



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA**

**PROGRAMACIÓN EN MATLAB PARA SECTORIZAR REDES DE AGUA POTABLE USANDO EPANET.**

**TESIS**  
**PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRA EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**YURY CAROLINA QUIROZ ESTUPIÑAN**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**DR. HERRERA ALANÍS JOSÉ LUIS**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**

**CDMX, AGOSTO 2020.**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Fuentes Mariles Oscar Arturo
Secretario:	Dr. Domínguez Mora Ramón
1er. Vocal:	Dr. Herrera Alanís José Luis
2do. Vocal:	Dra. Arganis Juárez Maritza Liliana
3er. Vocal:	Dr. Mendoza Resendiz Alejandro

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM. CIUDAD DE MÉXICO

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Herrera Alanís José Luis

---

**FIRMA**



## *DEDICATORIA*

*A mí madre, por su amor,  
consejo, guía y apoyo en todo  
momento.*

## *AGRADECIMIENTOS*

*A mi madre, por su apoyo en cada proyecto que emprendo.*

*Al Dr. José Luis Herrera Alanís, por su guía y experiencia para llevar a cabo esta tesis.*

*Al Dr. Ramón Domínguez Mora por ser guía, apoyo y permitirme hacer parte del Instituto de Ingeniería de la UNAM.*

*A la Dra. Maritza Lílana Arganís Juárez, al Dr. Oscar Fuentes Mariles y al Dr. Alejandro Mendoza Reséndiz, por su apoyo y revisión de esta tesis.*

*Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por ser parte de mi formación profesional.*

*Al CONACYT, por el apoyo económico otorgado durante los estudios de maestría.*

## **RESUMEN**

La sectorización de una red de agua potable consiste en dividir la red de distribución en pequeñas áreas. El objetivo de la sectorización es tener zonas aisladas y controladas, con lo que es posible establecer presiones en la red, medir el gasto de suministro y hacer diagnósticos del estado de los sectores. También hace más eficiente las campañas de detección de fugas.

Los criterios para Sectorizar una red de agua potable depende del tipo de red, de las fuentes de abastecimiento, la urbanización y la topografía. Por ende realizar una sectorización requiere del estudio y caracterización de la zona para su adecuado funcionamiento.

En este trabajo se desarrolló un algoritmo en MATLAB, el cual propone la sectorización de redes de agua potable, por medio de un reconocimiento de la red primaria y posteriormente verifica el suministro de todos los nodos. Por último, comprueba que las velocidades y presiones estén dentro del rango de valores permisibles

## **ABSTRACT**

The sectorization of the drinking water network consists in dividing the distribution network into small areas. The objective of the sectorization is to obtain isolated and controlled zones, with which is possible to establish the pressures in the network, measure the discharge of supply and diagnoses the state of the sectors. It also makes leak detection campaigns more efficient.

The criteria for sectorizing a drinking water network depends on the type of network, the supply sources, the urbanization and the topography. To carry out a sectorization is necessary the study of the area for its proper operation.

In this work was developed an Algorithm in MATLAB, which proposes the sectorization of drinking water networks, by means of a recognition of the primary network and subsequently verifying the supply of all the nodes. Finally verifies that the pressures and speeds are within the range of allowable values.



INTRODUCCIÓN.....	1
1 OBJETIVOS .....	3
2 CONCEPTOS BÁSICOS.....	4
2.1 Hidráulica de tuberías. ....	4
2.2 Redes de agua potable. ....	7
2.3 Esquema de la red de distribución de agua potable. ....	8
2.4 Análisis de redes.....	10
2.4.1 Análisis estático. ....	10
Redes abiertas. ....	11
Redes cerradas. ....	12
2.4.2 Análisis dinámico. ....	15
2.5 Software EPANET .....	15
2.6 Plugin EPANET.....	16
2.7 MATLAB .....	16
2.8 QGIS .....	17
2.9 PLUG IN THE QGIS – QGISRed.....	17
2.10 NOMENCLATURA UTILIZADA EN EL ANÁLISIS. ....	18
3 SECTORIZACIÓN:.....	20
3.1 Criterios de Sectorización: .....	21
3.2 Ventajas de realizar una sectorización.....	21
4 ALGORITMO DE SECTORIZACIÓN .....	22
4.1 Algoritmo de PRIM .....	24
4.2 Algoritmo de recorrido. ....	24
4.3 Consideraciones para funcionamiento del algoritmo .....	27
4.4 Pasos para aplicar el algoritmo.....	27
Creación archivos .txt .....	27

<b>5</b>	<b>APLICACIONES ALGORITMO.....</b>	<b>28</b>
<b>5.1</b>	<b>RED CALDERA: .....</b>	<b>28</b>
5.1.1	Análisis del recorrido red primaria .....	31
5.1.1.1	Recorrido primer reservorio. ....	33
5.1.1.2	Recorrido segundo reservorio. ....	33
5.1.1.3	Recorrido tercer reservorio. ....	34
5.1.2	Nodos con su reservorio de influencia. ....	37
5.1.2.1	Recorrido segundo reservorio. ....	38
5.1.2.2	Recorrido tercer reservorio. ....	39
5.1.3	Condición de carga. ....	39
5.1.4	Nodos aislados.....	41
5.1.5	Sectores entregados .....	41
5.1.6	Simulación .....	42
<b>5.2</b>	<b>RED ZARAGOZA. ....</b>	<b>43</b>
5.2.1	Sectores entregados por el algoritmo .....	46
5.2.2	Simulación .....	47
5.2.2.1	Red sectorizada. ....	47
<b>5.3</b>	<b>RED TEOTONGO.....</b>	<b>48</b>
5.3.1	Condición de carga. ....	52
5.3.2	Simulaciones.....	53
5.3.2.1	Red sectorizada .....	53
<b>5.4</b>	<b>RED ERMITA. ....</b>	<b>54</b>
<b>5.5</b>	<b>RED ACAUNTEPEC.....</b>	<b>57</b>
5.5.1	Sectores por condición de carga (inicial). ....	61
5.5.2	Simulación primera propuesta .....	62
5.5.2.1	Red sectorizada. ....	62
5.5.3	Sectores propuestos plug-in. ....	64
5.5.4	Simulación propuesta final en Epanet. ....	65
5.5.4.1	Red sectorizada. ....	65
<b>6</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>66</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES. ....</b>	<b>78</b>

## Tabla de Ilustraciones

Ilustración 2-1 Continuidad en conductos .....	4
Ilustración 2-2 Nomenclatura usada en la Ecuación de la energía.....	7
Ilustración 2-3 Esquema de una red de distribución de agua potable .....	9
Ilustración 2-4 Red abierta .....	12
Ilustración 2-5 Red cerrada .....	13
Ilustración 2-6 Recorrido de circuito en una red .....	14
Ilustración 2-7 Red Caldera.....	18
Ilustración 2-8 Elevaciones red Caldera .....	19
Ilustración 2-9 Red primaria y secundaria de la red Caldera .....	20
Ilustración 4-1 Árbol de peso mínimo.....	24
Ilustración 4-2 Red Ejemplo .....	25
Ilustración 5-1 Red Caldera.....	28
Ilustración 5-2 Elevaciones red Caldera .....	29
Ilustración 5-3 Resultado al aplicar el plugin QGISRed .....	29
Ilustración 5-4 Red primaria red Caldera .....	30
Ilustración 5-5 Conectividad entre reservorios red Caldera .....	31
Ilustración 5-6 Recorrido primer reservorio red Caldera .....	33
Ilustración 5-7 Segundo recorrido red Caldera .....	34
Ilustración 5-8 Tercer recorrido red Caldera .....	34
Ilustración 5-9 Definición red primaria Caldera .....	35
Ilustración 5-10 Nodos aislados en red principal Caldera.....	36
Ilustración 5-11 Red primaria Caldera .....	37
Ilustración 5-12 Primer recorrido total del primer reservorio de la red Caldera .....	37
Ilustración 5-13 Segundo recorrido total de la red Caldera .....	38
Ilustración 5-14 Tercer recorrido total de la red Caldera .....	39
Ilustración 5-15 Nodos según reservorio de influencia red Caldera .....	40
Ilustración 5-16 Nodos aislados en toda la red Caldera .....	41
Ilustración 5-17 Sectores Propuestos red Caldera .....	42
Ilustración 5-18 Presiones red Caldera sectorizada, en el tiempo 12:00 a.m. ....	42
Ilustración 5-19 Planos de ubicación Reservorios y elevaciones de la red Zaragoza .....	44
Ilustración 5-20 Sectores iniciales red Zaragoza .....	45
Ilustración 5-21 Sectores Propuestos red Zaragoza.....	46
Ilustración 5-22 Presiones red Zaragoza sectorizada en el tiempo 12:00 am.....	47
Ilustración 5-23 Plano de ubicación Reservorios y bombas de la red Teotongo .....	49
Ilustración 5-24 Plano de elevaciones de la red Teotongo .....	50
Ilustración 5-25 Sectores iniciales red Teotongo .....	51
Ilustración 5-26 red Teotongo sectorizada .....	52
Ilustración 5-27 Presiones red Teotongo sectorizada tiempo 12:00 a.m.....	53
Ilustración 5-28 Plano de ubicación Reservorios de la red Ermita .....	54
Ilustración 5-29 Plano de elevaciones de la red Ermita .....	55
Ilustración 5-30 Nodos según reservorio de influencia red Ermita .....	55
Ilustración 5-31 Presiones red Ermita tiempo 12:00 a.m. ....	56
Ilustración 5-32 Plano de ubicación Reservorios de la red Acauntepec.....	58
Ilustración 5-33 Plano de elevaciones de la red Acauntepec .....	59
Ilustración 5-34 Sectores iniciales red Acauntepec .....	60
Ilustración 5-35 Nodos según reservorio de influencia red Acauntepec.....	61
Ilustración 5-36 Presiones red Acauntepec sectorizada en el tiempo de máxima demanda .....	62
Ilustración 5-37 Tubería con altas velocidades .....	63

Ilustración 5-38 Nodos según reservorio de influencia corrección por medio del Plug-in de EPANET .....	64
Ilustración 5-39 Presiones red Acauntepec sectorizada Plug-in EPANET, en el tiempo de máxima demanda.....	65
Ilustración 6-1 Presiones Red Caldera Sectorizada .....	66
Ilustración 6-2 Presiones Red Caldera sin sectorizar .....	66
Ilustración 6-3 Simulaciones red sin sectorizar y red sectorizada en el tiempo 12:00 a.m. ....	68
Ilustración 6-4 Simulaciones red sin sectorizar y sectorizada en el tiempo de máxima demanda ...	70
Ilustración 6-5 Presiones red Teotongo sin sectorizar y sectorizada en el tiempo 12:00 a.m.....	72
Ilustración 6-6 Presiones red Teotongo sin sectorizar y sectorizada en el tiempo 12:00 p.m.....	73
Ilustración 6-7 Presiones Red Acauntepec sin sectorizar y sectorizada para el tiempo 12:00 a.m.	75
Ilustración 6-8 Presiones red Acauntepec sin sectorizar y sectorizada en el tiempo 12:00 p.m.....	76

## INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de un entorno con los elementos esenciales para el desarrollo de la vida, nuestros antepasados establecieron asentamientos alrededor de ríos, lagos y manantiales, posteriormente debido al crecimiento demográfico se provocan mayores demandas y el transporte del recurso a largas distancias, desarrollando así las primeras conducciones de agua por canales abiertos.

Algunos de los primeros asentamientos son ahora grandes ciudades donde la red de distribución de agua se expandió a razón del crecimiento demográfico, por ello el aumento en su trazo en ocasiones fue sin orden o control. Este es el caso de la Ciudad de México, en donde las redes de distribución del agua potable tienen una antigüedad mayor de 50 años, y presentan complejas formas de operación. A esto hay que agregar el hundimiento de la ciudad debido a la explotación del agua de la cuenca y consolidación del terreno sobre el cual se encuentra la ciudad. Todo ello provoca un incremento de probabilidad en la rotura de tuberías, conllevando a la fuga del recurso. En datos estimativos cerca de un 40 por ciento del agua de la Ciudad de México se pierde por fugas en la red hidráulica. (MILENIO, 2020)

La pérdida o fuga del recurso implica un alto costo, puesto que el tratamiento del agua es un proceso de alta inversión, y por otra parte la cantidad de agua con la que se sule a la ciudad en ocasiones no cumple con la demanda, razón por la cual algunas localidades no tienen flujo constante del recurso, convirtiendo en una necesidad el control de las redes de distribución de agua potable.

Una de las herramientas que permiten tener el control de las redes de abastecimiento del agua potable es la sectorización: la cual consiste en dividir la red en grupos de redes en las cuales sea posible monitorear y controlar la entrada de agua al sistema. El proceso consiste en identificar puntos en la red que hagan posible el aislamiento de un sector con otro, sin afectar la distribución de agua a todos los puntos.

Los beneficios de una sectorización son: control del funcionamiento y monitoreo, control de presiones, reduce el área de inspección del sistema facilitando así la detección, localización y control de anomalías en el suministro como roturas, fugas, deficiencias de presión, etc.

La sectorización de una red contempla varios factores, los cuales varían según las necesidades del transporte, calidad del agua, elementos en la red, tipo de suelo, condiciones climáticas, abastecimiento, tipo de consumo, normativas y otras características de la red y su entorno que hacen al proceso de sectorización un proceso complejo.

La sectorización en las redes de agua potable de la Ciudad de México, es compleja de realizar, ya que al ser una red con múltiples conexiones y de gran extensión, se deben encontrar todos los puntos que abastecen la zona a aislar, de acuerdo con su funcionamiento, e instalaciones.

La finalidad de este trabajo, es desarrollar un algoritmo en MATLAB y la Toolkit de EPANET, que defina el cierre de tuberías en una red de distribución de agua potable de una localidad, con el fin de sectorizarla y cumplir con las condiciones mínimas y máximas de carga de operación.

En esta tesis se trabajó con zonas de terrenos de alta pendiente, que tienen abastecimiento de agua potable por gravedad y no se consideraron operaciones en la red primaria.

Por medio de un recorrido en la red, el algoritmo desarrollado en este trabajo define una red primaria, bajo el criterio de los diámetros de las tuberías y la carga de posición en cada nodo.

