



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**IMPORTANCIA DEL TANQUE TORRES 4 PARA EL SUMINISTRO DE
AGUA POTABLE PARA LAS ALCALDIAS DE ALVARO OBREGON,
BENITO JUAREZ, IZTACALCO E IZTAPALAPA**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN HIDRAULICA

PRESENTA:

LUIS ENRIQUE ESCALANTE SEVERIANO

DIRECTOR DE TESINA: **DR. JOSE LUIS HERRERA ALANIS**

MÉXICO, D.F.

ENERO 2021

A mis padres José Manuel y Ana María, que con su amor, cariño y educación que me han brindado soy la persona que soy ahora.

A mis hermanos José Manuel, Ana Karina y Lizbeth, con quienes he aprendido, reído y peleado.

AGRADECIMIENTOS

A DIOS, por darnos vida, proteger a mi familia y protegerme.

A la UNAM, que desde la preparatoria me brindado las herramientas y el conocimiento para ser un estudiante de calidad.

Al Instituto de Ingeniería, por ser parte importante en mi formación profesional y por el apoyo técnico y económico.

A mis profesores de la licenciatura y especialidad, quienes con su dedicación experiencia y amor a la enseñanza aportaron mucho en mi formación académica.

Al Dr. José Luis Herrera Alanís, por haberme apoyado a desarrollar este trabajo y ayudarme profesionalmente.

A los M.I., Liliana Aguilar Yañez, Roberto Cagigas Velásquez, Carlos Franco Dominguez y al Dr. Enrique César Valdez por su apoyo, revisión a este trabajo.

Al M.I., Eliseo Carrizosa Elizondo, quien me recibió con las puertas abiertas para formar parte del instituto.

Al equipo del proyecto de sectorización, El Ingeniero Antonio Capella y los M.I, Gabriela, Javier y Olaf, gracias por el apoyo y conocimiento brindado durante mi estancia en el IINGEN.

A mis amigos de la preparatoria y de la facultad, de quienes he aprendido demasiado en esta gran etapa de estudiante y hemos pasado grandes momentos.

A mis amigos del cubículo, quienes me cobijaron de la mejor manera a mi llegada al IINGEN.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| OBJETIVO | 3 |
| I. ANTECEDENTES | 4 |
| 1.1. TIPOS DE TANQUES | 4 |
| 1.1.1. Tanque de almacenamiento..... | 4 |
| 1.1.2. Tanque de regulación..... | 5 |
| 1.1.3. Tanque de regulación y almacenamiento | 5 |
| 1.1.4. Enterrados..... | 6 |
| 1.1.5. Superficiales | 7 |
| 1.1.6. Elevados | 8 |
| 1.2. PRINCIPALES FUENTES. | 9 |
| 1.2.1. Sistema Lerma..... | 10 |
| 1.2.2. Sistema Cutzamala | 12 |
| 1.1.1. Pozos | 15 |
| 1.1.1.1. En la CDMX..... | 15 |
| 1.1.1.2. Fuera de la CDMX..... | 15 |
| 1.1.1.2.1. El sistema Chiconautla | 15 |
| 1.1.1.2.2. Plan Acción Inmediata (PAI)..... | 15 |
| 1.1.2. Ríos y manantiales..... | 17 |
| 1.3. PROBLEMÁTICA EN EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE..... | 19 |
| 1.3.1. Baja presión..... | 20 |
| 1.3.2. Servicio intermitente..... | 22 |
| 1.3.3. Fugas..... | 24 |
| II. ZONA DE ESTUDIO..... | 28 |
| 2.1. LÍNEAS DE ESTUDIO..... | 28 |
| 2.1.1. Santa Lucia..... | 29 |
| 2.1.2. Avenida Toluca..... | 33 |
| 2.2. TANQUE TORRES 4 | 35 |
| 2.3. MODELOS EN EPANET | 39 |
| 2.3.1. Trazo de la red..... | 39 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.2. Patrón de demanda..... | 42 |
| III. ANÁLISIS..... | 43 |
| 3.1. ANÁLISIS DE LA RED PRIMARIA, CONDICIONES ACTUALES..... | 44 |
| 3.1.1. Condición 1..... | 44 |
| 3.1.2. Condición 2..... | 46 |
| 3.1.3. Condición 3..... | 48 |
| 3.1.4. Condición 4..... | 49 |
| 3.2. ANÁLISIS DE LA RED PRIMARIA CON EL TANQUE TORRES 4..... | 51 |
| 3.2.1. Condición 1..... | 51 |
| 3.2.2. Condición 2..... | 53 |
| 3.2.3. Condición 3..... | 55 |
| 3.2.4. Condición 4..... | 56 |
| IV. CONCLUSIONES..... | 58 |
| REFERENCIAS..... | 60 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura I-1 Tanque enterrado | 6 |
| Figura I-2 Tanque Superficial..... | 7 |
| Figura I-3 Tanque Elevado. | 8 |
| Figura I-4 Caudal Suministrado por el Sistema Lerma. (Fuente: OCAVM, 2013)..... | 11 |
| Figura I-5 Elementos del Sistema Cutzamala. (Fuente: SINA,2018)..... | 13 |
| Figura I-6 Caudal Suministrado por el Sistema Cutzamala. (Fuente SINA, 2018)..... | 14 |
| Figura I-7 Sistema Plan Acción Inmediata (PAI). | 16 |
| Figura I-8 Fuentes e Infraestructura hidráulica para el Abastecimiento de la CDMX | 18 |
| Figura I-9 Mediciones de presiones en red primaria en kg/cm ² | 21 |
| Figura I-10 Ejemplo 1, consumo y fugas sin tandeo | 22 |
| Figura I-11 Ejemplo 1, consumo y fugas con tandeo | 22 |
| Figura I-12 Ejemplo 2, consumo y fugas sin tandeo del 20 al 22 de marzo 2005 | 23 |
| Figura I-13 Ejemplo 2, consumo y fugas con tandeo del 2 al 4 de abril 2005..... | 23 |
| Figura I-14 Fugas en función de la presión con exponentes e=0.5 y 1.5 | 25 |
| Figura I-15 Cambio de tuberías en Iztapalapa | 27 |
| Figura II-1 Líneas de red primaria: Santa Lucia y Av. Toluca | 28 |
| Figura II-2 Red primaria: línea Av. Santa Lucia. Fuente: Catastro SACMEX..... | 31 |
| Figura II-3 Sectores abastecidos por el tanque Santa Lucía 1 tubería de 48 pulgadas. | 32 |
| Figura II-4 Red primaria: línea Av. Toluca. Fuente: Catastro SACMEX | 34 |
| Figura II-5 Vista satelital desde Google Earth del tanque Torres 4..... | 35 |
| Figura II-6 Perfil de elevaciones de la línea avenida Toluca, inicio en el cadenamiento 0+100 | 36 |
| Figura II-7 Vista de una de las paredes interiores del tanque..... | 37 |
| Figura II-8 Caja de válvulas a la entrada del tanque..... | 38 |
| Figura II-9 Arreglo de by-pass..... | 38 |
| Figura II-10 Modelo en EPANET | 39 |
| Figura II-11 Contorno de elevaciones línea: avenida Toluca..... | 40 |
| Figura II-12 Patrón de demanda con el 41% de fugas. | 42 |
| Figura III-1 Niveles de los tanques reportados en la simulación, condición 1. | 44 |
| Figura III-2 Niveles de los tanques reportados en la simulación, condición 2. | 46 |
| Figura III-3 Niveles de los tanques reportados en la simulación, condición 3. | 48 |
| Figura III-4 Demanda BJ-IZC-IZT-COY | 49 |
| Figura III-5 Patrón de demanda BJ-IZC-IZT-COY..... | 50 |
| Figura III-6 Niveles de los tanques reportados en la simulación, condición 1 con tanque Torres 4... 51 | |
| Figura III-7 Niveles de los tanques reportados en la simulación, condición 2 con tanque Torres 4... 53 | |
| Figura III-8 Niveles de los tanques reportados en la simulación, condición 3 con tanque Torres 4... 55 | |
| Figura III-9 Gasto demandado por la zona BJ-IZC-IZT-COY (actualmente suministrado por la línea de Santa Lucia) vs Gasto enviado..... | 56 |
| Figura III-10 Niveles en los tanques reportados en la simulación, condición 4 con tanque Torres 4. 57 | |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla I.1 Gasto suministrado por el sistema PAI (EAM, CONAGUA, 2012). | 16 |
| Tabla I.2 Resumen Fuentes de Abastecimiento. Datos en-2017 | 18 |
| Tabla I.3 Fugas en la CDMX. | 26 |
| Tabla II.1 Capacidades de tanques en Línea Av. Santa Lucia. | 29 |
| Tabla II.2 Características de los sectores en línea Santa Lucia..... | 30 |
| Tabla II.3 Pozos en línea Santa Lucía. | 30 |
| Tabla II.4 Capacidades de tanques en Línea Av. Toluca | 33 |
| Tabla II.5 Características de los sectores en Línea Av. Toluca | 33 |
| Tabla II.6 Pozos en Línea Av. Toluca | 34 |
| Tabla II.7 Coeficiente n de rugosidad de Manning..... | 41 |
| Tabla III.1 Reglas de control, simulación: condición 1 | 44 |
| Tabla III.2 Gasto medio suministrado hacia la línea avenida Toluca..... | 45 |
| Tabla III.3 Reglas de control, simulación: condición 2 | 46 |
| Tabla III.4 Reglas de control, simulación: condición 1 con tanque Torres 4..... | 51 |
| Tabla III.5 Reglas de control, simulación: condición 2 con tanque Torres 4..... | 53 |
| Tabla III.6 Reglas de control, simulación: condición 4 con tanque Torres 4..... | 57 |



INTRODUCCIÓN

En la Ciudad de México existen problemas de todo tipo, entre ellos el crecimiento poblacional y su distribución en el área urbana disponible, que desencadenan otros no menos importantes, como lo es el abastecimiento de agua potable, un recurso indispensable para el desarrollo y la vida de los habitantes. La disponibilidad del agua en cualquier parte del mundo respecto a su demanda no siempre ha sido igual, por ello en los sistemas hidráulicos existen elementos para almacenarla y absorber las variaciones del consumo de las localidades.

Desde los años 50's la principal fuente de abastecimiento en la ciudad han sido los pozos, los cuales debido a su sobreexplotación y antes de ello, han pasado factura en el suelo con los hundimientos diferenciales, ocasionando fracturas en las redes de agua potable, alcantarillo y prácticamente todas las estructuras. Para los años 80's y debido a que la extracción de agua en el manto acuífero era mayor a la que se recargaba fue necesario traer agua desde otra cuenca con ayuda del sistema Lerma y posteriormente el sistema Lerma-Cutzamala, que hoy en día representa el 40% del suministro a la Ciudad de México.

Las líneas principales que actualmente conducen agua, cuyo origen son los sistemas previamente mencionados, hacia la ciudad de México, son las líneas de avenida Toluca y Santa Lucía, abasteciendo a las alcaldías de Álvaro Obregón, Benito Juárez, Iztacalco, Iztapalapa y Coyoacán.

La problemática actual es que el tanque Torres 4 el cual forma parte de la línea de conducción de avenida Toluca (Figura 1), y considerado como una obra hidráulica de gran importancia debido a su capacidad de 37,000 m³, se encuentra fuera de servicio, debido a que se localiza desplantado a la misma elevación que la bifurcación Judío-Lerma, ubicada 400 m aguas arriba del tanque Torres 4, donde se pierde la carga hidráulica evitando que el tanque Torres 4 opere.

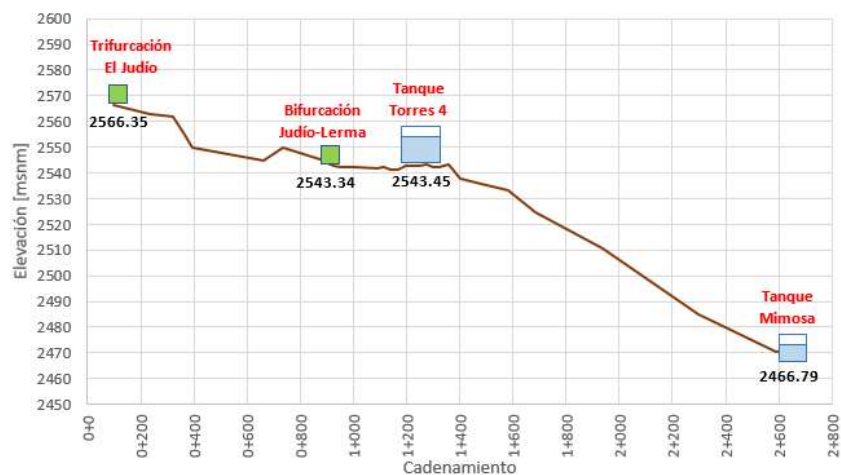


Figura 1. Perfil de elevaciones, inicio de la línea Av. Toluca



Este documento se divide en los siguientes capítulos:

Antecedentes. Se mencionan los tipos de tanques utilizados en las líneas de conducción, sus principales funciones y características. Posteriormente se señalan las fuentes de abastecimiento en la Ciudad de México, así como los problemas más frecuentes en la red de distribución, baja presión, servicio intermitente y fugas.

Zona de estudio. Se describe a detalle las características de las líneas de Santa Lucía y avenida Toluca, ya que con esa información se llevó a cabo la codificación de los modelos en el software EPANET, con la principal hipótesis de que las fugas para la zona son del 41%. También se menciona el estado actual del tanque Torres 4 y sus características.

Análisis. En este capítulo se lleva a cabo las simulaciones de la línea de avenida Toluca, con y sin el tanque Torres 4, para cada una de las condiciones, analizando los resultados obtenidos.

Finalmente, se reportan las conclusiones de los análisis realizados para cada condición.



OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo es analizar y comparar el comportamiento de la línea de avenida Toluca sin el tanque Torres 4 (condiciones actuales), contra la operación de la línea con el tanque en funcionamiento y previa rehabilitación, el cual se espera que tenga un impacto considerable en la red, además, se analizarán los efectos que se tendrían en los niveles de los tanques aguas abajo del tanque en cuestión, para cuatro condiciones diferentes:

1. Operando las válvulas de flujo a la entrada de los tanques excepto el primero de ellos, entrando un gasto constante.
2. Operando las válvulas de flujo a la entrada del último tanque (CAO) y manteniendo constante el gasto de entrada en los tanques previos.
3. Deteniendo las fuentes de abastecimiento.
4. Tratando de enviar el gasto que actualmente demanda la línea de Santa Lucía aguas abajo del tanque Santa Lucía 1.

Para cada una de las condiciones se dispondrán de dos simulaciones con ayuda del software de uso libre EPANET.



I. ANTECEDENTES

1.1. TIPOS DE TANQUES

Los tanques de una red de abastecimiento tienen dos funciones principales: almacenar el agua que llega a ellos y regularla para el mejor funcionamiento de la red o simplemente la combinación de las dos anteriores, de tal forma que los tanques se dividen en:

- Tanque de almacenamiento.
- Tanque Regulador.
- Tanque Regulador y de almacenamiento.

1.1.1. Tanque de almacenamiento

Son recipientes que permiten almacenar un volumen de agua para garantizar la disponibilidad del recurso cuando se implementan acciones de mantenimiento y/o reparación en los elementos previos del sistema, obra de captación o línea de conducción y también cuando se presentan desperfectos en la reducción del suministro de agua ocasionados por problemas en los equipos de bombeo, así como fallas en la energía eléctrica.

El volumen de agua almacenado además de ser utilizado para evitar problemas en el suministro se emplea para combatir incendios. El extinguir el fuego requiere de gran cantidad de agua, por ello un tanque de almacenamiento con la capacidad adecuada toma un papel importante para que en el momento de presentarse un incendio este logre ser mitigado sin afectar a las comunidades en temas de abastecimiento y de seguridad medioambiental.

Contar con tanques que realicen la única función de almacenar agua y en periodos extendidos podría provocar la incubación de agentes patógenos y contaminación del agua repercutiendo directamente a la población. Para evitar problemas de este tipo será necesario recircular el agua e implementar políticas de limpieza periódicas de la estructura y sustitución del agua (CONAGUA, 2007).

Prescindir de esta estructura provocaría problemas en dado caso que se presente una falla o emergencia en la conducción, ya sea por el mantenimiento o reparaciones y en el caso donde la fuente de suministro sea por medio de bombeo la falla del suministro de energía. (Caballero, 2015).



1.1.2. Tanque de regulación

El objetivo de un tanque de regulación es retener el agua cambiando el régimen de aportaciones de la línea de conducción, que generalmente es constante, a un régimen de consumo variable en la red de distribución satisfaciendo a la población a lo largo del día. Cuando el gasto que proporciona la fuente de abastecimiento es mayor al agua que demanda la población se mantiene el excedente en dicho tanque, posteriormente el agua acumulada es consumida al incrementarse la demanda de tal manera que la variación en los niveles del tanque será similar día a día si en las condiciones de entrada y salida no hay diferencias significativas. Si bien el tanque de regulación absorbe las variaciones del consumo de la población este debe recibir agua en todo momento para garantizar el servicio.

El ofrecer una carga hidráulica suficiente para satisfacer las necesidades de presión en la red de distribución garantizará que el agua llegue a los depósitos de almacenamiento de los usuarios, por ello el tanque de regulación es una obra civil que ayudará a mantener las presiones en la red evitando los cambios bruscos provocadas por la variación de la demanda. Generalmente estos tanques se desplantan en las partes más altas de la topografía para ayudar a incrementar las presiones en los puntos de la red (CONAGUA, 2007).

Para determinar la capacidad de regulación de este tipo de tanques se puede realizar mediante un método analítico de diferencia de volúmenes entre los gastos de entrada y de salida a un determinado tiempo, para ello se necesitará conocer los coeficientes de variación horaria de la zona a abastecer por el tanque, así como el gasto producido por la fuente de abastecimiento que alimenta el tanque.

1.1.3. Tanque de regulación y almacenamiento

Estas estructuras cumplirán con la función de los dos tanques antes mencionados, almacenar el agua y regularla para el funcionamiento en la red. La capacidad estará definida por la suma de las capacidades de almacenamiento y regulación con el objetivo de no suspender el servicio en desperfectos y emergencias (CONAGUA, 2007).

Otra clasificación de los tanques es por su construcción, disponibilidad de terreno y condiciones de la topografía:

- Enterrados
- Superficiales
- Elevados



1.1.4. Enterrados

Estos tanques se construyen por debajo del nivel topográfico, el tipo de suelo será un factor importante para proceder a construir un tanque enterrado. Es indispensable contar con una elevación del terreno lo suficientemente alta para brindar una presión adecuada a la red.

La ventaja principal de este tipo de tanques al encontrarse enterrados es que el agua estará protegida a variaciones de la temperatura, pero no en cuestiones de calidad. No obstante, la excavación eleva los costos de construcción y su ubicación dificulta el mantenimiento y control de las filtraciones (Libro 12, CONAGUA, 2016). En la **Figura I-1** se muestra un ejemplo de este tipo de tanques.



Figura I-1 Tanque enterrado



1.1.5. Superficiales

Se elige la construcción de este tipo de tanque ya que no es posible excavar debido a que las características del suelo lo impiden al ser rocosos o de difícil penetración y la altura es conveniente si se desplantan sobre la superficie del terreno. Cuentan con dos tuberías separadas una de entrada (conducción) y otra de salida (alimentación a la red) (Libro 12, CONAGUA, 2016).

Generalmente son de geometría rectangular y circular se construyen de mampostería revestidos interiormente o de concreto reforzado dependiendo la capacidad de los tanques, la cual es muy variable. Los tanques de mampostería pueden llegar a tener capacidades de hasta 10,000 m³, mientras que los de concreto preesforzado de 50,000 m³. En la **Figura I-2** se muestra un ejemplo de este tipo de tanque.

Deben contar con una losa tapa para evitar que se contaminen, respiración que garantice el contacto con la atmósfera, así como rebozaderos que eviten su presurización. Generalmente la respiración se obtiene mediante tubos dirigidos hacia abajo que se encuentran sobre la losa tapa al igual que los registros, estos últimos permiten el acceso de personal para su mantenimiento y supervisión del tanque, mientras que los tubos de desfogue deben descargar al sistema de alcantarillado (Valdez, 1990).



Figura I-2 Tanque Superficial.



1.1.6. Elevados

Estos tanques tienen mayor costo debido a que es necesario diseñar una estructura que mantenga elevado al tanque, se construyen en localidades donde la accidentalidad topográfica es nula.

