiento.

El modelo consta de un reservorio que manda agua a un tanque mediante bombeo, y se representan tres casos:

- Caso 1: Se revisa el comportamiento hidráulico dejando un diámetro de media pulgada para dos o más usuarios.
- Caso 2: El número de tuberías que llegan al tanque es equivalente al número de usuarios que abastece y todas tienen un diámetro de media pulgada.
- Caso 3: Se utiliza el diámetro equivalente correspondiente al número de usuarios que abastece el tanque.

Los tres casos tienen las mismas condiciones: todos los elementos tienen una elevación cero, la bomba manda el mismo gasto (1 LPS a 15 m de altura), los tanques tienen la misma capacidad (10 m³) y las tuberías tienen las mismas distancias. Estos tres casos servirán para observar cómo se comporta el modelo y cuál sería la diferencia entre utilizar el diámetro de una toma domiciliaria para representar dos o más tomas (Caso 1), aplicar los diámetros equivalentes obtenidos a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach (Caso 3) o hacer uso de un número de tomas domiciliarias correspondiente a la cantidad de usuarios beneficiados (Caso 2), tomando como punto de comparación este último caso por su mayor apego a la realidad. Estos tres casos se usarán para revisar 2, 5 y 8 usuarios por área de influencia.

Para 2 usuarios por área de influencia: Transcurridas 5 horas con 8 minutos podemos observar que el caso 2 hay 9.40 m³ de agua en el tanque teniendo una diferencia de 4.17 m³ con el caso 1 y 0.40 m³ con el caso 3.

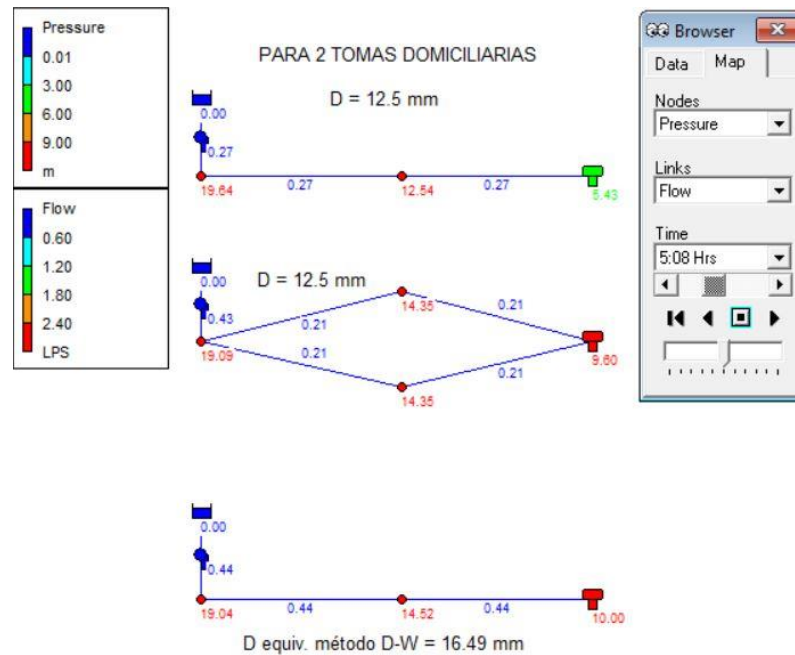


Figura 19. Comprobación del método de Darcy-Weisbach para 2 tomas domiciliarias

Para 5 usuarios por área de influencia: Transcurridas 2 horas con 29 minutos, con respecto al caso 2, el caso 1 tiene una diferencia de 6.69 m^3 y el caso 3 de 0.56 m^3 .

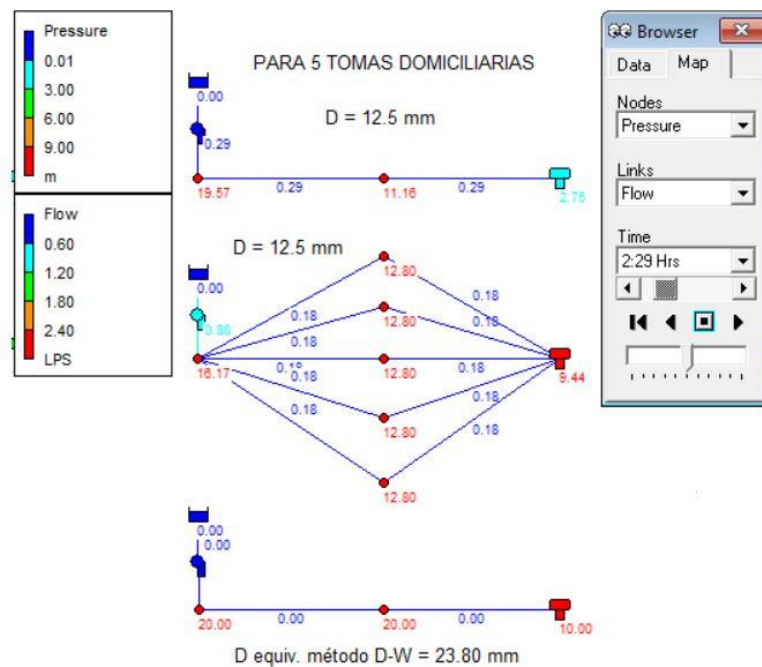


Figura 20. Comprobación del método de Darcy-Weisbach para 5 tomas domiciliarias

Para 8 usuarios por área de influencia: Con respecto al caso 2 hay una diferencia de 7.31 m^3 con el caso 1 y 0.46 m^3 de diferencia con el caso 3.

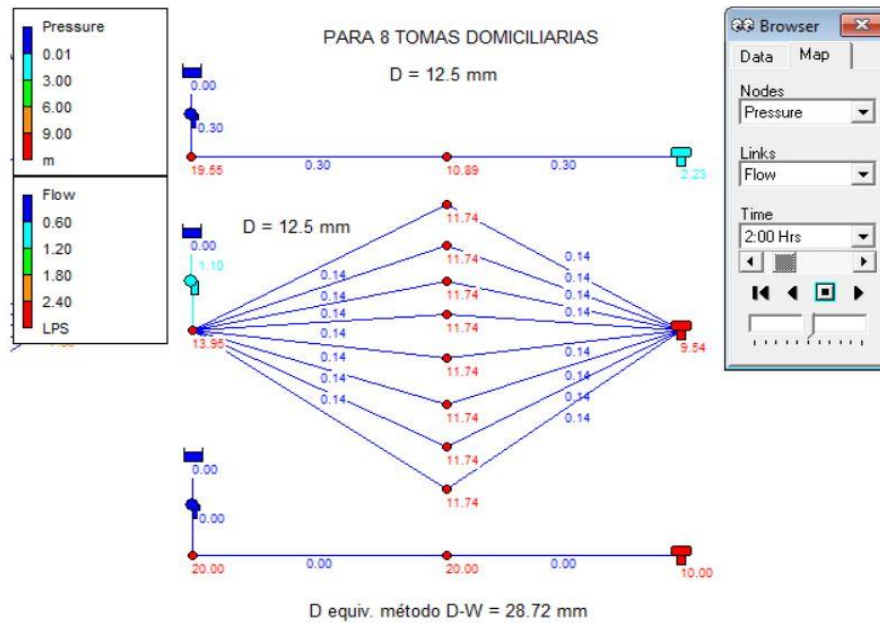


Figura 21. Comprobación del método de Darcy-Weisbach para 8 tomas domiciliarias

Con este modelo se deja en evidencia que el diámetro a seleccionar en un modelo dependiente de la presión afecta el comportamiento de la red y que el caso 1 no es adecuado como criterio de modelación. A pesar de que el caso 3 tiene menor diferencia con respecto del caso 2 no deja de ser una diferencia importante, más de 400 litros por tanque. Por lo que se procede a obtener un diámetro más adecuado y tener la menor diferencia posible, está búsqueda se hizo mediante aproximaciones de diámetros que generan un comportamiento igual al caso 2.

Para 2 usuarios por área de influencia: Utilizando un diámetro igual a 16.15 mm la diferencia con el caso 2 es de 0.01 m^3 , el tiempo transcurrido de la modelación es el mismo que en el caso anterior para 2 usuarios, 5 horas con 8 min.

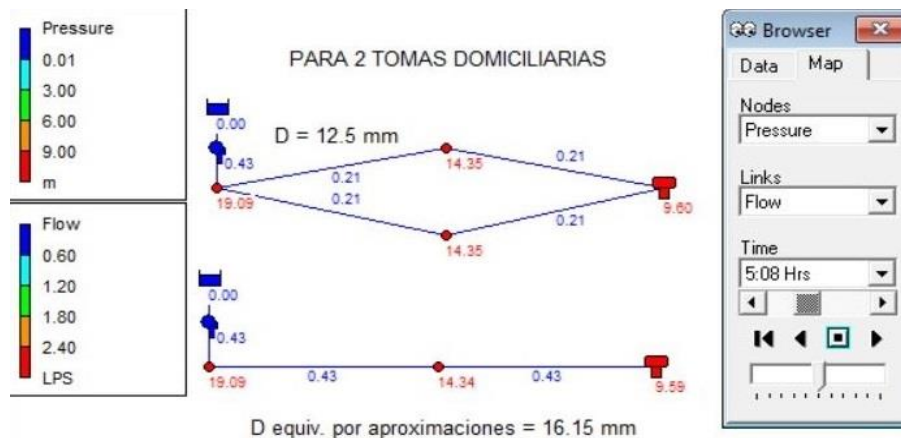


Figura 22. Comprobación del método por aproximaciones para 2 tomas domiciliarias

Para 5 usuarios por área de influencia: Transcurridos 2 horas y 29 minutos de modelación se aprecia una diferencia de 0.02 m^3 , con respecto del caso 2, si se utiliza un diámetro de 22.65 mm.

