



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**DIAGNÓSTICO DEL FUNCIONAMIENTO DE LA SECTORIZACIÓN DE
LA RED DE AGUA POTABLE EN LA ZONA SUR DE LA ALCALDÍA
ÁLVARO OBREGÓN Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN HIDRÁULICA

PRESENTA:

ING. DIEGO MONTEALEGRE ZÚÑIGA

DIRECTOR DE TESINA: **DR. JOSÉ LUIS HERRERA ALANÍS**

MÉXICO, CDMX.

MARZO 2019



ÍNDICE

Introducción	5
Justificación.....	7
Objetivos	8
1 Estado del arte	11
1.1 Problemática general de las redes de abastecimiento en el Valle de México.....	11
1.2 Sectorizaciones de las redes de abastecimiento.....	12
1.3 Modelo Epanet.....	13
2 Descripción de la zona de estudio	21
2.1 Localización.....	21
2.2 Población	23
2.3 Red de distribución.....	25
2.4 Fuentes de abastecimiento	26
2.5 Topografía	27
2.6 Patrón de demanda.....	29
2.7 Delimitación de los sectores actuales	30
3 Modelación de los sectores en Epanet.....	33
3.1 Comportamiento sectorización actual	37
3.2 Sectorización propuesta	39
3.2.1 Control de presiones.....	39
3.2.2 Delimitación de nuevos sectores	41
3.2.3 Campaña de reducción de fugas.....	44
Análisis de resultados.....	47
Conclusiones y observaciones.....	51
Referencias bibliográficas	55

Introducción

Históricamente las sociedades humanas han requerido de una fuente cercana y continua de agua para llevar a cabo sus actividades, los romanos, por ejemplo, intentaron llevar el río a la ciudad, preservándolo en canales, para que no dejara de tener las mismas características que en su captación, y pareciera que es la desviación de un río y la partición de este en multitud de venas o tuberías, pero siempre en funcionamiento continuo. (De la Peña, 2010).

Las redes de abastecimiento de agua potable tienen la importante tarea de distribuir desde un punto (o puntos) de entrada hasta los numerosos nodos de consumo, de forma eficiente, controlada y continua. El diseño óptimo de una red es todo un problema de ingeniería, en el que las variables a determinar son diámetros comerciales de tuberías disponibles, localización de válvulas de seccionamiento o de regulación de presiones, teniendo como restricciones el cuidado de presiones y velocidades dentro de la red.

Presiones demasiado altas conllevan el aumento de pérdidas de volúmenes de agua por fugas, del mismo modo, velocidades relativamente altas provocaran mayores pérdidas de energía perdiéndose eficiencia dentro de la red.

El desorganizado crecimiento poblacional ha provocado que los diseños iniciales de las redes se vean afectados en su funcionamiento, si a lo anterior se suma los grandes volúmenes de agua que se pierden, alrededor del 40% del agua que se inyecta a la red, el servicio se ve afectado lo que ha llevado a tomar estrategias en cuanto a una mejor gestión y control de la misma red.

Si bien es difícil decir cuál fue la primera sociedad moderna en emplear sectorizaciones en el Reino Unido ésta fue una medida enfocada para el control de presiones en el año de 1980. En México la



aplicación de sectores ha permitido a los operadores tener un control de los volúmenes de entrada, volúmenes de consumo (medidos mediante micromedición) y, por tanto, volúmenes de pérdidas por rupturas de las tuberías. Empleando algún método de detección de fugas, mediciones de gastos en tramos importantes, permitirá establecer la mejor estrategia para una campaña de sustitución de tuberías que llevaran a lograr aumentar la eficiencia de la red.

La presente tesina aborda el caso de cinco sectores en la zona sur de la delegación Álvaro Obregón, en la que los trabajos de sectorización tienen alrededor de 20 años, dentro de los cuales, presentan desniveles topográficos importantes y un acelerado crecimiento demográfico, por lo que se consideró pertinente revisar el funcionamiento actual y en función de lo obtenido proponer nuevas delimitaciones y colocación de válvulas reguladoras de presión.

Justificación

La creciente demanda de agua ha llevado a la Zona Metropolitana del Valle de México a importar grandes volúmenes de agua de otras cuencas, aun así, la principal fuente de abastecimiento continúa siendo la extracción subterránea la que ha provocado un importante déficit en el balance geohidrológico. Cuando se tiene en mente las cantidades de agua que se pierden en fugas resulta evidente la importancia que tienen los trabajos encaminados a establecer las condiciones para reducir estos volúmenes.

La presente tesina aborda una zona que se abastece principalmente del sistema Cutzamala y Lerma, donde las conducciones funcionan a gravedad y por lo que las presiones presentes son función de los niveles topográficos. Ya que el gasto de una fuga es función de la carga de presión dentro del conducto, a mayor presión mayor será el gasto que sale a través de ese orificio. Se sabe que, a manera de regular presiones, el flujo es conducido a tanques que distribuyen a su vez a la red secundaria que en algunos casos se encuentra alrededor de 150 m por debajo, provocando grandes pérdidas por fugas.



Objetivos

Establecer mediante un modelo Epanet, bajo las condiciones actuales de operación, las presiones presentes en cinco sectores en la zona sur de la delegación Álvaro Obregón.

Realizar en función de lo obtenido en el objetivo anterior colocación de válvulas reguladoras de presión y nuevas delimitaciones que lleven a tener un adecuado control de presiones.



Capítulo 1 Estado del Arte

1 Estado del arte

1.1 Problemática general de las redes de abastecimiento en el Valle de México.

La Ciudad de México se ubica dentro de lo que inicialmente era una cuenca cerrada, delimitada por las sierras Nevada, Chichinautzin, de las Cruces y por la sierra de Guadalupe y ahora con salidas artificiales, cuenta con una extensión de 9,600 km², a una elevación de 2,240 msnm, al ser una zona lacustre, los suelos que se tienen son principalmente limos y arcillas en la zona centro.

Uno de los principales problemas que sufre la Ciudad de México es que, al ser el centro cultural, político y económico del país ha llevado a grupos conformados por personas en busca de trabajo y de los beneficios económicos que suelen generarse en los centros de poder político a migrar al valle de México. Muchos de estos inmigrantes se establecen de manera ilegal en los límites urbanos, con la esperanza de que el gobierno les proporcione, eventualmente, servicios públicos. (Comité de Academias para el Estudio de Suministro de Agua de la Ciudad de México, 1995).

Ya que la principal fuente de abastecimiento de agua con la que cuenta el valle de México (y la mayoría de las zonas urbanas del país) lo constituye la extracción de agua subterránea junto con los 20 millones de personas que lo habitan ha provocado que el acuífero del Valle de México se encuentre sobreexplotado con un déficit anual de 591.18 millones de metros cúbicos (Conagua, 2015).

La desmedida extracción de agua del subsuelo ha provocado la consolidación de los suelos, y así asentamientos diferidos. Además del deterioro, lo anterior es una de las principales acusas de las rupturas en las redes primarias de la ciudad. Actualmente se estima pérdidas del vital líquido alrededor de 40% del volumen suministrado a la red.

Al presentarse una ruptura el organismo operador o el mismo Sistema de Aguas de la Ciudad de México reemplazará el tramo afectado restableciendo el servicio, pero al no tener un control o inventario de las condiciones de la red, la labor no resuelve el problema de fondo ya que el cambio de tramo aumentará la presión dentro de tuberías cercanas llevando a nuevas rupturas si las tuberías se encuentran en condiciones similares al tramo cambiado.

1.2 Sectorizaciones de las redes de abastecimiento.

Un sector o distrito hidrométrico es una delimitación y aislamiento hidráulico de una parte de la red de distribución de agua potable, con una fuente de suministro de agua bien identificada y medida. La sectorización consiste en aislar de la red primaria algunos sectores de la red secundaria, con la finalidad de controlar las presiones en las líneas de distribución y elaborar un balance que permita identificar y determinar el agua que se pierde por fugas y por tomas no autorizadas. La sectorización ofrece, asimismo, la posibilidad de instrumentar el control activo de fugas en una forma eficiente, obtener información sobre la cantidad de agua que no se cobra en cada uno de los sectores y, en general, permite un mejor control sobre la red de distribución al proporcionar un entendimiento más preciso del comportamiento del agua en la misma.

La sectorización contempla la división de la red de distribución de agua potable en 336 sectores de la red secundaria, aún en proceso, agrupados en siete macrosectores que han sido “concluidos”, considerando el desarrollo de 103 estaciones de medición de flujo en transferencias de la red primaria y la instalación del mismo número de medidores de flujo electromagnéticos y ultrasónicos que permitirán conocer los caudales suministrados a cada alcaldía. (Espinoza, 2012)

1.3 Modelo Epanet

Epanet es un software libre desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental, EPA por sus siglas en inglés, de los Estados Unidos de Norteamérica para simulación hidráulica en redes de distribución.

El programa calcula alturas de presión en conexiones y caudales en líneas para un conjunto fijo de niveles de depósitos, niveles de tanque, y demandas de agua a lo largo de una sucesión de instantes temporales. Desde un instante de tiempo los siguientes niveles de depósitos y demandas en las conexiones son actualizadas de acuerdo a los patrones de tiempo que se les ha asociado mientras que los niveles del tanque son actualizados utilizando los datos de solución de caudal. La solución de altura y caudal en un determinado punto a lo largo del tiempo supone el cálculo simultáneo de la conservación del caudal en cada conexión y la relación de pérdidas que supone su paso a través de los elementos de todo el sistema. Este sistema conocido como equilibrado hidráulico de la red requiere métodos iterativos de resolución de ecuaciones no lineales. EPANET utiliza el “algoritmo del gradiente” con este propósito.

El modelo Epanet estima las pérdidas de energía debidas a fricción mediante las ecuaciones Hazen-Williams, Darcy-Weisbach o Chezy-Manning.

El método de Hazen-Williams es el más utilizado en el ámbito anglosajón. No se puede usar con otro líquido que no sea agua y fue desarrollada originalmente únicamente para régimen turbulento. El método de Darcy-Weisbach es el más exacto teóricamente. Se puede aplicar para cualquier líquido en cualquier régimen que se encuentre. El método de Chezy-Manning es el más utilizado para conductos funcionando en lámina libre.