El ubicar los tanques en el centro geométrico de la red de distribución garantiza una uniformidad de presiones, disminuyéndose las pérdidas de fricción debido a que el recorrido del flujo es menor que si se encontrara en los límites o periferia de la red. Los sistemas tanque y torre se construyen generalmente de acero y concreto reforzado, con torres de 10, 15 y 20 m de altura y tanques con capacidades entre 10 y 1,000 m³ (Valdez, 1990). En la **Figura I-3** se observa un ejemplo de tanque elevado.

Las desventajas de construir estos tanques, es el costo ya que se añade una estructura de soporte la cual debe estar bien diseñada para resistir sismos, además de la vulnerabilidad y problemas que ocasionaría su posible falla (Libro 12, CONAGUA, 2016).



Figura I-3 Tanque Elevado.



1.2. PRINCIPALES FUENTES.

Los pozos de la ciudad fueron la principal fuente de abastecimiento desde el año 1930, posteriormente comienza la sobreexplotación de estos y para los 40's como consecuencia se presentaban hundimientos diferenciales de hasta 13 centímetros en algunos puntos de la ciudad (CONAGUA, 2016).

El constante crecimiento de la mancha urbana en la ciudad de México y el área metropolitana representó mayor demanda de servicios: educación, salud, transporte, energía eléctrica, agua potable, saneamiento, etc. Entre el año 1940 y 1950 el aumento de la población ascendió de 1.76 a 3.05 millones significando un crecimiento del 73% (Información Histórica, INEGI).

El agua limitada y sobreexplotación de las fuentes de agua potable en aquella época originó que el gobierno se viera la necesidad de traer agua de fuentes alternas que hasta la fecha han abastecido de agua a la Ciudad de México, los sistemas: *Lerma* y *Cutzamala*.

El sistema Lerma fue la primera fuente externa que entregó agua hacia la Ciudad de México (3-4 m³/s), conformado por la extracción de agua subterránea del acuífero del río Lerma localizada a 60 km, la cual es conducida a través del túnel Atarasquillo-Dos Ríos (Torres, 2014)

Para los años 70's la población en la Ciudad de México alcanzaba los 7 millones de habitantes, los problemas se agravaban en la ciudad, el sistema Lerma no se daba abasto para cumplir con las necesidades de la población y los acuíferos presentaban impactos graves de sobreexplotación, por ello la antes Gerencia Regional del Valle de México (GRAVAMEX) actualmente el Organismo de Cuenca del Valle de México (OCAVM), elaboró el Plan de Acción Inmediata (PAI) para iniciar operaciones en 1974 con el sistema de pozos en el sur (CONAGUA, 2014). En 1989 se construyó una segunda etapa con la que se llegó a aportar hasta 15 m³/s.

Paralelamente al sistema PAI, en 1972 se planeaba parcialmente la sustitución del Sistema Lerma con el Sistema Cutzamala el cual entró en operación para en el año 1982.



1.2.1. Sistema Lerma.

La construcción de este sistema estuvo conformada por dos etapas, la primera de ellas duró nueve años, iniciándose en 1942 con la captación de manantiales y agua subterránea, así como la conducción desde Almoloya del Río hasta los tanques de Dolores en Chapultepec. En dicha etapa, la captación de agua subterránea estuvo constituida por una serie de 54 pozos profundos, mientras que la conducción se conformó de tres partes: acueducto superior 22 km (Valle de Toluca), túnel de las Cruces 14.5 km y el acueducto inferior 21 km (Valle de México).

En el sistema Lerma desde su operación en 1953 hasta 1969, se logró medir un gasto medio anual a la entrada del túnel Atarasquillo-Dos Ríos de 3 a 4.15 m³/s con una característica peculiar: en la salida del túnel se lograba aforar una diferencia mayor a la de entrada debido a que dicho túnel captaba alrededor de 0.8 m³/s (Torres, 2014).

Debido a la crisis de agua en la Ciudad de México y la sobreexplotación de los pozos los cuales agravaban los problemas de hundimientos poniendo en riesgo infraestructuras habitacionales de drenaje y agua, se buscó ampliar el gasto, por ello en el año 1970 se perforaron 188 pozos de extracción con un gasto total de 10 m³/s, de esta manera se disminuirían los hundimientos en la ciudad de México y los efectos que estos producían. Adicionalmente se construyeron los ramales de la Presa Alzate a Ixtlahuaca, el de Jiquipilco y los pozos de La Gavia (Espinosa, 2006; Torres, 2014).

El gasto máximo producido por sistema Lerma fue en año 1974 con 13 m³/s, para años posteriores de 1980 el gasto conducido a través del sistema Lerma disminuyó a causa de problemas ambientales y sociales extrayéndose hasta 9 m³/s, así como la puesta en marcha del sistema Cutzamala en 1982, mientras que para los años 90's el caudal suministrado se mantenía cercano a los 7 m³/s.

En el año 2003, debido al agotamiento del acuífero de la cuenca, el Sistema Lerma disminuyó el caudal producido hasta 5 m³/s (Torres, 2014), debido a cambios en la gestión por cuencas el proyecto sistema Lerma incluía la desecación de las lagunas en la cuenca y dotación de 1 m³/s de agua, del total de 5 m³/s, para los municipios de la zona NZT (municipios de Naucalpan, Zaragoza y Tlalnepantla), compromiso federal del antes llamado Distrito Federal ahora Ciudad de México.

En **Figura I-4** se muestra el caudal producido por el Sistema Lerma, así como el suministrado hacia la Ciudad de México y el Estado de México, en el periodo del 2008 al 2012.

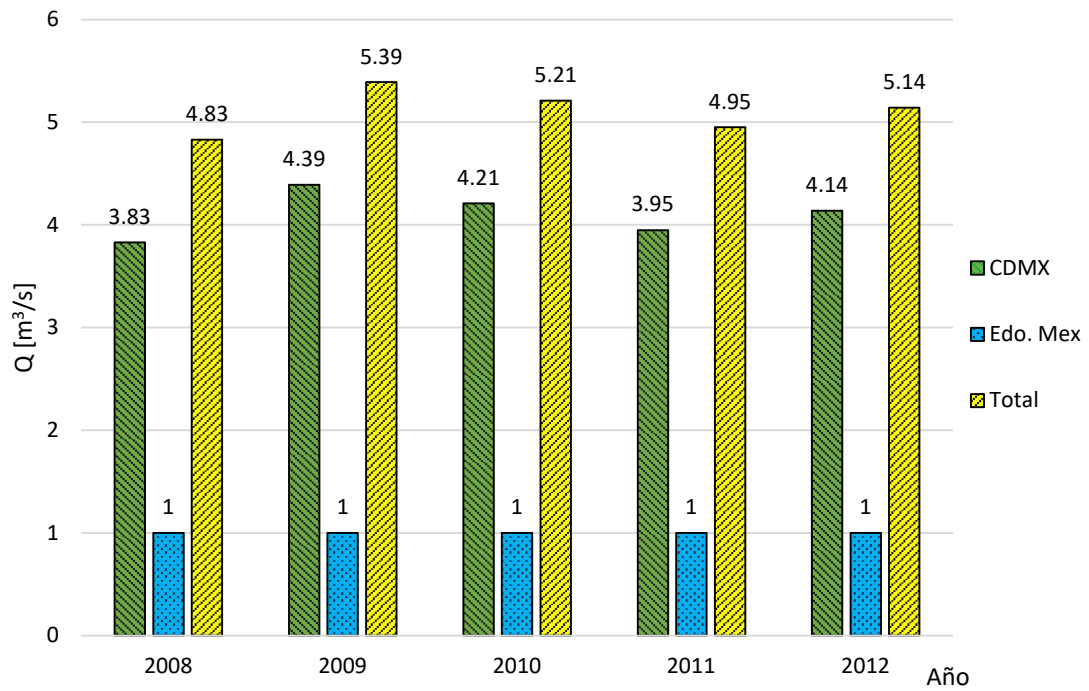


Figura I-4 Caudal Suministrado por el Sistema Lerma. (Fuente: OCAVM, 2013)



1.2.2. Sistema Cutzamala

El proyecto “Sistema Cutzamala” aprovecha los caudales del río Cutzamala en su cuenca Alta, los cuales provienen de las presas Tuxpan y Bosque en el estado de Michoacán, mientras que en el Estado de México el recurso se obtiene de las presas: Colorines, Ixtapan del Oro, Valle de Bravo y Villa Victoria, y finalmente la presa que conforma el sistema denominada: Chilesdo, que a excepción de las anteriores no capta aguas del río Cutzamala lo hace del río Malacatepec (EAM, CONAGUA, 2016).

La construcción y operación del proyecto fue llevada a cabo por el Gobierno Federal, las obras se realizaron en tres etapas:

La primera de ellas operó en 1982 con la aportación de 4 m³/s gracias a la captación de agua en la presa Villa Victoria, para que posteriormente fuera llevada a la planta potabilizadora los Berros, la más grande del país, la cual se ubica a 2,700 m.s.n.m. El agua potable se condujo por gravedad con un tubo de concreto de 2.5 m de diámetro y 77 km de longitud a la Zona Metropolitana del Valle de México.

La segunda etapa se puso en marcha en 1985, se logró captar agua de la presa Valle de Bravo conduciéndola hasta la planta potabilizadora, cabe mencionar que de las siete presas es la de mayor almacenamiento con 394.4 millones de metros cúbicos. Debido a que la diferencia de elevaciones entre la presa y la planta es de aproximadamente 900 metros fue necesario construir las plantas de bombeo 2,3 y 4, lográndose elevar el agua al destino. El agua fue conducida gracias a la construcción del túnel Analco-San José con 16 km de longitud, llegando a la bifurcación ramales: Norte-Macrocircuito y Sur-Acuaférico. En esta etapa se aportó un caudal de 6 m³/s al sistema.

En la tercera y última etapa se operaron las presas Chilesdo y Colorines, el subsistema Chilesdo operó desde 1993 aportando 1 m³/s elevándose 300 metros con ayuda de la planta de bombeo 6. La presa Colorines aprovecha el agua de las presas Tuxpan, El Bosque e Ixtapan de Oro para un suministro de 8 m³/s, alrededor de 2 m³ enviados hacia la Ciudad de México, paralelamente se construyó la planta de bombeo 1 para elevar el agua 1100 metros hacia la planta potabilizadora (CONAGUA, 2005).

En la **Figura I-5** se muestran las presas que conforman al Sistema Cutzamala.

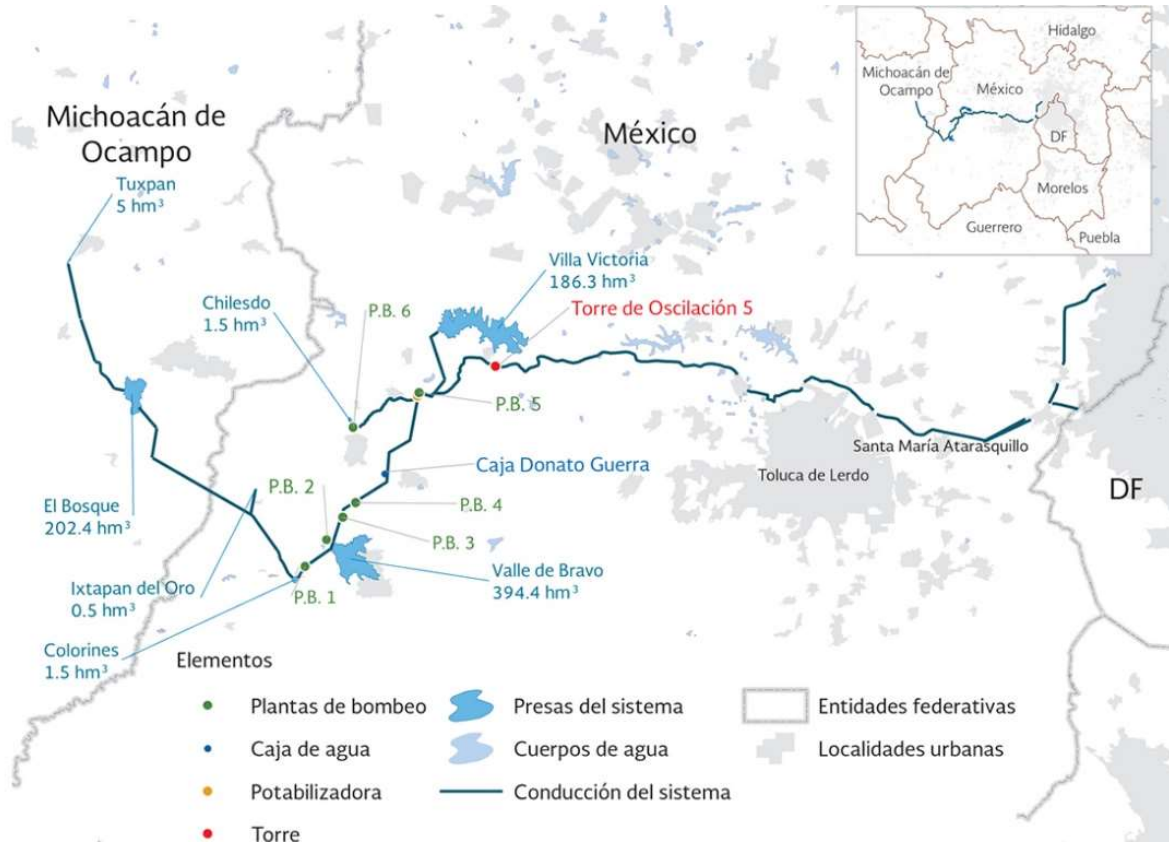


Figura I-5 Elementos del Sistema Cutzamala. (Fuente: SINA, 2018)

En conjunto, las siete presas: derivadoras y de almacenamiento, tienen una capacidad de 790.7 millones de metros cúbicos, mientras que omitiendo las presas derivadoras la capacidad total del sistema es de 782.4 millones de m³.

Después de haber culminado la tercera etapa el proyecto indicaba que el sistema sería capaz de importar 19 m³/s, sin embargo, con los datos proporcionados por el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México sobre el caudal suministrado, este no ha excedido los 16 m³/s.

En la Figura I-6 se logra observar que en el año 2017 el caudal producido por el Sistema Cutzamala fue de 16.06 m³/s de los cuales 9.89 m³/s fueron enviados hacia la ciudad de México y 6.17 m³/s destinados para el Estado de México.

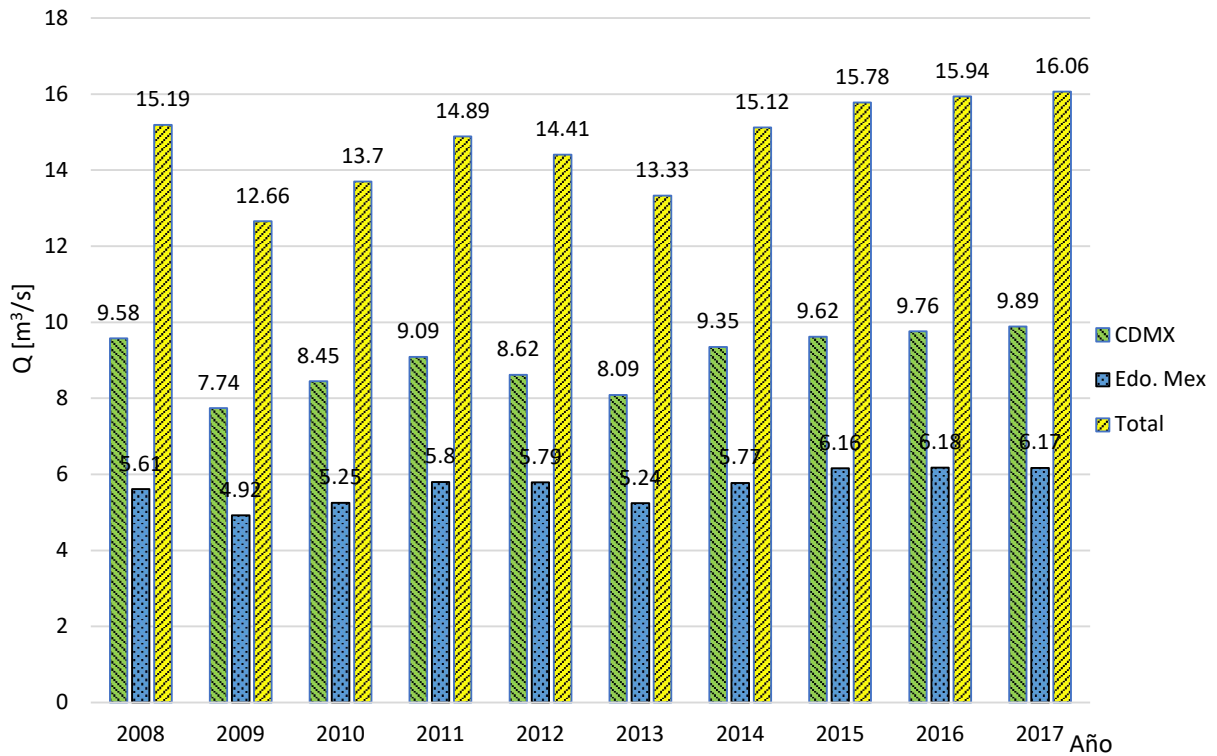


Figura I-6 Caudal Suministrado por el Sistema Cutzamala. (Fuente SINA, 2018)

Actualmente este sistema abastece a 11 alcaldías de la Ciudad de México y 11 municipios del Estado de México (EAM, CONAGUA, 2016), en la Figura I-6 se muestra el caudal enviado a los estados antes mencionados durante el periodo del 2008 al 2017.



1.1.1. Pozos

Actualmente los pozos profundos son la principal fuente de abastecimiento en la ciudad, ubicados dentro de la misma y en el Estado de México.

1.1.1.1. *En la CDMX*

Dentro de la ciudad se encuentran alrededor de 600 pozos los cuales son operados por el sistema de aguas de la Ciudad de México (SACMEX), la profundidad promedio de los pozos es de 200 m, con extremos de más de 1000 metros. Están divididos en 5 sistemas: sur, centro, oriente, poniente y norte, en conjunto se extrajo entre los años de 1990-2008, un promedio de 15 m³/s, registrándose un máximo en el año 2000 de 15.82 m³/s y un mínimo de 13.93 m³/s en 2009 (Escolero, et al., 2009).

1.1.1.2. *Fuera de la CDMX*

1.1.1.2.1. El sistema Chiconautla

Conformado por una batería de 41 pozos en el Estado de México, estos alimentan al acueducto localizado en el límite de la alcaldía Gustavo A. Madero y el municipio de Ecatepec.

La operación de este sistema inició en 1957 con tres ramales, 39 pozos, dos plantas de bombeo: San Juanico y San Cristóbal, y el tanque de regulación Santa Isabel, inicialmente operando con un gasto de 3.4 m³/s. Actualmente, el gasto de extracción se ha reducido a menos de la mitad, 1.4 m³/s (Escolero, et al., 2009).

1.1.1.2.2. Plan Acción Inmediata (PAI)

La demanda cada vez era mayor en el Zona Metropolitana, por ello en 1970 el Organismo de Cuenca del Valle de México (OCAVM) elaboró el Plan de Acción Inmediata para iniciar operaciones en 1974 con el sistema de pozos en el sur. En 1989 se construyó una segunda etapa con la que se llegó a aportar hasta 15 m³/s.

El sistema PAI actualmente lo conforman 7 baterías de pozos que en su totalidad suman 219, los ramales se encuentran ubicados en el Estado de México e Hidalgo. Además, cuenta con ocho acueductos con una longitud de más de 200 km, seis plantas de bombeo, la presa y planta potabilizadora Madín (OCAVM, 2013).

En la **Figura I-7** se muestra la ubicación de cada uno de los ramales enlistados en la **Tabla I.1** con su respectivo número de pozos que conforma dichos ramales.