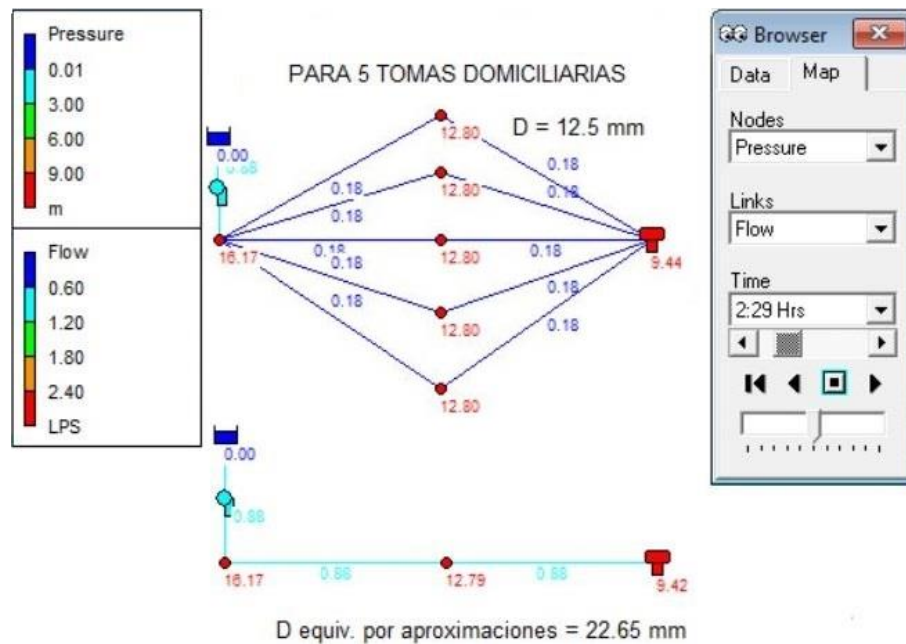


Figura 23. Comprobación del método por aproximaciones para 5 tomas domiciliarias

Para 8 usuarios por área de influencia: Con un diámetro de 26.90 mm se obtiene una diferencia de 0.03 m^3 con respecto al caso 2 en dos horas de modelación.

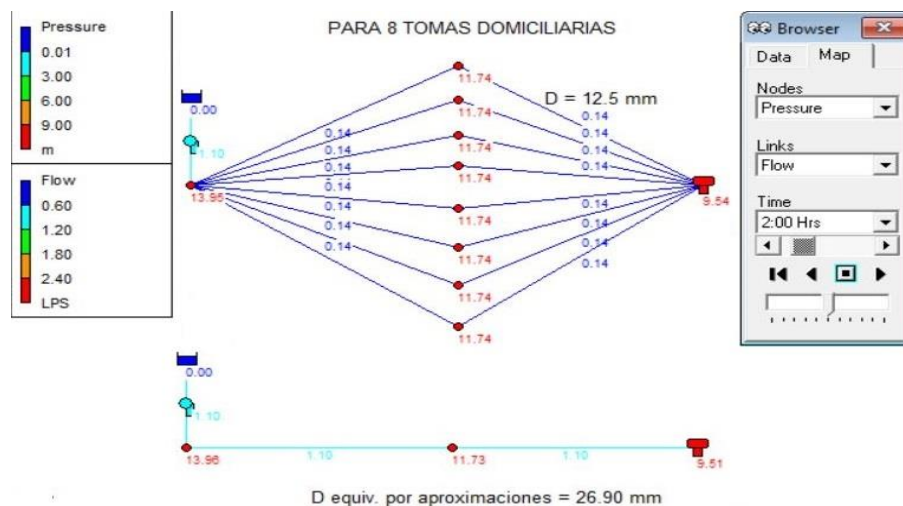


Figura 24. Comprobación del método por aproximaciones para 8 tomas domiciliarias

Con estos diámetros se reduce la diferencia en un 95% aproximadamente. Para los diámetros faltantes se grafican los ya obtenidos y se calculan con la ecuación que resulte de la curva de mejor ajuste con respecto a la ya obtenida.

Aproximaciones en EPANET	
Usuario	Diámetro (mm)
1	12.50
2	16.15
5	22.65
8	26.90

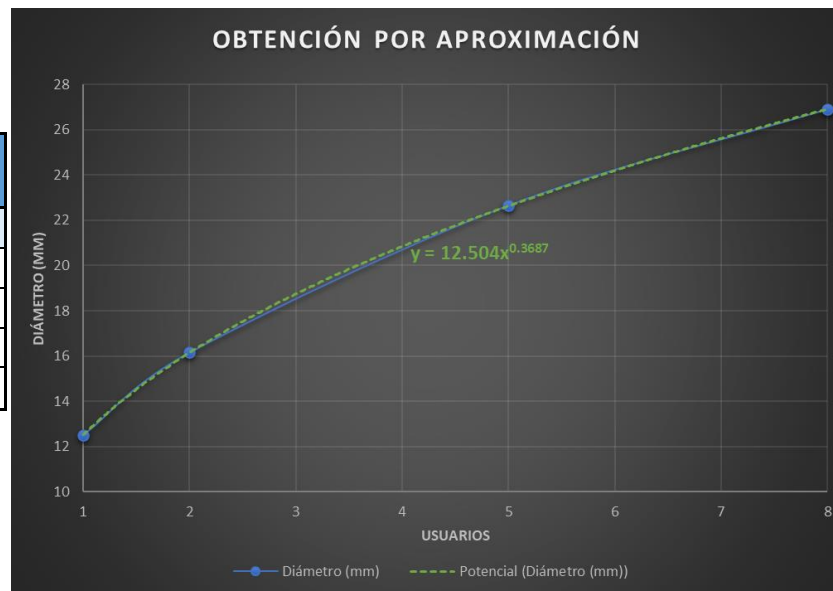


Figura 25. Curva de mejor ajuste para los diámetros equivalentes restantes

La línea de tendencia que mejor se ajusta al gráfico de los diámetros obtenidos por aproximaciones es la potencial y da como resultado a la ecuación:

$$y = 12.504x^{0.3687}$$

Donde:

y: Diámetro equivalente (mm).

x: El número de usuarios por área de influencia.

Con esta ecuación obtenemos los diámetros faltantes (para 3, 4, 6, y 7 usuarios).

Usuario (X)	Diámetro (Y)(mm)
1	12.50
2	16.15
3	18.75
4	20.85
5	22.63
6	24.21
7	25.62
8	26.92

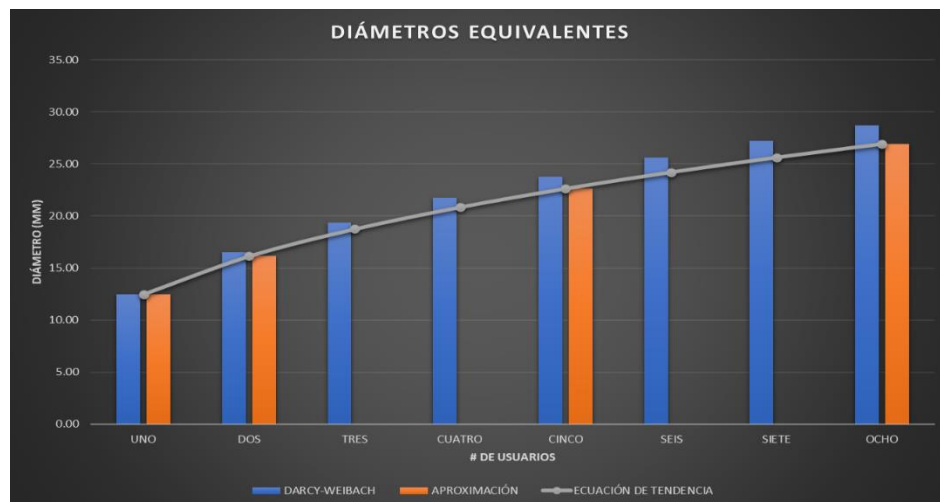


Figura 26. Comparación de diámetros equivalentes obtenidos por ambos métodos

Escenario 5

Para este escenario se sigue la metodología que el escenario 4 pero se hace la modificación en la válvula como se especifica en el escenario 2.

Escenario 6

Para este escenario es utilizada la misma metodología explicada en el escenario 4 pero con la diferencia de que se deben proyectar a 381 usuarios, por lo que la cantidad máxima de usuarios en un área de influencia será mayor. Esto cambiará la demanda base, el volumen de los tanques, volumen requerido de agua potable para la colonia y los diámetros equivalentes para las simulaciones de las tomas domiciliarias.

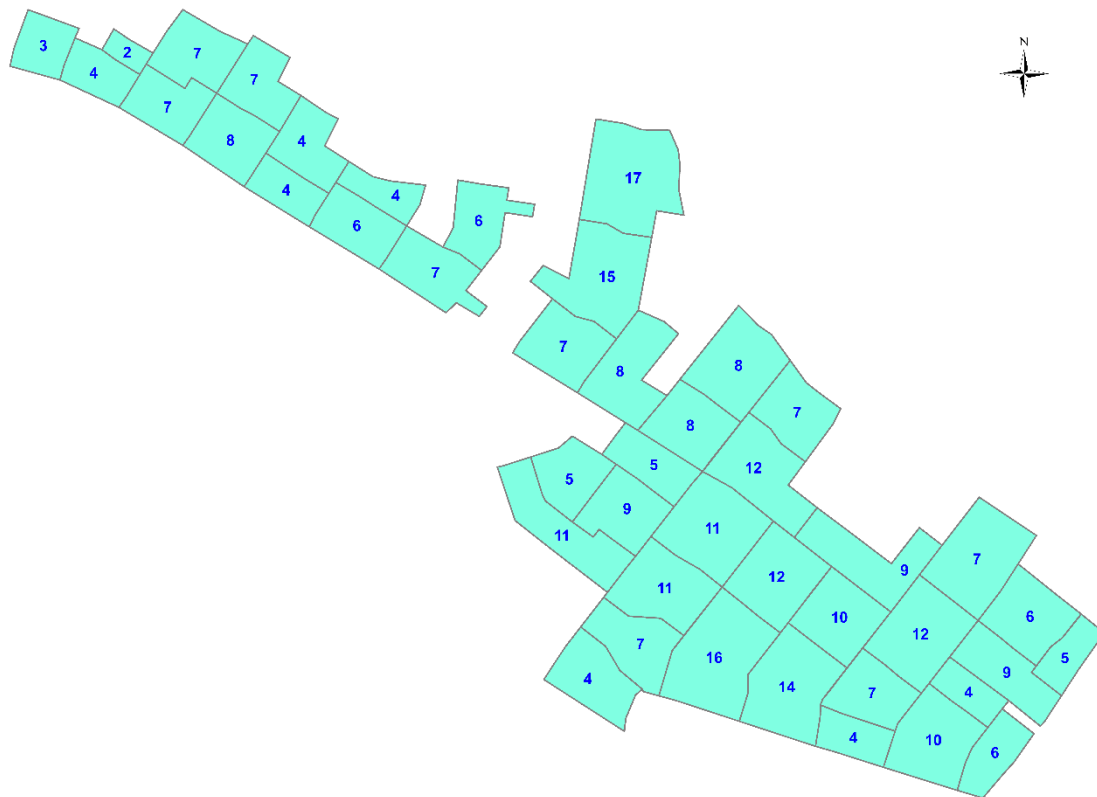


Figura 27. Área de influencia con la cantidad de usuarios en su interior para el escenario 6



RESULTADOS

Los 6 escenarios tienen un periodo de simulación de 10 días cada uno para un mejor entendimiento de la dinámica de llenado y vaciado del tanque principal así como de los depósitos intradomiciliarios, sin embargo se tomó en cuenta que el inicio de la simulación es a las 9:00 am., el suministro de agua potable al tanque principal comienza a las 10:00 am y los usuarios comienzan a recibir el agua hasta dos horas después, es decir, a las 12 pm. Al transcurrir los 10 días (240 horas) la simulación termina a las 9:00 am, faltando una hora para iniciar nuevamente el abastecimiento del tanque principal y tres horas para que los usuarios reciban agua potable en sus viviendas. Debido a esto se optó por incorporar tres horas extra, dejando un total de 243 horas de simulación, con resultados a cada 15 minutos para no perder detalle alguno del comportamiento del sistema.