Posteriormente, se define el área de influencia de cada reservorio, debido a la carga de posición obtenida de cada nodo. Esto se logra gracias a un recorrido que realiza el algoritmo por toda la red almacenando la carga obtenida en cada nodo, otorgando al nodo el identificador del reservorio por el cual llega el agua con la carga de posición más cercana a un rango de cargas establecido al inicio

del algoritmo. Las tuberías en las cuales se obtengan un reservorio de influencia diferente en su nodo inicial y en su nodo final son propuestas para cierre.

En ocasiones existirán nodos aislados, los cuales tendrán un tratamiento específico según si se presentan en la parte del algoritmo donde se define la red primaria o si se presentan en la definición del reservorio de influencia para cada nodo.

Hasta este punto el algoritmo crea sectores, los cuales son evaluados por medio de la herramienta Toolkit de EPANET, la cual simula la red sectorizada en el tiempo de máxima demanda y se identifican las presiones en cada nodo, estas son comparadas con la carga definida al inicio del algoritmo, si la simulación entrega presiones por debajo de las establecidas, éstos nodos son tratados de nuevo como nodos aislados y se busca conectarlos a alguna zona que entregue mejores presiones.

Al cumplir las condiciones y entregar una propuesta de sectorización, el ingeniero deberá evaluar, la sub-sectorización, puesto que el algoritmo entrega sectores conforme a los puntos de abastecimiento.

## **1 OBJETIVOS**

Desarrollar un algoritmo en MATLAB con el que se obtenga una propuesta de cierres de tuberías, las cuales crean sectores hidráulicos. El criterio utilizado está en función de las cargas que se establezcan para el adecuado abastecimiento de la comunidad.

Dejar la base para que se siga desarrollando algoritmos para mayores alcances que los tratados en este trabajo.

Entregar sectores hidráulicos, en los cuales se obtenga la menor cantidad de nodos con presiones inferiores a las establecidas como adecuadas.

El algoritmo desarrollado debe determinar sectores funcionales para todas las redes estudiadas en este trabajo.

## 2 CONCEPTOS BÁSICOS

### 2.1 Hidráulica de tuberías.

A continuación se presentan las definiciones de Hidráulica de tuberías de acuerdo con Sotelo G, 2002.

En términos simples, la hidráulica de tuberías es el estudio de la conducción de un fluido por medio de una tubería. El movimiento del fluido dentro del conducto se debe a las energías presentes así como de las características del conducto que la transporta.

Para el estudio de lo anterior, es necesario conocer:

Las características del fluido que se transporta, con ello se hace referencia a la viscosidad, compresibilidad, densidad, la presión y la temperatura.

Las características de la conducción en conjunto como lo son los diámetros, material, rugosidad, longitud, elevaciones, accesorios y otros elementos instalados para su adecuado funcionamiento.

**Ecuación de continuidad:** Está ecuación se basa en el principio de conservación de la materia que en términos simples dice que en un sistema debe existir un balance entre el agua que entra, el agua que sale y el agua que se almacena. Considerando un volumen de control (Ilustración 2-1).

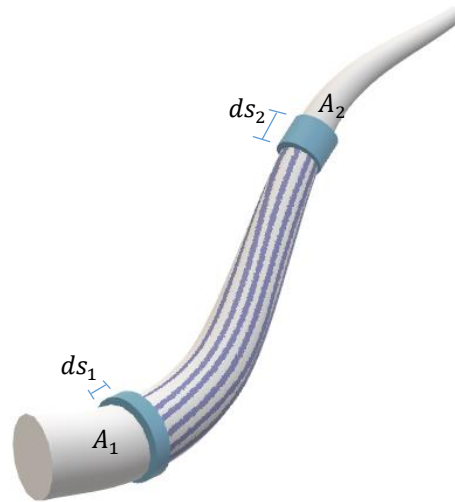


Ilustración 2-1 Continuidad en conductos

Aplicando la conservación de masa de fluido en dos secciones de un conducto o tubería, se tiene:

$$dm_1 = \rho_1 * A_1 * ds_1 \quad (2-1)$$

Donde  $dm$  es el diferencial de masa,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $A$  es el área y  $ds$  es la diferencial debido al movimiento.

La diferencial debido al movimiento es igual a la velocidad  $V$  por la diferencial de tiempo  $dt$ .

$$ds_1 = V_1 * dt \quad (2-2)$$

Según la conservación de masa para flujo permanente.



$$\frac{dm_1}{dt} = \frac{dm_2}{dt} \quad (2-3)$$

$$\rho_1 * A_1 * V_1 = \rho_2 * A_2 * V_2 \quad (2-4)$$

Considerando la densidad del fluido es constante en el tiempo se tiene.

$$A_1 * V_1 = A_2 * V_2 \quad (2-5)$$

Teniendo como definición de caudal: cantidad de agua que pasa por una sección transversal de un conducto en una unidad de tiempo.

$$Q = A * V \quad (2-6)$$

Con lo cual la ecuación (2-5) es la conservación de caudal entre un punto inicial a uno final.

**Número de Reynolds:** es un número adimensional, es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Con este valor se hace una distinción entre regímenes de flujo como son el laminar y el turbulento. Su expresión es la ecuación (2-7):

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (2-7)$$

Flujo laminar. Para fines prácticos, si el número de Reynolds es menor que 2000, el flujo es laminar. El número de transición aceptado de Reynolds para el flujo en una tubería circular es de 2300.

Flujo transitorio. En los números de Reynolds entre aproximadamente 2000 y 4000, el flujo es inestable como resultado del inicio de la turbulencia. Estos flujos a veces se denominan flujos de transición.

Flujo turbulento. Si el número de Reynolds es mayor que 4000

**Ecuación de Bernoulli:** El teorema de Bernoulli, es parte de la ecuación de conservación de energía. La "carga" total de una partícula de agua es igual a la carga de presión en el punto, la carga de posición respecto de un plano de referencia y la carga de velocidad.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (2-8)$$

Esta ecuación es válida para el estudio de una línea de corriente, solo en ausencia de fricción, y en flujo permanente. Al agregar las pérdidas por fricción, se convierte en la **ecuación de la conservación de energía**.

**Perdida por fricción:** es la pérdida de energía por efecto del movimiento del fluido a lo largo de una conducción. Para la pérdida debido a la longitud del conducto se usan varias ecuaciones.

#### **Ecuación de Darcy-Weisbach**

La forma general de la ecuación de Darcy-Weisbach es:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (2-9)$$

Esta ecuación sirve para calcular las pérdidas de energía para todo tipo de flujo, por eso es conocida como la ecuación universal.

Factor de fricción o factor de Darcy aplicando la ecuación de Swamee y Jain

$$f = \frac{0.25}{\left(\log\left(\frac{k}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right)^2} \quad (2-10)$$

El coeficiente de rugosidad  $f$  depende del tamaño promedio de las protuberancias de la pared interior de la tubería denominada rugosidad absoluta ( $k$ ), el diámetro de la tubería, la velocidad del flujo y viscosidad del fluido que circula en la tubería. Esta ecuación es aplicable dentro de los siguientes rangos:  $100 < D/k < 1 * 10^6$  Y  $4000 < Re < 3 * 10^8$

Si el número de Reynolds del fluido en la tubería es menor a 2300, el flujo es laminar y se establece que

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2-11)$$

**Ecuación de Hazen Williams:**

$$V = 0.8494 * C * (Rh)^{0.63} * S^{0.54} \quad (2-12)$$

En función del diámetro

$$Q = 0.2787 * C * (D_i)^{2.63} * S^{0.54} \quad (2-13)$$

Esta fórmula es aplicable con las siguientes restricciones.

Velocidades de flujo menores de 3.05 m/s, conductos de diámetro entre 2 y 72 pulgadas, agua a 15°C, Desarrollada únicamente para flujo turbulento.

**Ecuación de Manning:**

$$V = \frac{1}{n} * R_h^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \quad (2-14)$$

Aplicable para flujo turbulento.

**Pérdidas locales:** Las pérdidas de carga localizadas o pérdidas secundarias son pérdidas de carga debidas a elementos singulares de la tubería tales como codos, estrechamientos, válvulas, etc.

$$h_l = K \frac{V^2}{2g} \quad (2-15)$$

$K$  Es el coeficiente de pérdida sin dimensiones que depende del tipo de pérdida que se trate, del número de Reynolds y de la rugosidad del tubo.

**Ecuación de la conservación de la energía.**

Según la ley de conservación de la energía, la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma.

En la conducción de un fluido se presentan “pérdidas”, esto debido al rozamiento y/o choque entre las mismas partículas del fluido, las paredes que lo contienen o los accesorios que la componen.

En el estudio de hidráulica de tuberías es necesario hacer algunas correcciones en la carga de velocidad debido al uso de la velocidad promedio y no tomar en cuenta la distribución de velocidades. Para esta corrección se utiliza el coeficiente de Coriolis el cual se obtiene con la ecuación ( 2-16):

$$\alpha = \frac{\int v_i^3 dA}{V^3 A} \quad (2-16)$$

Donde  $v_i$  es la velocidad en el punto  $i$ ,  $dA$  es la diferencia de área en el punto  $i$ ,  $V$  es la velocidad promedio de la sección y  $A$  es el área total de la sección

Por lo que la ecuación de la energía se puede escribir como:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_f + h_l \quad (2-17)$$

Donde:

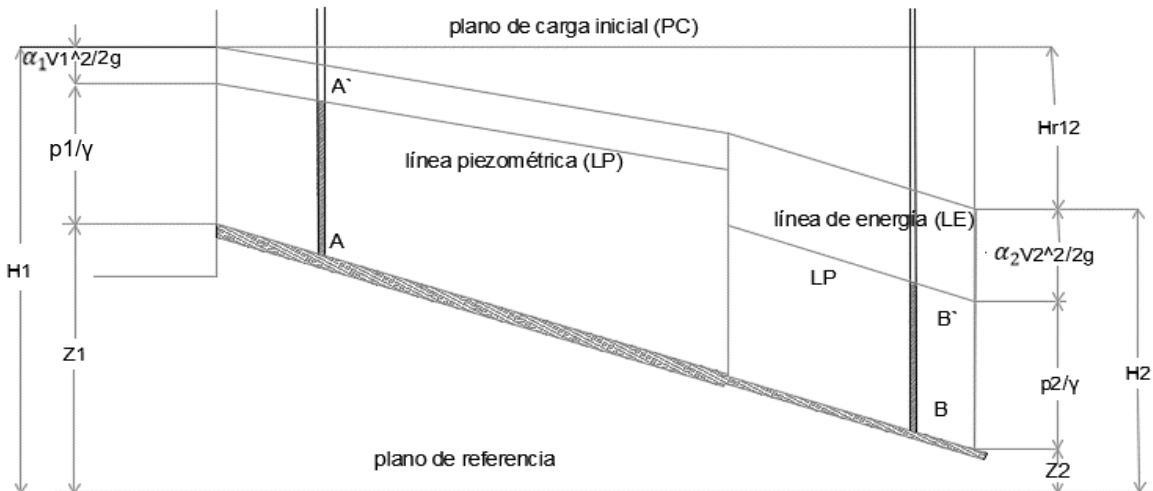


Ilustración 2-2 Nomenclatura usada en la Ecuación de la energía

$Q$  es el caudal en  $m^3/s$ ,  $A$  es el área transversal del tubo en  $m^2$ ,  $\rho$  es la densidad en  $kg/m^3$ ,  $\gamma$  es el peso específico del agua en  $kg/m^3$ ,  $H$  es la carga total en  $m$ ,  $\alpha$  es el Coeficiente de Coriolis,  $P$  es la presión en  $N/m^2$ ,  $Z$  es la Energía potencial en  $J$ ,  $m =$  masa en  $kg$ ,  $h$  es la altura en  $m$ ,  $h_f =$  pérdidas por fricción en  $m$ ,  $h_l$  son las pérdidas locales en  $m$ ,  $f$  es factor de fricción,  $L$  es longitud en  $m$ ,  $D$  es Diámetro en  $m$ ,  $V$  es Velocidad en  $m/s$ ,  $\nu$  es la viscosidad cinemática en  $m^2/s$ ,  $g$  es gravedad en  $m/s^2$ ,  $k$  es la rugosidad absoluta,  $Re$  es el número de Reynolds,  $C$  es el coeficiente que depende de la rugosidad del tubo,  $D_i$  es el Diámetro interno  $m$ ,  $S$  es la pendiente en  $m$ ,  $n$  es el coeficiente de rugosidad,  $R_h$  es el radio hidráulico en  $m$ ,  $K$  es el Coeficiente de pérdida,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido.

## 2.2 Redes de agua potable.

A continuación se presentan las definiciones de Redes de agua potable de acuerdo con la COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2007.

Una red de agua potable se encuentra conformada por tuberías, uniones, elementos especiales, de bombeo y control, que en conjunto logran la conducción de agua desde el punto de potabilización hasta el consumidor. Se deben cumplir ciertos parámetros establecidos para el adecuado funcionamiento y abastecimiento del agua. A continuación se nombran algunos de los elementos que conforman estas redes:

**Tubería:** es el conjunto de tubos (conducto de sección circular) ensamblados por sistemas de uniones.

**Piezas especiales:** son todos aquellos accesorios que se emplean para llevar a cabo ramificaciones, intersecciones, cambios de dirección, modificaciones de diámetro, uniones de tubería de diferente material o diámetro y terminales de los conductos, ejemplo de ellos son: las uniones, reducciones, la T de derivación, Y de derivación, codos, cruces rectas y reductoras.

**Válvulas:** accesorios usados para disminuir, aislar o controlar el flujo en las tuberías, existe una gran variedad de ellas, las cuales tienen propiedades adecuadas para cada tipo de control como: el seccionamiento entre tuberías, bombas y dispositivos de control, igualmente funcionan para el control de presiones, entradas y salidas de aire.

**Hidrantes:** son conexiones especiales con el propósito de abastecer agua en grandes cantidades, ya sea un hidrante público, para proveer de agua a una comunidad o el hidrante contra incendio el cual provee agua para combatir el fuego.