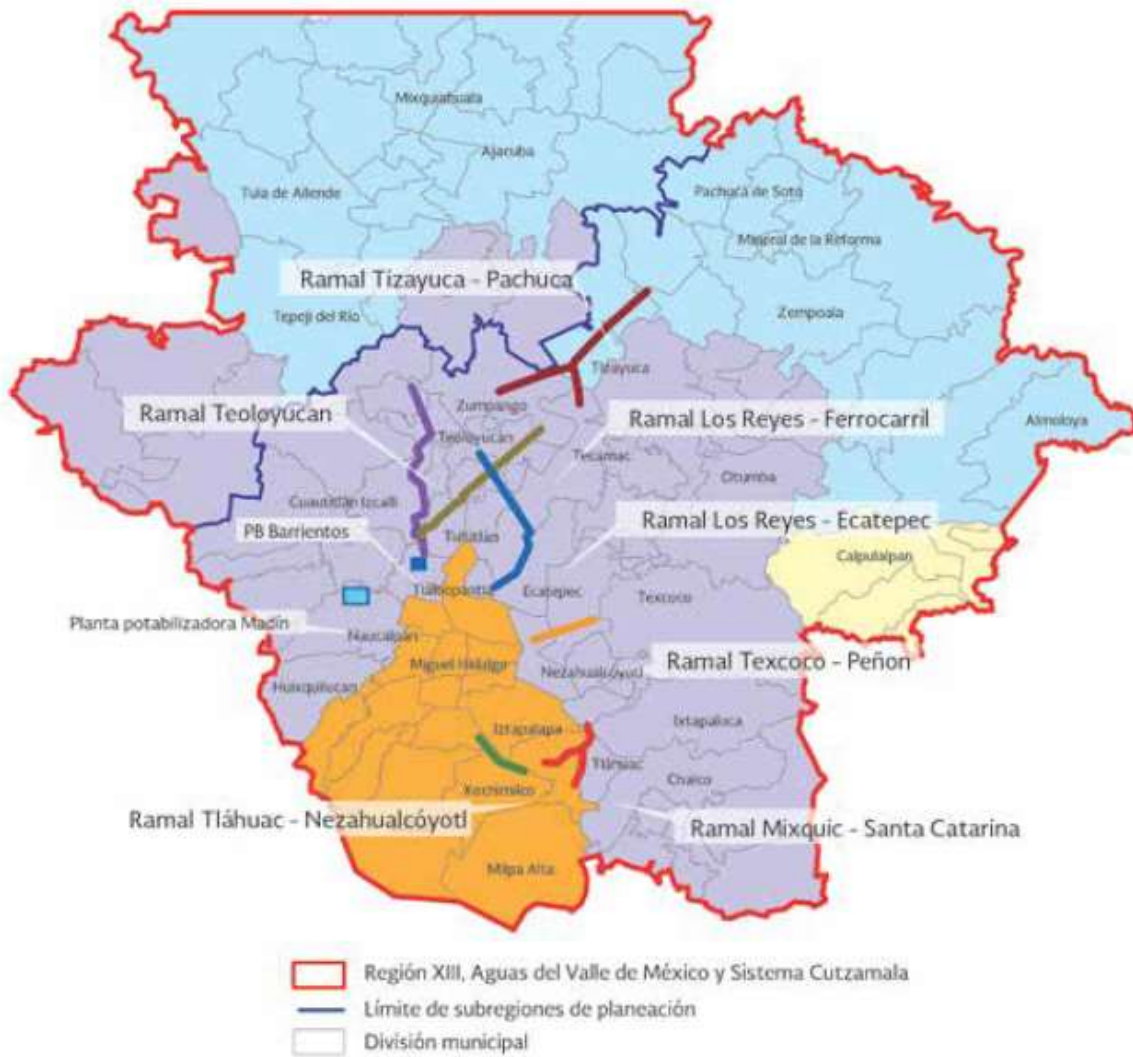


Figura I-7 Sistema Plan Acción Inmediata (PAI).

Tabla I.1 Gasto suministrado por el sistema PAI (EAM, CONAGUA, 2012).

| Ramal | No. De Pozos | Gasto [m ³ /s] |
|------------------------|--------------|---------------------------|
| Tizayuca-Pachuca | 34 | 1.204 |
| Teoloyucan | 49 | 1.389 |
| Los Reyes-Ferrocarril | 49 | 1.671 |
| Reyes-Ecatepec | 34 | 1.010 |
| Tláhuac-Nezhualcóyotl | 20 | 0.611 |
| Mixquic-Santa Catarina | 19 | 0.389 |
| Texcoco-Peñón | 14 | 0.589 |
| Total | 219 | 6.863 |



La aportación del sistema PAI a la Zona Metropolitana oscila cerca de los 7 m³/s. (Tabla I.1). Únicamente parte del agua proveniente de los ramales del norte y del sur abastecen a la Ciudad de México.

Los ramales del Norte: Tizayuca-Pachuca, Teoloyucan y los Reyes-Ferrocarril, conducen parte del agua a la planta potabilizadora Barrientos y posteriormente al tanque de regularización “Chalmita”, recientes mediciones indican que el gasto promedio que entrega el tanque Chalmita a la Ciudad de México es entre 2.2 y 2.6 m³/s (Escolero, et al., 2009), la profundidad promedio de los pozos que conforman los tres ramales antes mencionados es entre 200 y 300 metros.

Los ramales del Sur: Tláhuac-Nezahualcóyotl y Mixquic-Santa Catarina ubicados a lo largo del canal de Chalco y en el límite entre Tláhuac y Chalco respectivamente, están conformados por 19 y 14 pozos, conducen agua hasta el tanque la Caldera, el cual suministra agua a la Ciudad de México por bloques.

El caudal entregado a la Ciudad de México por el tanque La Caldera registra un promedio de 0.4 m³/s (Escolero, et al., 2009)

1.1.2. Ríos y manantiales.

Hay 18 manantiales que en conjunto aportan 0.8 m³/s, se ubican en su totalidad en la parte poniente y suroeste de la CDMX dentro de la zona de suelos de conservación, a excepción de los manantiales Fuentes Brotantes, Peña Pobre y Santa Fe. (Escolero, et al., 2009)



El caudal que aporta cada una de las fuentes hacia la ciudad de México se muestra en la Tabla I.2.

Tabla I.2 Resumen Fuentes de Abastecimiento. Datos en-2017

| Suministro de agua a la CDMX | | |
|--|---------------------|------|
| Fuentes | [m ³ /s] | % |
| Pozos en la CDMX | 13.9 | 44.2 |
| Pozos fuera de la CDMX (PAI, Barrientos, Chalmita) | 4 | 12.7 |
| Sistema Lerma | 3.8 | 12.0 |
| Sistema Cutzamala | 9 | 28.6 |
| Manantiales y Río Magdalena | 0.8 | 2.5 |
| Total | 31.5 | 100 |
| Dotación per cápita | 250 [l/hab/día] | |

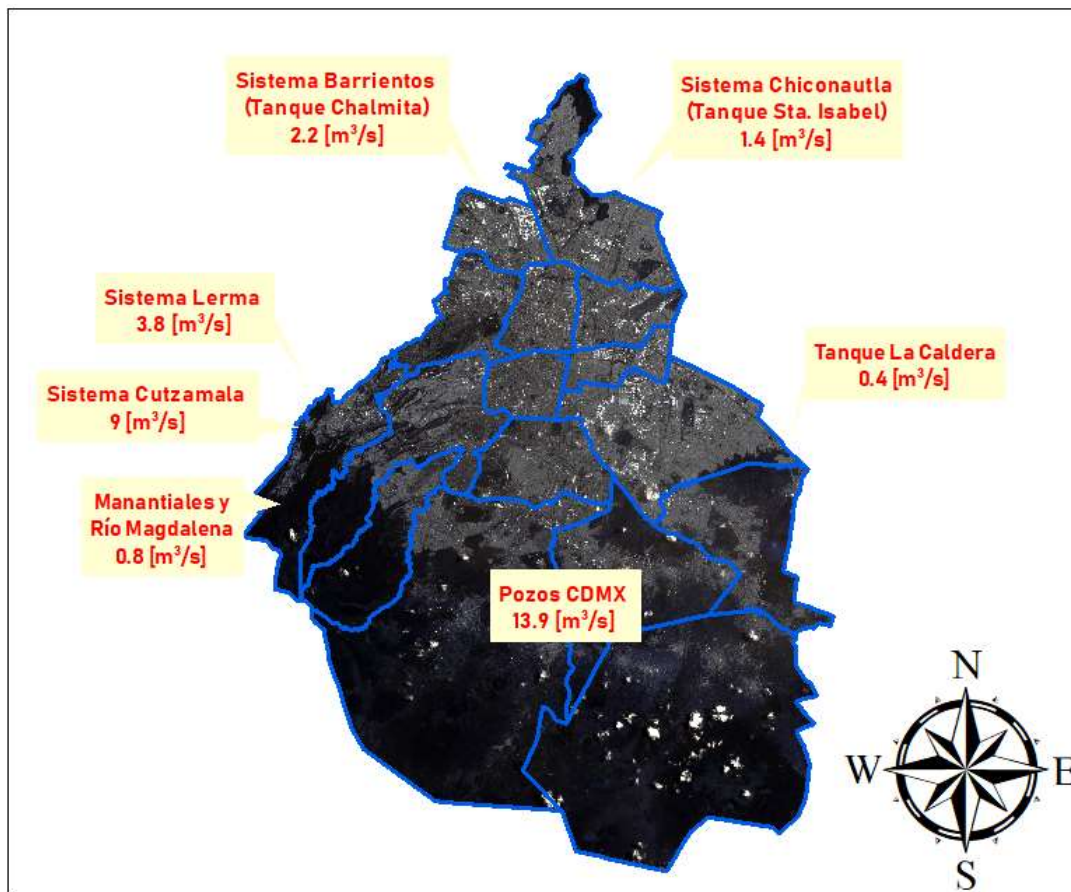


Figura I-8 Fuentes e Infraestructura hidráulica para el Abastecimiento de la CDMX



1.3. PROBLEMÁTICA EN EL SUMINISTRO DE AGUA POTABLE.

El problema del suministro de agua en la Ciudad de México se transfiere a la población, los cuales se ven a la necesidad de comprar tinacos y construir cisternas para almacenar el agua cuando no disponen de ella, así como comprar bombas para que el agua llegue a los tinacos. El contar con estos elementos se considera como una práctica común, siendo esto un indicador que el sistema de abastecimiento no cumple con las necesidades de la población.

Según la encuesta intercensal del INEGI del 2015, en la ciudad de México el 82% de las viviendas poseen un tinaco, existiendo aproximadamente dos millones seiscientos mil tinacos y considerando que en la ciudad hay un millón trescientas mil tomas domiciliarias (SACMEX, 2019), se resume que por cada toma existen en promedio 2 tinacos.

En cuanto a cisternas el 57.9% de los hogares de la ciudad cuentan con una, además, el 64% tiene una bomba para elevar el agua hacia los tinacos. Las cisternas y bombas de la ciudad de México representan el 17% y 19%, respectivamente, del total que hay en nuestro país (INEGI, 2015).

¿Cuánto dinero es necesario invertir para equipar las viviendas con un sistema que mejore el servicio de suministro de agua? Las cifras ascienden entre los 15 y 30 mil pesos dependiendo de la calidad y características de los equipos o elementos.

Los beneficiados son las industrias y empresas encargadas de fabricar y vender bombas y tinacos, junto con la industria encargada en la venta de materiales e insumos para la fabricación de cisternas con grandes capacidades cuya finalidad es almacenar la mayor cantidad de agua posible en caso de falla del sistema de abastecimiento o cortes imprevistos del recurso, sin considerar los gastos adicionales de la compra de agua embotellada debido a que la calidad del agua es mala.

La causa de que se vuelva necesario instalar los equipos antes mencionados en cada una de las viviendas es debido a la baja presión en la red de abastecimiento y el servicio intermitente. En el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) se menciona que la red de abastecimiento debe proporcionar el servicio de agua continuo, en cantidad suficiente, con la calidad requerida y a una presión adecuada (CONAGUA, 2007).



1.3.1. Baja presión.

Es necesario contar con una presión adecuada en la red de distribución, de esta manera se reflejará que el servicio de agua llegue a las tomas domiciliarias y a su destino, la población.

La presión, cuyas unidades en la mayoría de las ocasiones son expresadas en metros columna de agua (mca.) o en kilogramos sobre centímetro cuadrado (kg/cm^2), deben ser las adecuadas para el mejor funcionamiento de los muebles sanitarios y garantizar que el agua llegue a los tinacos y recipientes de almacenamiento satisfaciendo las necesidades que requieren los consumidores. Las presiones de operación deberán ser suficientes para suministrar una cantidad de agua razonable en los niveles más altos de las casas, fábricas y edificios comerciales (no más de 6 niveles).

Para zonas urbanas el MAPAS establece que las presiones deben oscilar entre 1.5 a $4.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$ (15 a 40 mca), mientras que para pequeñas localidades urbanas se admite una presión mínima de $1 \text{ kg}/\text{cm}^2$ (10 mca.). La presión máxima deberá ser menor a $5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ (50 mca.) para evitar problemas en las tuberías tales como rupturas e incremento de fugas (CONAGUA, 2007).

La problemática de baja presión es originada por varias razones, principalmente ocurre en la hora de mayor demanda y cuando aumenta el consumo por el incremento de temperatura (épocas de calor). Al realizar el agua su recorrido en la red de distribución y al presentarse mayor demanda en los puntos de primer contacto ocasionará la disminución de la presión en puntos subsecuentes, reflejándose presiones bajas al final de la red de abastecimiento. En caso contrario las mayores presiones a las que estará sometida una red serán cuando se presente la menor demanda.

Una de las causas principales de la baja presión en la red, es el deterioro de la infraestructura y la antigüedad de esta, ya que en muchos casos la gente de operación manipula y castiga las válvulas para evitar que se presenten mayor cantidad de fugas en los sitios donde el suministro es continuo, de tal forma que al cerrarlas y por las múltiples interconexiones de la red en muchos sitios la presión no es suficiente para llegar a los tinacos o bien, provocan que el agua deba tener un recorrido diferente para el cual fue diseñada, causando mayores pérdidas por fricción.



Actualmente en la Ciudad de México hay 57 estaciones de medición en las cuales se han registrado las presiones de la red primaria monitoreada por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, en la **Figura I-9** se logra observar las presiones máximas registradas durante el año 2019 (SACMEX, 2019).

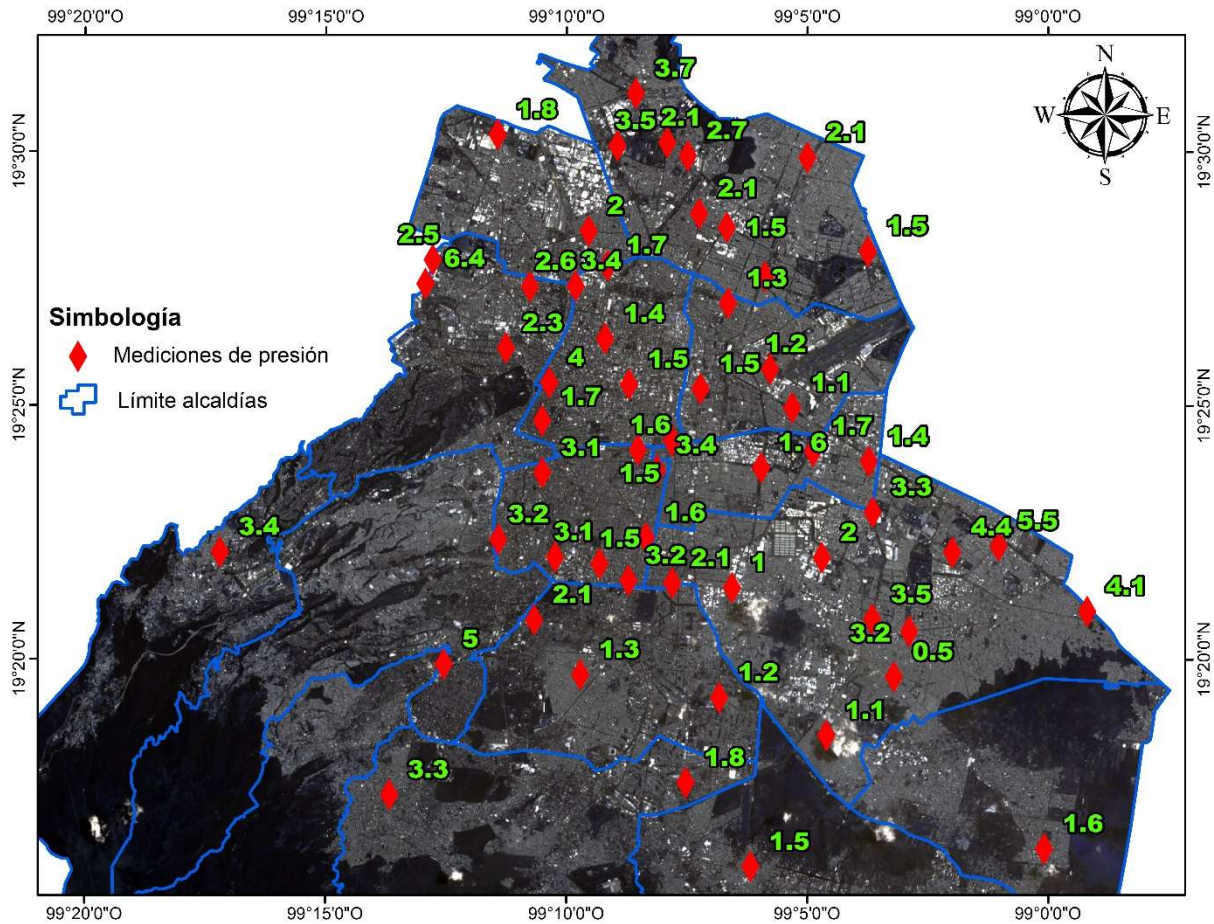


Figura I-9 Mediciones de presiones en red primaria en kg/cm²



1.3.2. Servicio intermitente.

El servicio en la Ciudad de México no es continuo las 24 horas del día, ya que en la red el agua y las presiones no son suficientes, como resultado se abastecen ciertas zonas en determinados tiempos y durante algunas horas, a esta acción se le denomina tandeo, el cual es llevado a cabo por la operación de apertura y cierre de válvulas, debido a la implementación de este programa la población requieren almacenar el agua para contrarrestar las necesidades en el tiempo que no se brinda el servicio.

El aplicar un programa de tandeo y compararlo con un servicio continuo en una misma red de distribución, con la ayuda de mediciones, se puede observar de la **Figura I-10** a la **Figura I-13** que las fugas son menores al suministrar el agua mediante tandeos que hacerlo continuamente. (Capella, 2017).