En algunas ocasiones en EPANET resultan nodos con presiones negativas pero en la realidad no existen dichas presiones, el programa calcula el gradiente hidráulico el cual es la pérdida de energía del flujo por unidad de longitud y este llega a un punto en el modelo el cual es cero, si aún queda distancia por recorrer el programa sigue descontando energía dando como resultado presión negativa. En realidad lo que pasa es que se reduce el caudal dentro de la tubería para adaptarse a la energía que tiene disponible o el flujo se detendrá por completo. Cabe resaltar que las presiones negativas representadas en el modelo computacional nos sirve para interpretar cuanta energía hace falta en el sistema y si se puede solucionar con un cambio de diámetro en la tubería o incrementado la energía disponible en el sistema. En los resultados de cada uno de los escenarios planteados se presentan estas presiones negativas, sin embargo por adaptarlo a una forma de suministro intermitente adquiere otro tipo de interpretación, la cual significa que no hay agua disponible en las tuberías. Si bien EPANET considera que siempre hay agua y las tuberías siempre están llenas, el modelo calcula que hace falta energía para llegar a los nodos y esto se debe a que el tanque principal, el cual provee de energía potencial a la red, está cerrado. Esto se puede comparar en los diferentes escenarios debido a que las presiones negativas solo se presentan cuando la tubería de salida del tanque principal está cerrada.

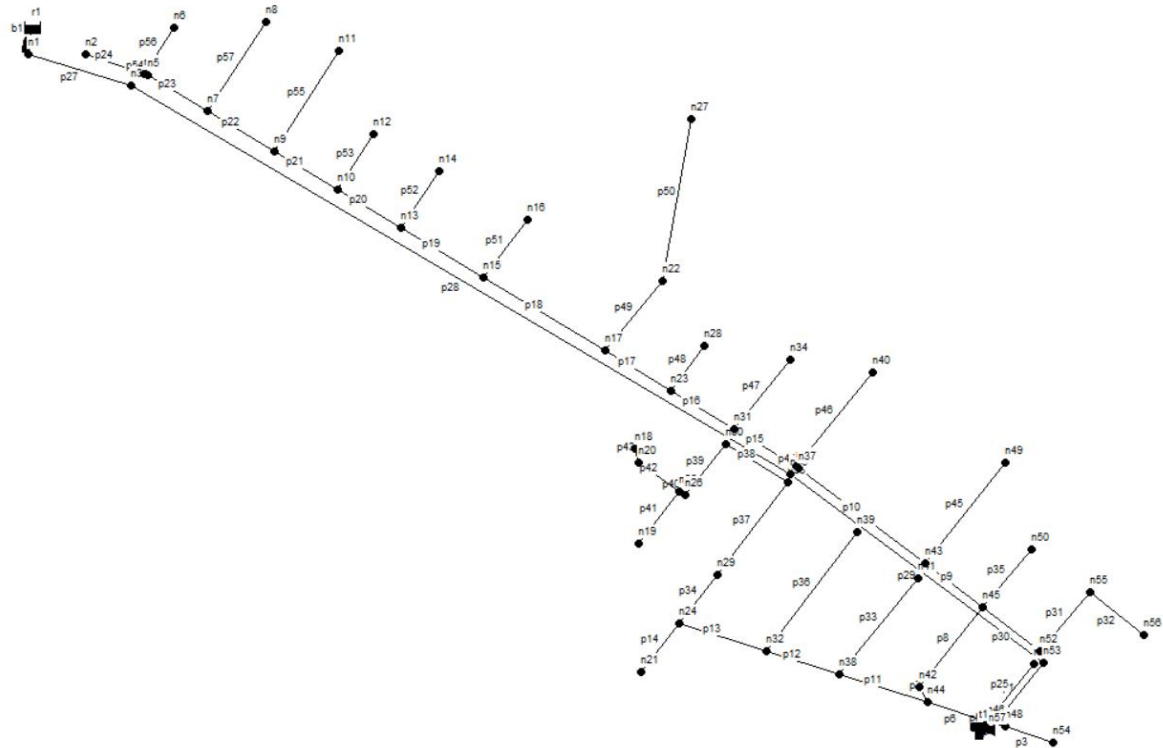


Figura 28. Esquema del modelo para los escenarios 1, 2 y 3.

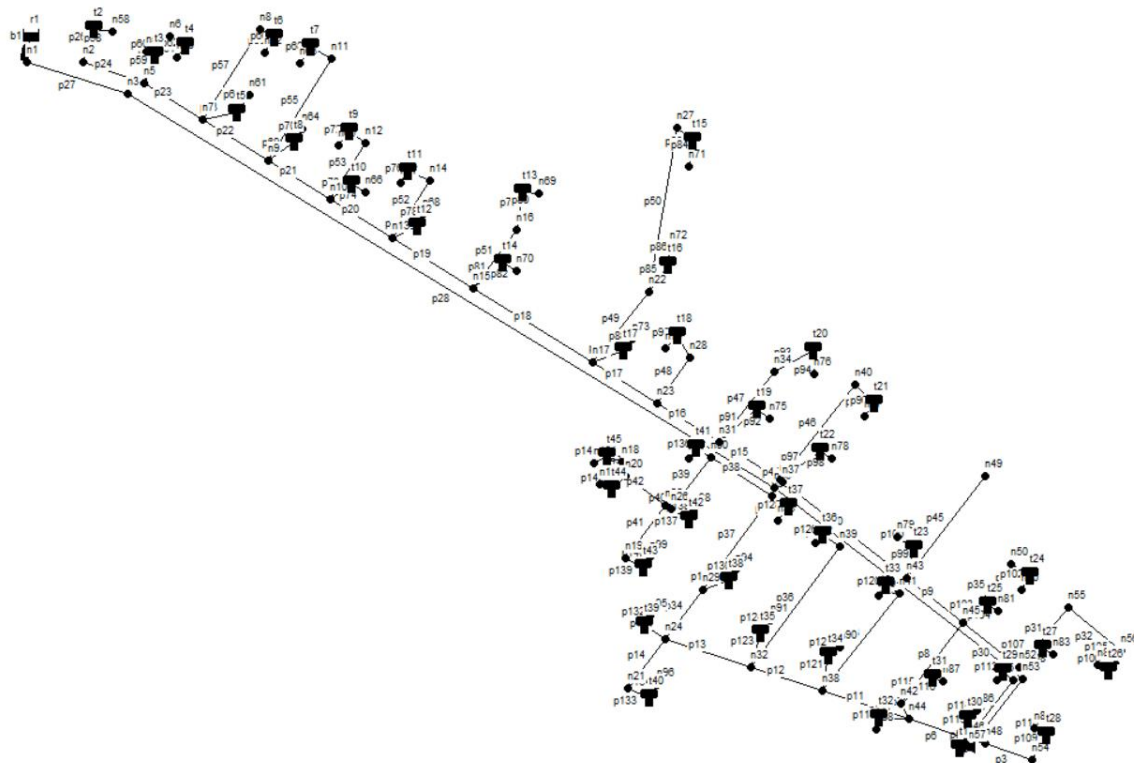


Figura 29. Esquema del modelo para los escenarios 4, 5 y 6.

Escenario 1

El nodo con la menor presión es el n54 con 23.23 m (2.323 Kg/cm²) que cuenta con una altura igual a 2037.79 msnm. El nodo de mayor presión es el n2 con 83.50 m (8.350 Kg/cm²) y posee una altitud de 1977.50 msnm.

El tanque principal nunca se vacía, antes de recibir cada suministro de agua potable se queda con un nivel de 0.37 m, lo que significa que aún contiene almacenado 14.8 m³ de agua (14,800 litros). Por lo que se puede apreciar que las condiciones en este modelo son suficientes para que toda la población siempre reciba agua.

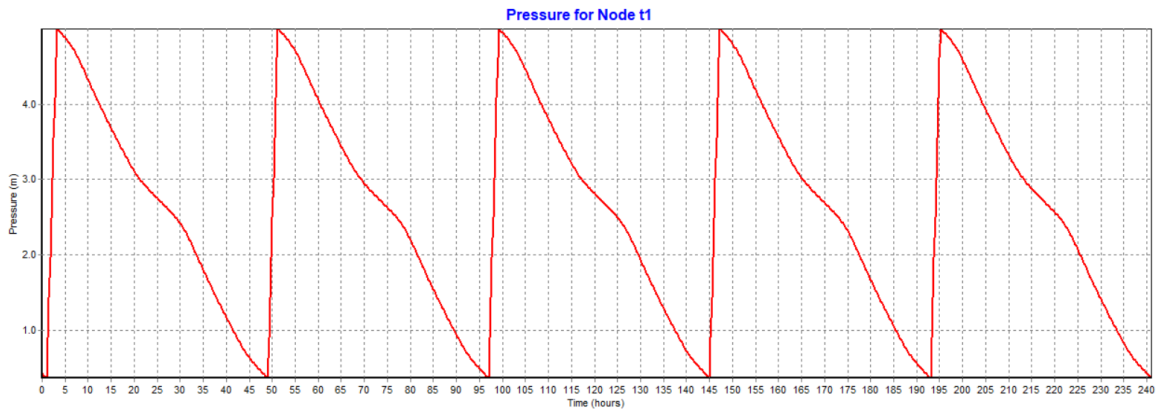


Figura 30. Diagrama del comportamiento del tanque principal (t1) en el escenario 1.