Con el método de Darcy-Weisbach, Epanet utiliza diferentes expresiones correspondientes a las distintas zonas en las que el factor de fricción f presenta comportamientos distintos. Así, dependiendo del régimen de trabajo:

- Para régimen laminar ($Re < 2,000$) utiliza la fórmula de Hagen-Poiseuille.

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

- Para régimen turbulento ($Re > 4,000$) utiliza la aproximación de Swamee y Jain de la ecuación de Colebrook-White (en la tabla 1 se muestran valores propuestos de rugosidad absoluta obtenidos del manual de Epanet).

$$f = \frac{0.25}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

- Para flujo transitorio ($2,000 < Re < 4,000$) utiliza una interpolación cúbica del diagrama de Moody.

$$X1 = 7FA - FB$$

$$X2 = 0.128 - 17FA + 2.5FB$$

$$X3 = -0.128 + 13FA - 2FB$$

$$X4 = R(0.032 - 3FA + 0.5FB)$$

$$FA = (Y3)^{-2}$$

$$Y2 = \frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}$$

$$Y3 = -0.86859 \ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{4000^{0.9}} \right)$$

Donde ε = rugosidad de la tubería y d = diámetro de la tubería.

Tabla 1: Valores de rugosidad absoluta para distintos materiales, tomado del manual de EPANET.

Material	Darcy-Weisbach ε (mm)
PVC y PE	0.0025
Fibrocemento	0.025
Fundición revestida	0.03
Fundición no revestida	0.15
Hormigón armado	0.1
Hormigón liso	0.025

El método utilizado por Epanet para resolver las ecuaciones de continuidad y de pérdidas que caracterizan el estado hidráulico de una red de abastecimiento en un punto dado en el tiempo puede llevarse a término con una aproximación híbrida nudo-malla. Todini y Pilati (1987) y más tarde Salgado et al. (1988) eligieron llamarlo el “Método del Gradiente”. Aproximaciones similares han sido descritas por Haman y Brameller (1971) (el “Método Híbrido”) y por Osiadacz (1987) (“El Método nudo-malla de Newton”). La única diferencia entre estos métodos es la forma en la que el caudal de las líneas es actualizado después de una nueva solución iterada se haya encontrado para las alturas de los nodos. La aproximación de Todini, la más simple, es la que se ha elegido para utilizar con Epanet.

Suponiendo que tenemos un sistema de tuberías con N conexiones nudo y NF nudos fijos (tanques y depósitos). Podemos expresar la relación pérdidas-caudal en la tubería entre los nudos i y j de la siguiente forma:

$$H_i - H_j = h_{ij} = rQ_{ij}^n + mQ_{ij}^2 \text{ ec. 1}$$

Donde H = altura en el nudo, h = pérdidas, r = coeficiente de resistencia, Q = caudal, n = exponente del caudal, y m = coeficiente de pérdidas menores. El valor del coeficiente de pérdidas dependerá de la ecuación de pérdidas utilizada. Para las bombas, las pérdidas (negativa al ser ganancia) pueden representarse con la siguiente ley.

$$h_{ij} = -\omega^2 \left(h_0 - r \left(\frac{Q_{ij}}{\omega} \right)^n \right)$$

Donde h_0 es la altura de corte para la bomba, ω es la velocidad relativa, y r y n son los coeficientes de la curva característica. El segundo conjunto de ecuaciones que debemos satisfacer son las ecuaciones de continuidad para todos los nudos:

$$\sum_j Q_{ij} - D_i = 0 \text{ para } i = 1, \dots, N \text{ ec. 2}$$

Donde D_i es la demanda de caudal en el nodo i y por convenio, el caudal entrante en un nodo es positivo. Para un conjunto de alturas conocidas en los nudos fijos, buscaremos una solución para todas las alturas H_i y caudales Q_{ij} que satisfagan las ecuaciones ec.1 y ec.2

La resolución del método del gradiente comienza con un valor estimado inicial de caudales en cada tubería que no tiene por qué satisfacer las ecuaciones de continuidad. En cada iteración del método, se encontrarán nuevas alturas con los nodos resolviendo la ecuación matricial:

$$AH = F \text{ ec. 3}$$

Donde A = matriz Jacobiana ($N \times N$), H = vector de las alturas incógnitas en los nodos ($N \times 1$), y F = vector de términos del lado derecho de la igualdad ($N \times 1$). Los elementos de la diagonal principal de la matriz Jacobiana son:

$$A_{ii} = \sum_j p_{ij}$$

Mientras que los términos fuera de la diagonal, no negativos, son:

$$A_{ij} = -p_{ij}$$

Donde p_{ij} es la inversa de la derivada parcial con respecto del caudal de las pérdidas en la línea entre los nodos i y j . Para las tuberías,

$$p_{ij} = \frac{1}{nr|Q_{ij}|^{n-1} + 2m|Q_{ij}|}$$

Mientras que para las bombas

$$p_{ij} = 1/n\omega^2r \left(\frac{Q_{ij}}{\omega} \right)^{n-1}$$

Cada término del lado derecho de la igualdad consiste en el desequilibrio del caudal neto en el nodo más un factor de corrección de caudal:

$$F_i = \left(\sum_j Q_{ij} - D_i \right) + \sum_j y_{ij} + \sum_f p_{if} H_f$$

De los últimos términos los aplicamos a cualquier línea que une un nodo i a un nodo fijo y el factor de corrección de caudal y_{ij} es:

$$y_{ij} = p_{ij} \left(r |Q_{ij}|^n + m |Q_{ij}|^2 \right) \text{sng}(Q_{ij})$$

Para tuberías

$$y_{ij} = -p_{ij} \omega^2 \left(h_0 - r \left(\frac{Q_{ij}}{\omega} \right)^n \right)$$

Y para bombas, donde el $\text{sng}(x)$ es 1 si $x > 0$ y -1 en caso contrario. (Q_{ij} siempre es positivo para las bombas). Después de que las nuevas alturas son calculadas resolviendo la ecuación ec.3, los nuevos caudales se encuentran con:

$$Q_{ij} = Q_{ij} - \left(y_{ij} - p_{ij} (H_i - H_j) \right) \text{ ec. 4}$$

Si la diferencia entre la suma de los caudales absolutos y el caudal total en todas las líneas es mayor que alguna tolerancia (por ejemplo, 0.001), entonces las ecuaciones ec.3 y ec.4 se resuelven una vez más. La ecuación de actualización de caudal ec.4 siempre cumple con la continuidad alrededor de cada nodo después de la primera iteración. (Rossman, 2001).



Capítulo 2 Descripción de la zona de estudio

2 Descripción de la zona de estudio

2.1 Localización

La delegación Álvaro Obregón está situada al suroeste del Distrito Federal en una superficie en la que el 70 por ciento es de tipo montañoso con barrancas y arroyos, y el 30 por ciento restante es de lomeríos y planicies. Desde la década de 1950, el porcentaje del crecimiento poblacional de la delegación es el doble del presentado de manera promedio en la Ciudad de México. Esto obedece a los asentamientos acelerados originados en las zonas libres del poniente de la alcaldía debido a la saturación de la zona central de la ciudad.

Cuenta con un amplio número de servicios, especialmente de equipamiento de cultura y educación media y superior, que además de satisfacer las necesidades de la población residente, abarca un amplio radio de influencia englobando a las alcaldías aledañas y a los municipios de la zona metropolitana de la Ciudad de México.

En importancia desde el punto de vista ambiental, se idéntica dentro cuatro sistemas de preservación ecológica: Sistema Contreras-Parque Nacional Desierto de los Leones, ubicado al poniente de la ciudad, y que se extiende hacia la Sierra de las Cruces y del Parque Nacional Insurgente Miguel Hidalgo y Costilla, “La Marquesa” en el Estado de México, dentro del cual se incluyen las barrancas correspondientes a las alcaldías Magdalena Contreras, Álvaro Obregón y Cuajimalpa.

La alcaldía de Álvaro Obregón se encuentra situada en la región poniente de la Ciudad de México, representa el 5.19 % de la superficie de esta. (información consultada en SACMEX)

La alcaldía Álvaro Obregón se encuentra al poniente de la Ciudad de México, colinda con las siguientes alcaldías: norte con Miguel Hidalgo, al sur con Magdalena Contreras y Tlalpan, al oriente con Benito Juárez y Coyoacán y al poniente con el municipio de Jalatlaco del Estado de México. En la siguiente figura 1 se muestra el área cubierta por los sectores analizados, se encuentran en la zona sur de la zona poblada de la alcaldía Álvaro Obregón, en las faldas de la sierra de las Cruces, cubren un área de 11.2 km²