**Tanques (Reservorios) de almacenamiento y regulación:** elementos ubicados antes de la red de distribución, el cual almacena agua con la finalidad de regular la distribución o prevenir intermitencias en el suministro.

**Toma domiciliaria:** es la conexión existente desde la red de distribución hasta el predio del usuario.

**Rebombeos:** en algunos puntos de las redes de distribución es necesaria la instalación de bombas que elevan la carga hidráulica para mantener la circulación del agua en la tubería.

**Cajas rompedoras de presión:** son depósitos con superficie libre del agua, de volumen relativamente pequeño, la cual permite que el flujo de la tubería se descargue en ésta, eliminando de esta forma la presión hidrostática y estableciendo un nuevo nivel estático aguas abajo.

### **2.3 Esquema de la red de distribución de agua potable.**

Las redes de distribución de agua potable están constituidas por: línea de alimentación, distribución primaria y secundaria (Ilustración 2-3).

La línea de alimentación son tuberías de gran diámetro, las cuales toman el agua de los puntos de potabilización y la transporta hasta la zona de distribución primaria, es considerada parte de la red primaria.

La red de distribución primaria es aquella que inicia de la línea de alimentación o de algún elemento de control y deriva el agua hacia la red de distribución secundaria.

La red de distribución secundaria, son las tuberías con diámetros menores, las cuales distribuyen el agua hasta las tomas domiciliarias.

Según la topología las redes pueden ser cerradas (malladas), abiertas (ramificadas) o mixtas.

Debido a su tipo de conectividad las redes cerradas forman al menos un circuito, esto significa que el agua parte de un punto y puede volver al mismo después de fluir por las tuberías que lo componen. Dicha red proporciona un factor de seguridad al abastecimiento del área en el caso de alguna fuga importante, por otra parte significan un costo adicional en su construcción y control.

La red abierta se compone de tuberías que se ramifican sin formar circuitos, dicho tipo de red se da debido a las condiciones de planimetría y topografía que dificultan la formación de circuitos, o debido a encontrarse en un poblado pequeño o muy disperso. Esta red es menos costosa, pero presenta extremos muertos donde el agua puede pasar largo tiempo sin movimiento, favoreciendo el crecimiento de bacterias y sedimentos, además si se realiza el cierre de una tubería en esta red, todo lo que este aguas abajo puede quedar sin servicio.

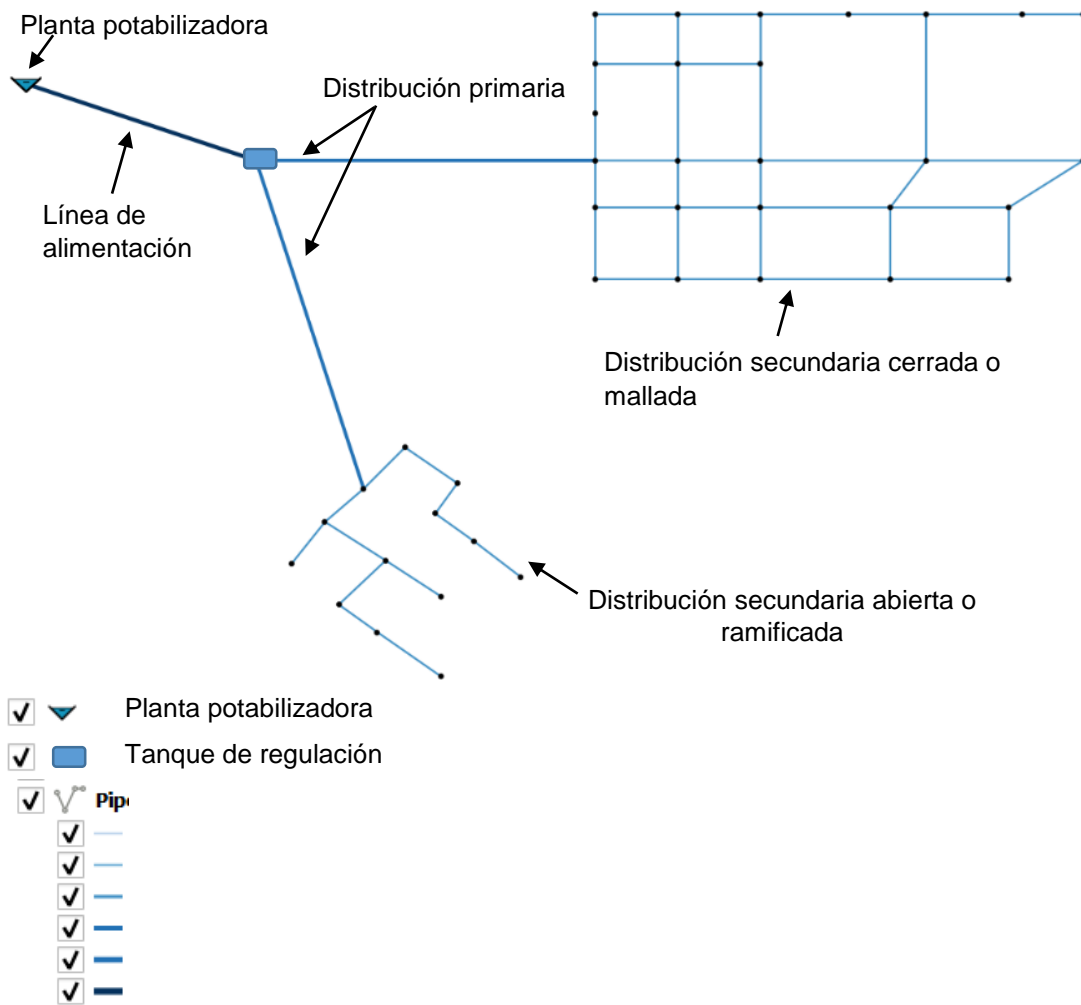


Ilustración 2-3 Esquema de una red de distribución de agua potable

Las redes de distribución de agua potable, buscan ser eficientes contemplando siempre las cualidades topográficas del terreno, por ello las redes operan por:

Gravedad: desde un punto elevado el agua fluye por gravedad hacia la población, de ser el caso en donde la topografía del lugar sea muy fuerte, se deben de usar elementos rompedores de carga, para moderar las presiones dentro de las tuberías, buscando que las presiones sean las adecuadas para un eficiente funcionamiento de la red y abastecimiento.

Bombeo: para los poblados que se encuentran más elevados al punto de abastecimiento, es necesario el bombeo del agua, para proporcionar la energía suficiente al agua y vencer el desnivel del terreno.

## 2.4 Análisis de redes.

Si la presión y el gasto que circula por una tubería no varían respecto al tiempo, se considera que dicha red tiene un flujo permanente, al cual se la acostumbra llamar red estática.

En el caso contrario es llamada red con flujo no permanente, dicha red proporciona más agua en ciertos momentos debido a la demanda cambiante, este análisis es el usado para las redes de agua potable.

### 2.4.1 Análisis estático.

De la ecuación de la conservación de la energía en una tubería se tiene.

$$P_1 + Z_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = P_2 + Z_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (2-18)$$

En una tubería donde la sección no cambia, según el criterio de continuidad

$$A_1 * V_1 = A_2 * V_2 \quad (2-19)$$

Queda

$$V_1 = V_2 = V \quad (2-20)$$

También se tiene que:

$$h_i = P_1 + Z_1 \quad ; \quad h_j = P_2 + Z_2 \quad (2-21)$$

Simplificando  $\alpha_2 = \alpha_1 = 1$ , utilizando la ecuación (2-21) en la ecuación (2-18) quedaría.

$$h_f = h_i - h_j \quad (2-22)$$

$h_i$  Corresponde a la carga de la sección inicial en estudio,  $h_j$  a la sección final.

Con lo cual se define que la pérdida de carga es igual a la caída de carga que tienen lugar entre las secciones inicial y final.

La pérdida de carga que se origina durante el movimiento de un fluido a través de una tubería, depende de la velocidad del flujo  $v$ , el diámetro  $d$ , la longitud  $L$  y la rugosidad de la tubería, así como de la densidad  $\rho$  y viscosidad  $\mu$  del fluido. Para estimarla se han propuesto. (Rouse, 1946).

$$h_f = C | Q | Q \quad (2-23)$$

y  $Q$  es el gasto que fluye por la tubería (Rouse, 1946). Las líneas verticales indican valor absoluto.

Por lo cual

$$h_i - h_j = C | Q | Q \quad (2-24)$$

$$Q = \begin{cases} k(h_i - h_j)^{\frac{1}{2}} & \text{si } h_i \geq h_j \\ -k(h_i - h_j)^{\frac{1}{2}} & \text{si } h_i < h_j \end{cases} \quad (2-25)$$

Considerando

$$k = \left(\frac{1}{C}\right)^{1/2} \quad (2-26)$$

Debido a que en general el flujo en las redes de las tuberías de agua potable es turbulento, es posible obtener el valor de C (depende de los parámetros antes citados) de la ecuación (2-10).

$$C = 0.0826 \frac{fL}{d^5} \quad (2-27)$$

### Redes abiertas.

A continuación se presentan las definiciones de Redes abiertas, cerradas y método de Cross de acuerdo con Sotelo G, 2002.

Contemplando que el gasto entrante en una red de agua potable es igual al gasto de salida de la red:

$$\sum Q = 0 \quad (2-28)$$

Considerando que los gastos que lleguen al nudo tengan un signo negativo; y positivo los que salgan de él (Ilustración 2-4)

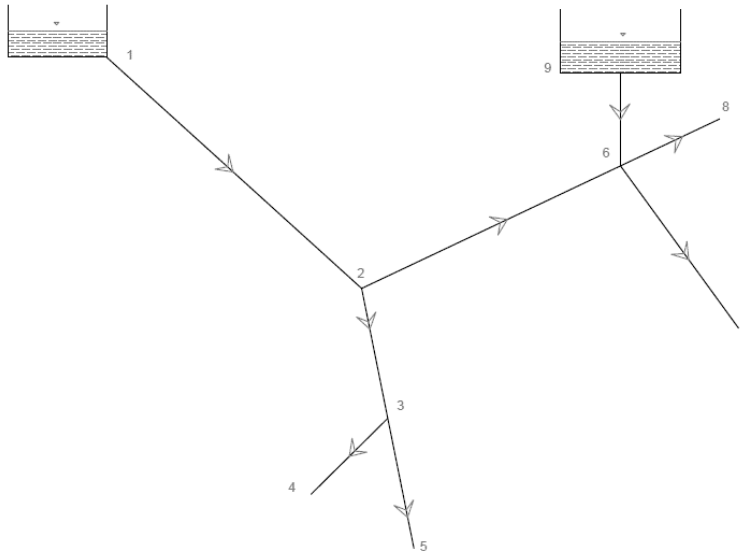


Ilustración 2-4 Red abierta

Al estar el agua a superficie libre la ecuación de continuidad queda.

$$Z_1 - \left( Z_j + \alpha \frac{V_j^2}{2g} \right) = \sum_{i=1}^j h_f \quad (2-29)$$

Donde  $Z_j$  es el nivel de la superficie libre del agua si el tubo descarga a un recipiente o bien, el nivel del centro de gravedad de la sección final.

$\sum_{i=1}^j h_f$  Es la suma de las pérdidas de energía de los tubos que se encuentran en el recorrido, desde el punto 1 hasta el extremo j.

En los casos donde la dirección del estudio va en contra de las líneas de flujo fijadas el signo cambia a negativo para h.

El resultado será un sistema de tantas ecuaciones del tipo (2-28) como nudos existan, y del tipo (2-29) como extremos finales tenga la red.

### Redes cerradas.

La característica particular de las redes cerradas son los circuitos que se pueden presentar debido a la conectividad de la red (Ilustración 2-5).

Para este tipo de redes se deben cumplir con la sumatoria de gastos igualada a cero para cada nudo.

$$\sum Q_{ij} + Q_i = 0 \quad (2-30)$$



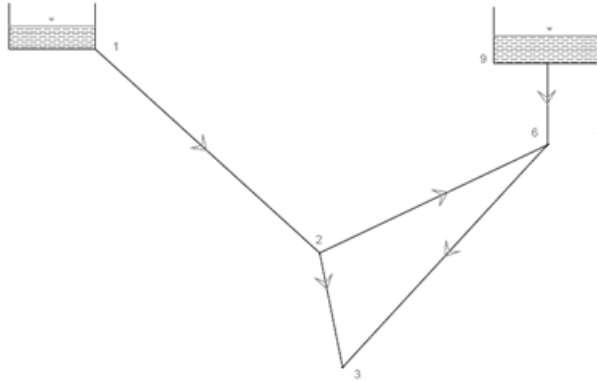


Ilustración 2-5 Red cerrada

Considerando a Q positivo si el flujo sale del nodo y negativo si entra al nodo.

La segunda ecuación por cumplir para este tipo de redes es la ecuación de pérdidas por fricción en cada tramo.

$$h_{ij} = a_{ij} Q_{ij}^N \quad (2-31)$$

Donde  $a_{ij}$  se trata como una constante definida:

Para el caso de Darcy-Weisbach  $N=2$ .

$$a_{ij} = \frac{8f_{ij}L_{ij}}{\pi^2 g D_{ij}^5} \quad (2-32)$$

Para el caso de Hazen-Williams,  $N=1.851$ .

$$a_{ij} = \frac{L_{ij}}{(0.279 C_{Hij} D_{ij}^{2.63})^{1.851}} \quad (2-33)$$

Para Manning.

$$h_{ij} = 10.3 * n^2 * \left( \frac{Q}{D^{5.33}} \right) * L \quad (2-34)$$

$n$  es el coeficiente de rugosidad de Manning.

La solución de este tipo de red conduce a un sistema de ecuaciones que es posible resolver, por un método iterativo por aproximaciones sucesivas a partir de valores iniciales, los cuales se aproximan a la solución exacta mediante correcciones cíclicas.

La dificultad en la solución consiste principalmente en que los sistemas de ecuaciones resultantes no son lineales.