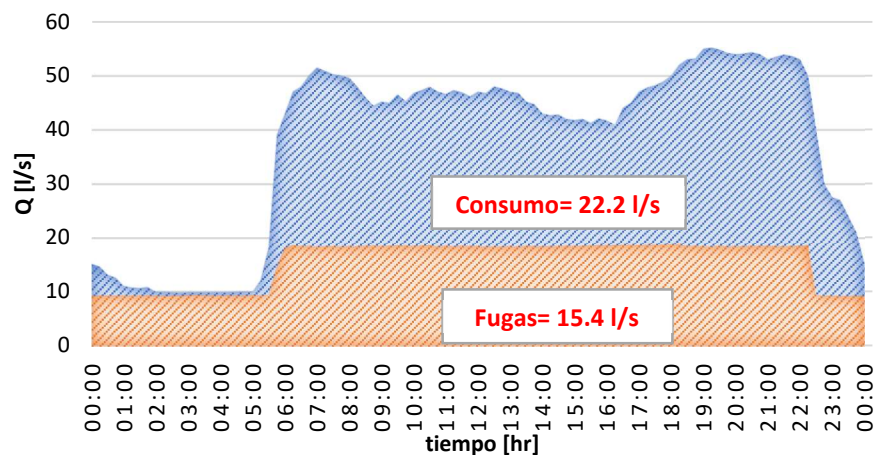


Figura I-10 Ejemplo 1, consumo y fugas sin tandeo

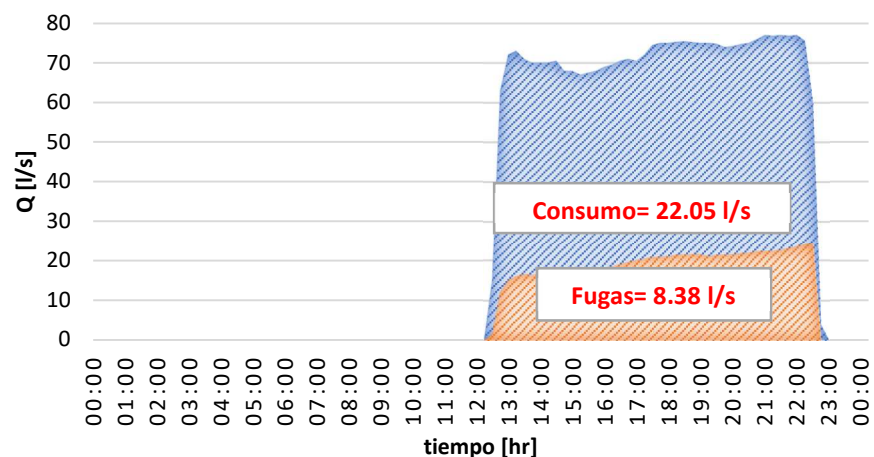


Figura I-11 Ejemplo 1, consumo y fugas con tandeo

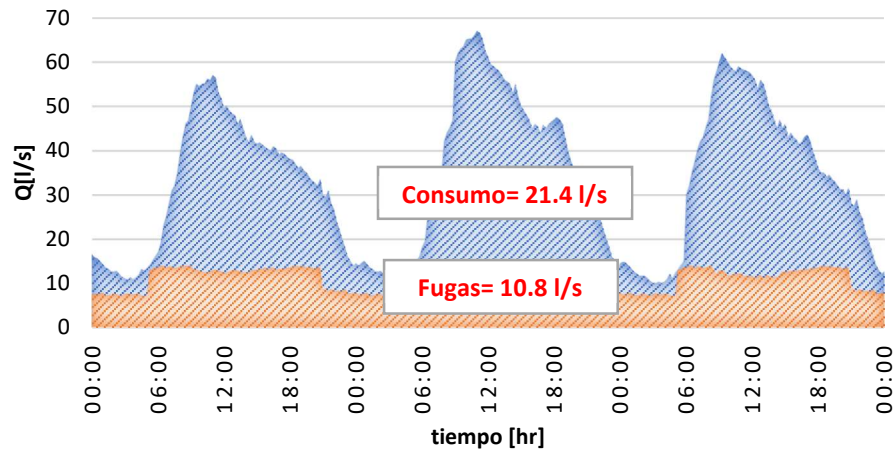


Figura I-12 Ejemplo 2, consumo y fugas sin tandeo del 20 al 22 de marzo 2005

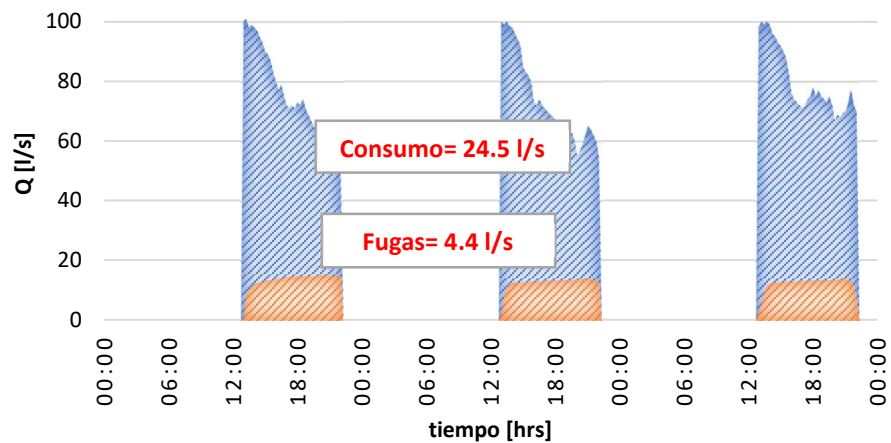


Figura I-13 Ejemplo 2, consumo y fugas con tandeo del 2 al 4 de abril 2005

Los problemas relacionados a los tandeos son:

- Los costos de tandeo son muy altos.
- Fomentan la aparición de nuevas fugas y deterioro hasta en un orden de 10 veces sobre las redes con servicio continuo. Su vida útil puede reducirse de 50 a 5 años.
- Inversión en instalaciones intradomiciliarias para almacenar agua (tinacos y cisternas).
- Problemas sanitarios.



El tandeo más que ser una solución al problema de escasez de agua, incrementa el deterioro de la red y, por tanto, agudiza el problema de falta de agua potable (Machorro, et al., 2013).

El tandeo es una forma de distribuir el agua en forma equitativa (el agua limitada y las horas de disponibilidad), habría que preparar a la red para que opere en estas condiciones disminuyendo los problemas arriba mencionados asociados al tandeo, este procedimiento será llevado a cabo mientras se regulariza el servicio continuo.

1.3.3. Fugas

Las fugas o pérdidas reales forman parte del agua no registrada de un sistema de abastecimiento de agua potable, además de desperdicios por fallas en flotadores de tanques de regulación, las tomas clandestinas, submedición, pérdidas comerciales, etc. (Caballero, 2015).

Entre los factores y causas comunes que provocan fugas son:

- Antigüedad y material de tuberías.
- Profundidad de colocación (colchón).
- Distribución de presiones en la red.
- Mano de obra empleada, materiales y procedimientos en la instalación.
- Operación de la red (tandeo), principalmente.
- Corrosión e incrustaciones.
- Asentamientos en el suelo.
- Actos de vandalismo (sobre todo en redes con tandeo, tomas clandestinas mal instaladas).
- Transitorios (Golpe de Ariete).

Sin embargo, el efecto de las altas presiones en las redes es el factor fundamental que incide en la aparición de fugas, además el estado de la infraestructura y el crecimiento acelerado de la población en las ciudades, no hacen posible rehabilitar o reparar las redes por falta de recursos económicos, de tal forma, que las tuberías están muy deterioradas. Un aumento de presión al doble significaría un aumento de fugas cuatro veces mayor (Capella, 2017).



Las fugas, se representan con el modelo matemático cuya ecuación es la de descarga a través de un orificio (Libro 13, CONAGUA, 2016).

$$q_f = CP^e$$

Donde:

q_f , gasto de fugas

C , cte que se determina con base en el área del orificio y demás condiciones de descarga

P , carga hidráulica (presión en m.c.a.)

e , cte que depende del tipo de descarga, puede variar entre 0.5 y 2.5 dependiendo de la flexibilidad de los materiales de la red y los tipos de fuga en ella.

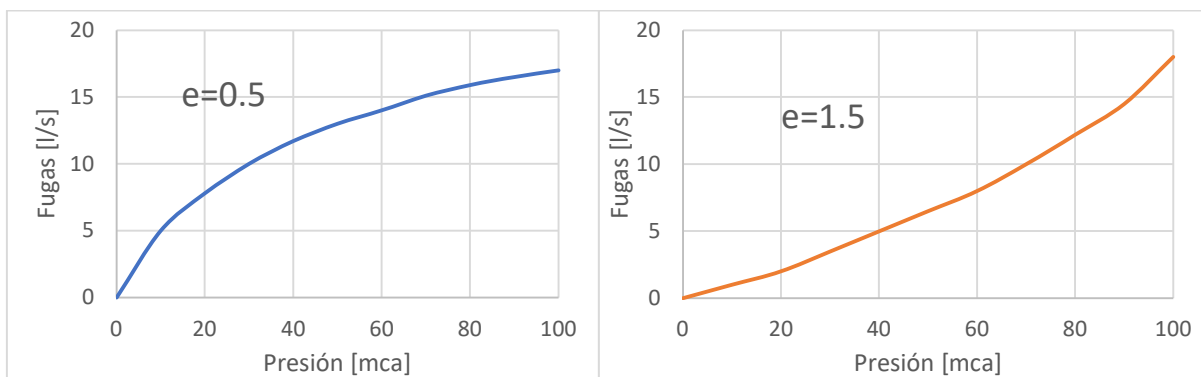


Figura I-14 Fugas en función de la presión con exponentes $e=0.5$ y 1.5

En la Ciudad de México el consumo medio doméstico y no doméstico corresponden a 14.05 y 2.93 m^3/s respectivamente, de tal forma que el consumo total es de 16.88 m^3/s (CADF, 2010), agregando a las cifras anteriores el consumo de una parte de Santa Catarina y algunos sectores del sur y norte de la ciudad, se llega a una estimación total aproximada de consumo medio de 18 m^3/s (Capella, 2017).

Recordando que el suministro de agua en la ciudad es de aproximadamente 31.5 m^3/s y el consumo de 18 m^3/s , las pérdidas físicas corresponderían a la diferencia del suministro y el consumo, teniéndose 13.7 de agua no contabilizada.

Las fugas representan aproximadamente el 95% de las pérdidas totales, mientras que el resto de los factores representan tan sólo el 5% del volumen no facturado, por lo tanto, el porcentaje correspondiente a las fugas en la ciudad de México son del orden 41%.



Tabla I.3 Fugas en la CDMX.

| Categoría | [m ³ /s] | [%] |
|------------------|---------------------|------|
| Suministro | 31.50 | 100 |
| Consumo Total | 18.00 | 57.1 |
| Pérdidas totales | 13.50 | 42.9 |
| Fugas (95%) | 12.85 | 40.8 |

El porcentaje de fugas antes estimado (Tabla I.3) corresponde al estado de la infraestructura actual y la operación del sistema de abastecimiento con tandeos y manteniendo presiones entre 1 y 2 kg/cm², mientras que, en países desarrollados como Paris, Barcelona, Singapur, etc., tienen fugas del orden del 10% al 15% con presiones de 4 y 5 kg/cm² (Capella, 2017).

Sin duda la principal causa de las fugas es el estado de la red, pero el cambiar y reparar tuberías sin previo criterio, ha llevado al fracaso de los programas de reparación de fugas en la ciudad, claro ejemplo: la alcaldía Iztapalapa donde se hicieron en 2003 cambios y reparación de 3,000 km de tuberías en la red secundaria sin lograr ver algún beneficio, en la Figura I-15 se muestra en azul tubería rehabilitada en la alcaldía. Analizar a detalle el fracaso de dicha inversión ayudaría a aprovechar la infraestructura sustituida para futuros proyectos.

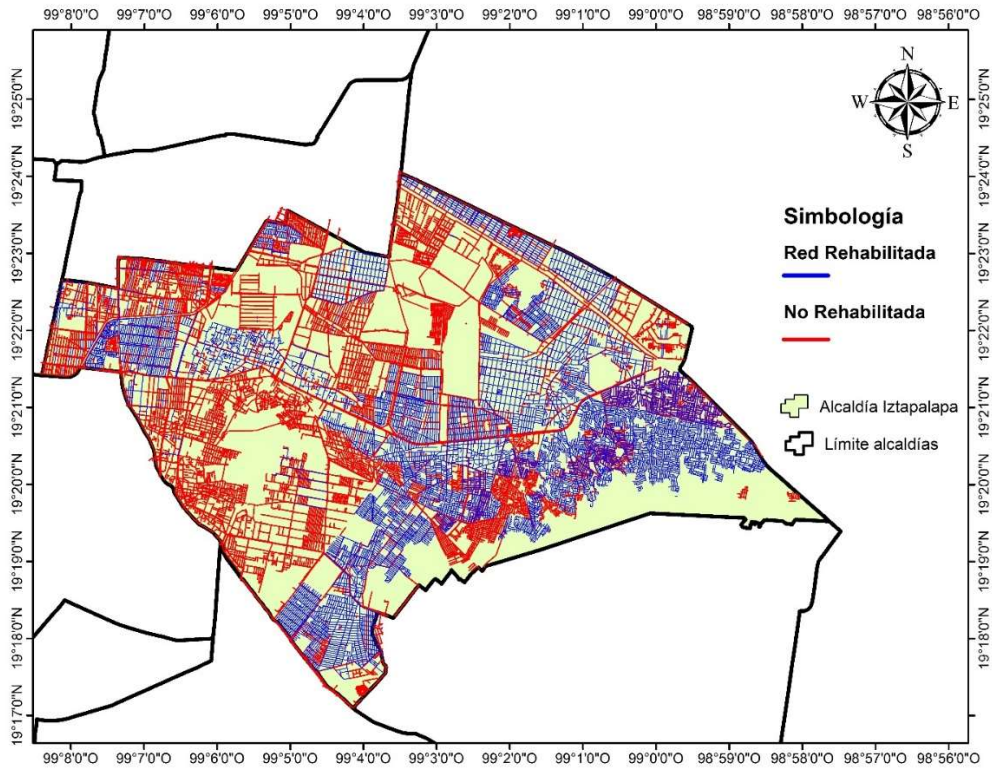


Figura I-15 Cambio de tuberías en Iztapalapa

Los tandeos y las presiones bajas en la Ciudad de México ayudan que las fugas totales no sobrepasen los 13 m³/s. Como bien se sabe, las fugas dependen de la presión, por ello para mejorar el problema de baja presión y contar un servicio continuo se necesitaría implementar un programa que contemple el rescate de la infraestructura de sectorización realizada en años previos para su continuación y puesta en marcha.

Será necesaria la realización de estudios de diagnóstico en los que se contemplen además de otras actividades en la red, la recolección de medición de macro y micro medición, así como el análisis de balances de agua, para determinar la evolución de eficiencias físicas en cada sector de la ciudad, en paralelo llevar a la aplicación un control de presiones y caudales en los sectores. De esta manera, serán identificables los sectores con problemas, planeando el cambio de tuberías donde realmente sean necesarios, o bien ubicar las zonas que requieran la complementación e instalación de micromedidores para la identificación de tomas no registradas y micromedidores con errores de lectura.

El llevar a cabo las actividades anteriormente mencionadas, así como implementar las medidas para reducir el agua no contabilizada, se obtendrá un ahorro de agua el cual se destinaría a las zonas que más la requieren.



II. ZONA DE ESTUDIO

2.1. LÍNEAS DE ESTUDIO.

El agua proveniente de los sistemas Lerma y Cutzamala tienen el primer contacto con la Ciudad de México a través de las alcaldías Álvaro Obregón y Cuajimalpa, de las tuberías de dichos sistemas se derivan cinco líneas denotadas por las avenidas principales que recorren: Camino a Santa Fe, Santa Lucía, Centenario, Las Águilas y Toluca, cada una de ellas divididas y delimitadas gracias a la topografía (**Figura II-1**).

Las líneas de Santa Lucía y Av. Toluca tienen impacto en la alcaldía Benito Juárez, Coyoacán, Iztacalco e Iztapalapa. Estas líneas de red primaria, en conjunto con la red secundaria, en su recorrido abastecen a las localidades de Álvaro Obregón, para que el agua restante que se conduce sea aprovechada en la zona centro sur, Benito Juárez e Iztacalco, donde finalmente parte del agua del Sistema Lerma-Cutzamala llega al rebombeo Cerro de la Estrella para suministrar algunas colonias de Iztapalapa.

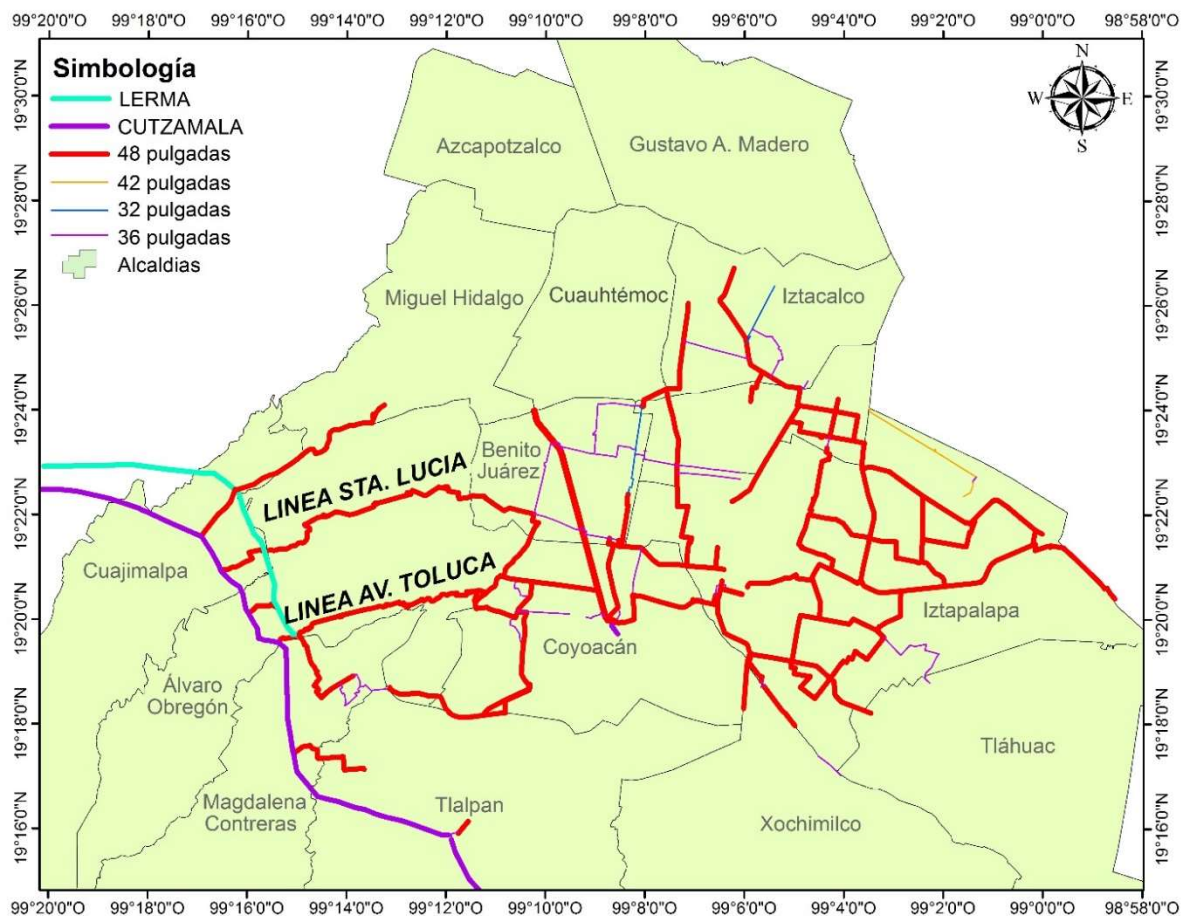


Figura II-1 Líneas de red primaria: Santa Lucía y Av. Toluca



2.1.1. Santa Lucía.

Esta línea inicia su recorrido captando agua del sistema Cutzamala en la Trifurcación Santa Lucía a una elevación de 2565 msnm, trabajando a gravedad con una tubería principal de 48 pulgadas y una longitud aproximadamente de 9.9 km, finalizando metros aguas abajo del tanque Santa Lucía 1 con dos tuberías que conducen agua hacia la alcaldía Benito Juárez de 20 y 48 pulgadas.

Existen un total de nueve tanques **Tabla II.1**, donde los principales trabajan en serie teniendo el mismo nombre “Santa Lucía” identificándose como 5,4,3,2 y 1. Los cuatro tanques restantes que se encuentran en esta línea son de menor capacidad respecto a los principales ya que son utilizados para abastecer colonias pequeñas, las conexiones de dichos tanques son con tuberías de diámetros entre 20, 12 y 10 pulgadas (SACMEX, 2019).

Tabla II.1 Capacidades de tanques en Línea Av. Santa Lucía.

| Tanque | Desplante | Capacidad |
|--------------------------|-----------|-------------------|
| | [msnm] | [m ³] |
| Sta. Lucía 5 | 2520.89 | 7,500 |
| Sta. Lucía 4 | 2486.5 | 20,000 |
| Sta. Lucía 3 | 2441.66 | 20,000 |
| Sta. Lucía 2 | 2371.08 | 45,000 |
| Sta. Lucía 1 | 2309.96 | 18,000 |
| Tanque 1 | 2421.7 | 250* |
| Centenario | 2421.7 | 930* |
| Batallón de San Patricio | 2343 | 1,500* |
| Merced Gómez 2 | 2342.59 | 250* |

* corresponden a capacidades estimadas con ayuda de la vista satelital en Google Earth

La línea en su recorrido en la alcaldía Álvaro Obregón abastece aproximadamente 11.8 km² con una población de 228,506 habitantes, esta información fue obtenida con la población a nivel manzana (INEGI, 2015).

El área de influencia en dicha alcaldía se dividió en doce sectores, (**Figura II-2**), de acuerdo con las propuestas de sectorización del proyecto: “Mejora de la eficiencia del agua potable en la Ciudad de México”, tomando en cuenta el área que abastece cada uno de los tanques que actualmente están en funcionamiento, la geometría de la red primaria (tuberías de 48, 20 y 12 pulgadas) y la topografía, así como sectores previamente construidos.