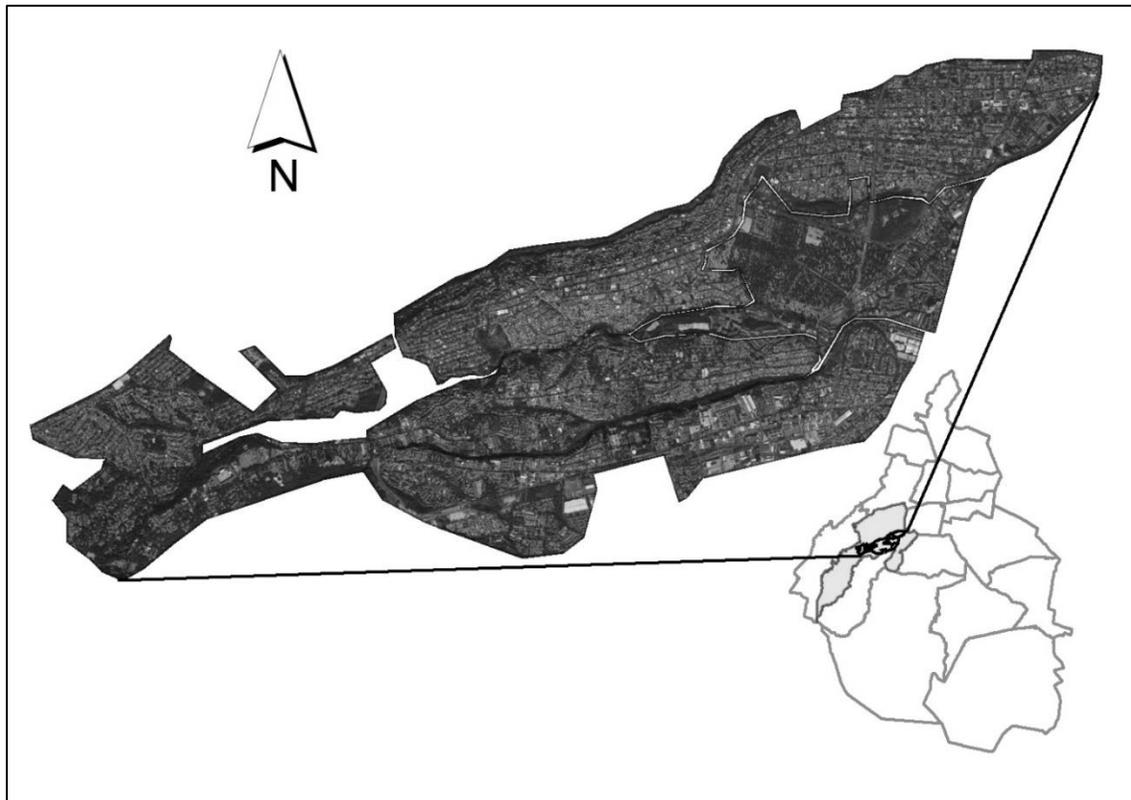
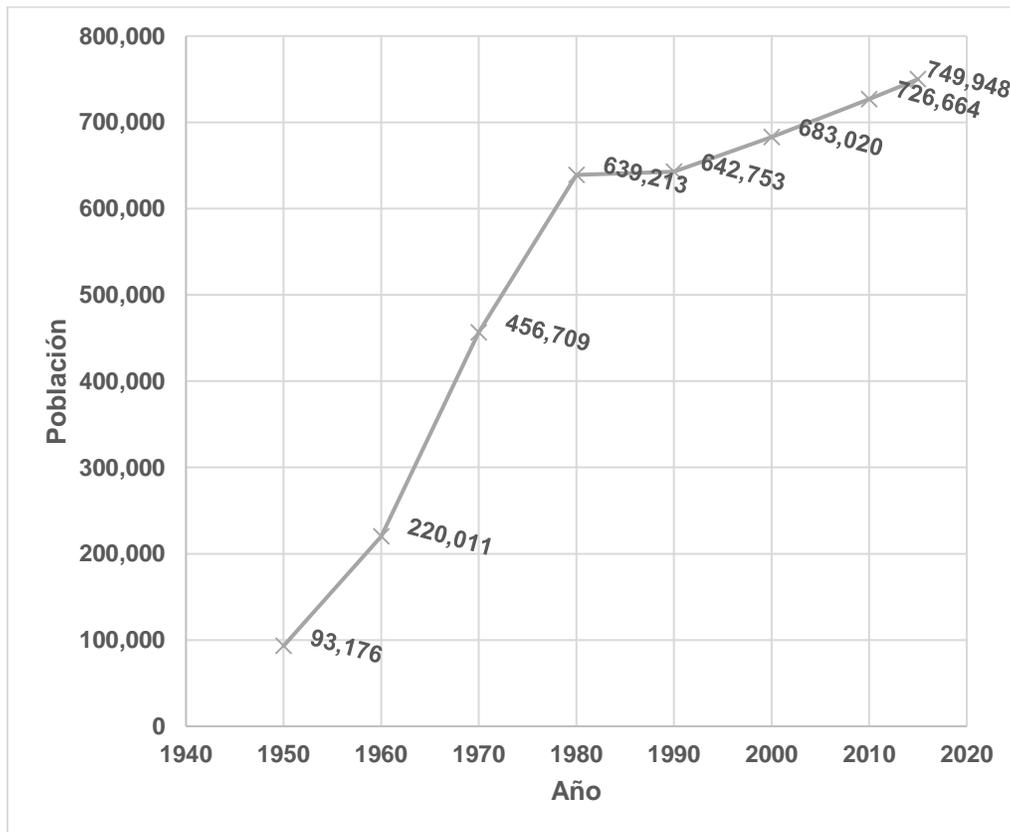


Figura 1: Localización de los sectores analizados, al sur de la alcaldía Álvaro Obregón.

2.2 Población

El desarrollo de la población de 1950 al 2015 se muestra en el gráfico 1, la densidad de la población al año 2015 en la Ciudad de México fue de $5,967.3 \text{ hab}/\text{km}^2$ mientras que en la alcaldía Álvaro Obregón fue de $7,820.9 \text{ hab}/\text{km}^2$ que es un valor por debajo de alcaldías céntricas como Iztacalco ($16,901.5 \text{ hab}/\text{km}^2$) o Cuauhtémoc ($16,373.7 \text{ hab}/\text{km}^2$) debido principalmente por las zonas boscosas no habitadas al sur - poniente de la alcaldía.



Grafica 1: Crecimiento poblacional en la alcaldía Álvaro Obregón, elaboración propia con información de INEGI.

De acuerdo con datos censales 2010 obtenidos del Inventario Nacional De Viviendas (INVI) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) a nivel manzana, la población total dentro de la zona de estudio es de 82,365 habitantes. Este valor fue obtenido ponderando la población según polígonos de manzanas dentro de los límites de los sectores (figura 2).

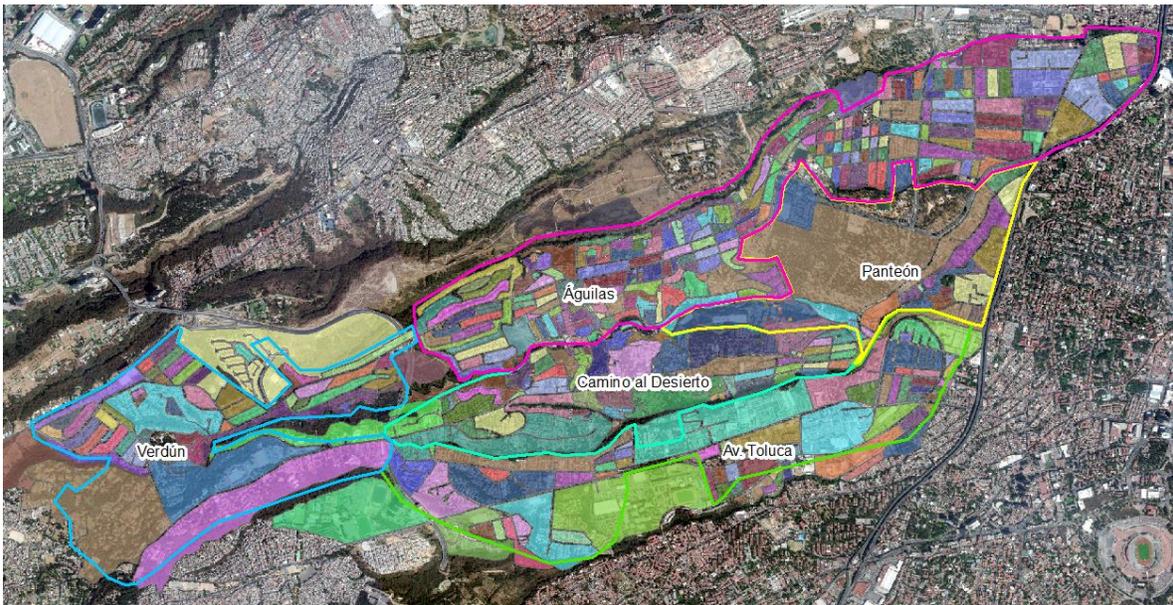


Figura 2: Manzanas consideradas en la ponderación de población y límites actuales de los sectores analizados.

2.3 Red de distribución

El agua potable dentro de la zona de estudio es distribuida a través de una red de tuberías con los siguientes diámetros y longitudes: 16 km de 30", 29 km de 15", 111.4 km de 10" y 3 km de diámetro 5". EL material de las tuberías se consideró de PAD (Polietileno de alta densidad) con una rugosidad absoluta ϵ , de 0.0015 mm.



Figura 3: Se muestra la distribución de la red secundaria y sus diámetros, así como la localización de tanques.

2.4 Fuentes de abastecimiento

El nivel de servicio de agua potable en la delegación Álvaro Obregón es del 100 por ciento cuyas principales fuentes de abastecimiento son los volúmenes aportados por los sistemas Lerma y Cutzamala, junto con pozos ubicados en el perímetro delegacional que son administrados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) y particulares, complementándose con los del sistema de manantiales del poniente de la ciudad de México.

El ramal Sur del Lerma condice los gastos que abastecen a la delegación, provenientes del sistema de pozos profundos del Valle de Lerma hacia la ciudad de México, en tanto que el Acueducto Poniente conduce el agua proveniente del Sistema Cutzamala, derivándose tres líneas que se conectan al sur del Lerma, complementando el suministro de agua a la población de la delegación (Información consultada en SACMEX).

De los conductos principales se derivan líneas de conducción de poniente a oriente que corren entre barrancas y conducen el agua de un tanque a otro más bajo en una serie que sirve de control de presión (Figura 3), además de su función de regulación de la demanda. A partir de estos tanques se abastecen los sectores urbanos de la zona que se encuentran debajo de ellos y limitados por las barrancas. (Capella, 2001)

Las características de volumen y altura de los tanques presentes en la zona fueron consultadas en SACMEX excepto áreas (no se contaba con esta información) que fueron obtenidas de lo observable en Google Earth, (Tabla 2).

Tabla 2: Características de los tanques presentes en la zona de estudio, información obtenida en SACMEX y Google Earth.

Tanque	Volumen [m ³]	Área [m ²]	Altura [m]
Centenario	30,000	9,000	3.3
Villa Verdún 1	650	130	3.8
Col. de Pol.	350	138	2.5
AO-27	100	50	2.0
Alcantarilla	1,400	280	5.0
Águilas 6	3,100	950	3.3
Águilas 5	1,000	300	3.4
Águilas 4	1,000	300	4.5
Águilas 3	1,000	300	3.4
Águilas 2	1,000	300	3.4
Lienzo	18,700	3,200	6
DGCOH	350	138	3.3

Para fines de modelación se consideraron volúmenes mayores que proporcionarían un flujo continuo de agua a la red durante el tiempo de modelación.

2.5 Topografía

Se tiene una topografía accidentada donde los desniveles topográficos van de la cota 2,635 msnm en la parte poniente a los 2,280 msnm en el oriente (figura 4). Las zonas entre barrancas y sus laderas han servido para los asentamientos urbanos, así como construcción de vías de comunicación como la calzada de las Águilas (Lugo, 1995). De igual manera, la infraestructura hidráulica también se ve definida por la topografía.