Algunos de los métodos usados para su solución son:

**Método de Cross para el balance de pérdidas.**

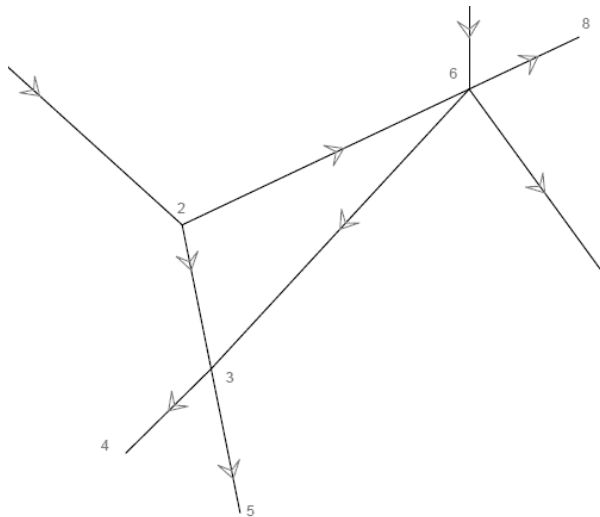
El método consiste en agregar un cierto gasto correctivo al que fluye en cada tubería del circuito. Se acepta que los gastos de las tuberías del circuito tienen un signo positivo si coincide con el sentido de movimiento de las manecillas del reloj o negativo en caso contrario. El gasto correctivo se suma al que existe en las tuberías hasta conseguir que la suma de diferencias de cargas en las tuberías del circuito sea cercana a cero.

En una red cerrada de la cual se conocen los gastos de entrada y salida, se identifican los circuitos que la componen, definiendo un sentido de estudio para todos los circuitos, esto es que todo el análisis se desarrolla basándose en que todos los circuitos tendrán un recorrido positivo ya sea en el sentido de las manecillas del reloj o viceversa; para cada nudo de este circuito se debe satisfacer la ecuación (2-30) igualmente la ecuación de pérdida de energía entre dos nudos de la red es la suma algebraica de las pérdidas en cada tramo usando la ecuación (2-31), teniendo en cuenta el sentido del flujo como determinante del signo que acompañará el valor de pérdidas.

El recorrido completo en cada circuito elemental debe cumplir.

$$\sum_{i=1}^k h_{ij} = 0 \tag{2-35}$$

Donde k es el número de tramos que forma el circuito.



*Ilustración 2-6 Recorrido de circuito en una red*

Definido el sentido del movimiento de las manecillas del reloj como positivo, por lo cual de este circuito se tiene.

$$h_{2-6} + h_{6-3} - h_{3-2} = h_{ij} = a_{2-6}(Q_{2-6} + \Delta Q)^N + a_{6-3}(Q_{6-3} + \Delta Q)^N - a_{3-2}(Q_{3-2} + \Delta Q)^N = 0 \tag{2-36}$$

En el caso general:

$$\Delta Q = - \frac{\sum_i^k (a_{ij} Q_{ij}^{N-1} | Q_{ij} |)}{N \sum_i^k | a_{ij} Q_{ij}^{N-1} |} \quad (2-37)$$

Donde  $\Delta Q$  y  $Q_{ij}$  son positivos si coinciden con el sentido definido como positivo, en este caso en sentido de las manecillas del reloj, o negativo en caso contrario.

La iteración se realiza hasta que se satisfaga la ecuación de circuito y posteriormente el de toda la red.

#### 2.4.2 Análisis dinámico.

A continuación se presentan las definiciones de Análisis dinámico de acuerdo con La COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA, 2007

Las ecuaciones diferenciales de continuidad y de cantidad de movimiento de flujo no permanente funcionando a presión permiten la solución de modelos dinámicos.

La solución numérica de la ecuación diferencial de conservación de cantidad de movimiento en una tubería, expresada en diferenciales finitas está definida como:

$$Q^{k+1} = a^k (h_f^{k+1} - h_i^{k+1}) + \gamma^{k-1} \quad (2-38)$$

Donde

$$a^k = \frac{\theta}{\frac{l}{ag\Delta t} + 2\theta C | Q^k |} \quad (2-39)$$

$$\gamma^k = \frac{(1 - \theta)(h_f^k - h_i^{k+1}) + (2\theta - 1)C | Q^k | Q^k + \frac{lQ^k}{ag\Delta t}}{\frac{l}{ag\Delta t} + 2\theta C | Q^k |} \quad (2-40)$$

Donde  $\Delta t$  es intervalo de tiempo,  $a$  es el área transversal del tubo,  $l$  la longitud del tubo,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $\theta$  es un factor de peso (comprendido entre cero y uno) y  $k$  es un superíndice que indica el valor de la variable en el tiempo  $t = k\Delta t$ .

Según el sistema de ecuaciones formado, es posible llegar a una solución por medio de las herramientas computacionales, esto debido a la cantidad de datos por manejar y la secuencia de tiempo incluida.

#### 2.5 Software EPANET

EPANET es un programa de ordenador que realiza simulaciones en periodo extendido (suma de tiempos parciales en los que se realiza un análisis estático y luego una acumulación de tiempos) del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de distribución a presión. En general, una red consta de tuberías, nudos (conexiones entre tuberías), bombas, válvulas y reservorios de almacenamiento o depósitos. EPANET determina el caudal que circula por cada una de las conducciones, la presión en cada uno de los nudos, el nivel de agua en cada reservorio y la concentración de diferentes componentes químicos a través de la red durante un determinado periodo de simulación analizado en diferentes intervalos de tiempo, es posible determinar el tiempo

de permanencia del agua en las tuberías, así como estudios de la procedencia del agua en cada punto de la red.

EPANET, puede emplearse bajo sistemas operativos Windows, ofrece un entorno de trabajo integrado para la edición de los datos de entrada de la red, para el cálculo hidráulico y las simulaciones de la calidad del agua, y visualización de los resultados obtenidos en una amplia variedad de formatos. Esta variedad de formatos incluye: planos de la red con códigos de colores, tablas de datos, gráficos con evoluciones temporales de diferentes variables, y planos con curvas de isovalores (MANUAL DEL USUARIO EPANET 2, 2017).

## 2.6 Plugin EPANET.

Es una herramienta por medio del cual se logra ejecutar y modificar los modelos realizados en EPANET, por medio de entornos de programación, como PYTHON, MATLAB y C++.

Esta herramienta también permite la ejecución y la extracción de información de los datos contenidos en los análisis hidráulicos o características del propio modelo.

En este trabajo se usa la herramienta para análisis hidráulicos y modificación del estado de las tuberías.

Se encuentra disponible en la página de <https://github.com/OpenWaterAnalytics/EPANET-Matlab-Toolkit>.

## 2.7 MATLAB

*MATLAB* es un entorno de cálculo técnico para cálculo numérico y visualización. Integra:

- Análisis numérico
- Cálculo matricial
- Procesamiento de señales
- Gráficos

En un entorno fácil de usar, donde los problemas y las soluciones son expresados como se escriben matemáticamente, sin la programación tradicional. El nombre *MATLAB* proviene de "MATrix LABoratory" (Laboratorio de Matrices). *MATLAB* fue escrito originalmente para proporcionar un acceso sencillo al software matricial desarrollado por los proyectos *LINPACK* y *EISPACK*, que juntos representan lo más avanzado en programas de cálculo matricial. *MATLAB* es un sistema interactivo cuyo elemento básico de datos es una matriz que no requiere dimensionamiento. Esto permite resolver muchos problemas numéricos en una fracción del tiempo que llevaría hacerlo en lenguajes como *C*, *BASIC* o *FORTRAN*. *MATLAB* ha evolucionado en los últimos años a partir de la colaboración de muchos usuarios. En entornos universitarios se ha convertido en la herramienta de enseñanza estándar para cursos de introducción en álgebra lineal aplicada, así como cursos avanzados en otras áreas. En la industria, *MATLAB* se utiliza para investigación y para resolver problemas prácticos de ingeniería y matemáticas, con un gran énfasis en aplicaciones de control y procesamiento de señales. *MATLAB* también proporciona una serie de soluciones específicas denominadas *TOOLBOXES*. Estas son muy importantes para la mayoría de los usuarios de *MATLAB* y son conjuntos de funciones *MATLAB* que extienden el entorno *MATLAB* para resolver clases particulares de problemas como:

- Procesamiento de señales
- Diseño de sistemas de control
- Simulación de sistemas dinámicos
- Identificación de sistemas
- Redes neuronales y otros.

## Características principales

- Lenguaje de alto nivel para cálculos científicos y de ingeniería
- Entorno de escritorio afinado para la exploración iterativa, el diseño y la solución de problemas
- Gráficas para visualizar datos y herramientas para crear diagramas personalizados
- Aplicaciones para ajustar curvas, clasificar datos, analizar señales, ajustar sistemas de control y muchas otras tareas
- Toolbox complementarias para una amplia variedad de aplicaciones científicas y de ingeniería
- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces de usuario personalizadas
- Interfaces para C/C++, Java®, .NET, Python, SQL, Hadoop y Microsoft® Excel®
- Opciones de implementación libres de regalías para compartir programas de MATLAB con los usuarios finales

(MathWorks.com)

## 2.8 QGIS

QGIS es un Sistema de Información Geográfica de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License. QGIS es un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Se puede ejecutar en Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android y soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos raster y bases de datos.

Con QGIS se puede explorar datos y componer mapas, creando, editando o gestionando los datos. Entre los más destacados se encuentran:

- Soporte para la extensión espacial de PostgreSQL, PostGIS.
- Manejo de archivos vectoriales Shapefile, ArcInfo coverages, MapInfo, GRASS GIS, DXF, DWG, etc.
- Soporte para un importante número de tipos de archivos raster (GRASS GIS, GeoTIFF, TIFF, JPG, etc.)
- Una de sus mayores ventajas es la posibilidad de usar Quantum GIS como GUI del SIG GRASS, utilizando toda la potencia de análisis de este último en un entorno de trabajo más amigable. QGIS está desarrollado en C++, usando la biblioteca Qt para su Interfaz gráfica de usuario.

(qgis.org)

## 2.9 PLUG IN THE QGIS – QGISRed.

QGISRed es una herramienta de ayuda al ingeniero hidráulico en la tarea de modelar una red de distribución de agua y en el proceso de toma de decisiones, dentro del entorno de un Sistema de Información Geográfico (SIG). Esta herramienta está diseñada como un complemento (plugin) del software libre QGIS. Sin embargo, QGISRed emplea el código fuente del software GISRed, aplicación diseñada como herramienta de escritorio para el sistema operativo Windows.

El plugin QGISRed se desarrolla con el objetivo de poder aprovechar todas las herramientas que un entorno SIG puede proporcionar de manera nativa. Por ejemplo, herramientas de geo-proceso, utilización de imágenes de satélite, gestión de estilos, etc.

Este Plug-in realiza simulaciones en tiempo extendido, ya que trabaja de forma nativa con el código de EPANET, la diferencia radica en la visual del modelo entregado, el cual se considera es adecuado para demostrar los pasos realizados por el algoritmo.

Dentro del Plug-in se encuentra la herramienta Obtain demand sectors, la cual encuentra el número de sectores hidráulicos que contiene una red en estudio.

## 2.10 NOMENCLATURA UTILIZADA EN EL ANÁLISIS.

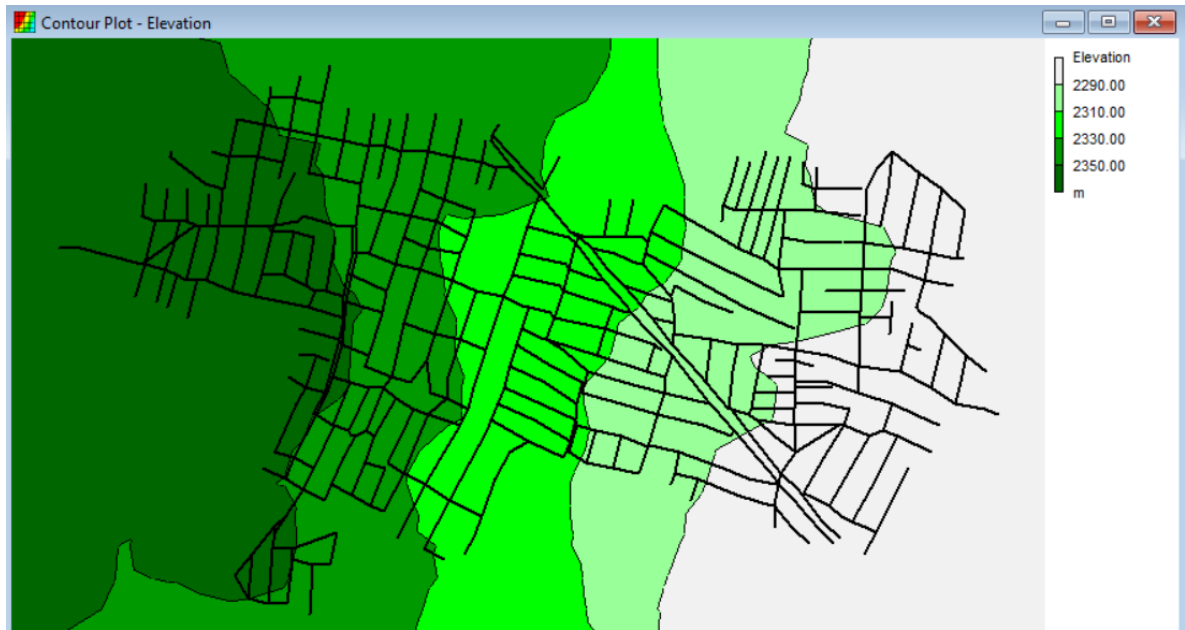
En este apartado se dan las definiciones correspondientes a los términos usados en el tratamiento de los datos.

Para la definición se usa como ejemplo la zona de la Caldera ubicada en la alcaldía de Iztapalapa en la Ciudad de México (Ilustración 2-7).

Se usó la herramienta de QGISRed para visualizar de los procesos.