El consumo de cada sector fue obtenido con los datos de micromedición (SACMEX, 2019) teniéndose las características de cada uno de ellos en la **Tabla II.2**

Tabla II.2 Características de los sectores en línea Santa Lucía.

| Nombre del sector | Población | Consumo | Demanda base |
|-------------------|--------------|-------------|--------------|
| | [Habitantes] | [l/hab/día] | [l/s] |
| AOB-16 | 22,263 | 121 | 31.88 |
| AOB-17 | 6,064 | 123 | 8.66 |
| AOB-17a | 3,873 | 156 | 6.99 |
| AOB-18 | 54,569 | 130 | 82.10 |
| AOB-19 | 17,000 | 167 | 32.87 |
| AOB-20 | 11,213 | 115 | 14.87 |
| AOB-21 | 24,644 | 163 | 46.37 |
| AOB-22 | 40,709 | 121 | 57.12 |
| AOB-30 | 10,625 | 108 | 13.32 |
| AOB-31 | 12,113 | 179 | 25.10 |
| AOB-32 | 15,661 | 178 | 32.26 |
| BJ-05 | 9,772 | 272 | 30.80 |

A lo largo de la línea hasta aguas arriba del tanque Santa Lucía 1, se encuentran dos pozos cuyas características se muestran en la **Tabla II.3**

Tabla II.3 Pozos en línea Santa Lucía.

| Pozo | Gasto | Sector que abastece |
|------------------|-------|---------------------|
| | [l/s] | |
| Merced Gómez 2 | 19 | AOB-31 |
| Olivar del Conde | 27 | Tanque San Patricio |

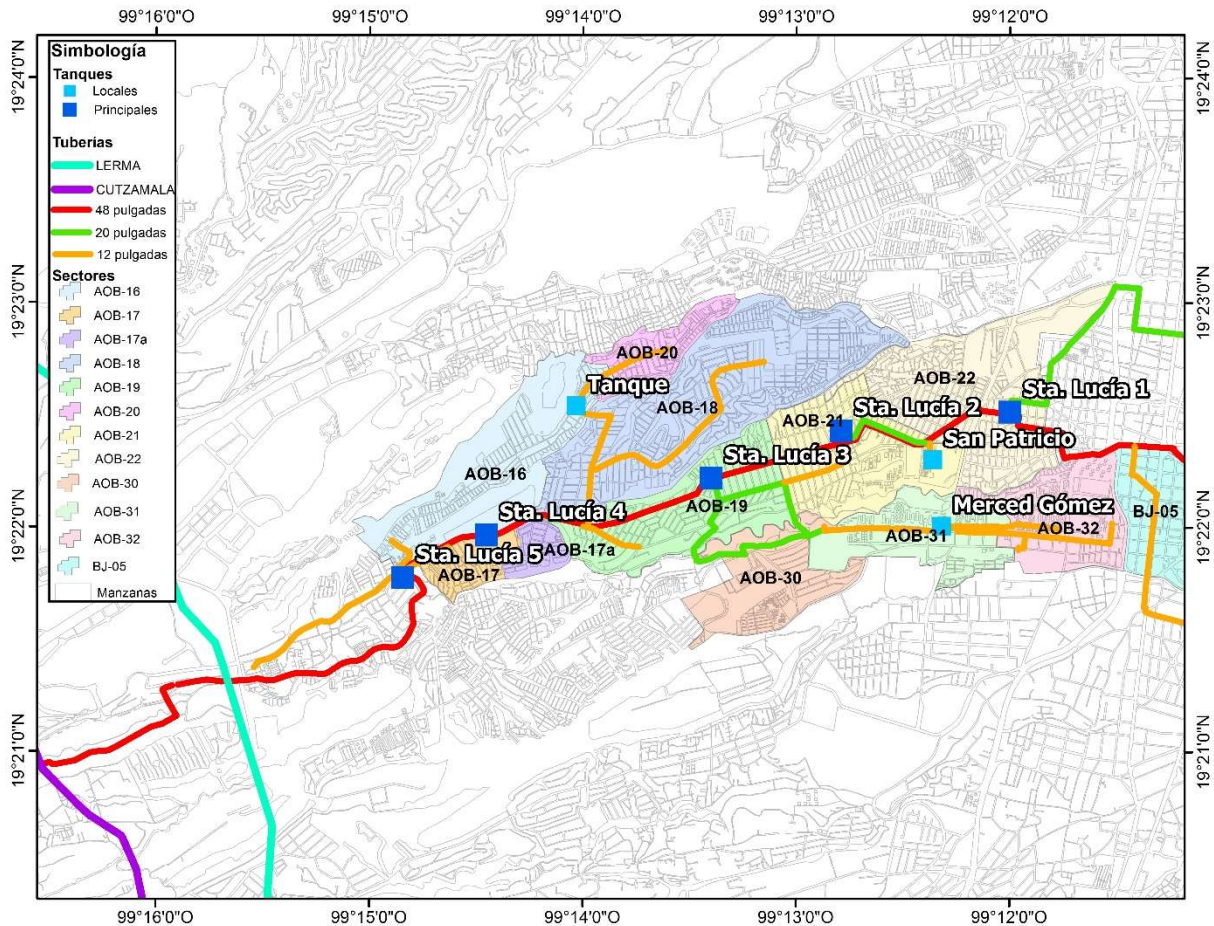


Figura II-2 Red primaria: línea Av. Santa Lucía. Fuente: Catastro SACMEX

Como se ha mencionado, del tanque Santa Lucía 1 salen dos tuberías de 20 y 48 pulgadas, (Figura II-2) enviando un gasto medio diario de 250 l/s y 908.7 l/s respectivamente, para satisfacer el consumo de la alcaldía Benito Juárez y parte de Coyoacán, Iztacalco e Iztapalapa.

Continuando con el recorrido aguas abajo del tanque Santa Lucía 1, el agua sigue su trayectoria hacia las alcaldías de Benito Juárez, Coyoacán, Iztacalco e Iztapalapa a través de la tubería de 48 pulgadas.

La zona abastecida mostrada en la Figura II-3, la componen 33 sectores de Benito Juárez, 18 de la alcaldía Iztapalapa, 11 de Iztacalco y 6 de Coyoacán, siendo así un total de 68 sectores con un consumo o demanda base de 1,638 l/s. La población total de estos sectores ronda cerca de los 820,000 habitantes y un área aproximada de 55 km².



En esta zona se localizan 41 pozos de agua potable que suministran a las colonias vecinas, el gasto total de los pozos oscila cerca de los 1780 l/s, teniéndose en promedio un gasto de extracción de 43 l/s por cada pozo.

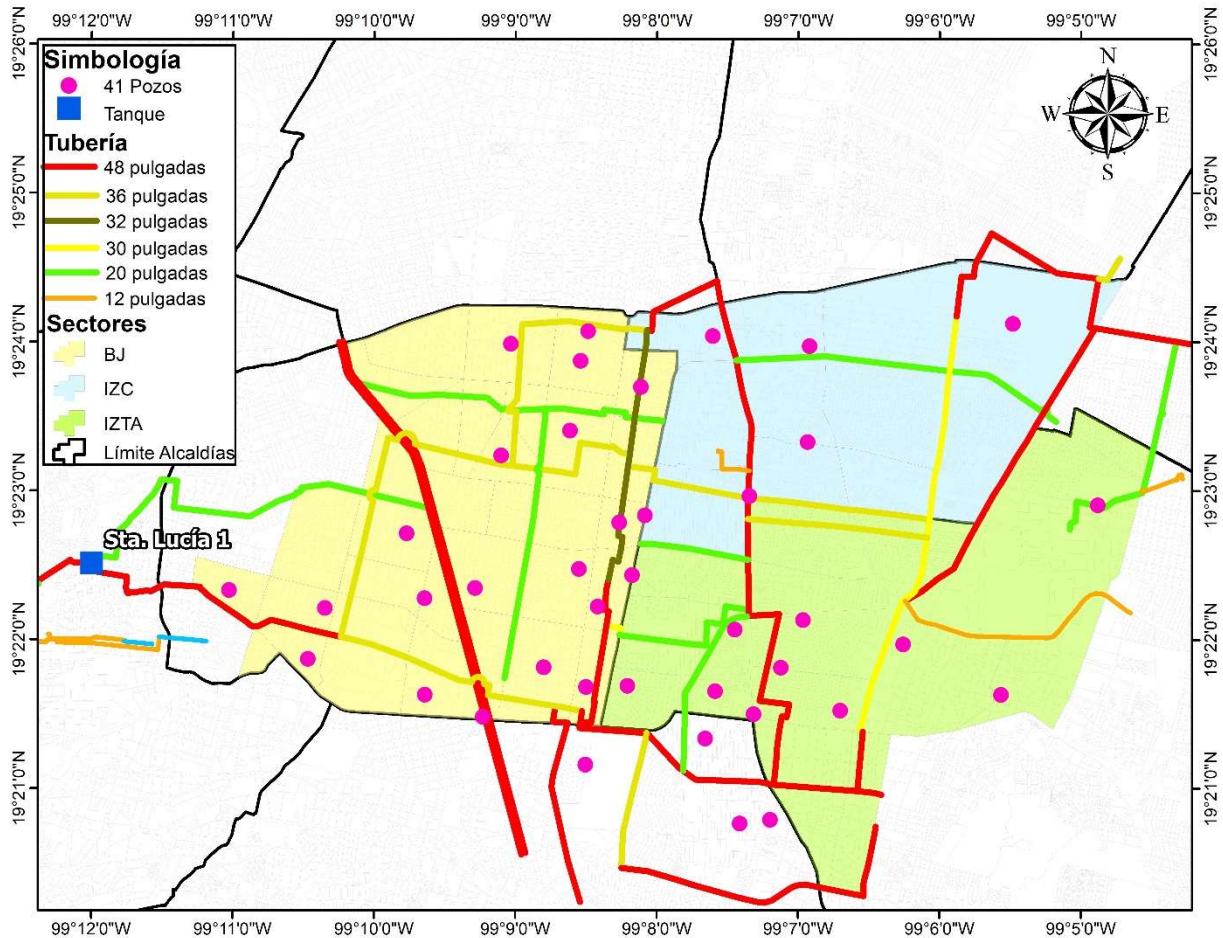


Figura II-3 Sectores abastecidos por el tanque Santa Lucía 1 tubería de 48 pulgadas.



2.1.2. Avenida Toluca.

Esta línea funciona a gravedad tomando agua en la bifurcación Judío-Lerma (ver **Figura II-4**) a una elevación de 2543 msnm, iniciando con una tubería de 48 pulgadas de aproximadamente 9 km (poniente-oriente) y finalizando cerca de avenida M.A. de Quevedo en una cota de 2265 msnm. Dicha línea está conformada por cinco tanques cuyas características se muestran en la **Tabla II.4**

Tabla II.4 Capacidades de tanques en Línea Av. Toluca

| Tanque | Desplante | Capacidad |
|------------------------------|-----------|-------------------|
| | [msnm] | [m ³] |
| Torres 4 | 2543.45 | 37,000 |
| Mimosa | 2466.79 | 18,700 |
| Lienzo | 2408.00 | 18,700 |
| CAO (Cárcamo Álvaro Obregón) | 2354.80 | 8,000 |
| Jardín del Arte | 2284.5 | 1,380 |

El tanque oscilador Jardín del Arte se encuentra en pésimo estado y por lo tanto fuera de servicio al igual que el tanque Torres 4, pero a diferencia del anterior este se encuentra estructuralmente funcional y en condiciones óptimas para su operación (SACMEX, 2019). Actualmente los tanques Mimosa, Lienzo, CAO se mantienen funcionando en serie rompiéndose la carga en cada tanque respectivamente.

El área total que abastece dicha línea en su recorrido es de aproximadamente 5.87 km², con una población total de 35,126 habitantes, (INEGI, 2015). Al igual que la anterior línea se tomaron las propuestas de sectorización del proyecto mencionado que lleva a cabo SACMEX. El consumo de cada sector fue obtenido con los datos de micromedición teniéndose las características de cada uno de ellos en la **Tabla II.5**

Tabla II.5 Características de los sectores en Línea Av. Toluca

| Nombre del sector | Población | Consumo | Demanda base |
|-------------------|--------------|-------------|--------------|
| | [Habitantes] | [l/hab/día] | [l/s] |
| AOB-39 | 6,539 | 153 | 11.55 |
| AOB-40 | 4,325 | 199 | 9.94 |
| AOB-41 | 7,076 | 154 | 12.64 |
| AOB-42 | 15,091 | 227 | 45.73 |
| AOB-43 | 2,095 | 614 | 14.89 |



En lo que respecta a la zona de influencia que abastece esta línea se encuentran cuatro pozos de agua potable que alimentan a los sectores. En la tabla **Tabla II.6** se muestran los gastos aforados que aporta cada pozo y el sector que abastece (SACMEX, 2019).

Tabla II.6 Pozos en Línea Av. Toluca

| Pozo | Gasto | Sector que abastece |
|----------------------|-------|-------------------------------|
| | [l/s] | |
| Olivar de los padres | 10 | AOB-41 |
| Tizapán | 47 | AOB-42 |
| San Jacinto | 31 | AOB-43 |
| San Ángel Inn | 18 | Enviado hacia la red primaria |

Agua abajo del tanque CAO la tubería de 48 pulgadas se bifurca en dos líneas del mismo diámetro, mandando por una de ellas un gasto medio diario de 1330 l/s hacia la alcaldía Coyoacán, mientras que por la otra se envía un gasto constante de 1000 l/s (Figura II-4), cuyo destino es el rebombear Xotepingo y a su vez hacia el rebombear del Cerro de la Estrella, para que finalmente se abastezca de agua parte de la zona alta y plana de Iztapalapa.

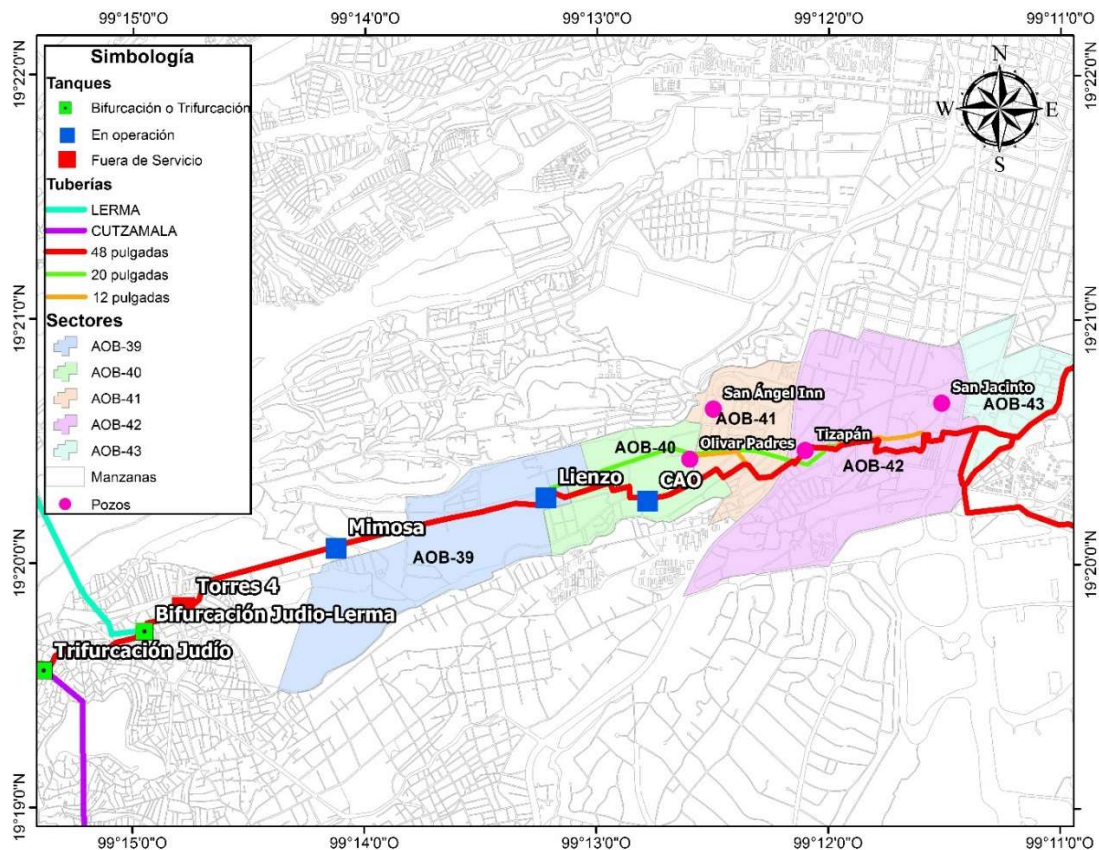


Figura II-4 Red primaria: línea Av. Toluca. Fuente: Catastro SACMEX



2.2. TANQUE TORRES 4

Este tanque de almacenamiento que actualmente se encuentra fuera de funcionamiento, forma parte de la línea de red primaria avenida Toluca, ubicado en avenida de las torres, en la colonia torres de potrero de la alcaldía Álvaro Obregón y cuya administración a cargo es el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, sus coordenadas geográficas son las siguientes:

$19^{\circ}19'49'' N$

$99^{\circ}14'51'' O$



Figura II-5 Vista satelital desde Google Earth del tanque Torres 4.

La capacidad reportada por el mismo sistema es de $37,000 \text{ m}^3$, con dimensiones aproximadas de 120 m de largo, 60 m de ancho y una profundidad de 5 m.

El tanque Torres 4 es de concreto reforzado y de tipo semi-enterrado, fue construido aguas abajo paralelamente con los tanques Mimosa, Lienzo y CAO, cuenta con 54 respiraderos en la parte perimetral del tanque a una altura de 4 metros sobre el nivel de la calle y dos cajas de derivación, en la entrada y a la salida, con válvulas de compuertas tipo vástago. La losa tapa está conformada por elementos prefabricados cuyas dimensiones son de 180x70 cm.



El motivo por el cual el tanque se encuentra fuera de operación es debido a que la bifurcación Judío-Lerma, sitio donde se desvía el agua del sistema Lerma-Cutzamala hacia la línea de avenida Toluca, tiene una elevación de desplante similar a la del tanque Torres 4, por lo tanto la carga hidraulica que proporciona la bifurcación no es suficiente para que el agua llegue al tanque y se comience a llenar.

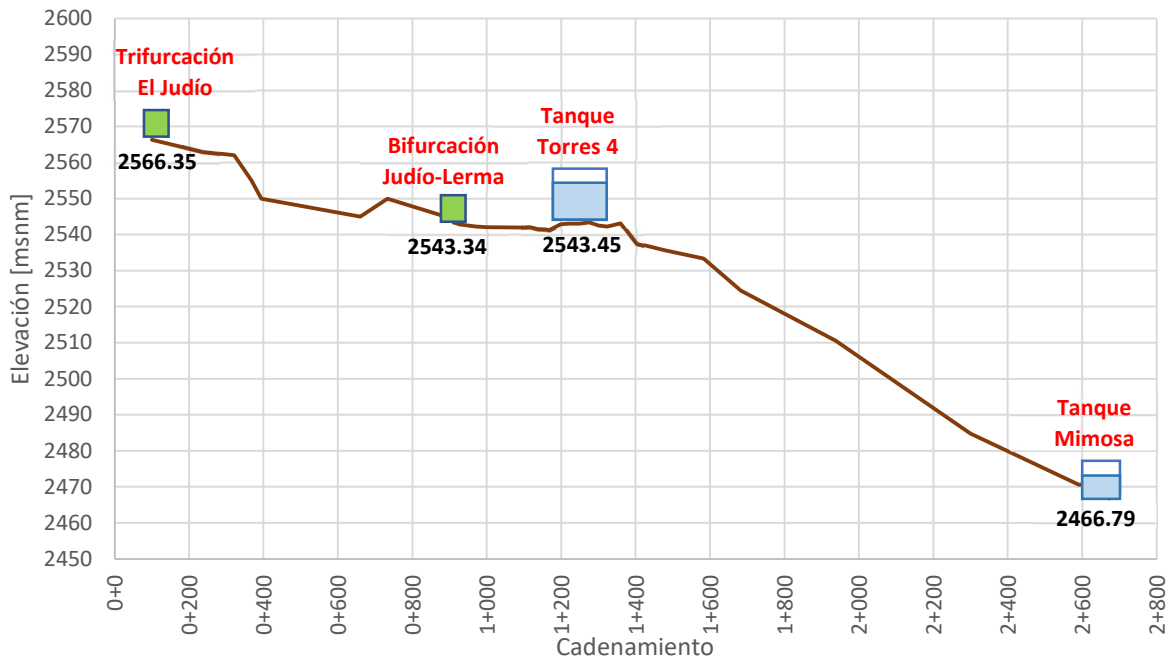


Figura II-6 Perfil de elevaciones de la línea avenida Toluca, inicio en el cadenamiento 0+100

En la **Figura II-6** se muestran las elevaciones correspondientes a la trifurcación y bifurcación que envían agua a la línea, como se puede observar la diferencia de elevaciones entre la bifurcación y el tanque es de 11 cm por ello actualmente la condición de frontera de este subsistema es la bifurcación Judío Lerma la cual proporciona la carga hidráulica suficiente al tanque Mimosa, que se encuentra a una distancia de 1.4 km aguas abajo.