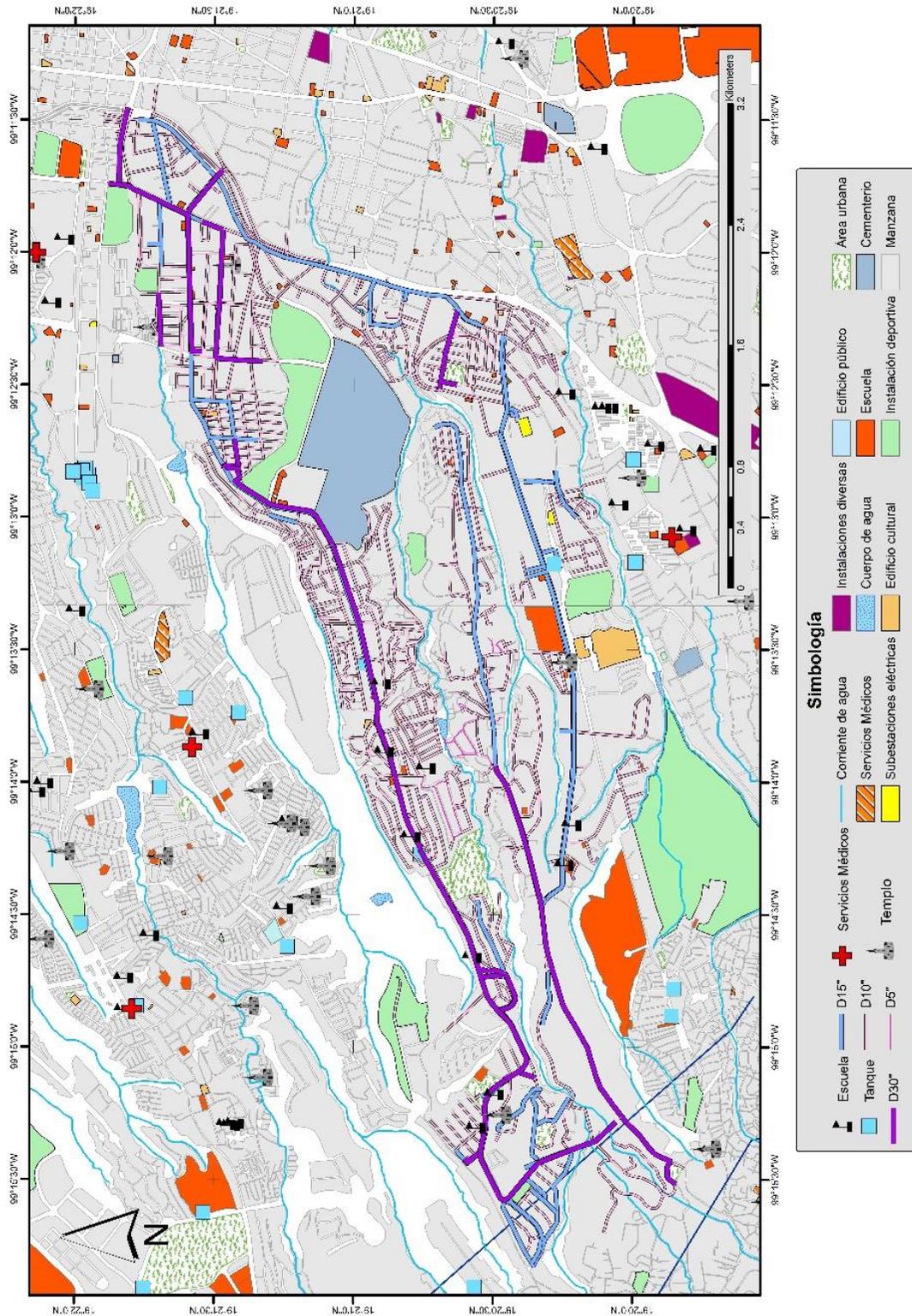


Figura 4: Información topográfica en la zona de estudio de las cartas E14A39d y E14A39e escalas 1:20,000 en formato vectorial disponibles en el portal de INEGI.

2.6 Patrón de demanda

Un patrón de demanda define la variación de los consumos que se tienen en función de la hora del día. El siguiente patrón (Gráfico 2) fue medido dentro de la colonia Santa Lucía, alcaldía Álvaro Obregón, se empleó en este estudio por proporcionar información real a la que está sujeta una red de abastecimiento y con las características de la zona de estudio.

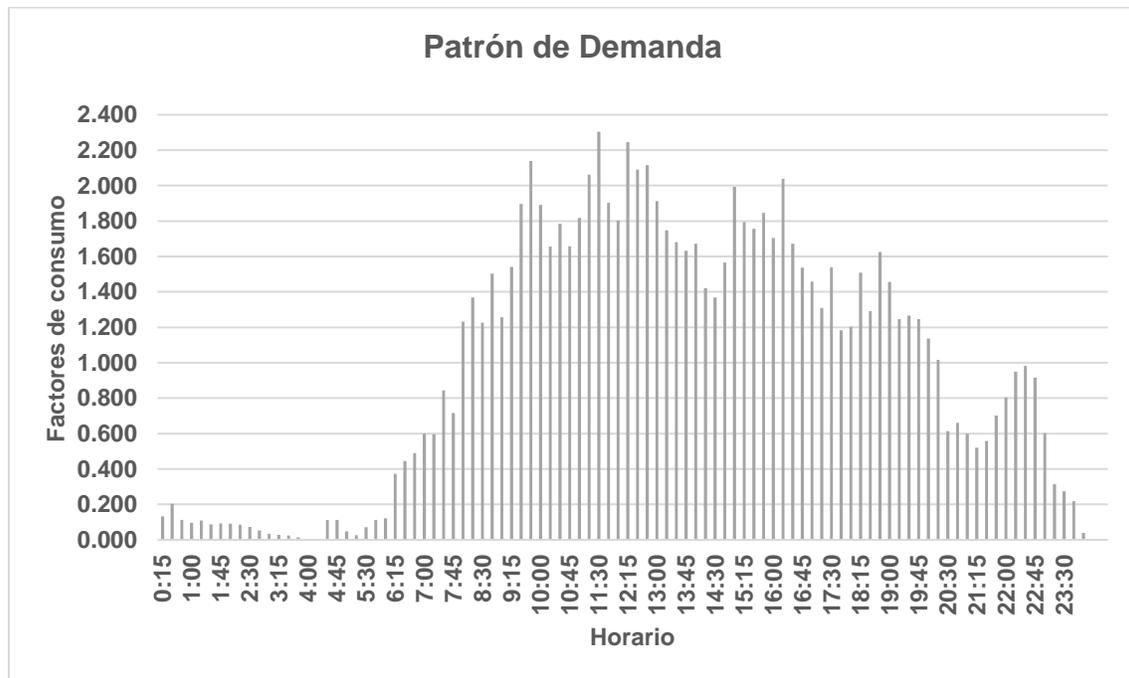


Gráfico 2: Patrón de demanda horaria con valores cada 15 minutos en Santa Lucía en la alcaldía Álvaro Obregón.

Ya que el patrón no considera pérdidas y en la zona se tiene un suministro continuo se observan valores cercanos a cero en horarios nocturnos. El separar los gastos de consumo y de fugas del gasto de suministro permite modelar el consumo y las fugas por separado y se deja el gasto de fugas como una función de la presión. A manera de ejemplo se muestra en la siguiente grafica la

separación de los gastos de un registro adimensional. La zona marcada en gris de la figura 5 se asocia generalmente a gastos debidos a fugas en la red sobre todo en zonas donde el suministro es continuo.

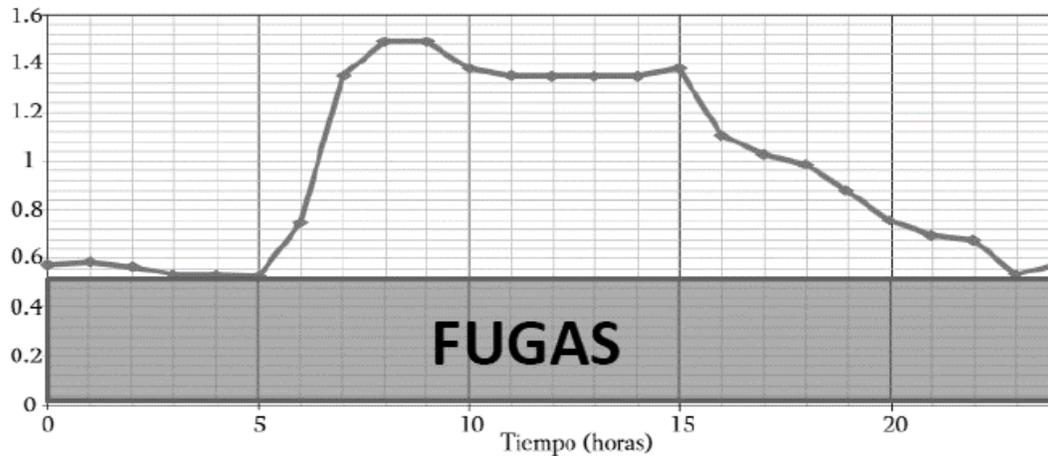


Figura 5: Patrón de demanda, se resalta en la zona marcada los factores asociados a fugas.

2.7 Delimitación de los sectores actuales

Los sectores actuales (figura 2) se ven definidos en gran medida por las barrancas, mas no así por los desniveles topográficos, en la tabla 3 se muestran los valores que se tienen para cada sector.

Tabla 3: Desniveles de los actuales sectores.

Sector	Área [km ²]	Cota máxima [m]	Cota Mínima [m]	Desnivel [m]
Verdún	2.223	2,630	2,520	110
Águilas	3.578	2,520	2,280	240
Panteón	1.598	2,330	2,297	33
Camino al Desierto	1.655	2,512	2,340	172
Av. Toluca	2.153	2520	2340	180



Capítulo 3 Modelación de los sectores en Epanet

3 Modelación de los sectores en Epanet

La información a partir de la cual se generó el modelo en Epanet fue el plano catastral de la red de abastecimiento en formato .wmf (Windows Media File) el cual puede ser manipulado por Sistemas de Información Geográfica (SIG). El software empleado ArcMap v10.5 permitió exportar la información almacenada de la imagen vectorial .wmf a formato de dibujo manejable en AutoCad.