Ilustración 2-7 Red Caldera



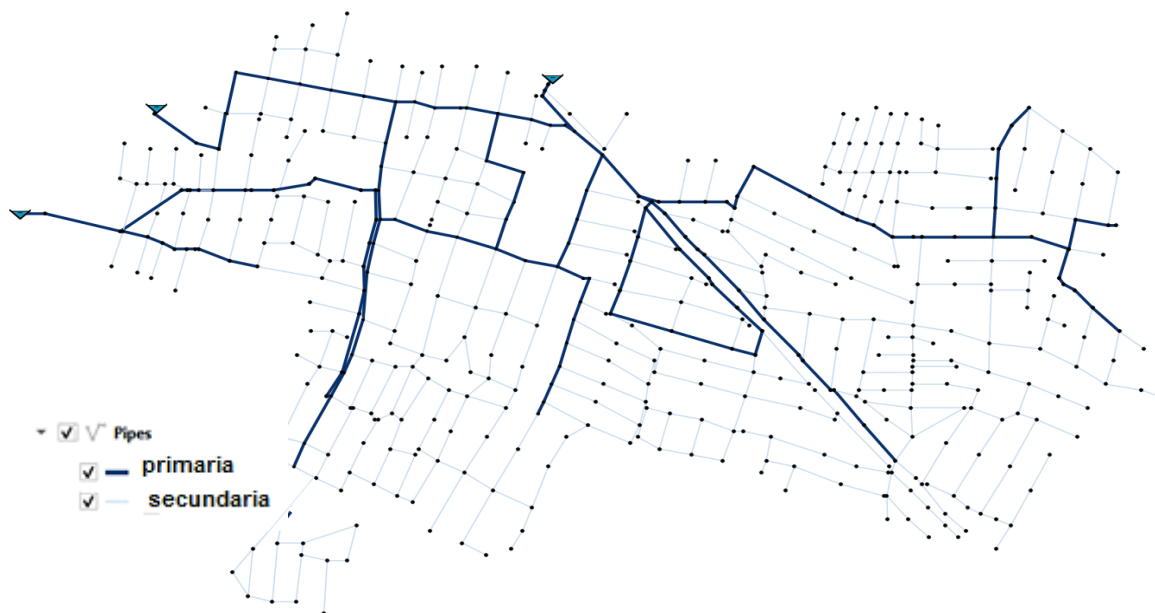
*Ilustración 2-8 Elevaciones red Caldera*

#### **Red primaria:**

Para este trabajo, se consideraron tubos de red primaria todos los diámetros mayores o iguales a los 150 mm debido a que las zonas de estudio no hay diámetros grandes. En general en la Ciudad de México se consideran tubos de red primaria aquellos diámetros mayores o iguales a 500 mm.

Al ser definida la red primaria, ésta ya no puede cambiar de reservorio de influencia, y no puede proponerse para cierre ninguna de sus tuberías, excepto cuando esta red conecte en todo su trayecto a dos reservorios.

Por el contrario las **tuberías pertenecientes a la red secundaria**, pueden ser propuestas para cierre y pueden cambiar de reservorio de influencia durante el recorrido.



*Ilustración 2-9 Red primaria y secundaria de la red Caldera*

El criterio de red primaria se ha definido por diámetros, debido a que en diferentes pruebas este criterio ha sido el más acertado.

**Reservorio de influencia:** Es aquel reservorio que le proporciona agua a un nodo, puede ser que al nodo llegue agua de distintos reservorios debido a su conexión, por lo cual se define como reservorio de influencia aquel reservorio que entregue la carga de posición más cercana al rango que cargas que se definan para el adecuado funcionamiento de la red.

**Nodo con reservorio de influencia:** Este nombre es el dado a los nodos a los cuales ya se les ha definido un reservorio de influencia.

**Tuberías para cierre:** El criterio para definir una tubería para cierre es que el nodo inicial y el final no pertenezcan al mismo reservorio, esto es que tengan valores diferentes.

### 3 SECTORIZACIÓN:

La sectorización consiste en dividir una red de distribución de agua potable en grupos o sectores, logrando que no se encuentren conectados entre sí y abastezcan a toda el área. Con la sectorización es posible obtener el control de la cantidad de agua que ingresa al sector así como de las presiones.

Con la sectorización se hacen eficientes los programas de detección y reparación de fugas, puesto que, al tener los datos de la cantidad de agua ingresada a la red y la consumida, se puede conocer la cantidad de pérdidas presentes en ese sector, con lo cual es posible realizar acciones de control, detección y reparación o sustitución de red.

Para realizar la sectorización se tienen en cuenta distintos criterios que pueden corresponder a la topografía del lugar, capacidad, demanda hidráulica, optimización de la red, etc.; condiciones con las cuales se debe obtener una nivelación en las presiones de cada sector sin afectar la dotación de agua a los todos los puntos de abastecimiento.



En la literatura se han definido diversos métodos de sectorización dependiendo de algún componente de interés. Sin embargo, son cuatro las variables que afectan el diseño del sector:

- a. La fuente que la que abastecerá de agua al sector
- b. La topografía que establece zonas de presión
- c. La infraestructura
- d. El área, tamaño del sector o también el número de habitantes que contendrá el sector.

### 3.1 Criterios de Sectorización:

A continuación se presentan las definiciones de Redes de agua potable de acuerdo con CAMPBELL E. 2013.

**Sectorización mediante límites naturales:** se realizan sectores teniendo en cuenta las separaciones de la red, esto debido a infraestructuras como vías, puentes, o debido a elementos de la naturaleza como montañas, riscos o ríos.

**Sectorización mediante caudal:** se toma en cuenta las tuberías que presentan menor caudal, en las cuales puede ser viable su cierre.

**Sectorización mediante presión:** se toman como referencia presiones estimativas para el adecuado funcionamiento de la red en estudio, por medio de las cuales se puede realizar la delimitación de áreas.

**Sectorización mediante potencia:** potencia es el producto del caudal y la pérdida de altura piezométrica, las tuberías que presenta el valor de menor potencia, son las candidatas para realizar la separación.

**Sectorización según criterios de eficiencia energética:** se delimitan aquellas zonas donde la eficiencia energética sea menor, es decir, donde la diferencia entre la presión de los nudos y el umbral mínimo de servicio sea mayor.

**Sectorización mediante costos:** esta sectorización trata de la diferencia en costos monetarios entre realizar una sectorización a otra a largo, corto o mediano plazo.

**Sectorización mediante la zona de cobertura de las fuentes de abastecimiento:** toma en cuenta la capacidad que tiene cada fuente de abastecimiento, como los reservorios, de suplir las necesidades del consumo de un área.

**Sectorizaciones mediante el tamaño óptimo:** cuando un sector es muy grande puede llegar a significar una disminución en la detección del lugar donde se presenta una fuga, o en otros casos los sectores son tan pequeños que requieren de la instalación de varios elementos, lo cual la hace costosa, por ello se habla de un tamaño óptimo del sector, siendo aquel en el cual se nivelan los costos con los beneficios.

### 3.2 Ventajas de realizar una sectorización.

- Mediciones de suministro.
- Balances de volúmenes de agua
- Estimaciones de pérdidas de agua
- Mayor eficiencia en la detección de fugas para su reparación
- Detectar instalaciones clandestinas

- Mejora los planes de mantenimiento
- Jerarquiza las prioridades de reparación.
- Control de presiones
- Identificar la demanda de la zona, especialmente el caudal nocturno.

#### 4 ALGORITMO DE SECTORIZACIÓN

Uno de los principales problemas para realizar la sectorización de una red de agua potable, se debe a la cantidad de variantes y condiciones que afectan el comportamiento del agua en una red, como lo son las solicitudes de los consumidores y los factores propios de los conductos, de las cuales se destacan la rugosidad y conectividad. El diseño del sector dependerá del criterio que desee usar para hacerlo, en este caso se tiene en cuenta la carga de posición en cada nodo para obtener una propuesta de sectorización inicial, posteriormente esta propuesta es corrida en Epanet, por medio del plugin de Epanet, obteniendo las presiones que presenta dicha sectorización, si las presiones cumplen con los requerimientos es acepta la sectorización, de lo contrario se modifica.

El tipo de conectividad en una red es indispensable para el desarrollo del algoritmo, puesto que las redes con múltiples conexiones tienden hacer que los algoritmos incurran en ciclos repetitivos, en ocasiones infinitos.

En este trabajo se realizó un algoritmo que entrega una propuesta de cierres de tuberías, con las cuales se logran crear sectores hidrométricos.

Para el adecuado funcionamiento de este algoritmo se deben definir condiciones de diámetros de red secundaria, cargas y el tiempo de máxima demanda que se presenta en la red.

En un inicio para la identificación de la red principal, fue necesario desarrollar un recorrido que inicia desde el punto de abastecimiento de agua y continúa por las tuberías que sean de diámetro menor a la tubería ya recorrida pero mayor al diámetro establecido como red secundaria.

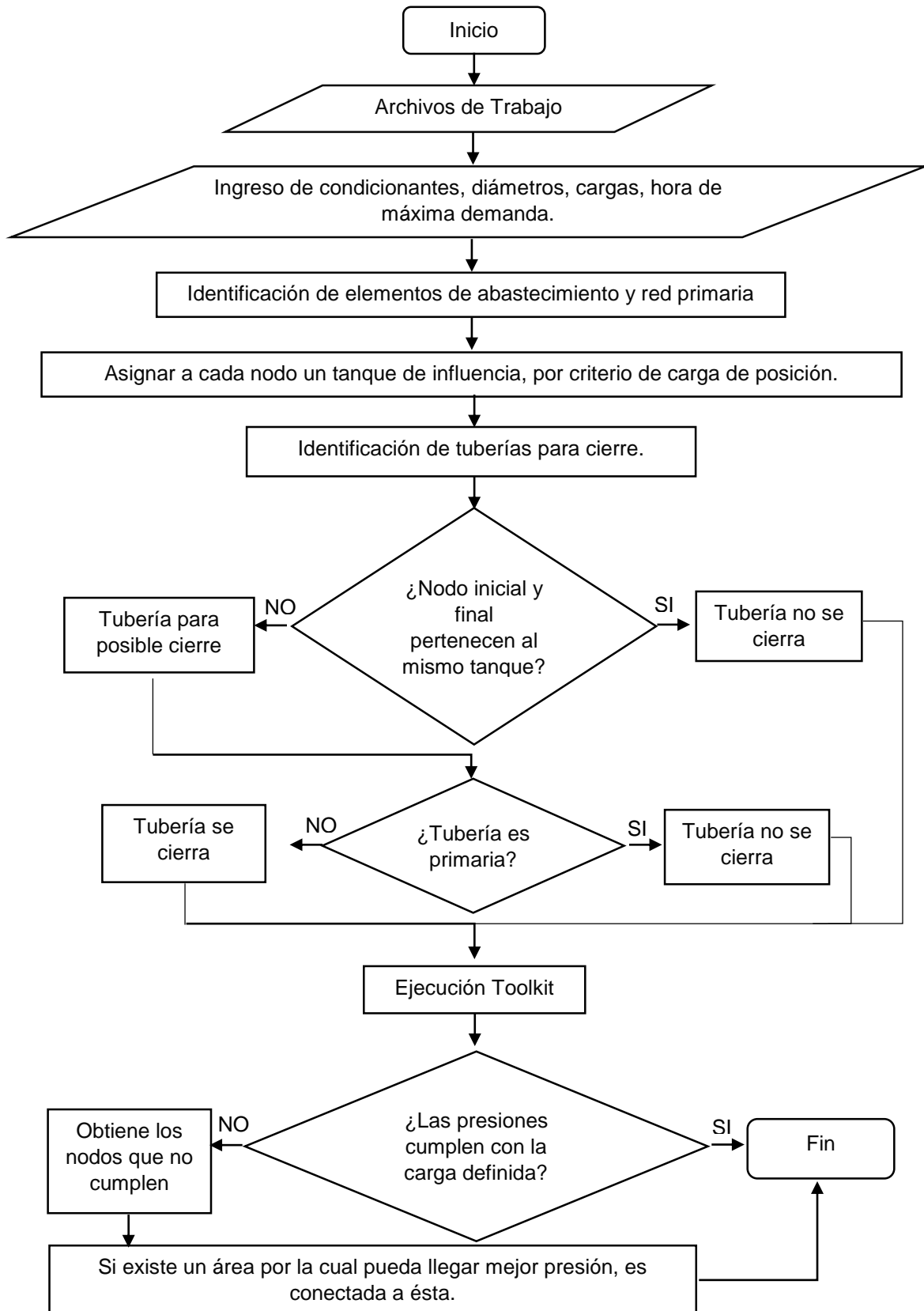
Definida la red primaria, se debe de otorgar a los demás nodos un reservorio de influencia, el cual se estima por medio de un recorrido que inicia desde el punto de abastecimiento de agua hacia los puntos de distribución finales y obtiene la carga de posición en cada nodo. Al finalizar los recorridos se organizan los datos de las cargas obtenidas, de tal forma que se otorgue a cada nodo el reservorio de influencia que entrega la carga más cercana al rango establecido, con esto es posible definir las tuberías para cierre, siendo aquellas que tengan su nodo inicial y final con un identificador de reservorios de influencia diferente.

En algunos casos existirán nodos aislados, debido al cierre de algunas tuberías, por lo cual se realiza un nuevo recorrido por toda la red ahora con las tuberías cerradas, identificando todos los nodos presentes en dicho recorrido, los nodos faltantes de este recorrido son los nodos aislados.

Los nodos aislados, deben ser organizados según la proximidad del nodo aislado con una zona no aislada, el algoritmo identifica los nodos más próximos no aislados, que entregan la carga más favorable para conectar la zona no aislada y es conectada, esto con el fin de conectar primero las tuberías que entreguen las cargas más cercanas a las establecidas.

Una vez conectados los nodos aislados, se simula la sectorización inicial propuesta en el tiempo de máxima demanda, por medio de la Toolkit de Epanet, el cual se incluye al algoritmo y obtiene las presiones en cada nodo, si las presiones son superiores al mínimo establecido, se acepta la sectorización inicial propuesta, de lo contrario los nodos que presenten presiones por debajo de las establecidas son tratados como nodos aislados, pero ahora no se basan en la carga de posición, sino en los datos de presiones que ha entregado la Toolkit. Con esto se modifica la sectorización inicial propuesta, obteniendo la sectorización final.