Como parte de la realización de este trabajo, se llevaron a cabo inspecciones del inicio de la línea: avenida Toluca, visitando el tanque Torres 4, la trifurcación el Judío y la bifurcación Judío-Lerma, verificando especialmente el estado estructural y las condiciones en las que se encontraba el tanque, para determinar las acciones que se deberían tomar en caso de que fuera necesaria su operación después de los análisis que se presentan en el próximo capítulo.



Figura II-7 Vista de una de las paredes interiores del tanque

En la **Figura II-7** se muestra el interior del tanque Torres 4, donde el acero de refuerzo se encontraba ligeramente expuesto debido a que el recubrimiento fue desprendido a causa del intemperismo y corrosión del acero. De igual manera se encontraba gran cantidad de basura dentro del tanque.

Algunos respiraderos se encontraban tapados por la basura y tierra, como se había mencionado el tanque es semi enterrado, debido a la topografía del sitio algunos de estos elementos se encontraban totalmente cubiertos u obstruidos por desechos.

El exterior del tanque se mantiene en buen estado, no se logró observar algún daño considerable que comprometa a la estructura, sin pasar desapercibido por el vandalismo con algunas pintas y señas en los muros.



Figura II-8 Caja de válvulas a la entrada del tanque

En cuanto al interior de la caja de derivación al tanque las escaleras tipo marinas, cuyo uso es para la realización de inspecciones y mantenimiento, se encuentran totalmente corroídas y en pésimo estado, mientras que los manuales de las válvulas se localizan “pegados” debido a su nula manipulación (Figura II-8)

Sin considerar estrictos criterios estructurales, a simple vista se podría evaluar que el tanque se encuentra en condiciones para ser sometido a una rehabilitación que no implique grandes costos para su operación si fuese necesario, tomando en cuenta que se podría dirigir el agua desde la trifurcación al tanque Torres 4, colocando un by-pass que evitaría el uso de la bifurcación Judío-Lerma (

Figura II-9), de tal forma que la trifurcación el Judío emplee su carga total para llenar el tanque Torres 4.

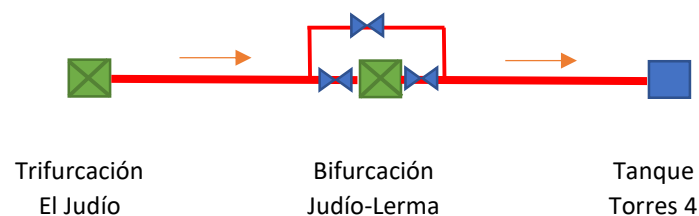


Figura II-9 Arreglo de by-pass



2.3. MODELOS EN EPANET

Con la información disponible del catastro de la red primaria de agua potable, se construyó el modelo numérico de la línea (ver **Figura II-10**) para su estudio, se procedió a analizarla en el software EPANET, con el fin de realizar las simulaciones durante un periodo de 96 horas interpretando las condiciones actuales, tomando en cuenta la información aguas abajo de las líneas de avenida Toluca y Santa Lucía para conducir el agua hacia el oriente de la ciudad. El objetivo del estudio en el modelo numérico es verificar el funcionamiento de la línea av. Toluca con la operación del tanque Torres 4 y algunas variantes de la misma línea que se presentan en el capítulo III.

2.3.1. Trazo de la red.

Las simulaciones se concentrarán en la línea de avenida Toluca, considerando la información de la línea de Santa Lucía y la zona de Benito Juárez e Iztacalco. El plano del catastro de la red de agua potable fue indispensable para realizar el trazo del modelo en el software EPANET, información fue obtenida del SACMEX.

La actualización de la información de estos planos en la ciudad no ha sido continua, recientes versiones oscilan entre los años 90's, por ello la verificación de información en campo se volverá indispensable y considerar un levantamiento topográfico dependerá si se cuenta con datos confiables. Para el caso de la línea de estudio la información obtenida ha sido corroborada por diferentes fuentes. Debido a que el objetivo es analizar el funcionamiento de la línea con el tanque Torres 4 el trazo se realizó desde la trifurcación El Judío, el modelo cargado en el software se muestra en la **Figura II-10**.

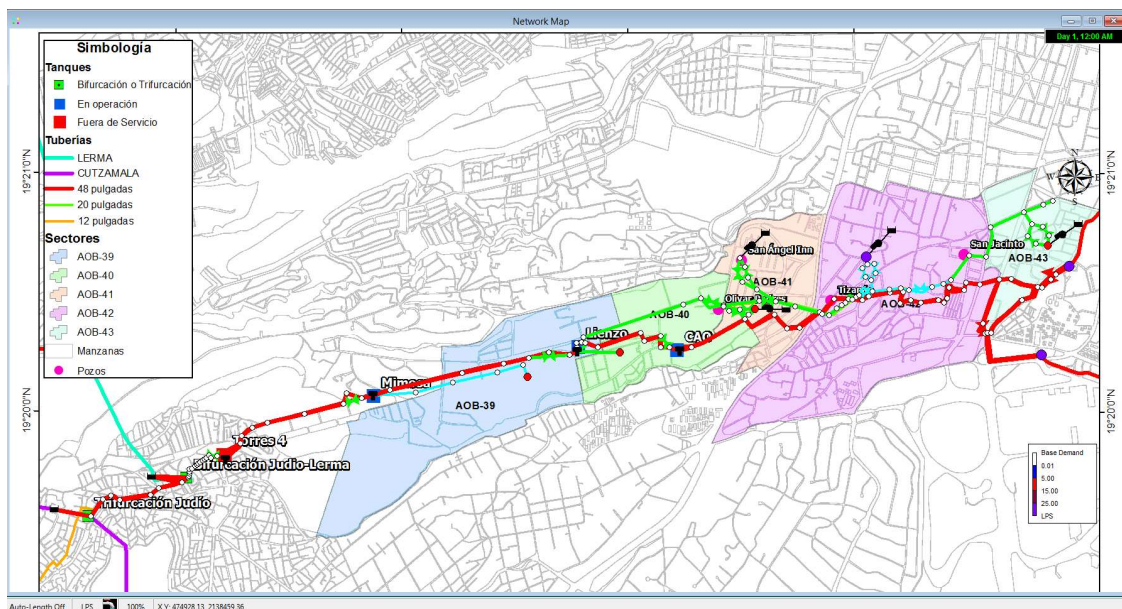


Figura II-10 Modelo en EPANET



Dicho modelo cuenta con los siguientes elementos:

- 139 nodos y 142 tubos
- 6 reservorios (2 representando la bifurcación y la trifurcación y 4 para los pozos)
- 4 tanques
- 4 bombas
- 18 válvulas (FCV, PRV, PSV)

El software solicita la información de elevaciones de los elementos, por ello, del plano proporcionado por SACMEX se obtuvo la información de la **Tabla II.4** y la **Tabla II.6** para cargar en el modelo lo correspondiente a los tanques y pozos, mientras que las elevaciones de los nodos se adquirieron de las curvas de nivel a cada metro en el archivo con extensión .dwg, correspondiente a la topografía de una imagen satelital de la Ciudad de México (LIDAR).



Figura II-11 Contorno de elevaciones línea: avenida Toluca

Para el modelo se utilizó la expresión de Chezy-Manning ya que dicha expresión es utilizada generalmente para canales y tuberías de gran diámetro:

$$hL = A * Q^B$$

donde:

hL: pérdida de carga

Q: Gasto

A: Coeficiente de resistencia

B: Exponente del caudal

Para la expresión de pérdidas calculadas con Manning:

$$\text{Coef. Resistencia (A)} = 10.294 n^2 d^{-5.33} L$$

$$\text{Exponente de caudal (B)} = 2$$



El coeficiente n de Manning depende del material de la tubería, al ser de concreto reforzado el valor puede variar entre 0.012 y 0.017 según la **Tabla II.7**. Debido al tiempo en el que fue instalada la tubería, años 60-70's, y a pesar de transportar agua potable el coeficiente de rugosidad se consideró de 0.018 ya que la velocidad en la que se conduce el agua ocasiona la erosión del conducto y de recientes inspecciones con un dispositivo de la línea de 48 pulgadas, en Av. Paseo del Río, en la cubeta de la tubería se encontraron una especie de sedimentos (SACMEX, 2019).

Tabla II.7 Coeficiente n de rugosidad de Manning.

| Material | n | Material | n |
|---|-------------|-------------------------------|-------------|
| Plástico (PE, PVC) | 0.006-0.010 | Fundición | 0.012-0.015 |
| Poliéster reforzado con fibra de vidrio | 0.009 | Concreto revestido con gunita | 0.016-0.022 |
| Acero | 0.010-0.011 | Concreto | 0.012-0.017 |
| Hierro Galvanizado | 0.015-0.017 | Revestimiento Bituminoso | 0.013-0.016 |



2.3.2. Patrón de demanda.

El patrón de demanda horario estará definido por los coeficientes de variación horaria dependiendo del consumo en la Ciudad de México. En la **Figura II-12** se muestra el patrón típico de la ciudad, donde los usuarios predominantes son de tipo doméstico, este fue obtenido de mediciones sin considerar las fugas debido a que los valores reportados corresponden a la micromedición. El valor promedio de los coeficientes de variación es de uno.

En las simulaciones no es objeto representar las fugas en función de la presión, por ello con los datos de fugas en la red de la ciudad que se muestran en la **Tabla I.3**, se construyó un patrón de demanda bajo la hipótesis de que las fugas son del 41% de la demanda en los sectores.

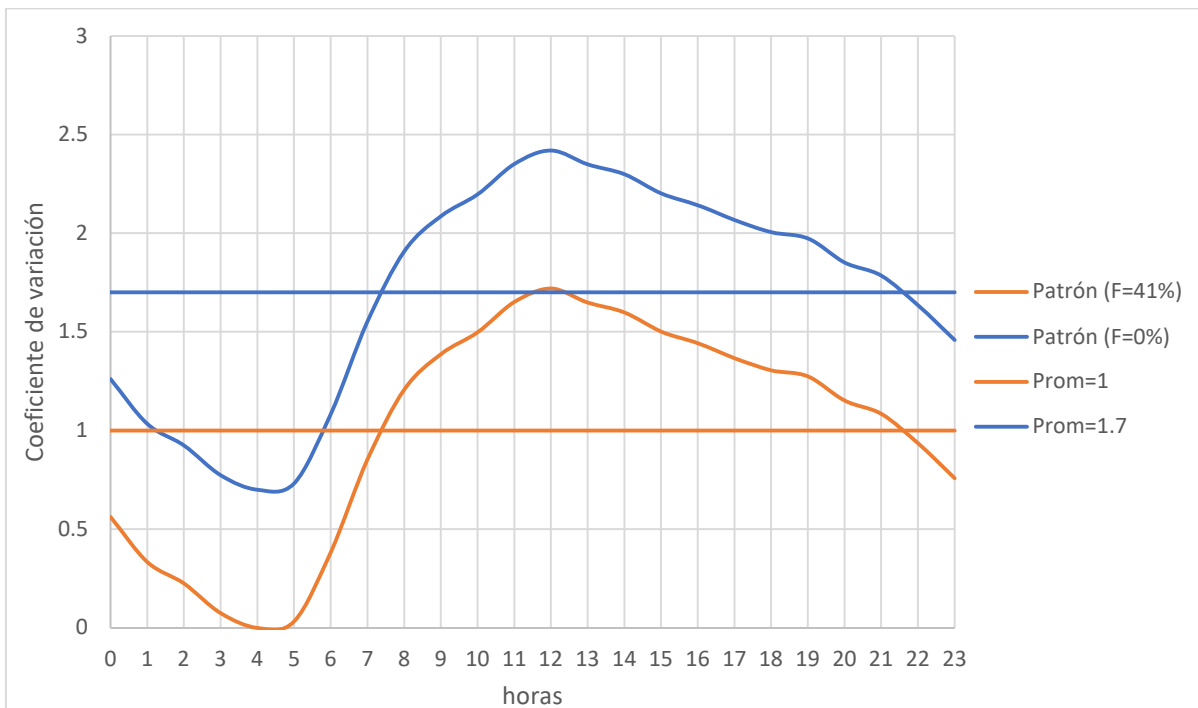


Figura II-12 Patrón de demanda con el 41% de fugas.

Para el patrón con 41% de fugas, el valor medio de los coeficientes de variación es de 1.7. En los coeficientes para cada una de las horas, se le añadió el valor de 0.7 de tal forma que el promedio paso de 1 a 1.7.

Supongamos un sector con un consumo de 100 l/s al multiplicar dicho valor por 1.7 se obtiene una demanda de 170 l/s, con fugas de 70 l/s, correspondientes al 41%.



III. ANÁLISIS

Como se ha mencionado desde los capítulos anteriores, las líneas que recorren por el poniente de la ciudad, en la alcaldía Álvaro Obregón, son de gran importancia para enviar agua al centro y al oriente de la ciudad. Se analizarán las condiciones actuales del funcionamiento de los 3 subsistemas: avenidas Santa Lucía, Toluca, y la zona de las alcaldías de Benito Juárez, Iztacalco e Iztapalapa.

Se procederá a la simulación de la línea de avenida Toluca con el fin de verificar el comportamiento de los niveles en los tanques de dicha línea en condiciones actuales, posteriormente en otro modelo se le añadirá el tanque Torres 4 y se simulará y analizará el impacto de este sobre los demás tanques y la zona que abastece.

Las dos simulaciones anteriores, representación de las condiciones actuales con el tanque Torres 4 fuera de servicio y en operación, forman parte de un primer análisis. El gasto de entrada para el primer tanque ya sea el Mimosa o el Torres 4, según la condición a analizar se mantendrá constante, mientras que los tanques aguas abajo para cada condición tendrán válvulas de control de flujo en función de los niveles en los tanques.

El segundo análisis, como el primero, el gasto de entrada para el primer tanque ya sea el Mimosa o el Torres 4, según la condición a analizar, se mantendrá constante. Mientras que los tanques aguas abajo para cada condición tendrán un gasto de entrada constante a excepción del tanque CAO con la finalidad de disminuir las condiciones de operación en lo mayor posible.

Un paro en el sistema Lerma-Cutzamala por mantenimiento o simplemente por una falla podría ser catastrófico, en el modelo, un tercer análisis, definirá que las bifurcaciones que alimentan a la línea de avenida Toluca son detenidas por completo. Previamente, debido a los anuncios del mantenimiento de los sistemas Lerma-Cutzamala, los tanques se llenarían como medida al recorte de agua, se verificarán los tiempos de respuesta del sistema con y sin el tanque Torres 4.

Finalmente, en el cuarto análisis se tratará de enviar por la línea de avenida Toluca el agua que actualmente sale de la tubería de 48 pulgadas del tanque Santa Lucía 1. De esta manera se verificará si el sistema con el tanque Torres 4 es capaz de enviar el agua que se necesita principalmente en la zona de la alcaldía de Benito Juárez y parte de las demás alcaldías que se encuentran a su alrededor.



3.1. ANÁLISIS DE LA RED PRIMARIA, CONDICIONES ACTUALES

En este apartado se muestran las 4 condiciones que se presentaron con anterioridad, con el tanque Torres 4 fuera de operación. La frontera del sistema, la bifurcación el Judío-Lerma, proporciona la carga hidráulica necesaria para llenar el primer tanque aguas abajo de la línea, el tanque Mimosa, enviando un gasto medio de 2395 l/s necesario para cada una de las condiciones analizadas a continuación.

3.1.1. Condición 1

Esta simulación es la más apegada a la realidad, con la válvula de entrada al tanque Mimosa entregando un gasto constante de 2395 l/s, posteriormente los tanques aguas abajo; poseen una serie de controles que evitan el llenado o vaciado repentidamente.

En el modelo se asignaron 5 reglas de operación a las válvulas de control de flujo (FCV), que se ubican a la entrada de cada tanque y según dependiendo el nivel de estos las válvulas permiten el paso de un determinado gasto hacia los tanques. Las reglas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla III.1 Reglas de control, simulación: condición 1

| Regla | Válvula de entrada al tanque (l/s) | | |
|-----------------|------------------------------------|--------|------|
| | Mimosa | Lienzo | CAO |
| Nivel < 1.5 | 2395 | 3000 | 2800 |
| 1.5 < Nivel < 2 | | 2900 | 2400 |
| 2 < Nivel < 2.5 | | 2200 | 2000 |
| 2.5 < Nivel < 3 | | 2000 | 1800 |
| 3 < Nivel | | 1550 | 1400 |

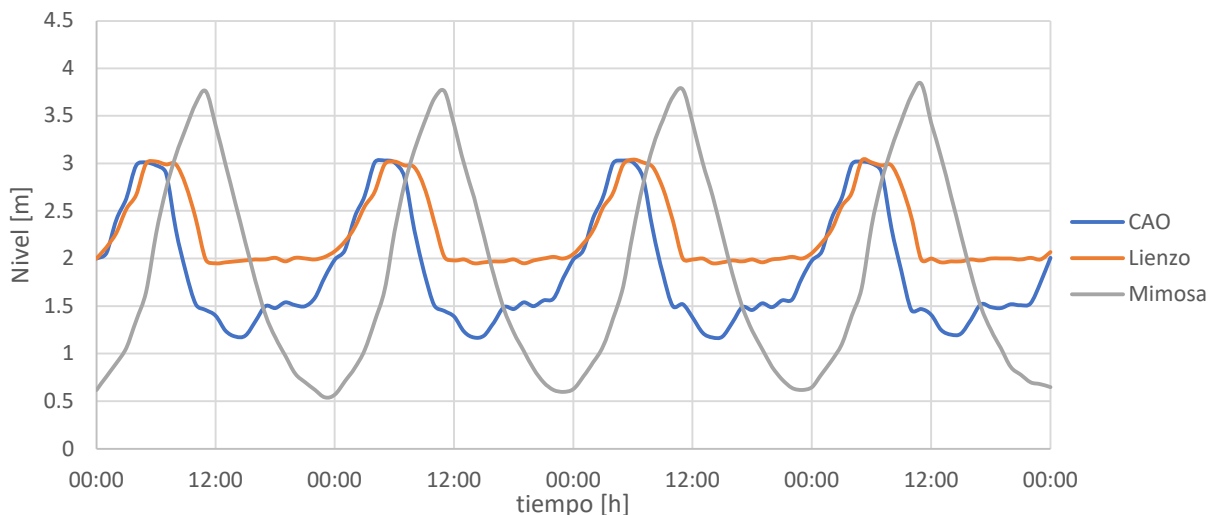


Figura III-1 Niveles de los tanques reportados en la simulación, condición 1.



El gasto de entrada a la línea de 2395 l/s, corresponde al gasto medio horario necesario para abastecer a la zona de influencia, en este caso los sectores y el agua enviada hacia la alcaldía de Coyoacán y hacia la planta de bombeo Cerro de la Estrella. El gasto medio horario, sin considerar los pozos de la línea dentro de la alcaldía Álvaro obregón, corresponde a 2487 l/s, de tal manera que al contabilizar el agua extraída de los pozos el gasto de entrada necesario disminuye a 2381 l/s, pero en la hora de máxima demanda no son suficientes para suministrar a la población por ello el gasto medio diario aumentó de 2381 a 2395 una diferencia de 14 l/s.

Tabla III.2 Gasto medio suministrado hacia la línea avenida Toluca.

| Sectores | Consumo [l/s] | Q _{MD} |
|------------------|---------------|-----------------|
| AOB-39 | 11.55 | 19.63 |
| AOB-40 | 9.94 | 16.89 |
| AOB-41 | 12.64 | 21.48 |
| AOB-42 | 45.73 | 77.74 |
| AOB-43 | 14.89 | 25.31 |
| Coyoacán | 780 | 1326 |
| Tanques C.E | 1000 | 1000 |
| Pozos en la zona | -106 | -106 |
| Total | | 2381 |



3.1.2. Condición 2

En esta condición se propusieron menor cantidad de reglas para disminuir la operación y manipulación de válvulas aumentando la facilidad operativa, suministrando al inicio de la línea el mismo gasto constante a la anterior condición de 2395 l/s, entrando al tanque Mimosa, posteriormente al Lienzo y finalmente al CAO, debido a su capacidad este contará con otras reglas de operación que no dependen del nivel de agua que se presente en el tanque sino de la hora del día.