El software EpaCad (desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia) permite transformar las líneas de tuberías en Cad a los nodos y líneas con longitudes a escala real en un archivo de Epanet, antes de realizar esto, fue necesario delimitar de acuerdo a la zona de estudio las líneas de tuberías de red primaria y secundaria, así como organizar en capas la información del catastro en tuberías (primaria y secundaria), diámetros, calles y nombres de calles, etc.

La información básica que requiere un modelo es la elevación para los nodos, longitud, diámetro y rugosidad para las líneas. La asignación de diámetros se realizó según los datos del plano catastral a las 1,453 tuberías en el modelo Epanet (valor variante al manipular el modelo durante procesos posteriores).

Al tener un gran número de nodos a los que se debe asignar una elevación se empleó la herramienta de exportación de Epanet generando un archivo .inp que permite manipular la información en un editor de texto como Excel. En este archivo se encuentran las coordenadas de cada nodo en sistema UTM (Universal Transversal de Mercator).

Dentro del software ArcMap se importaron las coordenadas de cada nodo y empleando las herramientas del propio SIG se asignaron elevaciones almacenadas en un modelo digital de elevación obtenido de las bases de datos de INEGI.

En la determinación de demanda base que requiere el modelo, se generaron áreas de influencia y mediante poblaciones según superficies de manzanas dentro de estas se asignaron valores de población contemplando una dotación de 150 *l/hab/día* para consumo doméstico, si bien dentro de la zona de estudio existe diversa infraestructura como escuelas, deportivos, parques y edificios públicos, iglesias, cementerios, se considera que estos representan una pequeña parte del suministro a la red debido a la alta densidad poblacional en la zona y no fueron considerados en este trabajo.

Para la generación de áreas de influencia (figura 6) se emplearon dos insumos: la distribución espacial de manzanas obtenidas de cartas topográficas en formato vectorial escalas 1:20,000 claves E14A39d y E14A39e, y polígonos de Thiessen generados por nodo con herramientas de ArcMap.

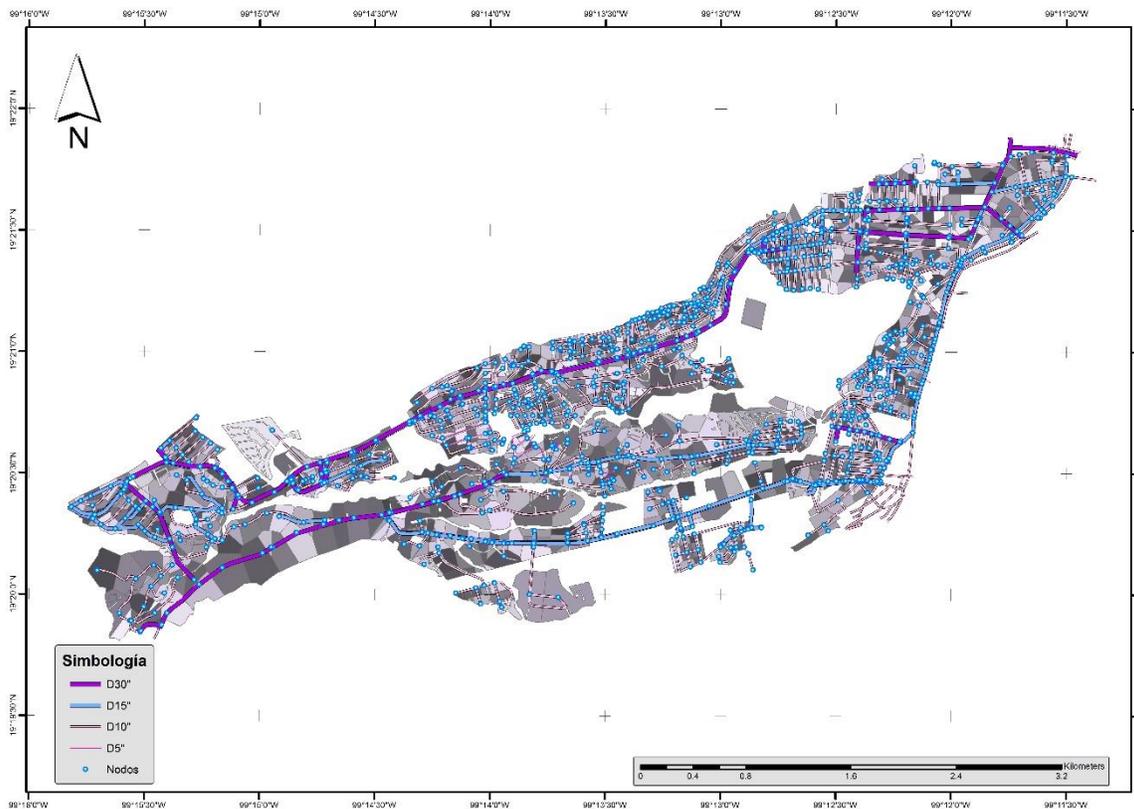


Figura 6: Áreas de influencia para cada nodo.

La información de población por manzana se obtuvo del Inventario Nacional de Viviendas (INV) de INEGI que almacena diversa información referente a la población como número de viviendas, viviendas habitadas, habitantes por vivienda, etc., así como número de habitantes por nivel de desagregación geostatística manzana en documentos de Excel. En la figura 7 se muestra un acercamiento a la zona nororiente de la zona de estudio con las áreas de influencia generadas.

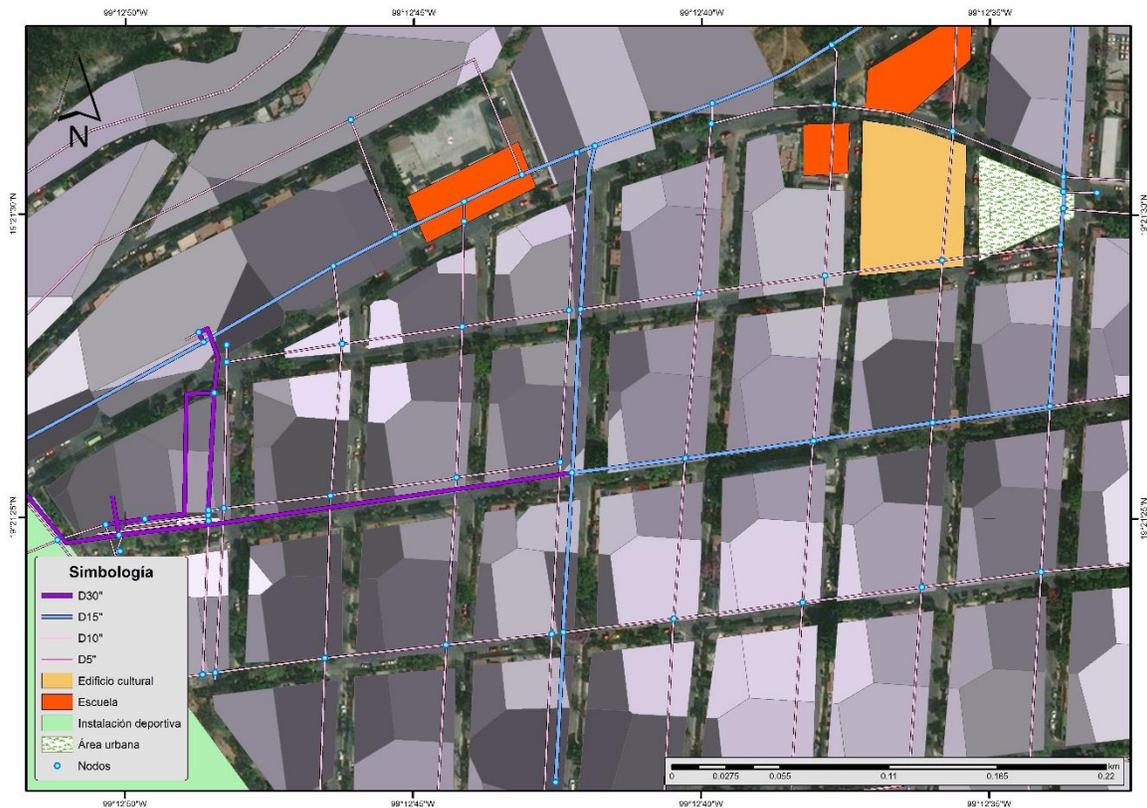


Figura 7: Área noreste de los sectores analizados y las zonas de influencia para cada nodo.

Las áreas obtenidas contienen la información de los nodos (zonas de influencia Thiessen) y de las manzanas, mediante una ponderación de áreas se determina la población que en teoría se concentra alrededor del nodo y se logra asociar una demanda base (figura 8).

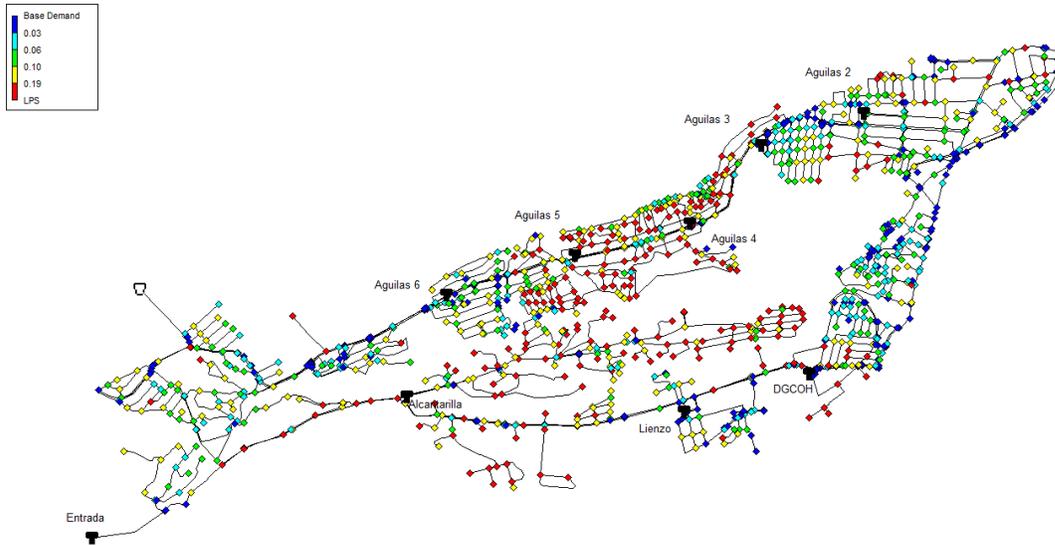


Figura 8: Distribución de demandas para cada nodo generadas a partir de áreas de influencia.