Diagrama de flujo

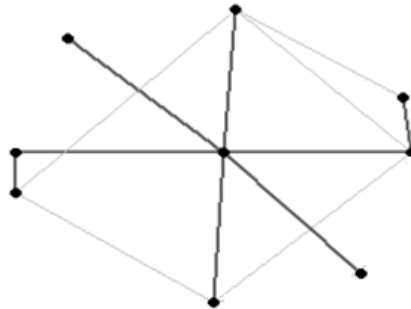


## 4.1 Algoritmo de PRIM

Es un algoritmo en el tratamiento perteneciente a la teoría de grafos, cuya finalidad es encontrar un árbol de expansión por el cual se obtenga el menor peso posible.

Este algoritmo fue desarrollado en 1930 por el matemático Vojtech Janik, posteriormente el científico Robert Prim en 1957 y Dijkstra en 1959. Por lo cual el algoritmo también puede ser encontrado como el algoritmo de DJP O Janirk.

Básicamente este algoritmo obtiene un árbol de peso mínimo desde cualquier vértice, aumenta su tamaño agregando a otros vértices cuya distancia entre ellos sea mínima y contenga a todos.



*Ilustración 4-1 Árbol de peso mínimo*

Se tomó el concepto del algoritmo de PRIM para la base del algoritmo de sectorización. El cual realiza un recorrido en el que se comparan las cargas de posición de cada nodo, y es tomado aquel que se encuentre dentro de un valor preestablecido, con el objetivo de pasar por todos los nodos.

## 4.2 Algoritmo de recorrido.

El objetivo de este recorrido es pasar por todos los nodos presentes en la red y evitar la creación de ciclos repetitivos.

Se definió de la siguiente forma:

Inicia en un reservorio, el algoritmo realiza una búsqueda de dicho reservorio en toda la lista de tuberías, la cual tendrá que cumplir algunas condiciones según la parte del algoritmo donde se desarrolle, al encontrarla la almacena como tubería recorrida.

Ejemplo:

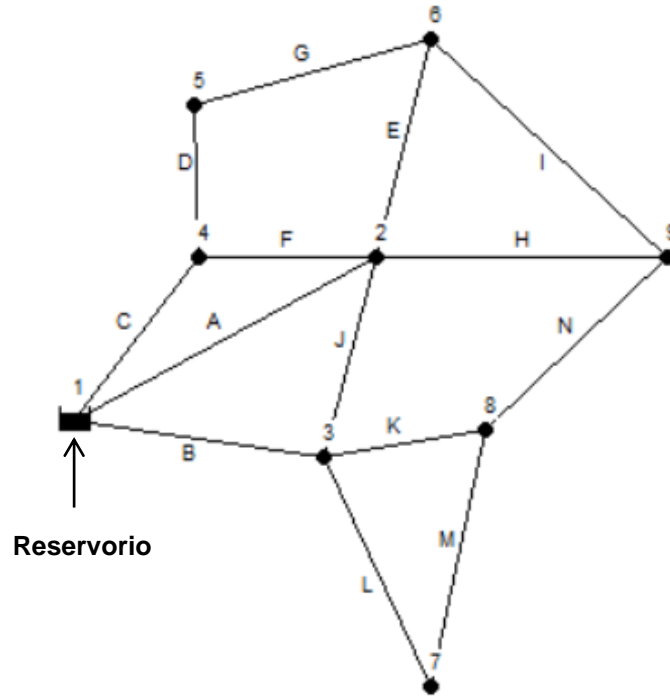


Ilustración 4-2 Red Ejemplo

En la red de la Ilustración 4-2, se debe hacer un recorrido desde el reservorio y pasar por todos los nodos.

La Tabla 4.3 contiene los datos de la red.

[NODOS]	
Identificador	Elev
2	187
3	186
4	188
5	185
6	184
7	186
8	185
9	183

Tabla 4.1 Lista de Nodos de ejemplo

[RESERVORIOS]	
Identificador	Carga
1	200

Tabla 4.2 lista de Reservorios de ejemplo

[Tuberías]					
Identificador	Nodo1	Nodo2	Long.	Diámetro	Rugosidad
A	1	2	20	300	0.014
B	1	3	30	200	0.014
C	1	4	35	200	0.014
D	4	5	50	150	0.014
E	2	6	51	150	0.014
F	4	2	52	150	0.014
G	5	6	53	150	0.014
H	2	9	64	200	0.014
I	6	9	25	150	0.014
J	2	3	15	150	0.014
K	3	8	158	150	0.014
L	3	7	42	150	0.014
M	8	7	25	150	0.014
N	9	8	71	150	0.014

*Tabla 4.3 Lista tuberías de Ejemplo*

En cada paso se van almacenando los nodos y las tuberías ya recorridas.

1. Inicia el recorrido en el Reservorio, se identifica en la lista de tuberías en cuales de ellas se encuentra el reservorio.
2. De las anteriores tuberías encontradas se obtienen todos sus nodos y son depurados según los nodos ya recorridos, (Reservorio).
3. De los nodos obtenidos en el punto 2, se buscan en la lista de tuberías, y son depuradas con las anteriores ya recorridas.

En este punto se entra a una subrutina, la cual contiene condicionales que filtran el resultado de tuberías.

Si el recorrido se encuentra en la definición de la red principal, las condicionales son de diámetro y carga de posición. Si se encuentra en la red secundaria la condicional es de carga de posición. Esta red de ejemplo, no tendrá en cuenta las condicionales.

4. Realiza lo mismo que el punto 2.
5. Realiza lo mismo que el punto 3.

Al depurar los nodos en el último ciclo 4 no quedan más tubería por evaluar, con lo cual se sale del ciclo.

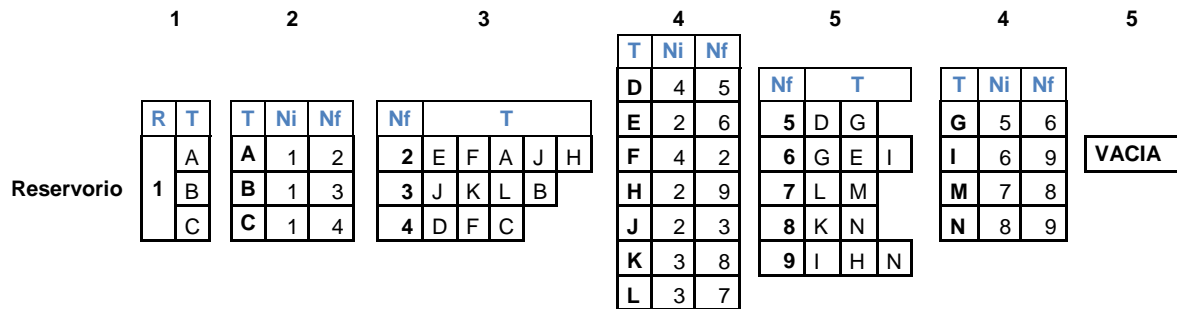


Tabla 4.4 Recorrido en la red ejemplo

Donde R es Reservorio, T es Tubería, Ni es Nodo inicial y Nf es Nodo final.

Con este arreglo se evitan los ciclos infinitos.

Al ser varios reservorios, en cada nodo se obtiene la carga de posición, si un nodo recibe agua de diferentes reservorios, son almacenados los datos para posteriormente ser evaluados. Con esto se define para cada nodo un reservorio de influencia.

### 4.3 Consideraciones para funcionamiento del algoritmo

Se deben de revisar los diámetros de las tuberías, ver que se manejen para todas ellas las mismas denominaciones. Ejemplo: que no existan tuberías de 300 y 304 milímetros en la misma lista de tuberías, deben ser todas de 300 o 304 milímetros. Esto para evitar una inadecuada definición de la red primaria, ya que esta se basa en los diámetros y posteriormente en las cargas.

Las válvulas y bombas deben de estar direccionadas de forma correcta, esto significa que el nodo inicial y final deben de ir en el sentido correcto del funcionamiento que realizan en la red, esto debido a que las cargas de los nodos que pasen por una tubería que tenga el nodo inicial y final igual al de una válvula, serán cambiados por los valores de la carga que entrega la válvula o la bomba.

Verificar que las elevaciones se encuentren correctas. Esto es, que no se encuentren nodos que no tengan elevación definida, o sea elevaciones incorrectas.

Ejemplo: Estar en una red que se encuentre entre los 2300 a 2350 metros y encontrar un nodo con el valor de cero, o valores de 80 o 120 metros.

### 4.4 Pasos para aplicar el algoritmo.

#### Creación archivos .txt

Para correr el programa son necesarios los archivos .txt, los cuales deben de contener la información necesaria para la realización del código, en este apartado se explica el cuerpo de estos archivos.

ELEMENTO	DATOS
NODOS	ID, Elevación, Demanda
RESERVORIO	ID, Elevación
TUBERÍA	ID, Nodo1, Nodo2, Longitud, Diámetro, Rugosidad
Coordenadas	ID (nodo) X, Y
VÁLVULAS	ID, Nodo 1, Nodo2, Carga
BOMBAS	ID, Nodo1, Nodo2, Carga

Tabla 4.5 Creación archivos .txt

Estos datos se pueden obtener desde un modelo en EPANET, por medio de la ruta, File, Export, Network, exportándolo como un archivo .txt, el cual entrega todos los datos que contiene el modelo.

## Ingreso de las condiciones iniciales en el algoritmo

Diámetro red secundaria, rango de cargas admitidas en los nodos y hora en la cual se presenta la máxima demanda.

### Correr el algoritmo.

Después de inspeccionada la red y haber ingresado las condicionales al algoritmo, se procede a correrlo.

### Entrega lista de cierres finales.

La cual contiene las tuberías propuestas para cierre.

## 5 APLICACIONES ALGORITMO

### 5.1 RED CALDERA:

El sistema de La Caldera consta de los elementos que contiene la Tabla 5.1, gráficamente se puede ver en las Ilustración 5-1 e Ilustración 5-2.

Caldera	
Reservorios	3
Nodos	495
Tuberías	622
Válvulas	0
Bombas	0
Cota inicial (msnm)	2397.9
<u>Cota final (msnm)</u>	<u>2263.5</u>

Tabla 5.1 Información red Caldera



Ilustración 5-1 Red Caldera



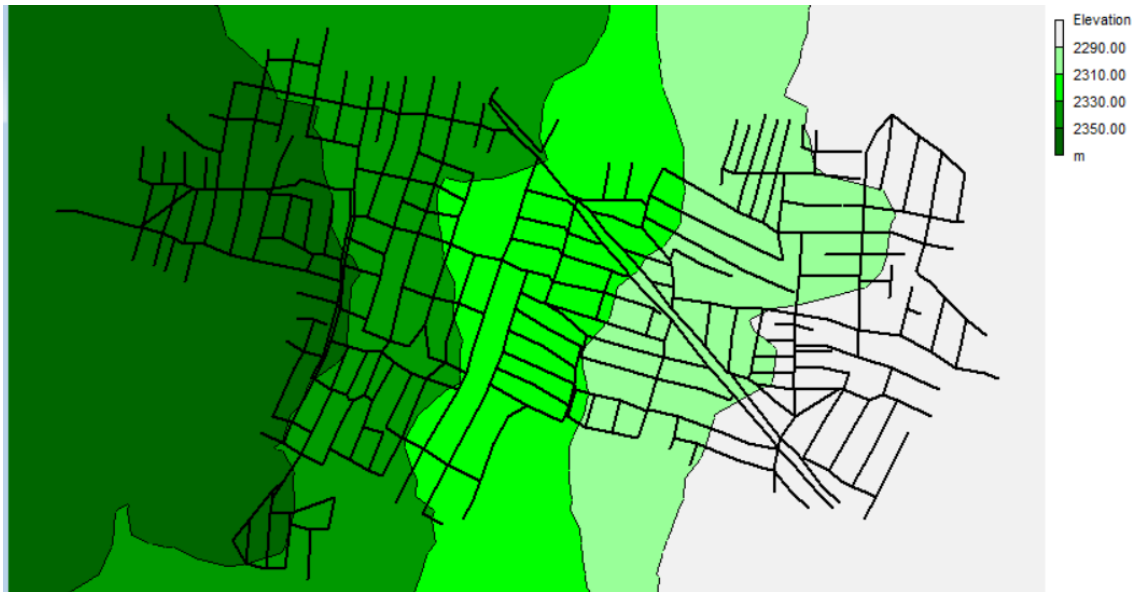


Ilustración 5-2 Elevaciones red Caldera

Se utilizó un plugin de QGISRed donde se identifica si la red original ya está sectorizada, Esto lo realiza verificando que las redes no se conectan entre sí, o si está conectada pero con los elementos cerrados. Al aplicar el plugin se tiene el resultado mostrado en la Ilustración 5-3.