Tabla III.3 Reglas de control, simulación: condición 2

| Regla | Válvula de entrada al tanque (l/s) | | |
|--------------|------------------------------------|--------|------|
| | Mimosa | Lienzo | CAO |
| A la hora 0 | 2395 | 2375 | 1945 |
| A la hora 2 | | | 1900 |
| A la hora 8 | | | 2600 |
| A la hora 14 | | | 2580 |
| A la hora 20 | | | 2363 |

De acuerdo con las reglas establecidas la variación de los niveles en los tanques para esta condición se muestra en la **Figura III-2**

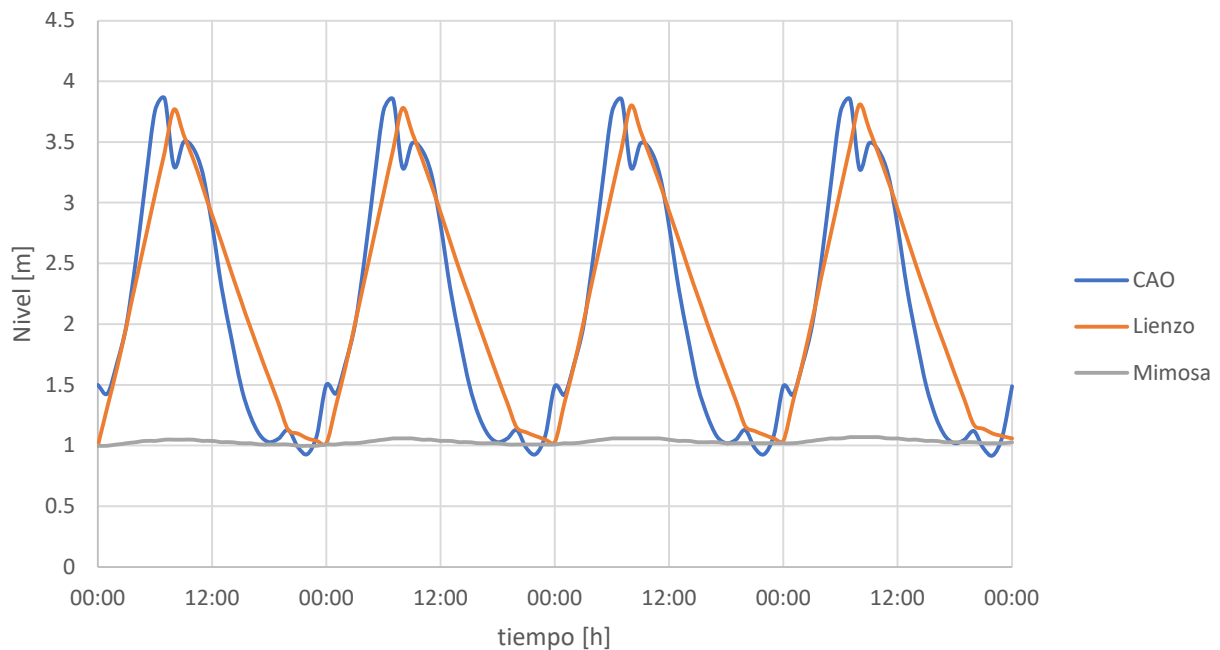


Figura III-2 Niveles de los tanques reportados en la simulación, condición 2.



A diferencia de la primera condición, el tanque Mimosa presenta ligera variación en los niveles de este, de tal forma que los subsecuentes, Lienzo y CAO tienen variaciones en los niveles significativamente, con valores entre 1 y 3.7 metros. Las variaciones del consumo son absorbidas por los tanques finales de la línea, teniéndose un tanque subutilizado, el Mimosa.



3.1.3. Condición 3

En esta simulación se detuvieron las fuentes de abastecimiento, sistema Lerma-Cutzamala, para verificar el tiempo de respuesta del sistema, en el cual se sigue abastecimiento a los sectores y las zonas que se mencionaron en la condición 1.

Previamente, se llenaron cada uno de los tanques hasta su nivel máximo (4 metros) y se realizó la simulación con las reglas de operación definidas en las válvulas de control de flujo a la entrada de los tanques de la condición 1 (Tabla III.1).

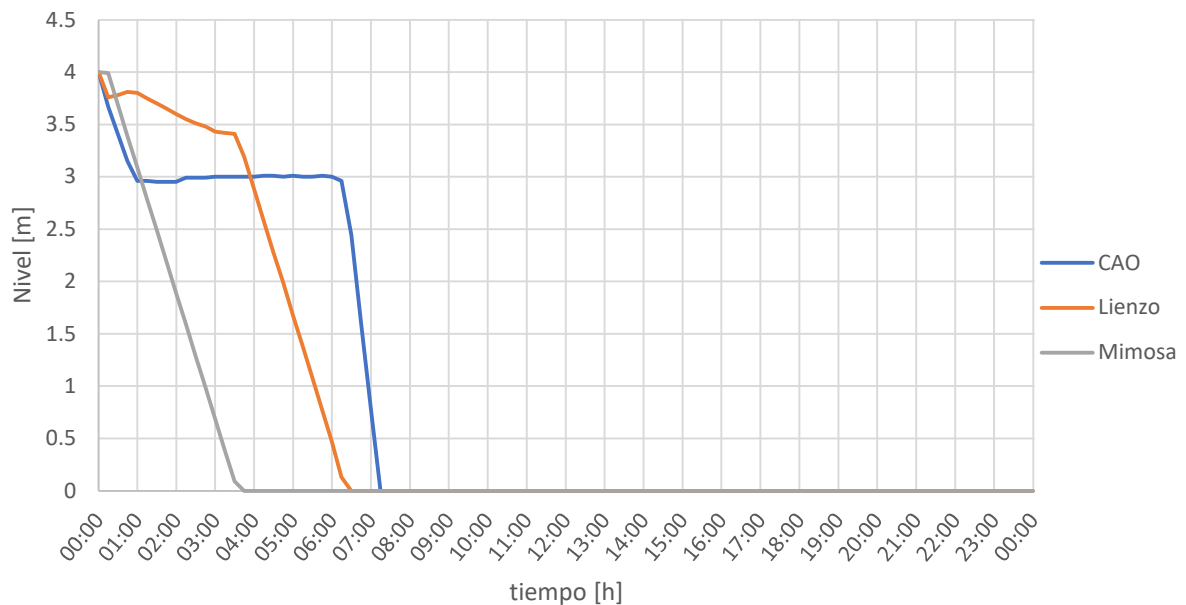


Figura III-3 Niveles de los tanques reportados en la simulación, condición 3.

Como se puede observar los tanques Mimosa y Lienzo se vacían a las horas 03:30 y 06:30, respectivamente, mientras que el último tanque de la línea (CAO) se vacía después de que transcurren 07:15 horas.

El paro de las fuentes de abastecimiento puede ocurrir en cualquier hora del día, si bien en esta simulación se considera que previamente se llenaron los tanques y el vaciado de estos inicia en la madrugada, se estarían alimentando netamente las fugas (a la hora de presiones máximas) de tal manera que el tiempo de respuesta de los tanques incrementaría si se controlaran las presiones en la madrugada, así como el gasto suministrado.



3.1.4. Condición 4

Para este análisis se considera que se presenta una falla en la tubería de 48 pulgadas de Santa Lucía, tratándose de enviar el agua por la red primaria de avenida Toluca hacia las alcaldías abastecidas por la primera línea, esto es posible debido a la interconexión que existen entre las líneas aguas abajo de los tanques, para lo cual será necesario realizar alguna manipulación de válvulas para permitir el paso del agua de un lugar hacia otro.

Como bien se mencionó, el agua que sale del tanque Santa Lucía 1 abastece a una zona que está compuesta por 68 sectores con un consumo de 1638 l/s y 41 pozos con un gasto de 1780 l/s. Debido a que en cada sector se le asignó un patrón de demanda con fugas del 41% (**Figura II-12**) en la simulación de la zona se observa que el gasto de pozos se agota totalmente por la demanda estimada de fugas, de tal forma que el agua demandada por la zona tiene un comportamiento mostrado en la **Figura III-4**.

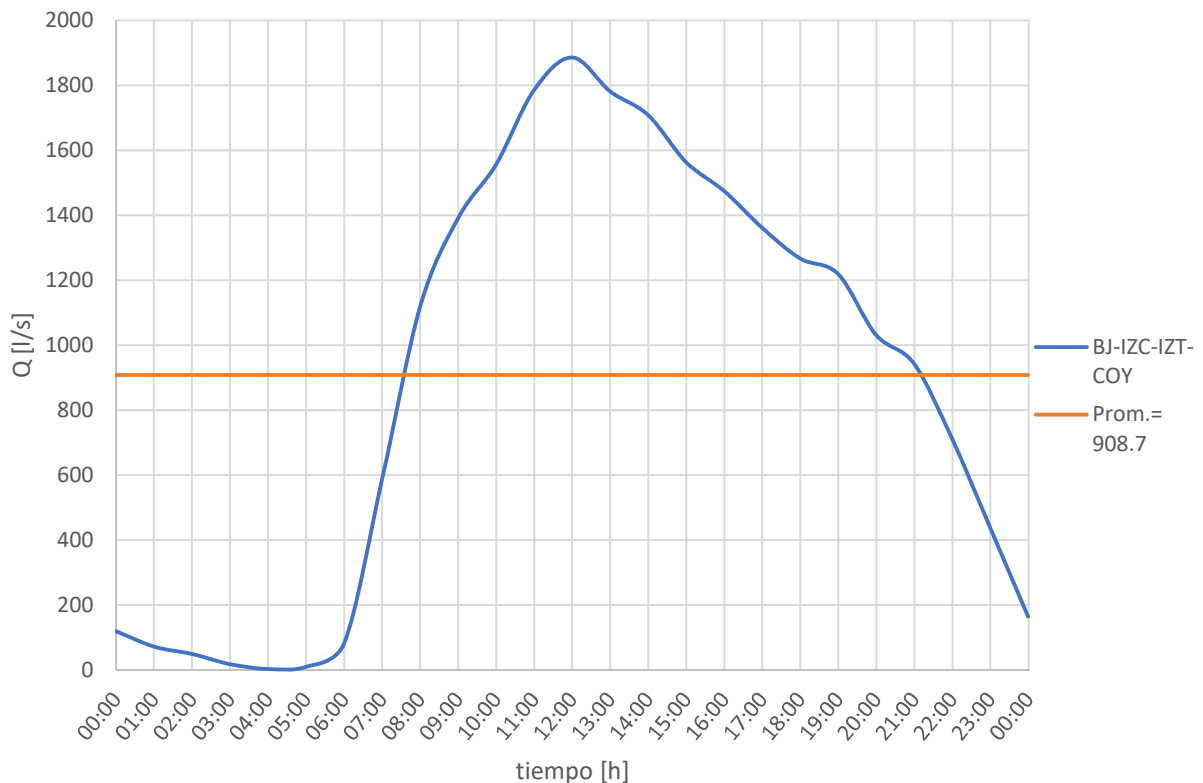


Figura III-4 Demanda BJ-IZC-IZT-COY

Se construyó un patrón de demanda que al multiplicar cada coeficiente de variación horaria por la demanda base (908.7 l/s) se obtuvieran los gastos de la **Figura III-4**.

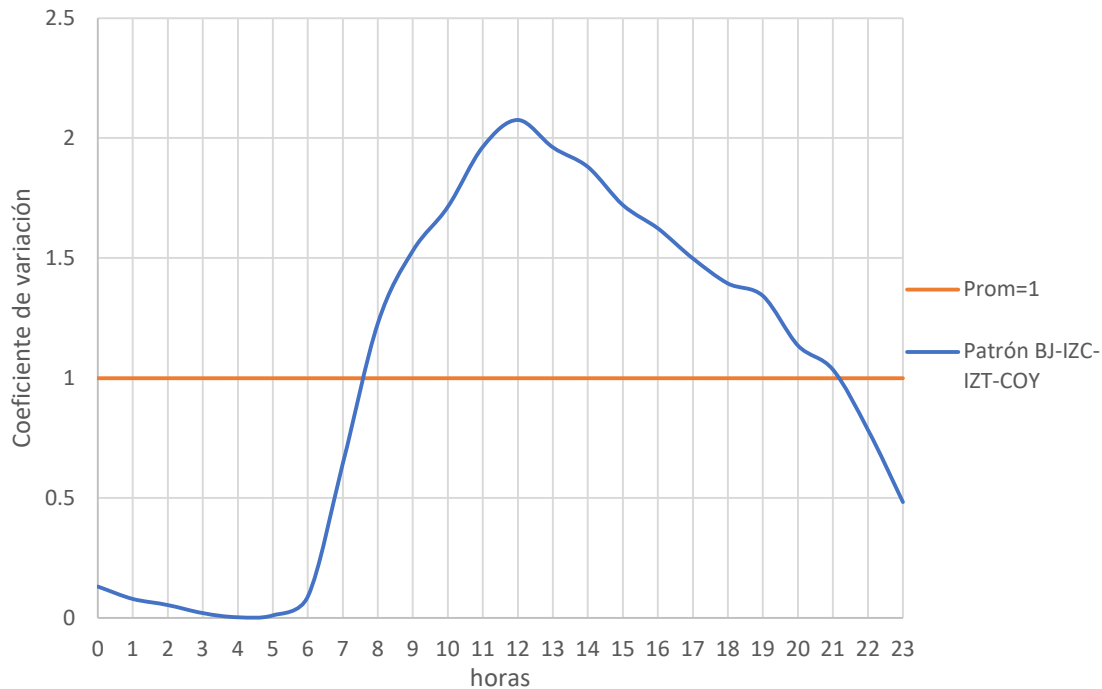


Figura III-5 Patrón de demanda BJ-IZC-IZT-COY

A la simulación de la línea de avenida Toluca en condiciones actuales se le añadió la demanda base de 908.7 l/s con su respectivo patrón (Figura III-5), y así obtener las nuevas reglas de control de las válvulas a la entrada de los tanques Lienzo y CAO, considerando que a la entrada del primer tanque (Mimosa) se mantuviera un gasto constante de 3250 l/s.

Finalmente, con los tanques que actualmente se encuentran en operación y con un suministro constante a la entrada del primer tanque, no se logró regular la variación del flujo que demandaba la línea en condiciones actuales más la zona a la que se estaría alimentando con esta condición. Esto fue debido a que el gasto constante de entrada al primer tanque (3,250 l/s) en las horas de máxima demanda se vaciaba de manera repentina, y en las horas de mínima demanda el tanque se llenaba hasta desbordarse en el modelo, mientras que los otros tanques aguas abajo sucedía algo similar.

De esta manera se comprobó que la capacidad de los tres tanques que actualmente operan no son suficientes para cumplir con el 100% de la demanda (3250 l/s) y regular la variación del consumo de la zona actual a la que abastecen y a la que tendrían que abastecer en dado caso que se presentara una falla en la línea de Santa Lucía.



3.2. ANÁLISIS DE LA RED PRIMARIA CON EL TANQUE TORRES 4

En este apartado se analizarán las 4 condiciones que se presentaron con anterioridad, considerando que el tanque Torres 4 está en funcionamiento, de esta forma, buscando mejoras al funcionamiento del sistema al aumentar la capacidad de almacenamiento. La nueva frontera del sistema es la trifurcación el Judío, el cual proporcionará la carga hidráulica necesaria para llenar el primer tanque aguas abajo de la línea (tanque Torres 4), enviando el agua necesaria para cada una de las condiciones analizadas a continuación.

3.2.1. Condición 1

De esta simulación se consideró el mismo gasto de entrada al primer tanque, Torres 4 de 2395 l/s. Las reglas de control en las válvulas de entrada a los tanques CAO y Lienzo fueron las mismas que se utilizaron en las condiciones actuales, **Tabla III.1**, añadiéndole al tanque Mimosa otro control a la válvula de entrada, el gasto de entrada según el nivel del tanque se muestra en la **Tabla III.4**

Tabla III.4 Reglas de control, simulación: condición 1 con tanque Torres 4

| Regla | Válvula de entrada al tanque (l/s) | | | |
|-----------------|------------------------------------|--------|--------|------|
| | Torres 4 | Mimosa | Lienzo | CAO |
| Nivel < 1.5 | 2395 | 3000 | 3000 | 2800 |
| 1.5 < Nivel < 2 | | 2600 | 2900 | 2400 |
| 2 < Nivel < 2.5 | | 2100 | 2200 | 2000 |
| 2.5 < Nivel < 3 | | 1600 | 2000 | 1800 |
| 3 < Nivel | | 1400 | 1550 | 1400 |

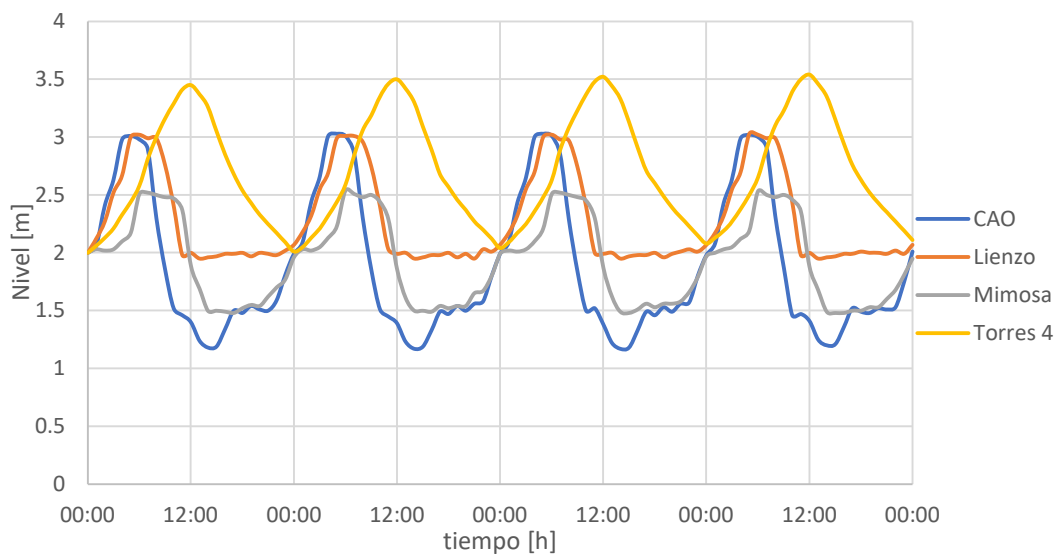


Figura III-6 Niveles de los tanques reportados en la simulación, condición 1 con tanque Torres 4.



En esta simulación se resuelve el problema que se presentaba en el tanque Mimosa en el análisis de condiciones actuales, dicho problema es que al suministrarle un gasto constante de 2395 l/s en las horas de máxima demanda se llegaba a un nivel dentro del tanque de 0.55 m mientras que en la hora de mínima demanda se alcanzaba un nivel máximo de 3.8 m.

Al proporcionarle controles a la válvula de entrada al tanque Mimosa se evita que se lleguen a niveles mínimos y máximos, donde las variaciones del consumo son tomadas por el tanque Torres 4 véase en **Figura III-6**.



3.2.2. Condición 2

Para esta simulación se evitó la operación de válvulas de entrada a los tanques excepto la válvula del tanque CAO, de esta manera se aumentaría la facilidad operativa, dichas reglas de control fueron las mismas que se utilizaron en la condición 1 sin taque Torres 4 (Tabla III.3).

Se puso en operación el tanque Torres 4 con un gasto de entrada de 2,395 l/s. Las reglas dependiendo la hora del día se resumen en la Tabla III.5.