El modelo generado tiene las siguientes características: 1,165 Nodos, 10 Tanques, 1,452 tuberías, unidades de flujo litros por segundo, ecuación de pérdidas Darcy – Weisbach. Se consideró una dotación de 150 l/hab/día para toda la población de 82,365 habitantes, el consumo para este valor es de 143 l/s o $12,354.75 \text{ m}^3$ al día.

En cuanto al gasto por fugas se consideró el siguiente comportamiento, donde H corresponde a la carga de presión en el nodo, C es el coeficiente de descarga y x el exponente de la presión (ec. 5).

$$Q_{fuga} = c * H^x \text{ ec. 5}$$

El cálculo de pérdidas se realiza mediante la ecuación Darcy-Weisbach, para este caso el software Epanet requiere la asignación de la rugosidad absoluta en unidades de milímetros (para sistema de unidades internacional, SI), se asignó para todas las tuberías un valor de 0.0015 mm correspondiente a PAD.

3.1 Comportamiento sectorización actual

Ya que la conducción de agua en la zona es a gravedad y que la regulación de presiones es a través de tanques, fue necesario interpretar las conexiones entre tuberías para establecer las condiciones de presión que permitieran trabajar a los tanques de esta manera. Se encontró que, aunque no se tengan definidos límites, existe una subdivisión no definida del sector Águilas, donde los tanques, desde el Águilas 6 hasta el Águilas 2, definen estas zonas de entrega.

Cabe mencionar que de acuerdo con Capella (2001), a manera de regular presiones dentro de la red los operadores cierran parcialmente válvulas, durante el día, los consumos y velocidades aumentan provocándose pérdidas de carga, pero durante la noche los consumos bajan y también las velocidades, estableciéndose la carga estática cercana a la que se tiene en los tanques en la red. Esta condición no fue modelada en Epanet ya que las presiones más desfavorables suceden durante la noche.

Como ya se ha mencionado, los gastos de fugas son función de la carga de presión, por lo que al no considerar las pérdidas de energía que provocan las válvulas y la variación de presiones, se está sobreestimando los volúmenes de pérdidas. Para considerar esta situación se ajustó el valor del coeficiente c , a manera de tener un porcentaje de perdidas alrededor del 40% del volumen suministrado mediante un proceso iterativo. El valor obtenido del coeficiente c , es de 0.001. El volumen de suministro es:

$$S = 20,903.8 \text{ m}^3$$

Ya que el balance entre suministro, consumo y fugas es (ec. 6).

$$S = C + F \text{ ec. 6}$$

El volumen de fugas

$$F = 20,903.8 \text{ m}^3 - 12,354.7 \text{ m}^3$$

$$F = 8,549 \text{ m}^3$$

Lo que corresponde al 41 % del volumen suministrado la distribución de presiones se muestra en la figura 9.

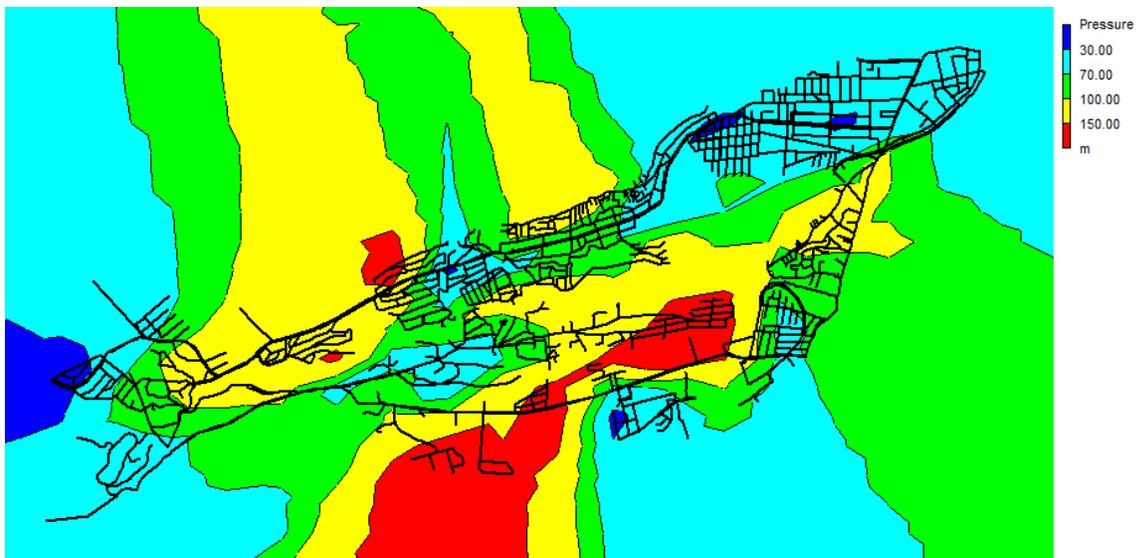


Figura 9: Distribución estimada de presiones a las 24hr del día.

3.2 Sectorización propuesta

Cuando se habla de mejorar las condiciones de una red existente se encuentran dos alternativas: la primera consiste en realizar gestión de presiones sobre la red mediante la instalación de controles de presión en puntos estratégicos, con lo cual se busca disminuir el nivel de pérdidas de agua por fugas y extender la vida de las tuberías; la segunda alternativa mide la forma cómo la red reaccionará ante la falla de alguno de sus elementos para así determinar cuáles son los elementos más débiles y proponer su intervención, mejorando la respuesta de la red.

En el primer caso, una manera de realizar gestión de presiones es dividiendo físicamente la red en sectores hidráulicos independientes, controlados mediante válvulas reguladoras de presión (VRP), metodología que a nivel mundial ha demostrado ser una forma eficiente de disminuir las pérdidas de agua causadas por la presencia de fugas (Saldarriaga, 2010).

3.2.1 Control de presiones

En el control de presiones se buscó tener un rango entre los 10 a 50mca (aunque se aceptaron valores un poco más altos en algunas zonas), así como seccionamiento de conexiones entre tuberías con válvulas existentes (o al menos marcadas en el catastro), en el modelo Epanet no se modelaron válvulas de seccionamiento, se cambió el estatus de una tubería de abierta a cerrada. La localización de las VRP se muestra en la figura 10.

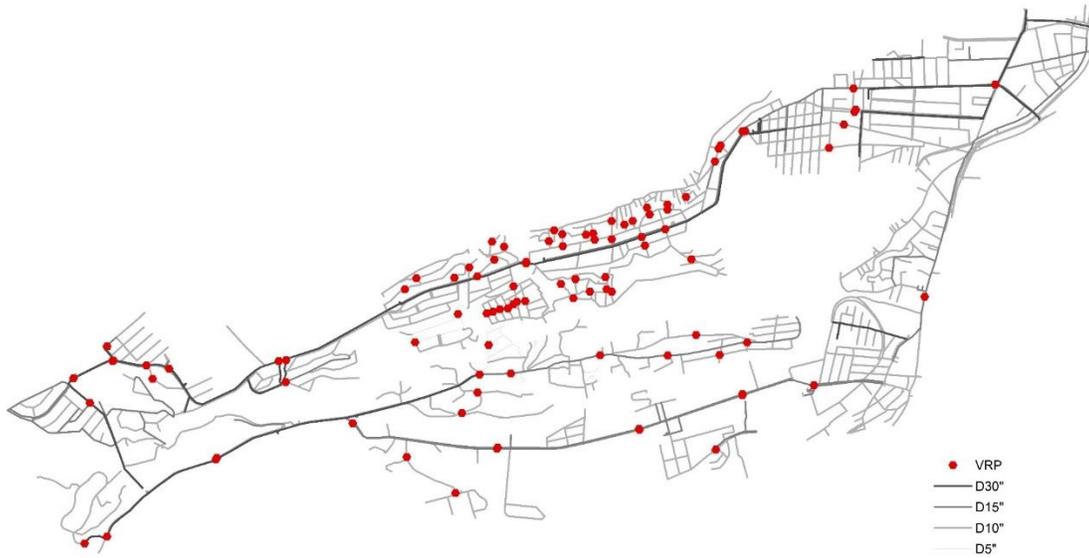


Figura 10: Localización de válvulas reguladoras de presión, VRP.

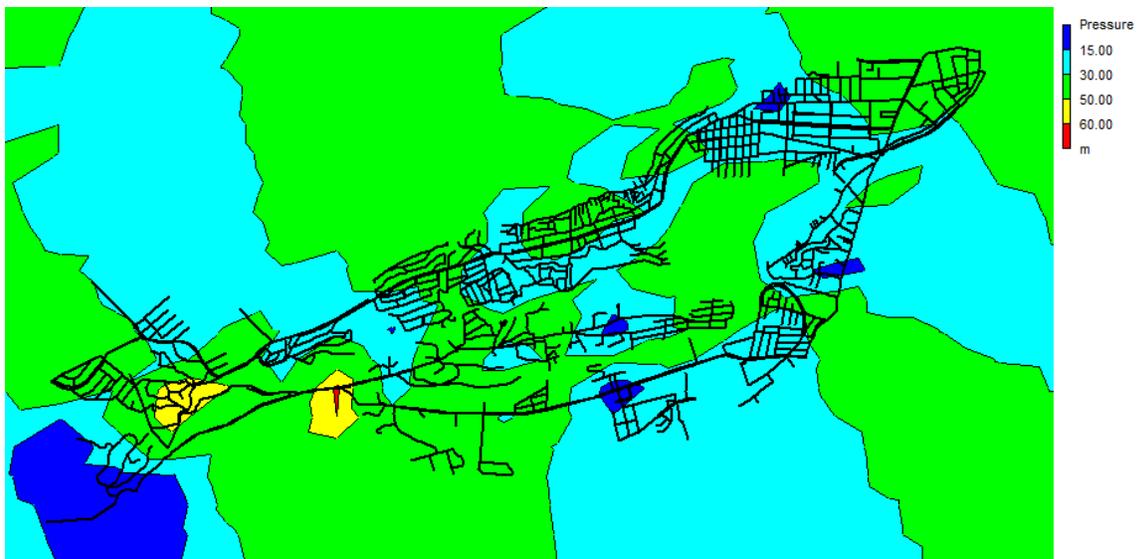


Figura 11: Presiones controladas a las 24hr.