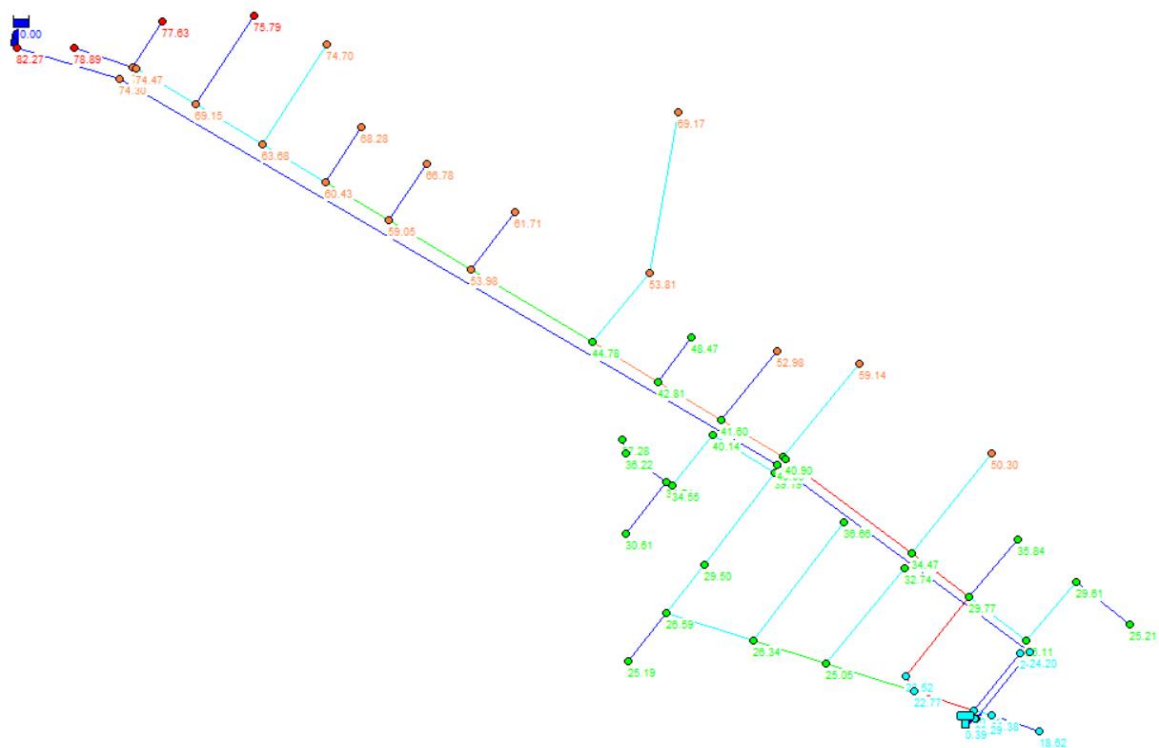


Figura 31. Modelo del escenario 1 con 48 horas y 45 minutos de simulación.
(15 minutos antes del inicio del segundo suministro)

Escenario 2

El nodo con la menor presión es el n54 con 20.74m (2.074 Kg/cm²) que cuenta con una altura igual a 2037.79 msnm. El nodo de mayor presión es el n2 con 81 m (8.1 Kg/cm²) y posee una altitud de 1977.50 msnm.

El tanque principal permanece con agua 26 horas con 15 minutos, pasado ese tiempo se vacía por completo y los usuarios duran 21 horas y 45 minutos antes de recibir agua nuevamente. Por lo que se considera que el agua es insuficiente en este escenario.

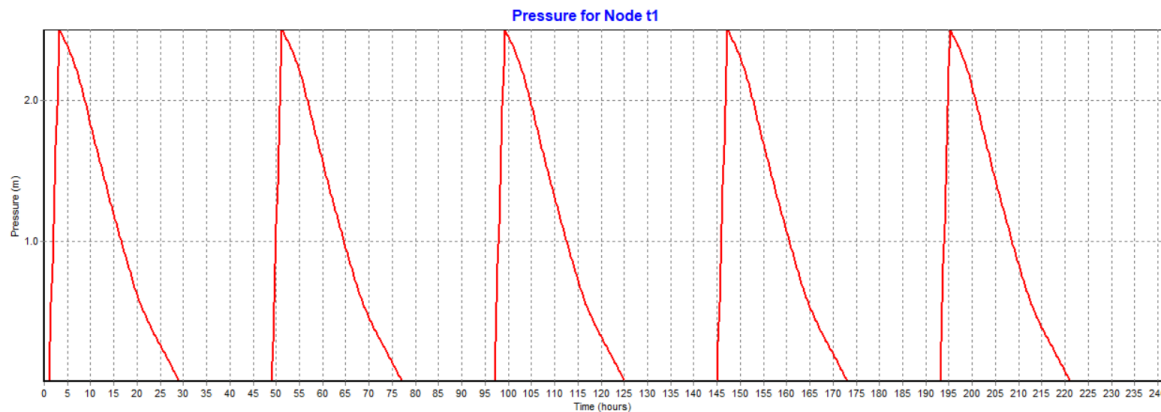


Figura 32. Diagrama del comportamiento del tanque principal (t1) en el escenario 2.

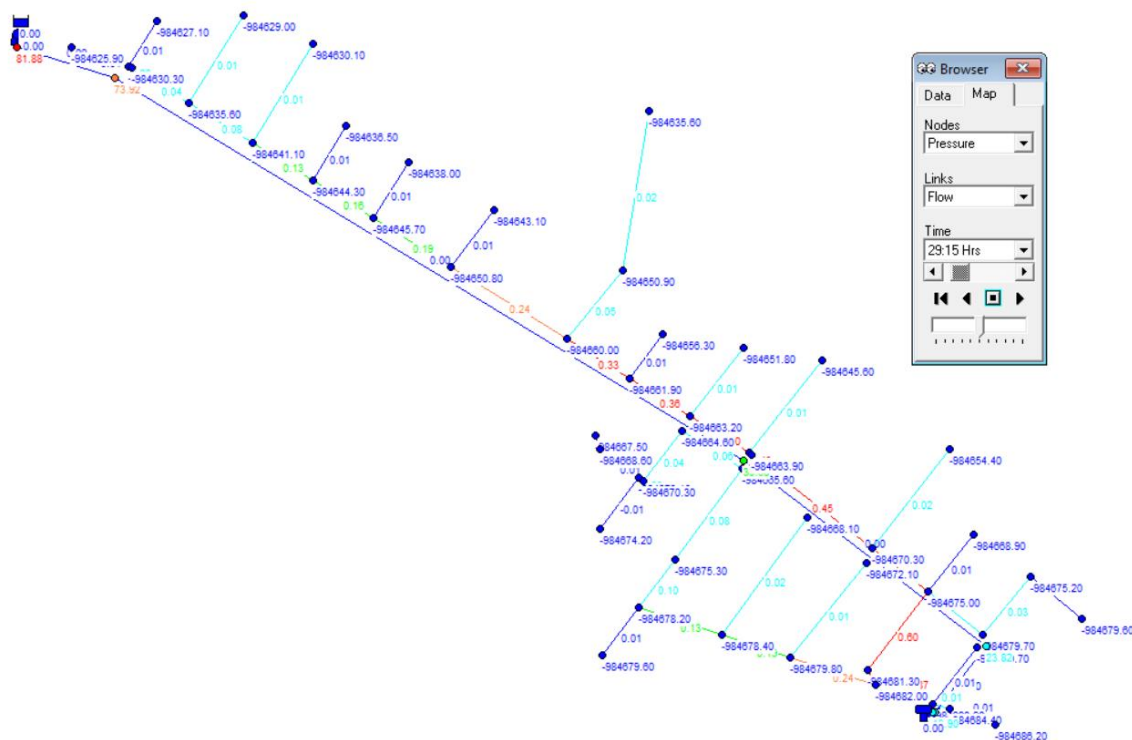


Figura 33. Modelo del escenario 2 con 29 horas y 15 minutos de simulación.

Escenario 3

El nodo con la menor presión es el n54 con 23.18 m (2.318 Kg/cm²) que cuenta con una altura igual a 2037.79 msnm. El nodo de mayor presión es el n2 con 83.39 m (8.339 Kg/cm²) y posee una altitud de 1977.50 msnm.

En este caso el tanque no se vacía por completo antes del siguiente suministro, quedando con 0.87 m³ de agua (34,800 litros), sin embargo este volumen no es fijo y va en decremento con 800 litros menos en cada ocasión.

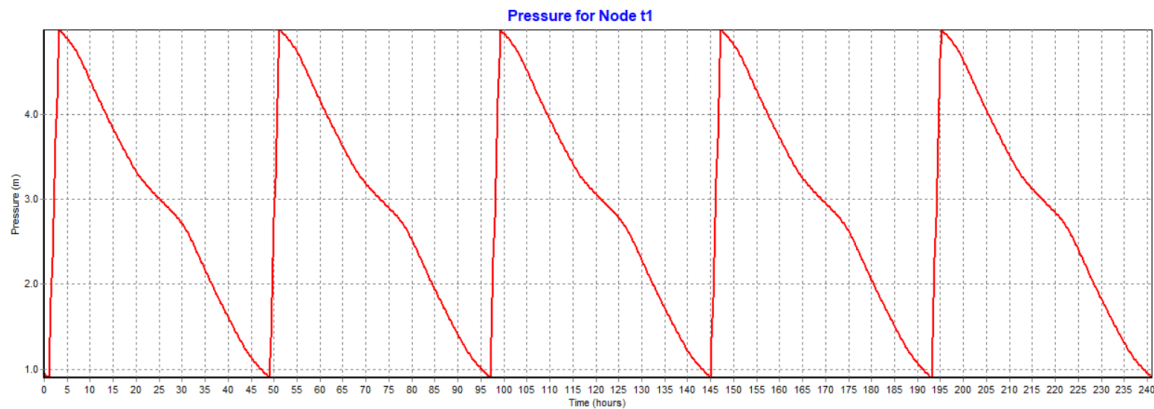


Figura 34. Diagrama del comportamiento del tanque principal (t_1) en el escenario 3.

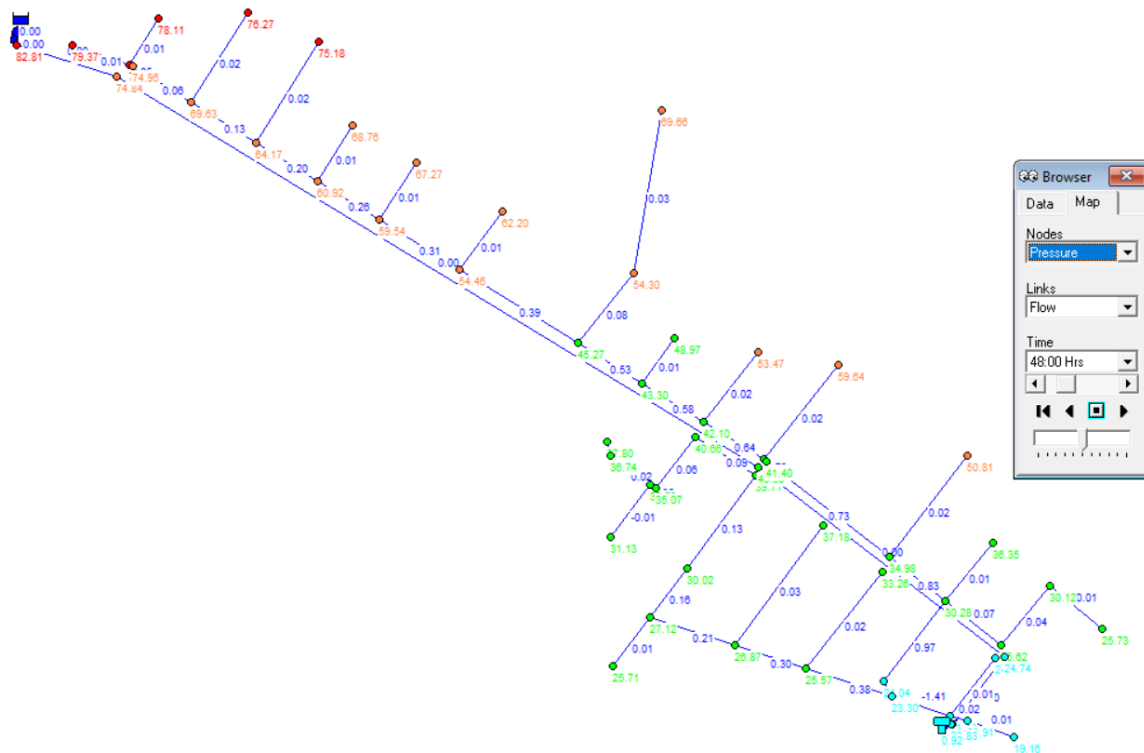


Figura 35. Escenario 3 con 48 horas de simulación.