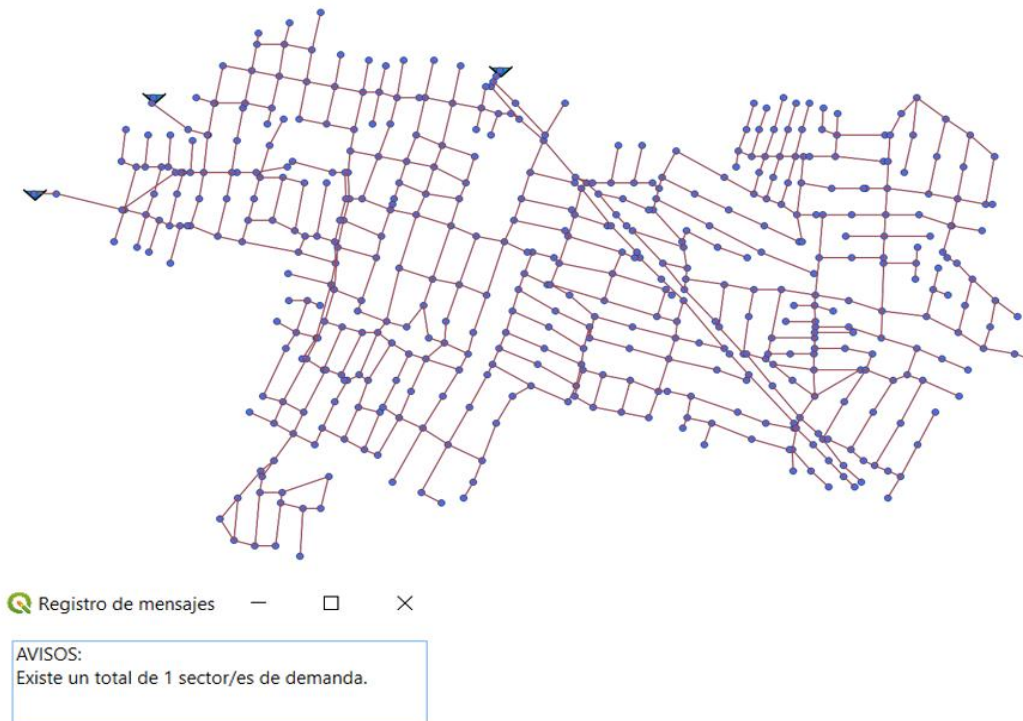


Ilustración 5-3 Resultado al aplicar el plugin QGISRed

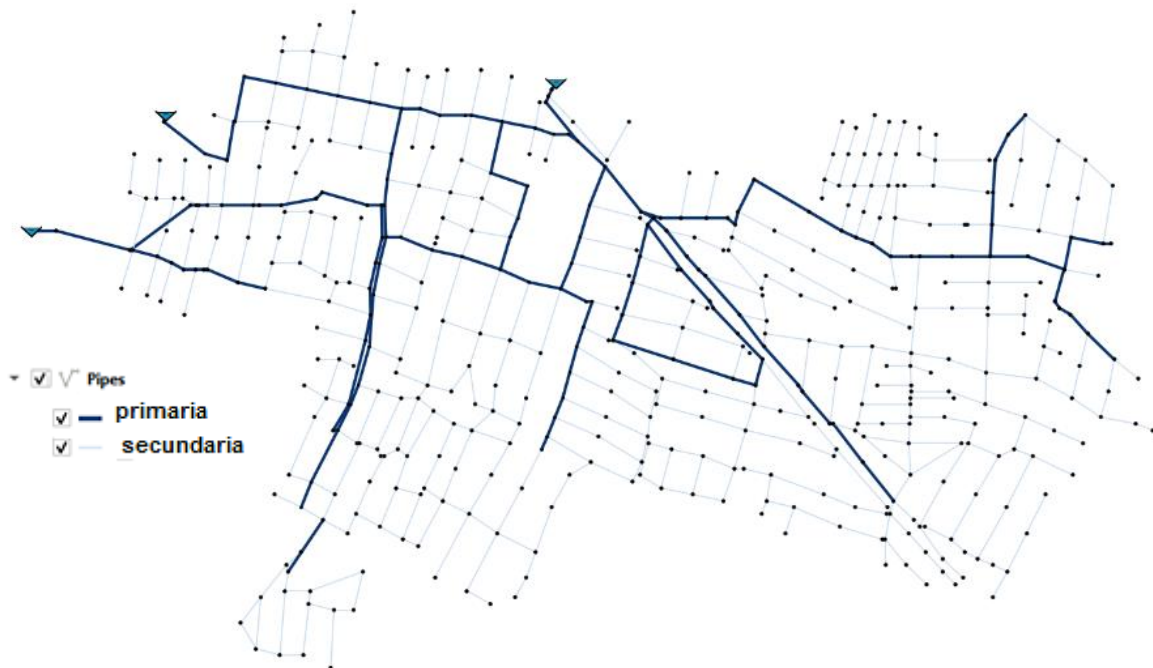
Con lo cual se verifica que la red se encuentra conectada de tal forma que no tiene sectores hidráulicos.

De ser el caso en que la red tenga sectores establecidos debido a que no se encuentran conectados, el algoritmo propuesto modifica sólo las partes por donde se puede realizar el recorrido sin modificar los sectores preestablecidos.

Si la red tiene sectores establecidos debido al cierre de una válvula o tubería que no puede cambiar de estado, este elemento no se debe incluir en la lista de los elementos para evitar que el algoritmo modifique su estado.

Por ello la inspección inicial del estado de la red es importante para el adecuado funcionamiento del algoritmo.

**Red primaria.** En esta parte el algoritmo identifica las tuberías que tengan un diámetro superior al definido para red secundaria, con lo cual define una red primaria como se observa en la Ilustración 5-4.

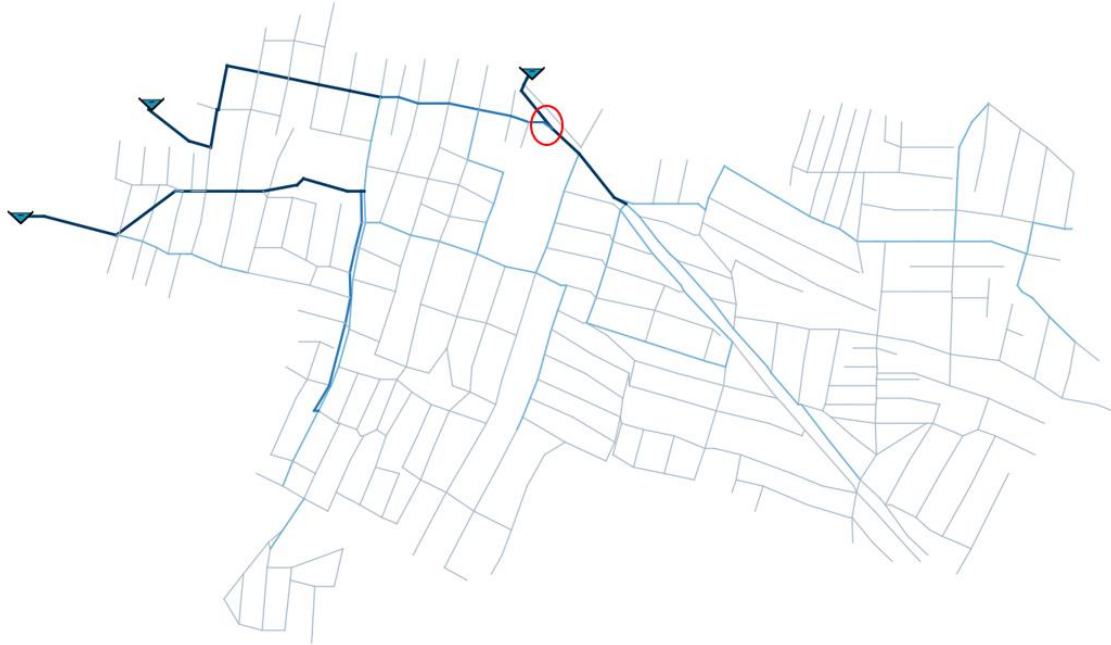


*Ilustración 5-4 Red primaria red Caldera*

Debido a las condiciones de la red en esta zona, las tuberías con diámetro inferior a los 150 milímetros se consideraron como secundarias.

En este paso no se distingue que parte de la red primaria corresponde a cada reservorio. El siguiente paso es separar la red primaria por cada punto de abastecimiento. Se realiza un nuevo recorrido por las redes y se detendrá cuando el diámetro por el cual se desplaza se encuentra con un diámetro mayor.

Ejemplo de ello es el área encerrada en un círculo en la Ilustración 5-5. Aquí el recorrido se realiza por una tubería de 200mm y se detiene al encontrarse con una de 300mm, esto es porque la tubería de 300 mm conduce agua de otro Reservorio.



*Ilustración 5-5 Conectividad entre reservorios red Caldera*

### **5.1.1 Análisis del recorrido red primaria**

Dentro de un ciclo que se realiza tantas veces como se tengan de puntos de abastecimientos, en este caso se repetirá tres veces, porque son tres reservorios.

1. Se obtiene la tubería que conecta al reservorio, se depuran aquellas tuberías que sean de diámetro inferior al definido para las tuberías de la red secundaria.
2. Se obtiene los nodos siguientes en el recorrido, en este punto se obtienen las elevaciones de los nodos encontrados, buscándolos en la lista de todos los nodos de la red, estas elevaciones son restadas al anterior valor encontrado de nodos, (reservorio).

Si estos nodos hacen parte de las válvulas o bombas, se modifica el valor de la carga en dicho nodo.

3. Se encuentra la segunda tubería del recorrido.

Realiza el mismo procedimiento del punto 1, solo que ahora las tuberías obtenidas son depuradas con las tuberías obtenidas en el punto 1.

Se depuran aquellas tuberías que tengan un diámetro más pequeño al determinado para la tubería de red secundaria.

Se aplica ahora la condicional de que el recorrido no pase de una tubería de diámetro menor a uno mayor.

Se almacena las tuberías por donde ha pasado el recorrido.

4. Se obtienen los nodos de las tuberías del punto 3.

Se obtienen las elevaciones de los nodos encontrados, buscándolos en la lista de todos los nodos de la red, estas elevaciones son restadas al anterior valor de elevación de nodos encontrado en el paso 2.

Se valida si estos nodos hacen parte de válvulas o bombas, de ser el caso se modifica su carga.

En este momento se colocan identificadores a los nodos encontrados, esto con el objetivo de poder restar los nodos siguientes con su precedente y no restarlo con alguno diferente.

Ejemplo de la Ilustración 4-2.

Este ciclo se repite tantas veces como el número de puntos de abastecimiento

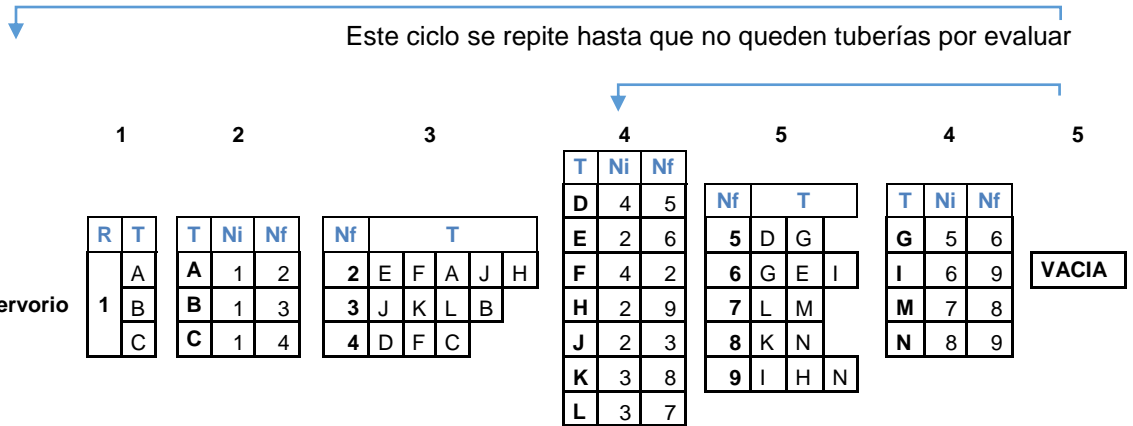


Tabla 5.2 Ciclo recorrido red ejemplo

Los pasos impares, entregan tuberías y los pares nodos.

En esta red, para saber con qué valor se debe restar las elevaciones de los nodos obtenidos en el paso 2, sería sencillo, puesto que viene del nodo 1, en este caso el reservorio. Para el paso 4 se tienen tres nodos precedentes, los obtenidos por el paso 2, los nodos 2, 3 y 4, para saber de dónde ha venido cada nodo se agrega un identificador a las tuberías de las cuales proceden los nodos anteriores.

Tubería = Identificador

A=1

B=2

C=3

Este identificador es heredado a los nodos a los que conecta.

Nodo= Identificador

2=1

3=2

4=3

Las tuberías obtenidas de estos nodos tendrían estos identificadores.

D=3 Debido que esta tubería viene del nodo 4

E=1 Viene del nodo 2

F=1 Viene del nodo 2

H=1 Viene del nodo 2

J=2 Viene del nodo 3

K=2 Viene del nodo 3

L=2 Viene del nodo 3

Los nodos obtenidos de estas tuberías ahora serían.

5=3

6=1  
7=2  
8=2

Estos identificadores son comparados con los de los nodos anteriores y si son iguales, se restan las elevaciones.

Cada vez que el recorrido sale de este ciclo, significa que ha terminado de realizar un recorrido perteneciente a un punto de abastecimiento de agua.

Este procedimiento se muestra en las ilustraciones Ilustración 5-6 a la Ilustración 5-17.

#### 5.1.1.1 Recorrido primer reservorio.

El recorrido inicia en el reservorio 1, los nodos de color azul y resaltados en amarillo, son aquellos por los cuales el recorrido se logra al tomar en cuenta los diámetros y las cargas de posición en cada nodo. Por ello el recorrido se detiene en las partes donde la tubería va de un diámetro menor a uno mayor o las cargas no se encuentran dentro del rango de cargas establecidas al inicio del algoritmo.

Al terminar con el recorrido, se inicia con el siguiente reservorio.

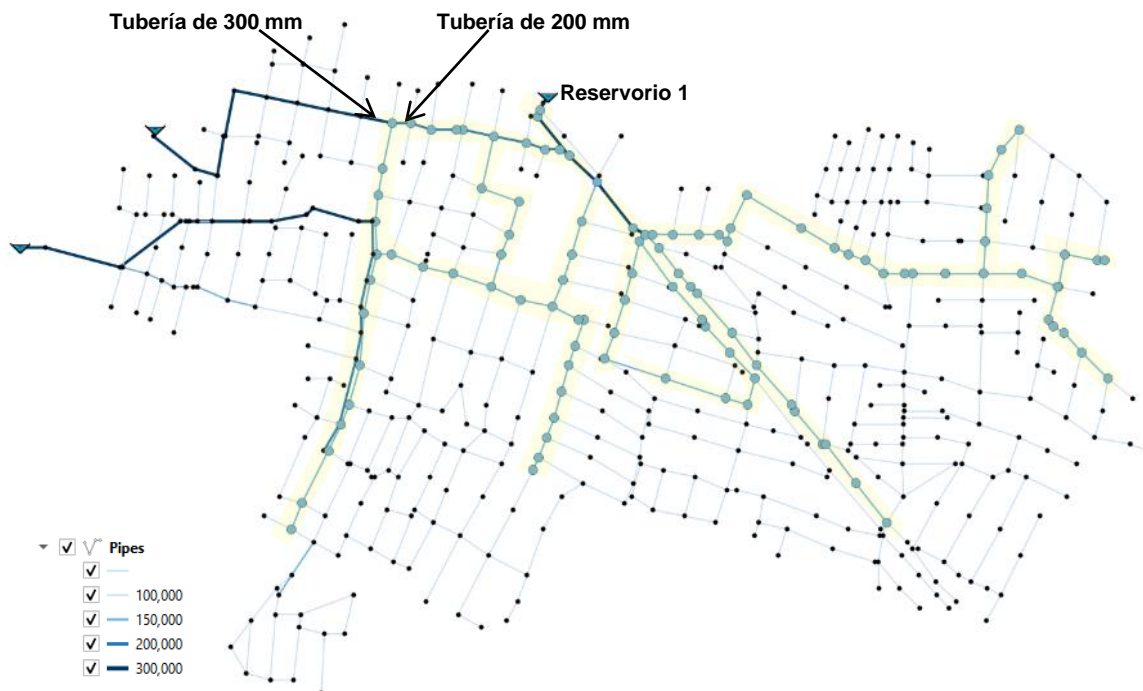


Ilustración 5-6 Recorrido primer reservorio red Caldera

#### 5.1.1.2 Recorrido segundo reservorio.

En la Ilustración 5-7 se observa el inicio del recorrido dos en el reservorio 2, los puntos donde se detiene el recorrido es debido al cambio de una tubería de diámetro menor a uno mayor.