Tabla III.5 Reglas de control, simulación: condición 2 con tanque Torres 4

| Regla | Válvula de entrada al tanque (l/s) | | | |
|--------------|------------------------------------|--------|--------|------|
| | Torres 4 | Mimosa | Lienzo | CAO |
| A la hora 0 | 2395 | 2395 | 2375 | 1945 |
| A la hora 2 | | | | 1900 |
| A la hora 8 | | | | 2600 |
| A la hora 14 | | | | 2580 |
| A la hora 20 | | | | 2363 |

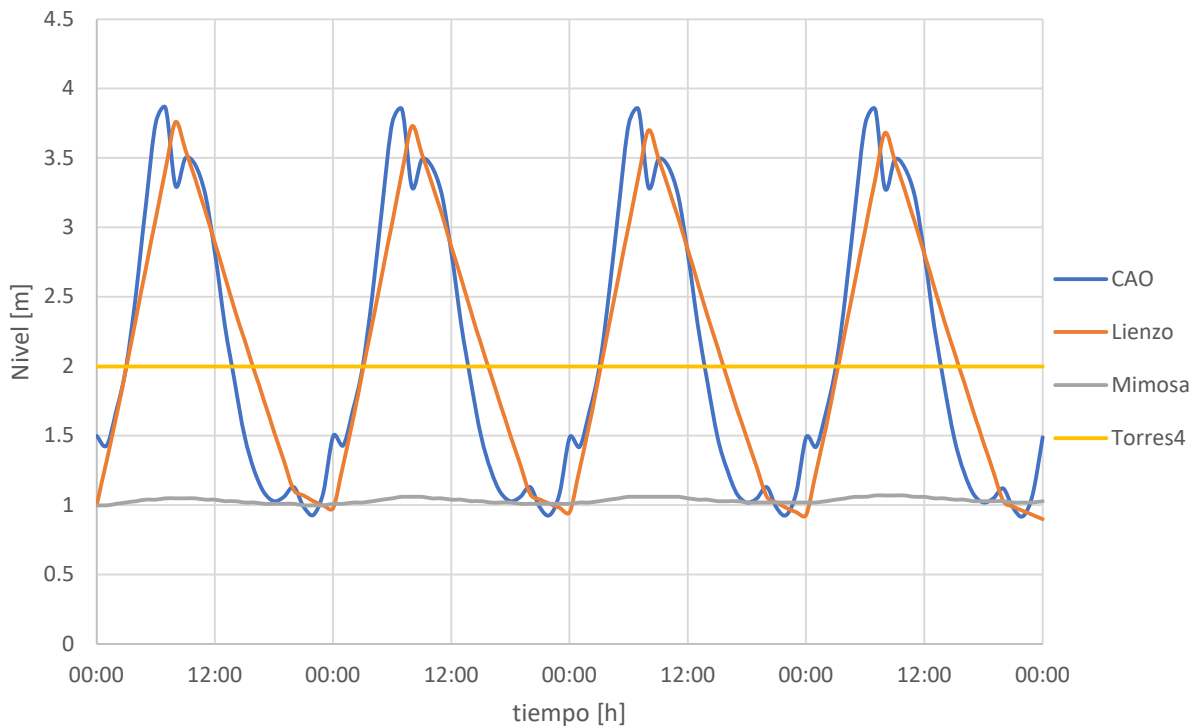


Figura III-7 Niveles de los tanques reportados en la simulación, condición 2 con tanque Torres 4.



Con las reglas de control en la válvula de entrada al CAO, y suministrando un gasto constante a la entrada de los demás tanques la variación de los niveles del agua en los tanques Mimosa y Torres 4 es casi nula, debido a que la variación del consumo es regulada por el tanque Lienzo, siendo innecesarios los primeros dos tanques.

Podría llevarse a cualquier nivel el tanque Torres 4 y almacenarse un volumen considerándose como volumen muerto si no es utilizado para cualquier emergencia.



3.2.3. Condición 3

Se detuvieron las fuentes de abastecimiento, llenándose previamente cada tanque, para llevar a cabo la simulación con las reglas de control de flujo en las válvulas a la entrada de los tanques de la condición 1 con el tanque Torres 4 (Tabla III.4). En esta simulación se espera obtener el tiempo de respuesta del sistema.

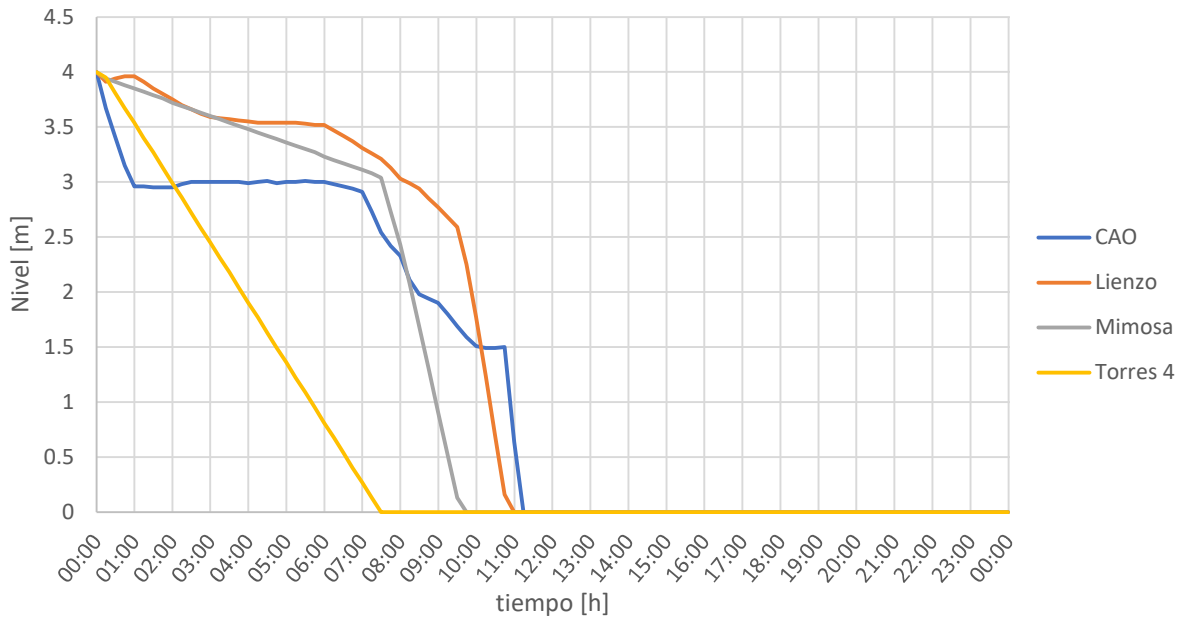


Figura III-8 Niveles de los tanques reportados en la simulación, condición 3 con tanque Torres 4.

Era evidente que al poner en operación el tanque Torres 4 el tiempo de respuesta de la línea aumentaría, siendo así que se obtuvieron los tiempos de vaciado de cada tanque.

Como se puede observar en la Figura III-8 los tanques Torres 4 y Mimosa se vacían a las 07:30 y 9:45 horas, respectivamente, mientras que los dos últimos tanques Lienzo y CAO son vaciados a las 11:00 y 11:15 horas.

Ante una circunstancia semejante, deberá existir un protocolo que permita reducir el gasto suministrado y presiones en la red con el objetivo de incrementar el tiempo de respuesta.



3.2.4. Condición 4

Como ocurrió en la misma condición 4 pero sin la operación del tanque Torres 4 (condiciones actuales) el tratar de enviar el gasto medio diario (3,250 l/s) que necesita la línea de Av. Toluca en condiciones actuales más la zona de Benito Juárez, Iztacalco, Iztapalapa y Coyoacán, no fue posible que dicho gasto de entrada fuera regulado aún con la puesta en marcha del tanque Torres 4, el cual se vaciaba y llenaba de manera repentina.

Por ello con la operación del tanque Torres 4 se buscó el gasto medio diario que podría regular el tanque con el consumo actual y parte del gasto que demanda la zona de Benito Juárez y alrededores. Se llegó a que el gasto que demanda la zona de Benito Juárez no sería enviado en su totalidad por la línea de avenida Toluca debido a la capacidad de los tanques, quedando sin suministro algunas zonas de Iztapalapa.

Finalmente, el gasto medio diario que podrá mandarse por la línea de Av. Toluca hacia la zona norte, para abastecer los 68 sectores es de 608.7 l/s y no de 908.7 l/s. Al gasto de demanda base se le asignó el mismo patrón de variación horaria, de tal forma que en la **Figura III-9** se puede visualizar el agua que demanda la zona contra el agua que en realidad se podrá enviar por la línea de avenida Toluca con el tanque Torres 4 en operación.

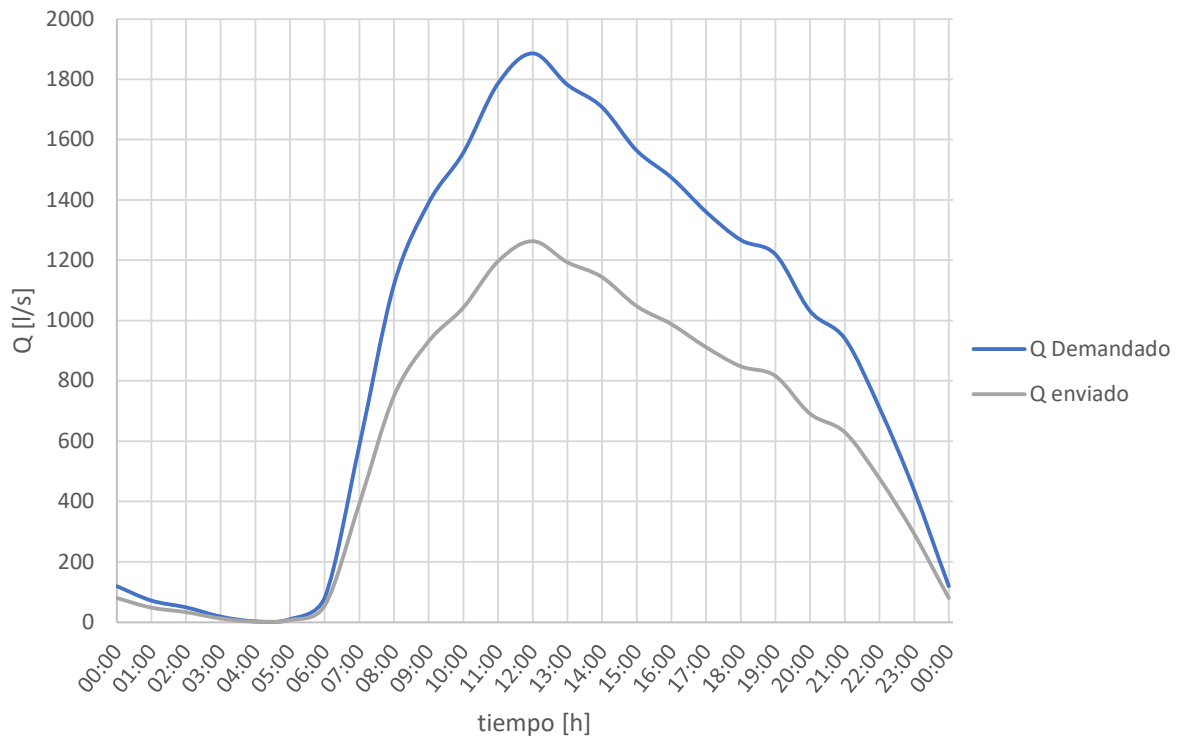


Figura III-9 Gasto demandado por la zona BJ-IZC-IZT-COY (actualmente suministrado por la línea de Santa Lucía) vs Gasto enviado



Para enviar un gasto medio total de 3015 l/s hacia la zona que abastece la línea de Av. Toluca y parte de la zona que actualmente es abastecida por la línea de Santa Lucía, se asignaron en la simulación 5 reglas de operación a las válvulas de control de flujo (FCV), totalmente diferentes a las condiciones anteriores, las cuales operarán a la entrada de los tanques Mimosa, Lienzo y CAO, dependiendo el nivel de estos las válvulas permitirán el paso de un determinado gasto, dichas reglas se muestran en la **Tabla III.6**.

Tabla III.6 Reglas de control, simulación: condición 4 con tanque Torres 4

| Regla | Válvula de entrada al tanque (l/s) | | | |
|-----------------|------------------------------------|--------|--------|------|
| | Torres 4 | Mimosa | Lienzo | CAO |
| Nivel < 1.5 | 3015 | 5100 | 4000 | 3900 |
| 1.5 < Nivel < 2 | | 4350 | 4250 | 3800 |
| 2 < Nivel < 2.5 | | 3550 | 3350 | 3350 |
| 2.5 < Nivel < 3 | | 2200 | 2200 | 1900 |
| 3 < Nivel | | 1450 | 1450 | 1500 |

Debido que el gasto medio diario para abastecer a la zona de Benito Juárez pasó de 908.7 a 608.8 l/s el gasto de entrada al primer tanque disminuyó a 3,015 l/s, de tal forma que el tanque fue capaz de regular las variaciones del consumo. En la **Figura III-10** se muestran los niveles reportados en la simulación para cada tanque.

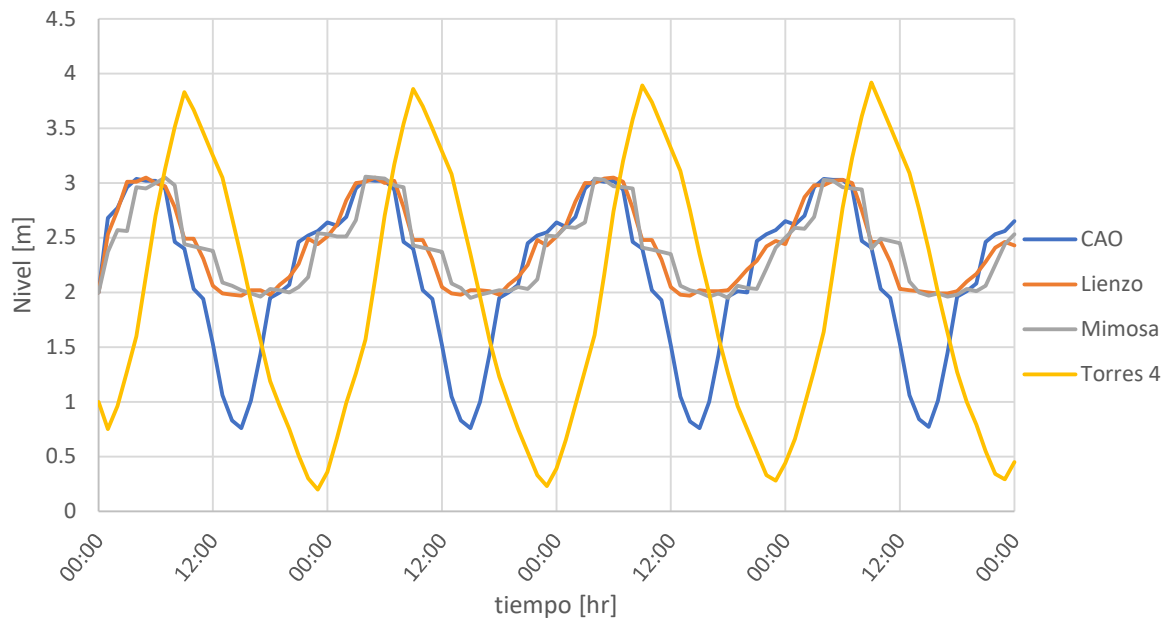


Figura III-10 Niveles en los tanques reportados en la simulación, condición 4 con tanque Torres 4.



IV. CONCLUSIONES

De las condiciones analizadas se concluye lo siguiente:

- En la condición 1, el tanque Torres 4 será importante para regular las variaciones del consumo de la zona actual que abastece, de esta manera se evita que los tanques aguas abajo, principalmente el Mimosa, se tengan niveles con valores cercanos a 0 y al nivel máximo, esto considerando unas reglas de control en las válvulas de entrada de los tanques a excepción del Torres 4 cuyo gasto de entrada se mantendrá constante.
- De la segunda condición, aumentando la facilidad operativa, donde se evitan los controles u operación de las válvulas de entrada a los tanques excepto en el último, CAO, el funcionamiento de la línea con y sin tanque Torres 4 es prácticamente el mismo, de tal forma que para este caso sería indiferente la rehabilitación del tanque.
- Que se presente una falla en la fuente de abastecimiento, el funcionamiento del tanque Torres 4 será fundamental para amortiguar el tiempo de suministro a la zona hasta 4 horas. Podrá decirse que el tiempo de respuesta es poco, pero para llevar una maniobra de reparación de la infraestructura o el restablecimiento de la energía eléctrica en la fuente sería suficiente para continuar con el servicio de abastecimiento de agua a la ciudad.
Los tanques se vaciaron en las horas de baja demanda, es decir el periodo con mayores presiones en la red, por tanto, se deberá implementar un protocolo el cual deberá contemplar reducir las presiones y controlar el gasto a suministrar cuando se presente este escenario, eso haría que el periodo de vaciado de los tanques se alargara y el agua fuera mejor utilizada.
- En la última condición debido a la capacidad de los tanques no es posible abastecer completamente de agua a la zona que presentaría fallas en su línea de conducción (línea de Santa Lucía), pero es posible enviar el 67% de la demanda en la zona sin dejarlos totalmente sin agua. Esto sería logrado gracias a que el tanque Torres 4 se ponga en funcionamiento.

El tanque Torres 4 cuya capacidad es de 37,000 m³ tiene grandes ventajas en 3 de las 4 condiciones analizadas, la principal de ellas es que ya está construido y solo sería cuestión de hacer las modificaciones correspondientes para aprovecharlo, siendo algunas de ellas la construcción de la obra mecánica, by-pass, entre la bifurcación Judío-Lerma y la línea de 48 pulgadas, tomar las medidas necesarias para la rehabilitación del tanque, caja de derivación, instalación de válvulas de flujo automáticas y finalmente tener cuenta un programa de mantenimiento y desinfección que evite la contaminación del agua.



Por otra parte, se concluye que la puesta en marcha del tanque Torres 4, es estrictamente necesaria, ya que los beneficios de inclusión son de contundencia, por lo que sería intrascendente buscar soluciones en el sistema actual sin incluir al tanque.

La medición es fundamental para representar en los modelos lo que bien sucede en la realidad, si bien, los datos de fugas y consumos no son precisos en las simulaciones debido a las hipótesis que siguieron, el realizar un trabajo con gran nivel de detalle necesitaría registros confiables de por lo menos de macromedición de gasto y presiones en las líneas de interconexión de los tanques, así como las entregas a los sectores.



REFERENCIAS

ArcGIS V.10.2.2 Environmental Systems Research Institute (ESRI). Redlands, California, EUA.

Caballero Aguilar, J. L. 2015. *Apuntes Hidráulica Urbana, Capítulo III. Abastecimiento de agua potable*. México.

Capella Vizcaíno, A. 2017. *El servicio intermitente: Tandeos*. México. Instituto de Ingeniería UNAM, México.

Capella Vizcaíno, A. 2017. *Abastecimiento de agua a la zona metropolitana del valle de México*, Instituto de Ingeniería UNAM, México.

César Valdez, E. 1990. *Abastecimiento de agua potable*, Volumen I, UNAM México.

CONAGUA, 2005. *Sistema Cutzamala agua para millones de mexicanos*. México.

CONAGUA, 2007. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. *Guía de diseño de redes de agua potable con uno o varios tanques y fuentes de abastecimiento*, México.

CONAGUA, 2007. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. *“Diseño, construcción y operación de tanques de regulación para abastecimiento de agua potable”* México.

CONAGUA, 2014. *Estadísticas del Agua en México*. Comisión Nacional del Agua. México.

CONAGUA, 2016. *Grandes Retos Hídricos en el Valle de México*. Comisión Nacional del Agua. México.

CONAGUA, 2016. *Estadísticas del Agua en México*. Comisión Nacional del Agua. México.

CONAGUA, 2018. *Estadísticas del Agua en México*. Comisión Nacional del Agua. México.

CONAGUA, 2016. Libro 12, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, *Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable*. Comisión Nacional del Agua. México.

CONAGUA, 2016. Libro 13, Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. *Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Distribución*. Comisión Nacional del Agua. México.

Escolero, O., Kralisch S., et al. 2009. *Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático*. México.



Espinoza Alonso, A. G. 2006. Tesis de Licenciatura. *La gota que si se agota. El sistema Lerma-Cutzamala en el Valle de México (reportaje)*, México.

INEGI, 2015. Encuesta Intercensal. Instituto Nacional de Geografía y Estadística, México.

Machorro M. A., Coronado Rosario A., et al. 2013. *Estudio sobre la escasez de agua potable en Iztapalapa*. Instituto tecnológico de Iztapalapa. México.

OCAVM, 2013. *Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII*. Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. México.

Rossman, V. 2.0. EPANET. Environmental Protection Ambiental, EUA.

SACMEX, 2019. Información del catastro y de la red de agua potable, Sistema de aguas de la Ciudad de México.

Torres B. L. 2014. *Sistema Lerma: Una visión política en la gestión pública del agua*, México.