Escenario 4

En este escenario los resultados se tomaron a cada minuto, para evitar que los tanques intradomiciliarios retornen el agua a la red se utilizó reglas basadas en el nivel del tanque principal las cuales cierran todas las tuberías que conducen el agua a los tanques que simulan los depósitos interiores de las casas una vez que este tanque tenga su nivel de agua igual a cero, excepto dos de ellas, la tubería p105 y p107 que corresponden a los tanques t26 y t27, estas dos tuberías se dejaron fuera de las reglas de control y en su lugar se implementaron válvulas check (CV) debido a que se presentaba el reingreso de agua a la red por parte de ambos tinacos por efectos del desnivel y de presiones generadas en el sistema.

El tanque principal dura 1 hora y 33 minutos con agua y se distribuye a los tanques intradomiciliarios, los cuales todos se llenan a un 100% de su capacidad excepto dos tanques con 87%, uno con 81%, otro con 83% y otros dos más con 57%, es decir un total de 6 tanques intradomiciliarios que no quedaron completamente llenos.

El primer depósito intradomiciliario en estar vacío es el “t27” a las 31 horas y 51 minutos de simulación y tiene una elevación de 2046.29 msnm. Antes de recibir el segundo suministro, un total de 7 depósitos interiores quedan completamente vacíos los cuales están destinados para 28 usuarios, para el tercer suministro son 6 tanques vacíos; y para el cuarto y quinto suministro quedan 4 sin agua. Estos depósitos intradomiciliarios corresponden a la zona más alta de la colonia y siendo los de las zonas más bajas los mayormente beneficiados con la distribución del agua.

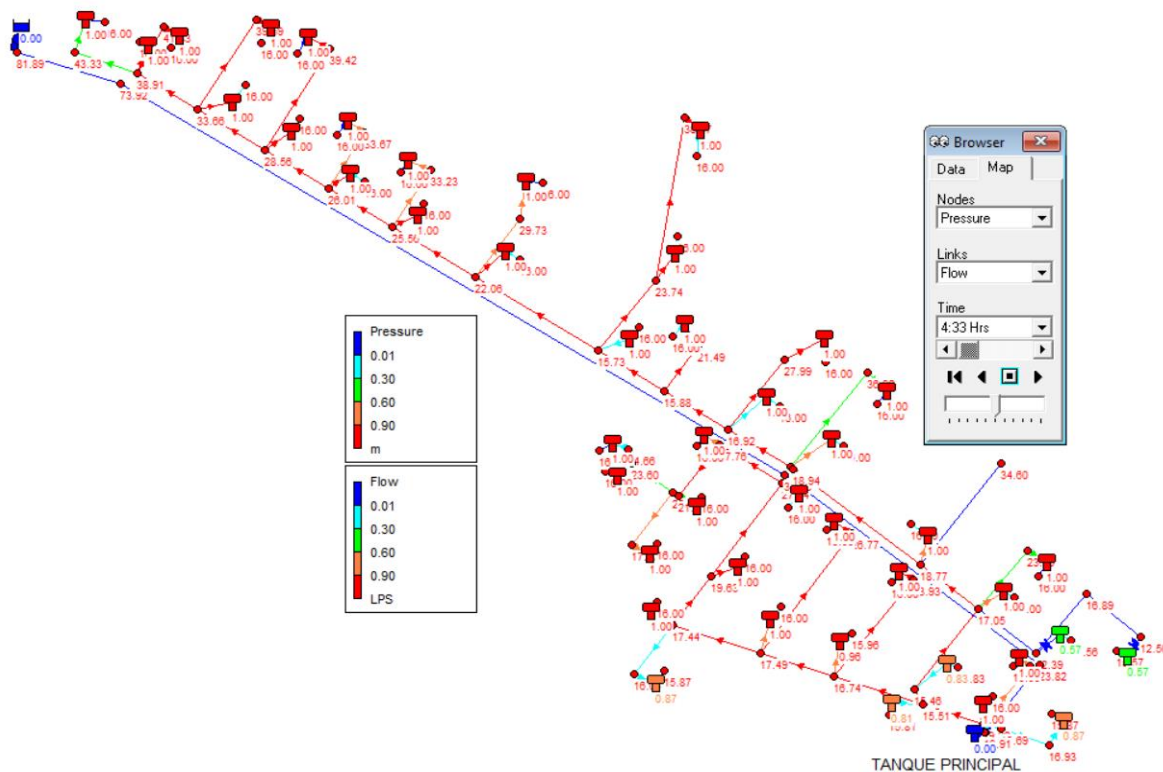


Figura 36. Escenario 4: tanque principal vacío (4:33 hrs de simulación)

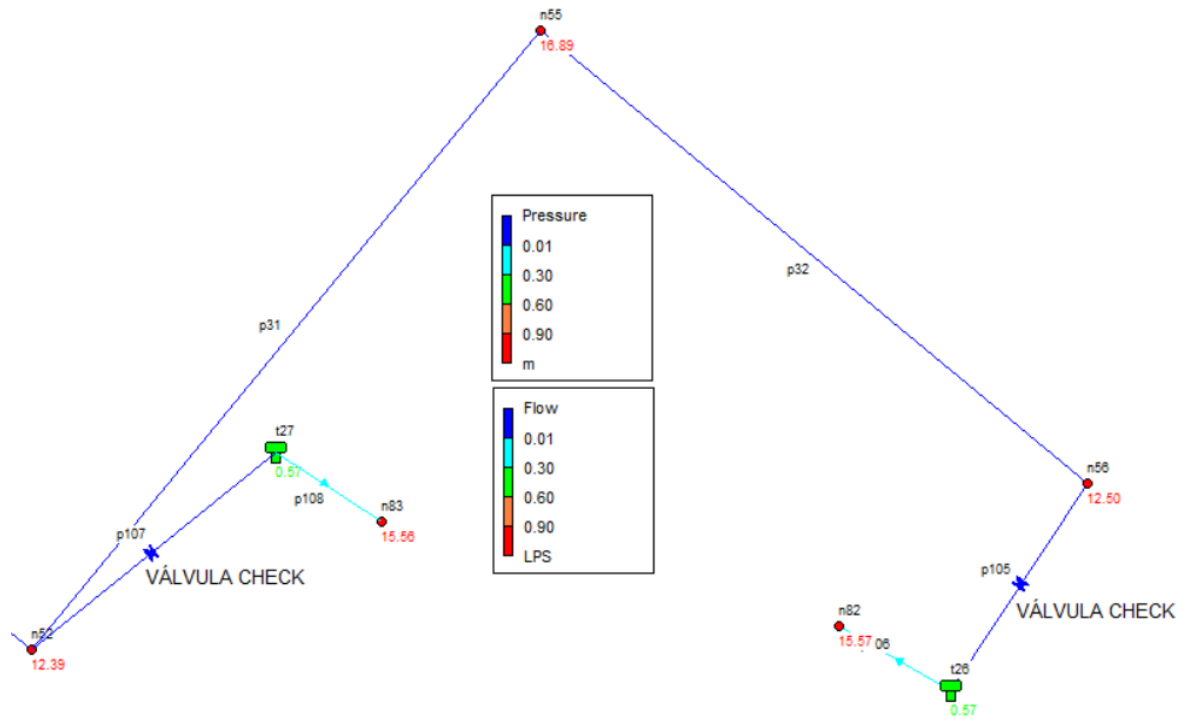


Figura 37. Tuberías con válvula check integrada.

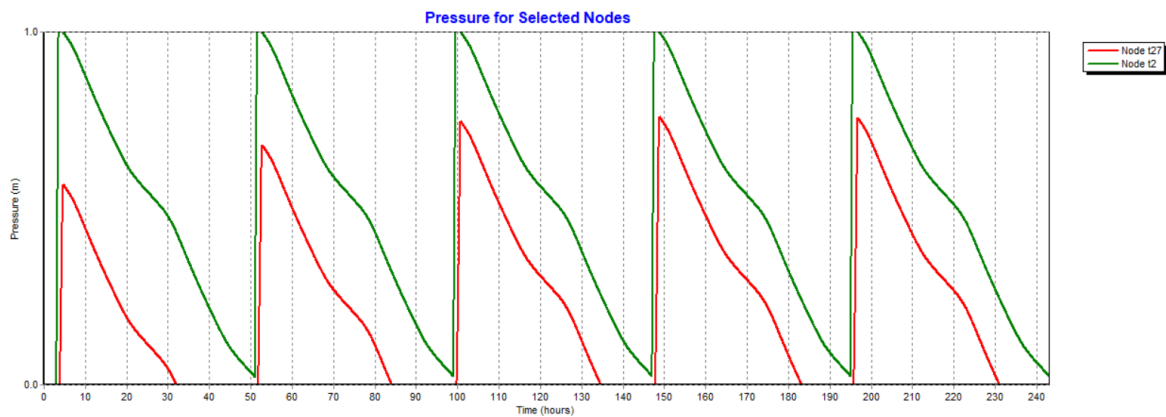


Figura 38. Comparación de presiones entre el depósito más favorecido "t2" (color verde) y el menos favorecido "t27" (color rojo).

Escenario 5

En este escenario los resultados se reportan a cada 5 minutos y se emplearon reglas de control basadas en el nivel de agua del tanque principal para cerrar las tuberías de entrada a los tanques secundarios. En este modelo no se presentan problemas de reingreso de agua a la red por parte de los depósitos intradomiciliarios y su comportamiento en llenado y vaciado es el esperado. Sin embargo, los tanques interiores “t26” y “t27” no reciben agua a lo largo de la simulación, esto es debido a la configuración del modelo que fuerza a EPANET a trabajar bajo presiones, los nodos que abastecen a estos dos tanques son “n56” y “n52” respectivamente y sus alturas piezométricas son inferiores a la altura de los tanques, por lo que no tienen la suficiente carga para conducirles agua.