Bajo las nuevas condiciones se puede estimar la reducción en volúmenes de fugas. El nuevo suministro arrojado por Epanet:

$$S = 15,673 \text{ m}^3$$

Con el consumo considerado anteriormente de $12,354.7 \text{ m}^3$, las fugas son

$$F = 3,318 \text{ m}^3$$

Equivalente al 21% del suministro, lo que significa una reducción del 39% del volumen de fugas.

3.2.2 Delimitación de nuevos sectores

Existen diversos criterios para establecer sectores de una red de abastecimiento, factores como la topografía, nivel socioeconómico de la población, límites políticos, áreas, conexiones, entre otros, influyen en la toma de decisión. Por las características de la zona el criterio más aplicable es delimitación topográfica, siguiendo curvas de nivel y estableciendo las entradas del sector, en algunas zonas por la falta de conexión entre tuberías este método no fue aplicable.

En el sector Águilas, como se había mencionado en secciones anteriores, existen zonas de influencia no marcadas de los tanques Águilas 6 al Águilas 2 los que abastecen a zonas en cotas alrededor de 20 m más abajo, se buscó que la propuesta de sectorización tuviera como límites estas áreas no marcadas, en este mismo sector es notorio la variación en el nivel socioeconómico factor que fue considerado en la propuesta.

En el caso de Camino al Desierto se propusieron sectores con áreas similares, con desniveles topográficos entre 60 a 90m, aunque no es deseable, existe comunicación entre sectores, siendo las



salidas de unos las entradas de los que se encuentran en cotas más abajo debido a la falta de tuberías. De forma similar sucede con Av. Toluca con desniveles en la sectorización propuesta entre 40 a 80m.

Aunque no se tiene claro la actual entrada a Panteón, esta zona se encuentra en las cotas más bajas en donde no se tienen pendientes de importancia, los desniveles solo varían entre los 30m, por lo que solo se delimitó de acuerdo a la zona habitacional.

Por último, en Verdún se observan construcciones de un nivel socioeconómico elevado, aquí se encuentran desarrollos urbanos como el Rancho San Francisco y Las Haciendas. Aquí se siguió un criterio socioeconómico.

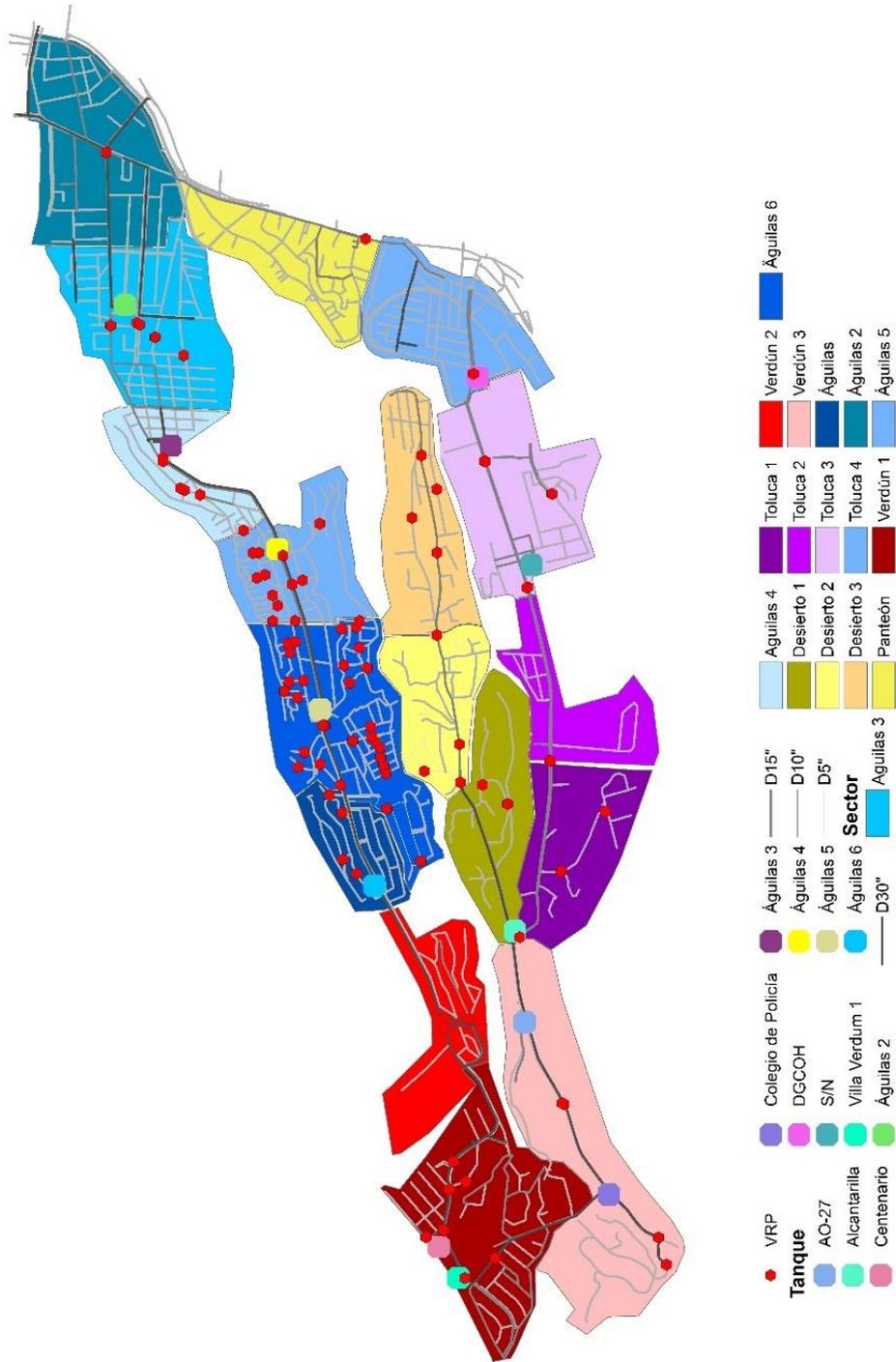
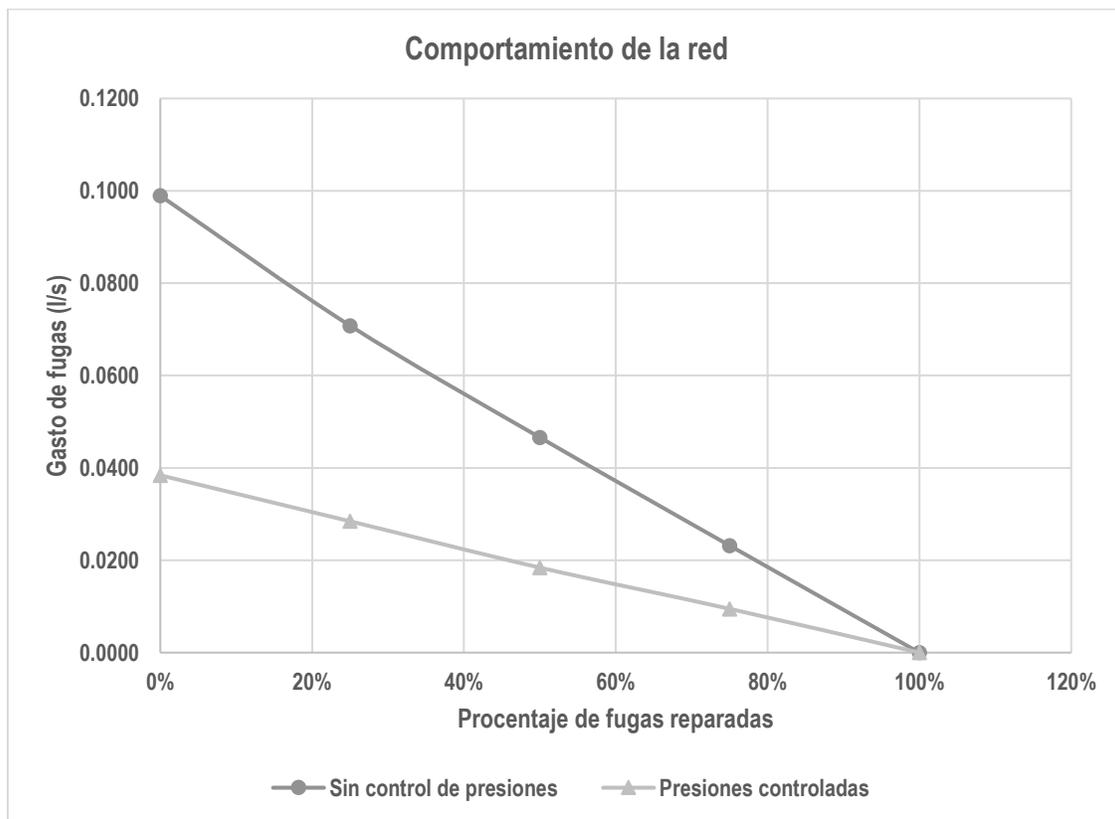


Figura 12: Propuesta de Sectorización.

3.2.3 Campaña de reducción de fugas

Una segunda acción en la búsqueda de reducción de fugas es la implementación de campañas de sustitución de tuberías llevando un calendario o programa de las fechas de reemplazo, diámetros, tramos cambiados, con el objetivo de tener un control de la infraestructura hidráulica y de sus condiciones. En la estimación de la reducción de las fugas se modeló un coeficiente c igual a cero asignados a nodos aleatoriamente, esta estimación se consideró para el 25, 50, 75 y 100 por ciento de fugas reparadas. Para la sectorización propuesta con control de presiones y sectorización sin control de presiones, los gastos de fugas de la red guardan la relación mostrada en el gráfico 3.



Grafica 3: Relación entre Suministro y Porcentaje de fugas reparadas.