El Tanque principal dura 40 minutos en vaciarse desde su apertura en cada suministro y antes de este los depósitos interiores quedan completamente vacíos excepto 7 de ellos los cuales cuentan con el 1% de su capacidad, nuevamente estos 7 tanques están ubicados en las zonas más bajas de la colonia.

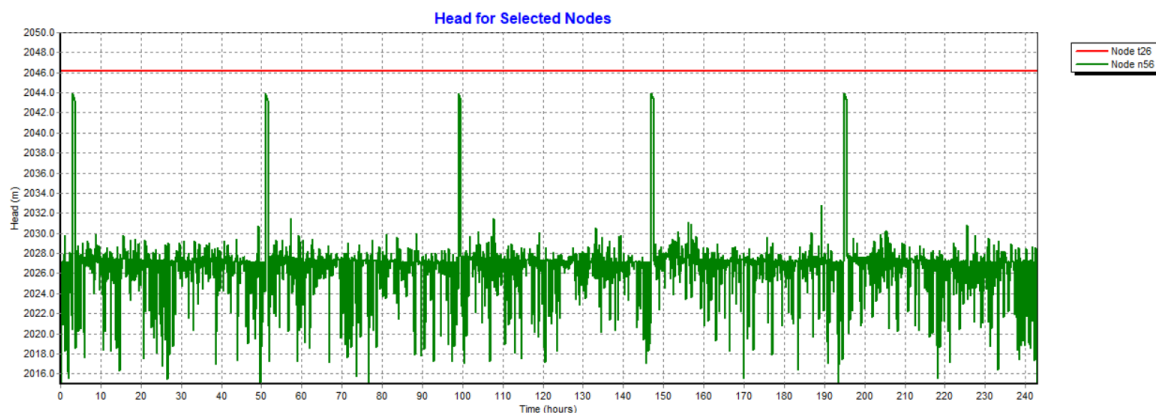


Figura 39. Comparación de alturas entre el tanque “t26” (color rojo) y el nodo que lo abastece “n56” (color verde).

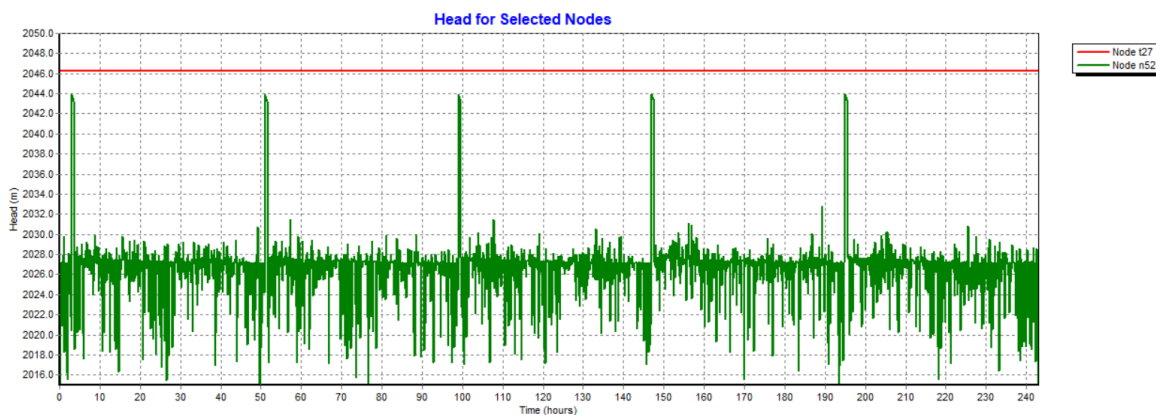


Figura 40. Comparación de alturas entre el tanque “t27” (color rojo) y el nodo que lo abastece “n52” (color verde).

Como se muestra en la Figura 39 y Figura 40, los picos de presión en los nodos corresponden a el horario de apertura del tanque para abastecer a los habitantes y estos no alcanzan la altura de los depósitos intradomiciliarios, siendo esta la razón por la que nunca reciben agua.

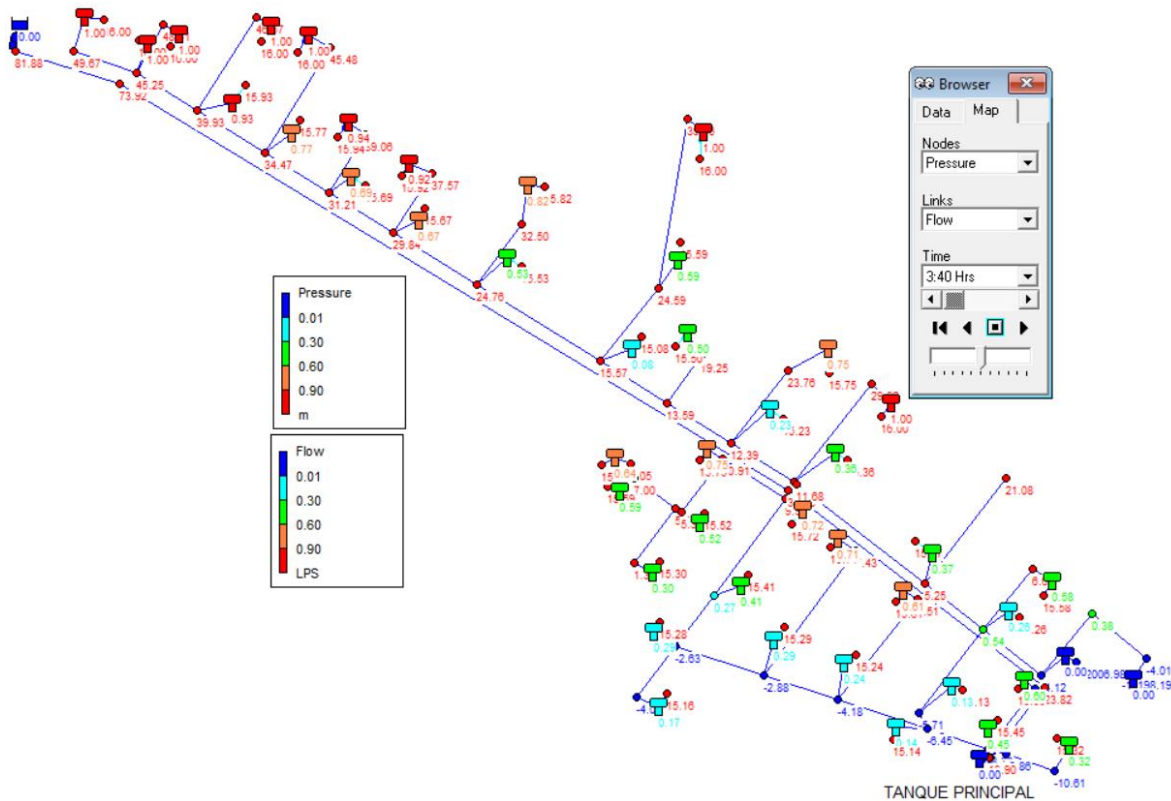


Figura 41. Escenario 5: Tanque principal vacío (3:40 hrs de simulación)

Escenario 6

Para este escenario se hace uso de válvulas check en las tuberías que alimentan los depósitos interiores que no permiten el reingreso de agua al sistema y los resultados se reportan a cada cinco minutos. El tanque principal tarda 5 horas con 20 minutos en vaciarse desde su hora de apertura a la colonia. En este caso ningún depósito interior se queda vacío entre suministros, es decir la cantidad de agua es suficiente para la población durante 48 horas. La mayoría de los tanques secundarios cuenta con un 10% de su capacidad de agua y esta cantidad se queda estable en 14% al final de la simulación y el depósito mayormente beneficiado es el “t2” el cual cuenta con agua en un 22% de su capacidad antes de iniciar el quinto suministro.

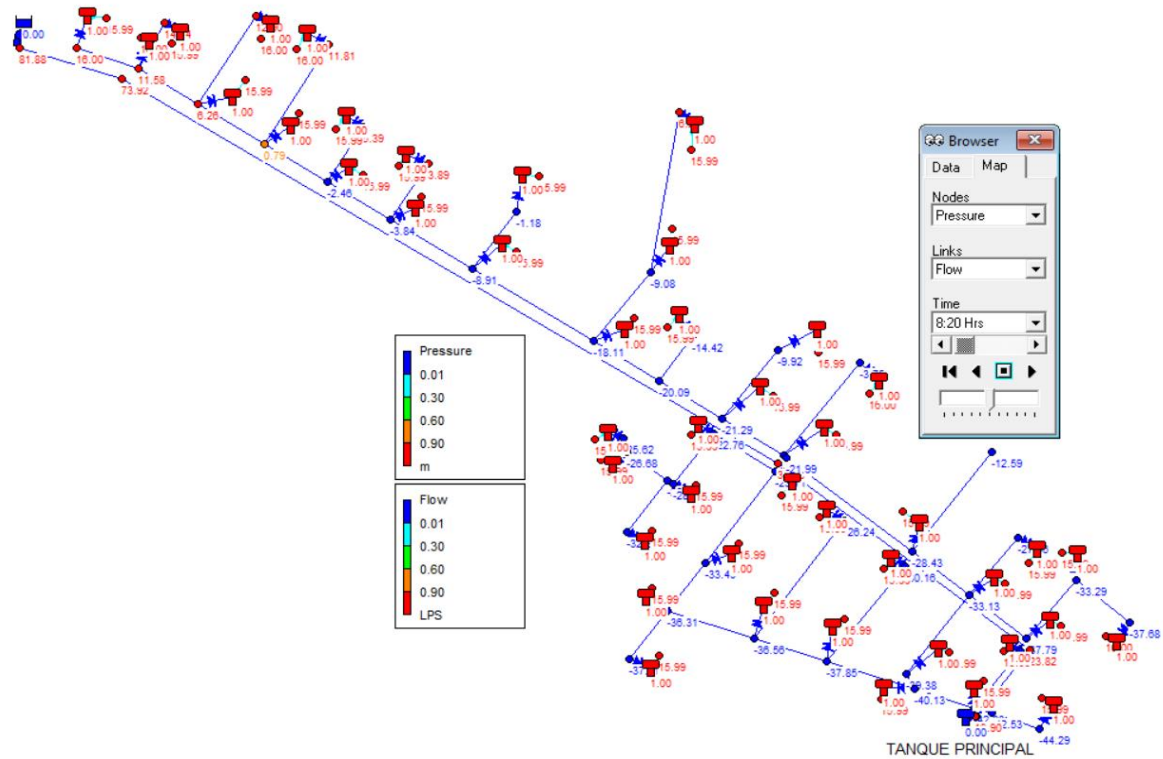


Figura 42. Escenario 6: Tanque principal vacío (8:20 hrs de simulación)

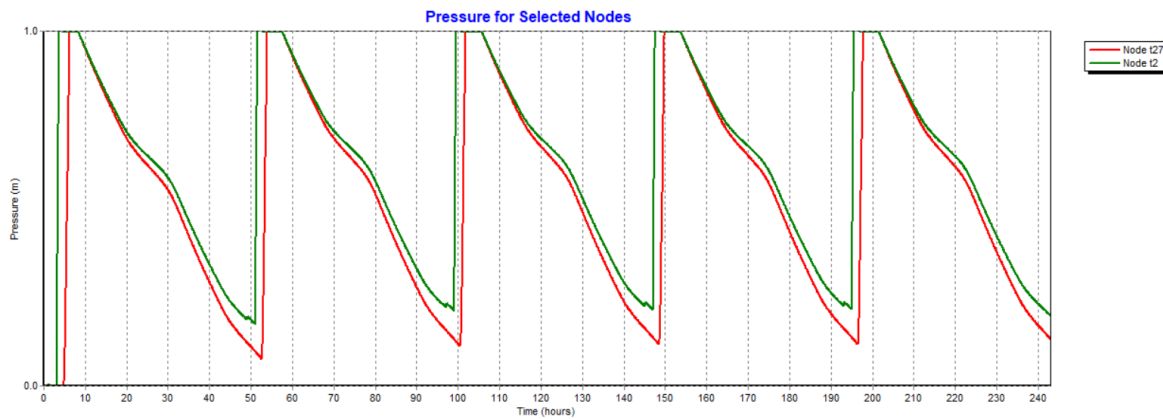


Figura 43. Comparación de presiones entre el depósito más favorecido “t2” (color verde) y el menos favorecido “t27” (color rojo).

Como se puede apreciar en la Figura 43, el comportamiento entre ambos depósitos es muy parecido cuando se le adiciona más agua al sistema.

CONCLUSIONES

El escenario 1 y 3 no presentan problemas de agua, la cantidad es suficiente para que el sistema siga con agua en la red y las demandas sean satisfechas, el único inconveniente son las presiones, las cuales son excesivas; en recomendación a esto se propone utilizar válvulas rompedoras de presión en puntos estratégicos de la colonia para evitar daños en las tuberías. Mientras que del escenario 2 se concluye que la cantidad real de agua que es suministrada no da abasto a los usuarios contemplados. Sin embargo esta información no parece ser suficiente para un adecuado análisis de la zona debido al tipo de modelación empleado, el cual es dependiente de la demanda y con esto se presenta la omisión de datos como el tiempo que dura la red con agua, cómo se distribuye este recurso entre los habitantes y cuál es el comportamiento hidráulico del sistema antes, durante y después de cada suministro. Para obtener estos datos fue necesario el uso de modelos en función de la presión disponible, ya que de esta depende la distribución y comportamiento del agua. En el caso del escenario 2 y 5, los cuales comparten las mismas condiciones (dotación real y demanda igual a 150 lts/hab/día), se puede llegar a la misma conclusión: el agua es insuficiente y no tendría mayor sentido analizar más datos. De los demás escenarios se esperaría que el abasto sea suficiente por el hecho de compartir una dotación igual a la demanda como lo es en el caso 1; no obstante, en el caso 4, el cual tiene las mismas condiciones que el caso 1 pero el modelo es dependiente de la presión, el agua no es suficiente para todos los usuarios y esto se debe a que los primeros en recibir agua son los que tienen una menor topografía y en cuanto sus depósitos estén llenos la presión aumenta y esta sería suficiente para abastecer a los de mayor altura; sin embargo, mientras esto ocurre los primeros usuarios en recibir agua ya están haciendo uso de la misma y siguen llenando sus depósitos, impidiendo que el recurso correspondiente al de las zonas altas no sea el estimado y una vez terminado el suministro son estos los que presentan problemas de escasez. Esta es la razón por la que hay usuarios sin agua en un modelo donde plantea una dotación igual al de la demandada. En el caso del escenario 6 se esperaría la misma situación que en el escenario 4, en el que a pesar de que la demanda sea la misma que la dotación la distribución no sea uniforme. Pero al tener una mayor cantidad de agua en el sistema conlleva a tener un lapso mayor de esta misma, lo cual da el tiempo necesario de que los depósitos intradomiciliarios de las zonas altas reciban agua una vez que los depósitos de cotas inferiores estén al máximo de su capacidad sin importar que estén consumiendo agua. Lo que deja como reflexión que el comportamiento del agua potable en un cualquier sistema de distribución con suministro intermitente depende de la topografía del terreno y las presiones disponibles, en el cual los habitantes mayormente beneficiados son los que requieren de presiones relativamente bajas para tener servicio. Por lo tanto entre menor sea la cantidad de usuarios, el agua destinada a estos es menor y su distribución será desigual; por el contrario, entre más aumente la cantidad de habitantes mayor cantidad de agua le debería corresponder y dicha distribución tenderá a ser uniforme. A pesar de que se comprobó que la cantidad de agua suministrada a la colonia Piedra Lisa es insuficiente, el ingeniero Rubén Márquez (jefe de sector 5), aseguró que no se han reportado quejas de falta de agua por parte de ningún usuario. Por lo que también se concluye que los hábitos y costumbres de los habitantes son aspectos importantes a analizar para los sistemas



de distribución de agua potable, es decir, si los usuarios saben que la cantidad de agua con la que son abastecidos es poca estos se adaptan a usar realmente la mínima indispensable o si son personas que trabajan la mayor parte del día o que solo lleguen a casa a dormir será obvio intuir que su consumo de agua es menor al esperado para una zona tipo popular (150 lts/hab/día).

En general analizar modelos que dependen de la presión aporta más información en comparación con los que son dependientes de la demanda, la cual es de mayor relevancia cuando se trata de un sistema de distribución con suministro intermitente o coloquialmente conocido como tandeado. Para este tipo de modelos es importante tomar en cuenta las alturas reales de los depósitos intradomiciliarios, para este estudio se tomó en cuenta una altura de 15 metros debido a que la presión mínima requerida para casas habitaciones es de 1.5 Kg/cm^2 . Sin embargo en la colonia Piedra Lisa no todos los tinacos están a esta altura, algunas casas son de un solo piso y hay otras que llegan a tener tres (planta baja, nivel 1 y nivel 2) por lo que se tendrían resultados con mayor precisión si se toman en cuenta los promedios de las alturas reales para los depósitos que representan dos o más predios en EPANET, pero la obtención de datos requeriría de un enorme esfuerzo. Sin embargo la ventaja que existe de hacer este tipo de modelaciones es que aplica muy bien para analizar proyectos de fraccionamientos de interés social en donde las casas tienen una altura constante.



BIBLIOGRAFÍA

- Cabrera-Béjar, J. A. (2012). Modelación de redes de distribución de agua con suministro intermitente. *Revista TYCA*, 3(2). Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/3535/353531977001.pdf>
- CONAGUA. (mayo de 2012). *Glosario General de Términos del Desarrollo de la Base Metodológica para el Inventario Nacional de Humedales de México*. Recuperado el 13 de octubre de 2021, de Gobierno: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/165389/Glosario_de_T_rminos.pdf
- CONAGUA. (08 de diciembre de 2015). *Conducciones*. Recuperado el 14 de octubre de 2021, de Biblioteca Digital de MAPAS: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro10.pdf>
- CONAGUA. (08 de diciembre de 2015). *Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado*. Recuperado el 14 de octubre de 2021, de Biblioteca digital de MAPAS: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf>
- CONAGUA. (08 de diciembre de 2015). *Diseño de redes de distribución de agua potable*. Recuperado el 14 de octubre de 2021, de Biblioteca Digital de MAPAS: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro12.pdf>
- CONAGUA. (08 de diciembre de 2015). *Modelación Hidráulica y de Calidad de Agua en Redes de Distribución*. Recuperado el 14 de octubre de 2021, de Biblioteca Digital de MAPAS: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro13.pdf>
- Cruz, R. E. (19 de mayo de 2015). *El Acueducto de Valladolid - Morelia*. Recuperado el 14 de octubre de 2021, de Michoacán Histórico: <https://www.michoacanhistorico.com/el-acueducto-de-valladolid-morelia>
- EPANET. (19 de julio de 2017). *Manual del usuario*. Recuperado el 14 de octubre de 2021, de EPANET: https://www.iiama.upv.es/iiama/src/elementos/Software/2/epanet/EN2Manual_esp_v20012_ext.pdf
- INAFED. (2010). *MORELIA*. Recuperado el 13 de octubre de 2021, de Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM16michoacan/municipios/16053a.html>
- INEGI. (9 de noviembre de 2009). *Prontuario de información geográfica municipal*. Recuperado el 13 de octubre de 2021, de Inegi: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/16/16053.pdf



- Ochoa, L. (2014). *Sectorización de redes de distribución*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- SEMARNAT. (2012). *Agua*. Recuperado el 13 de octubre de 2021, de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap6_agua.pdf
- SIAPA. (04 de marzo de 2014). *Estaciones de bombeo*. Recuperado el 14 de octubre de 2021, de Criterios y lineamientos técnicos para factibilidades en la A.M.G.: https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_13._estaciones_de_bombeo.pdf
- SIAPA. (04 de marzo de 2014). *Sistemas de Agua Potable (Parte 1)*. Recuperado el 14 de octubre de 2021, de Criterios y lineamientos técnicos para factibilidades en el A.M.G.: https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_2._sistemas_de_agua_potable-1a._parte.pdf
- SIAPA. (04 de marzo de 2014). *Sistemas de Agua Potable (Parte 2)*. Recuperado el 14 de octubre de 2021, de Criterios y lineamientos técnicos para factibilidades en la A.M.G.: https://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_2._sistemas_de_agua_potable-2a._parte.pdf
- UNAM. (3 de abril de 2019). *Morelia*. Recuperado el 13 de octubre de 2021, de SOMI 34: <http://somi.icat.unam.mx/somi34/morelia.html>