Análisis de resultados

Análisis de resultados

En el nuevo rango de presiones los volúmenes de fugas se redujeron de $8,546 \text{ m}^3$ a $3,318 \text{ m}^3$ lo que representa el 21% del suministro bajo condiciones de presión controlada y una reducción del 39% del volumen de fugas. Las presiones en la propuesta de sectorización van de manera general entre los 16 mca a 50 mca y hasta 64 mca en pequeñas áreas en de la red, siendo de 16 mca a 32 mca el rango más prevaleciente, lo que representa una disminución significativa de presión en los niveles más bajos de cada sector. Dentro de la campaña de reducción de fugas, aunque se modelaron aleatoriamente nodos con coeficiente c igual a cero, la campaña debería enfocarse en zonas donde las presiones son las altas mayores a 30 mca representadas en color amarillo y rojo en la siguiente figura 13.

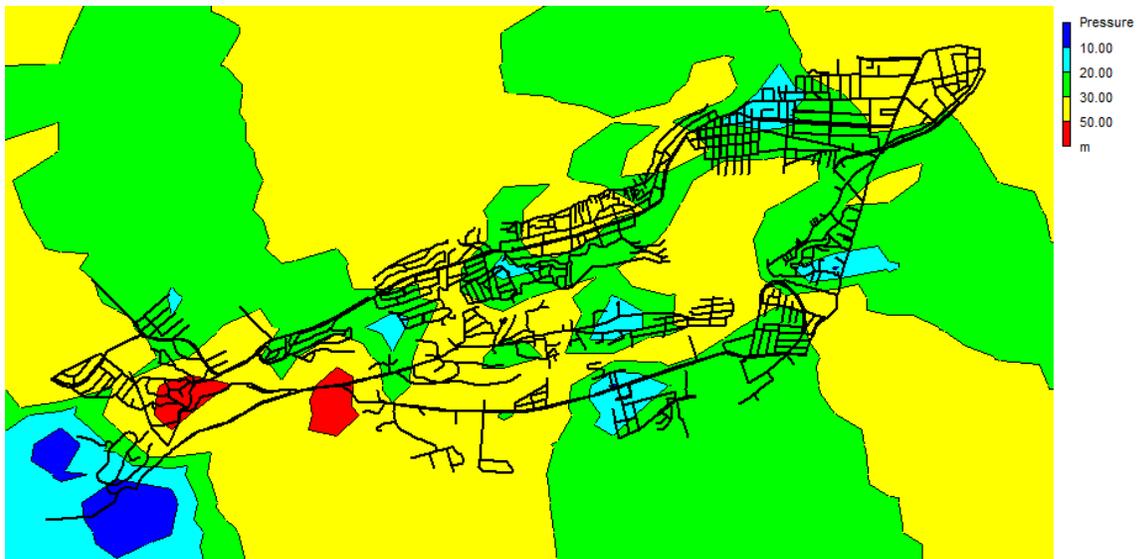
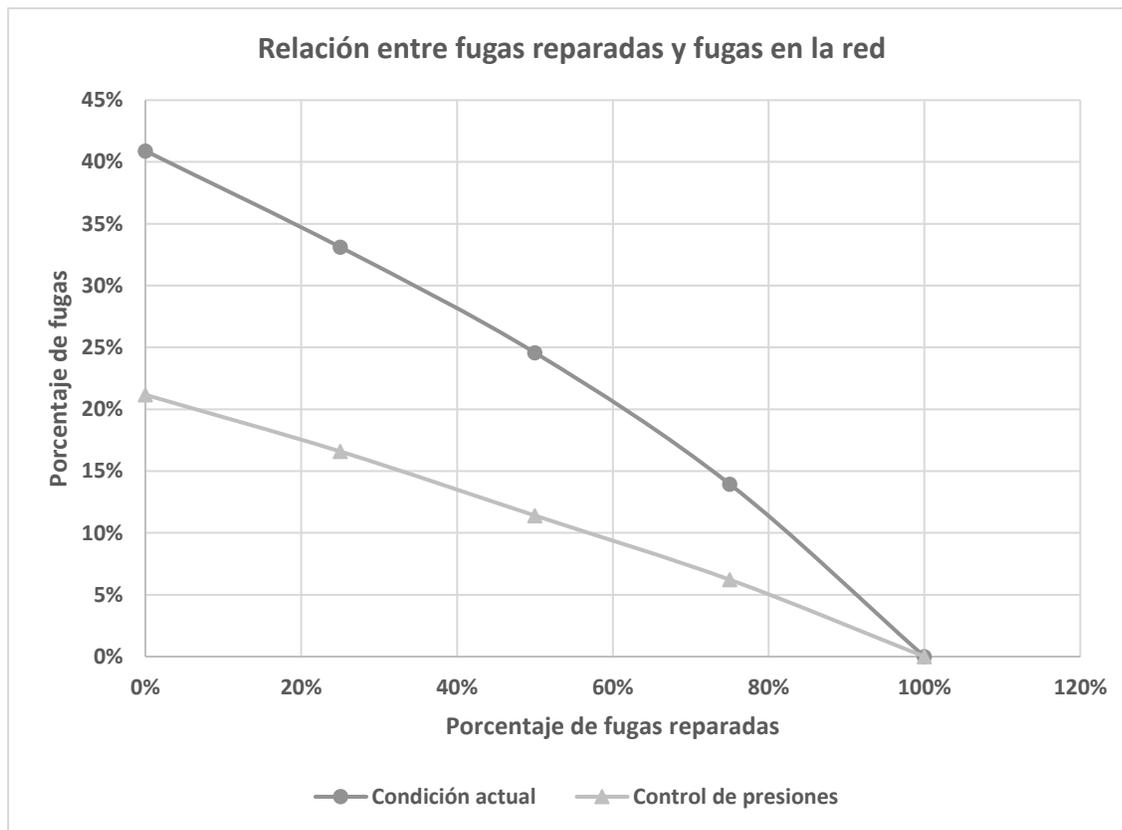


Figura 13: Distribución de presiones. Se resalta las zonas en color amarillo y rojo donde se podrían enfocar campañas de reducción de fugas.

La relación entre el porcentaje de fugas reparadas y el porcentaje de fugas permite estimar de acuerdo con los objetivos planteados en la campaña de sustitución de tuberías los volúmenes recuperados. En el gráfico 4 se muestra un comparativo entre los comportamientos de los casos analizados.



Grafica 4: Comportamiento de la reducción en porcentaje de fugas en función del porcentaje de fugas reparadas.



Conclusiones y observaciones

Conclusiones y observaciones

Es imprescindible la aplicación de acciones encaminadas a optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico, dada la cantidad de agua que se pierde en fugas por no contar con condiciones físicas y operacionales adecuadas de la red de abastecimiento. Gran parte del problema es la naturaleza cambiante de las condiciones iniciales de diseño, donde en la práctica se busca subsanarlos empleando soluciones poco adecuadas, como la descrita por Capella (2001), cerrando válvulas a fin de provocar pérdidas de energía y por tanto disminución de presiones solamente en horarios de alto consumo y aumentando durante la noche.

Cuando se tiene en cuenta la distancia que viaja el agua a través del sistema Cutzamala y la inversión energética y económica para elevarla hasta la Ciudad de México, resulta evidente pensar en aprovechar la mayor cantidad de estos volúmenes de agua importados. Ya que el comportamiento que sigue el gasto a través de un orificio es función de la presión a la que está sometido, es en estas zonas con grandes desniveles topográficos como la analizada y que se abastecen del sistema Cutzamala que se deben implementar las medidas en el control de presiones. Las sectorizaciones han demostrado ser la herramienta más importante en el control de presiones, así como la administración de volúmenes de entrada y salida.

En esta tesina se logró analizar sectores que presentan condiciones desfavorables, aunque es necesario mencionar que el comportamiento actual de los sectores puede diferir con lo modelado debido a la interpretación realizada de conexiones, entradas y salidas, por ejemplo, se observó que los tanques Águilas 6, 5, 4, 3 y 2 regulan presiones dentro del sector a ciertas áreas alrededor de 20m por debajo de su desplante y estas áreas podrías ser distintas a la realidad.



El valor obtenido del coeficiente c de 0.001 ajustado a un volumen de pérdidas de 40%, resulta muy por debajo de 0.1 que es recomendado cuando se desconoce las características de una red, de esta manera se toma en consideración la disminución de presiones que provocan la operación de válvulas de seccionamiento, de otra manera se estaría sobreestimando estas pérdidas al no modelar la localización y factores de pérdida simplemente por no conocerlas.

Al controlar presiones se observó una disminución significativa en volúmenes de pérdidas, de la condición sin control $11,326 \text{ m}^3$ a $6,160 \text{ m}^3$ con presiones controladas. De manera que se considera que se cumplieron los objetivos marcados en esta tesina.



Referencias bibliográficas

Referencias bibliográficas

- Capella, V. (2001). Control de Presiones y Reducción de Fugas en la Red de Agua Potable del Poniente de la Ciudad de México.
- Comité de Academias para el Estudio de Suministro de Agua de la Ciudad de México. (1995). Suministro de Agua de la Ciudad de México. Mejorando la Sustentabilidad.
- Conagua. (2015). Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Zona Metropolitana de la Cd. De México (0901), Distrito Federal.
- De la Peña Olivas, J. M. (2010). Sistemas romanos de abastecimiento de agua. Las técnicas y las construcciones en la ingeniería romana. Fundación de la Ingeniería Técnica de Obras Públicas.
- Domínguez, J., & Carrillo-Rivera, J. J. (2007). El agua subterránea como elemento de debate en la historia de México. México en tres momentos: 1810-1910-2010.
- Espinoza, V., Collado, J., Morales, J. M. & Hernández, J. (2012). El Gran Reto del Agua en la Ciudad de México. Pasado, Presente y Prospectivas de Solución para una de las Ciudades más Complejas del Mundo. Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- Jiménez, B., Mazari, M., Domínguez, R., & Cifuentes, E. (2004). El agua en el Valle de México. El agua en México vista desde la academia. Science Academy, México.
- Lugo, J., Cordero, M. & Zamorano, J. (1995). Relieve, Litología y Riesgos en la Zona Urbana de la Delegación Álvaro Obregón, Distrito Federal, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 12(1), 52-67.
- Rossman, L. A. (2001). (Versión 2.0 vE). Epanet 2 Manual de Usuario. Universidad Politécnica de Valencia.
- Saldarriaga, J. G., Naranjo, G., & Rothstein, E. (2010). Metodologías para la Sectorización de Redes Existentes de Distribución de Agua Potable. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica Punta del Este, Uruguay, noviembre 2010.