ANEXO

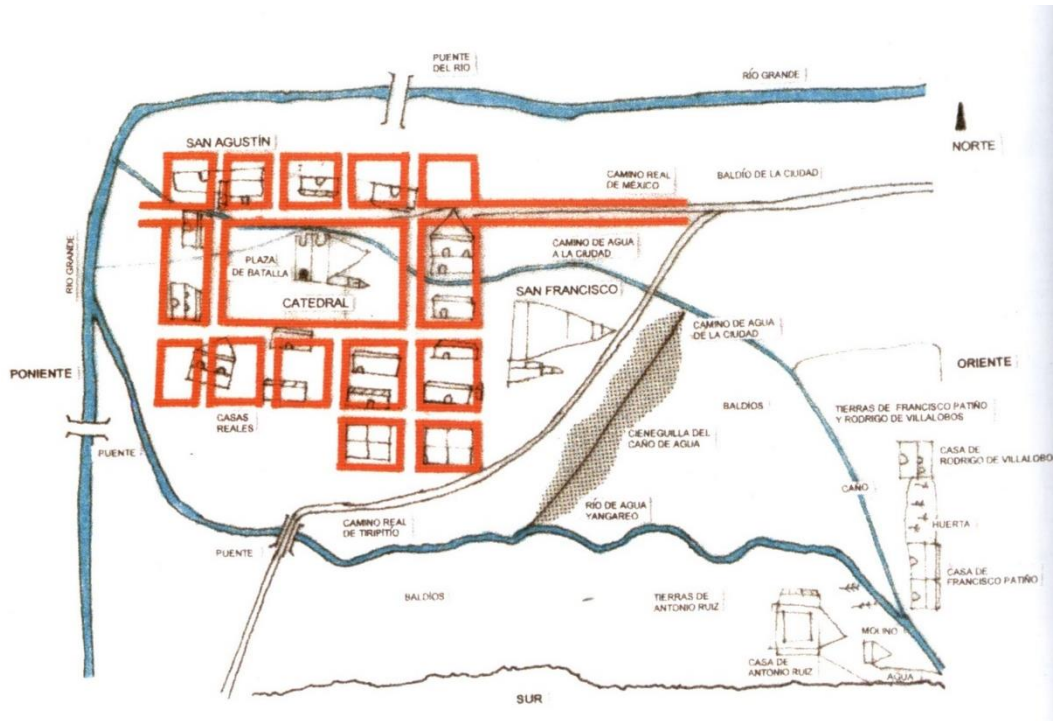


Figura 44. Interpretación de la traza urbana de Valladolid en 1579 por el Arq. Enrique Cervantes S.

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES			
Material	ϵ (mm)	Material	ϵ (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0

Figura 45. Rugosidad de tuberías según el tipo de material.

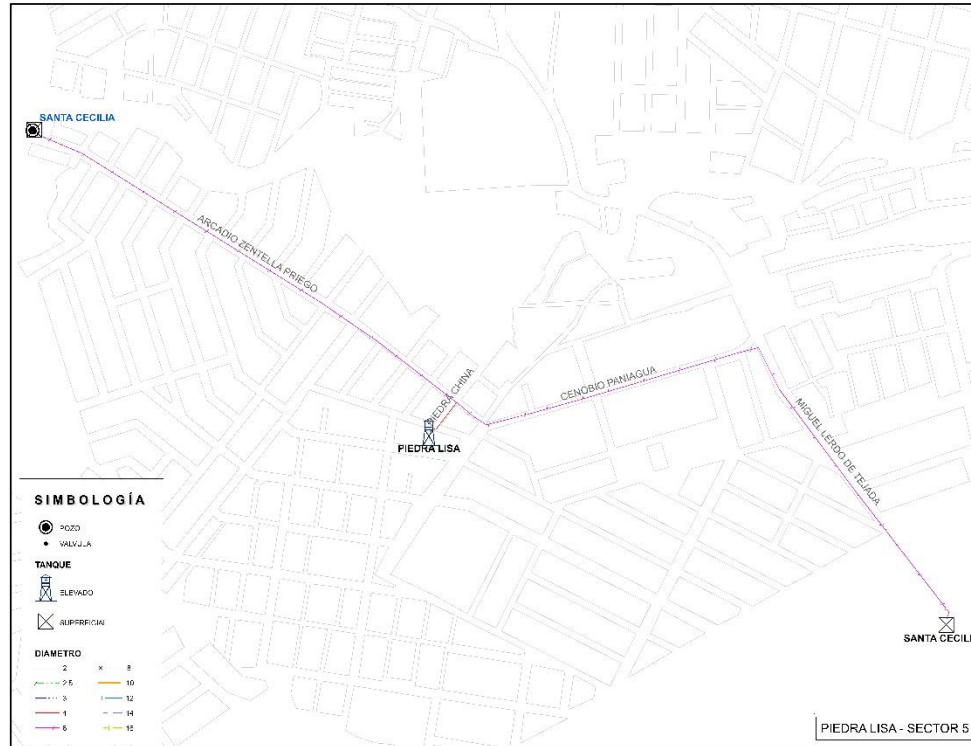


Figura 46. Conducción del cárcamo de bombeo al tanque superficial Santa Cecilia.

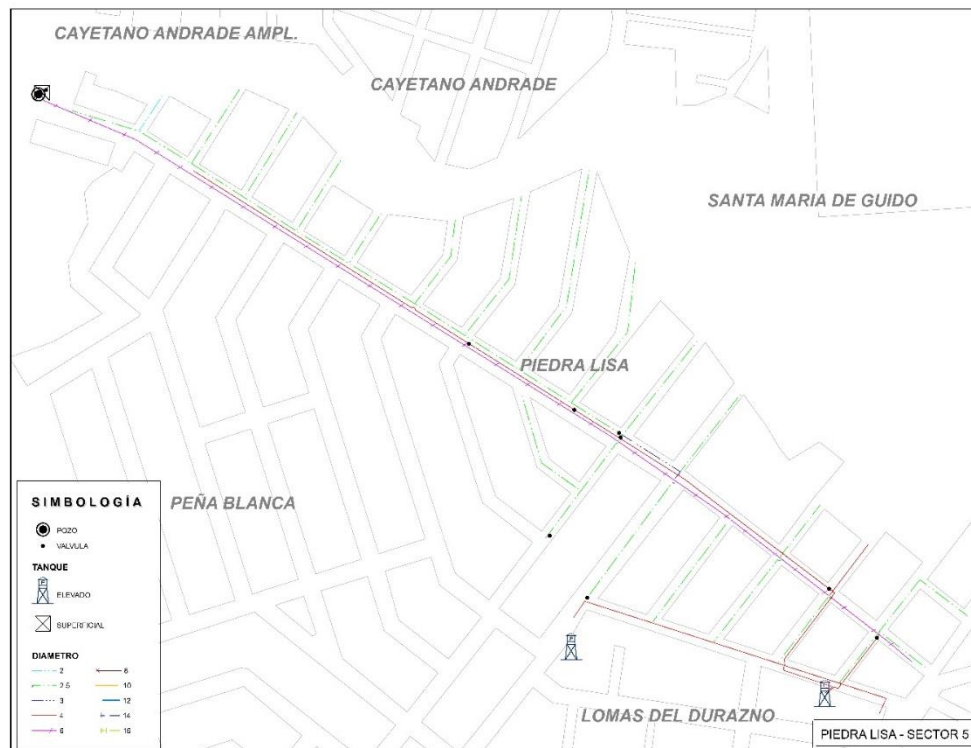


Figura 47. Plano original de la colonia Piedra Lisa del sistema de catastro digital de OOAPAS

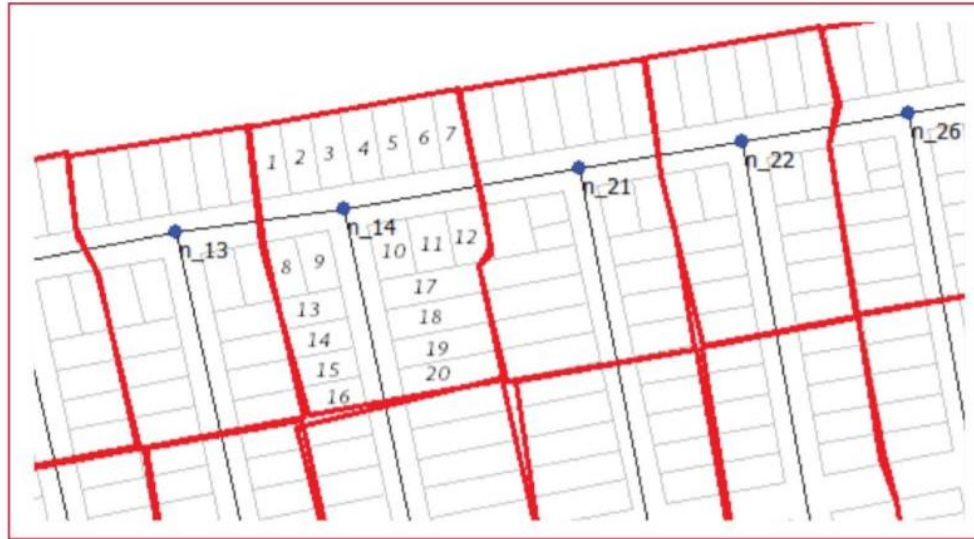


Figura 48. Área de influencia (MAPAS Libro 13: Modelación hidráulica y de calidad del agua en redes de distribución, CONAGUA, pág. 32).

Tabla 2.6 Coeficientes de variación horaria para distintas ciudades de México (Ochoa., et al. 1993)

t (h)	q/q_{med}	t (h)	q/q_{med}
0	0.606	12	1.288
1	0.616	13	1.266
2	0.633	14	1.216
3	0.637	15	1.201
4	0.651	16	1.196
5	0.828	17	1.151
6	0.938	18	1.121
7	1.199	19	1.056
8	1.307	20	0.901
9	1.372	21	0.784
10	1.343	22	0.710
11	1.329	23	0.651

Ilustración 2.2 Coeficientes de variación horaria para distintas ciudades de México (Ochoa, et al. 1993)

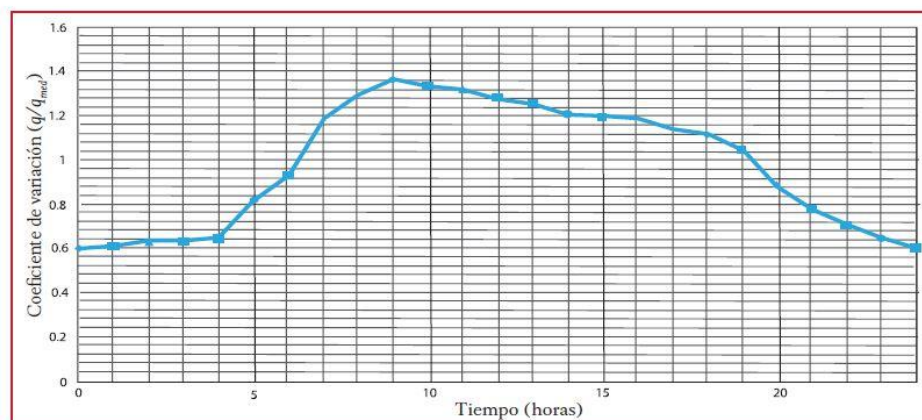


Figura 49. Coeficientes de Variación Horaria para distintas ciudades de México (MAPAS Libro 4: Datos Básicos, CONAGUA, pág. 20).