En las tuberías señaladas, el recorrido va por una tubería de 150 mm y llega a una tubería de 300 mm, por lo cual el recorrido se detiene.

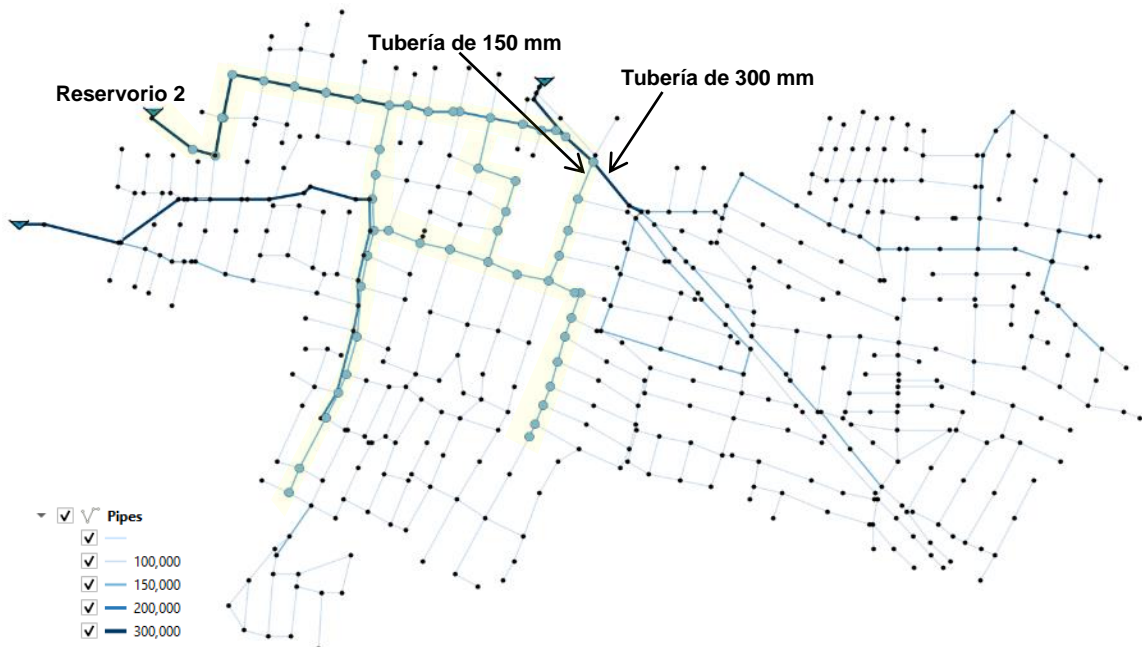


Ilustración 5-7 Segundo recorrido red Caldera

### 5.1.1.3 Recorrido tercer reservorio.

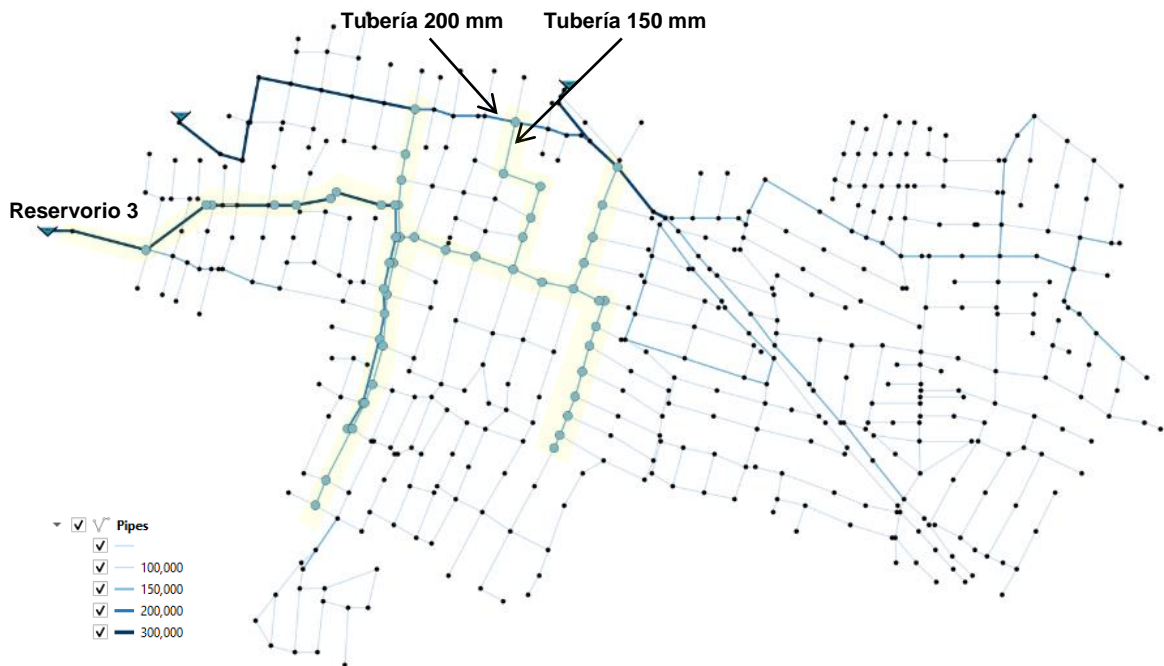


Ilustración 5-8 Tercer recorrido red Caldera

El recorrido inicia en el reservorio tres, y se detiene en las tuberías señaladas en la Ilustración 5-8 debido a que el recorrido se va desarrollando por una tubería de 150 mm y encuentra a una de 200 mm

Estos tres recorridos son almacenados en una sola matriz. Esta matriz es organizada con los valores de carga menos favorables al inicio y por último los más favorables

Debido a que el rango de cargas establecidas al inicio del algoritmo para sectorizar esta red es de 20 metros a 50 metros de carga, se organiza de la siguiente manera, primero las cargas menores a 20 metros, luego las mayores a 50 metros y por último las cargas entre los 20 y 50 metros.

Al buscar para cada nodo su reservorio de influencia en la lista de los recorridos acumulados, se sobrescribirá el dato encontrado las veces que encuentre a cada nodo, logrando con esto que se obtenga el reservorio que entregue la carga más cercana al rango de datos que se defina. En la Ilustración 5-9, se observa la asignación de tanques de influencia a cada nodo.

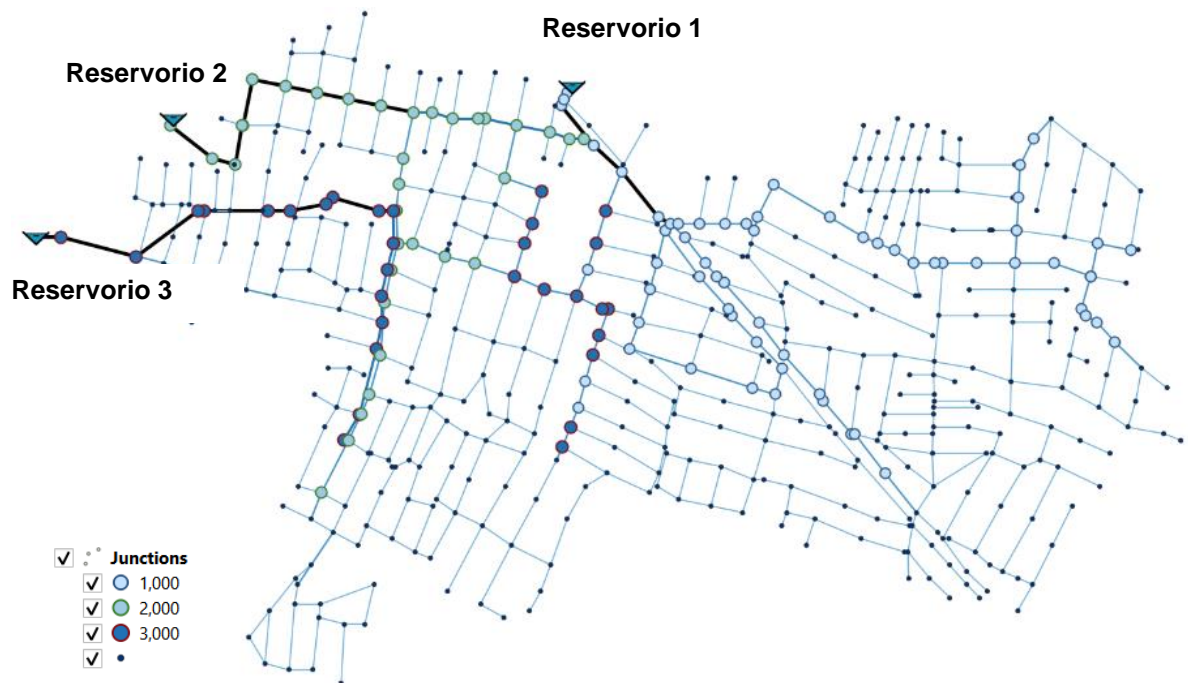
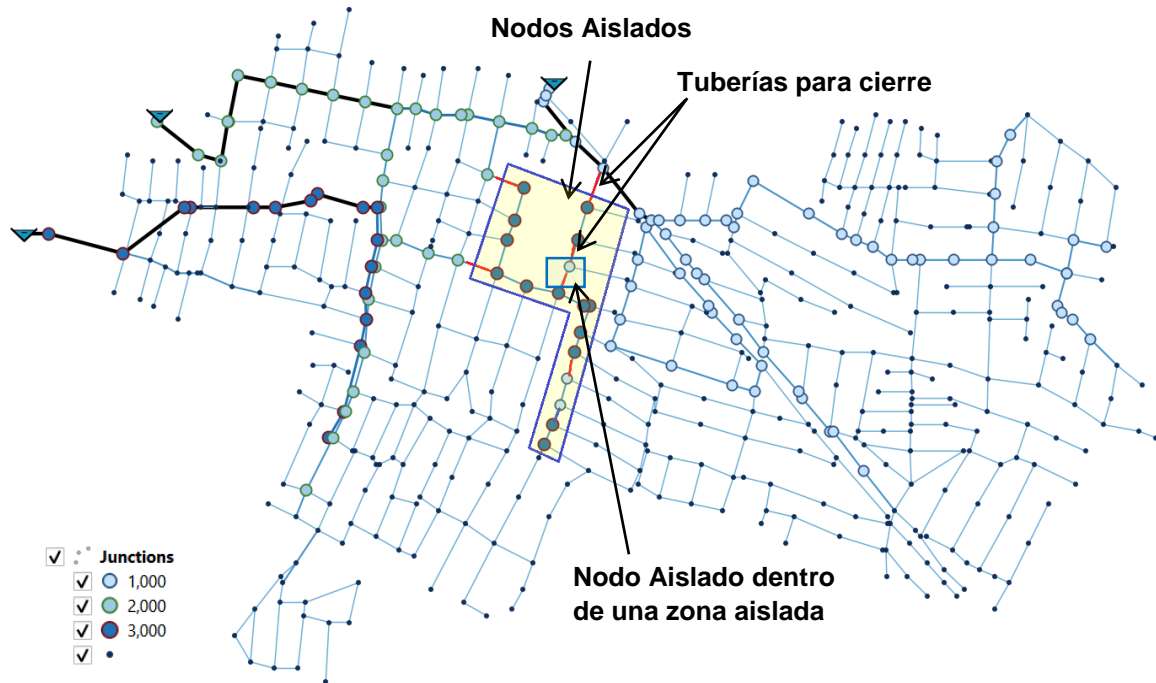


Ilustración 5-9 Definición red primaria Caldera

Con este criterio existen tuberías en la red primaria que pertenecen a dos distintos reservorios, dichas tuberías son la propuesta inicial para cierres.

Para validar que no existan zonas aisladas, se realiza de nuevo el recorrido por la red primaria definida con las tuberías cerradas, los nodos obtenidos de este recorrido, son comparados con el total de los nodos de la red primaria total, en caso que falte alguno, es definido como zona aislada.

En la imagen Ilustración 5-10, se pueden ver las tuberías propuestas para cierre en color rojo, y la zona de los nodos aislados en un polígono de color amarillo.



*Ilustración 5-10 Nodos aislados en red principal Caldera*

Se realiza otro recorrido solo por los nodos y las tuberías aisladas, sin incluir las de cierres, con el objetivo de tratar a toda un área de nodos aislados.

Para el tratamiento de los nodos aislados, se establece un orden, los nodos aislados deben ser conectados según la proximidad que exista de la zona aislada con una zona no aislada, esto significa que de ser el caso existan zonas aisladas contenidas en otra zona aislada, o una zona aislada que puede cambiar a diferentes reservorios de influencia, el algoritmo identifica los nodos más próximos no aislados, que entregan la carga más favorable para conectar la zona no aislada y es conectada.

Con esto se logra conectar las zonas aisladas de forma ordenada, conectando siempre las zonas aisladas a las zonas que entreguen las cargas más cercanas al rango establecido.

Dichos recorridos se realizan la cantidad de veces necesarias hasta que quede vacía la lista de nodos aislados, la cual es depurada según se realizan estos recorridos.

Con esto es posible obtener la Ilustración 5-11.



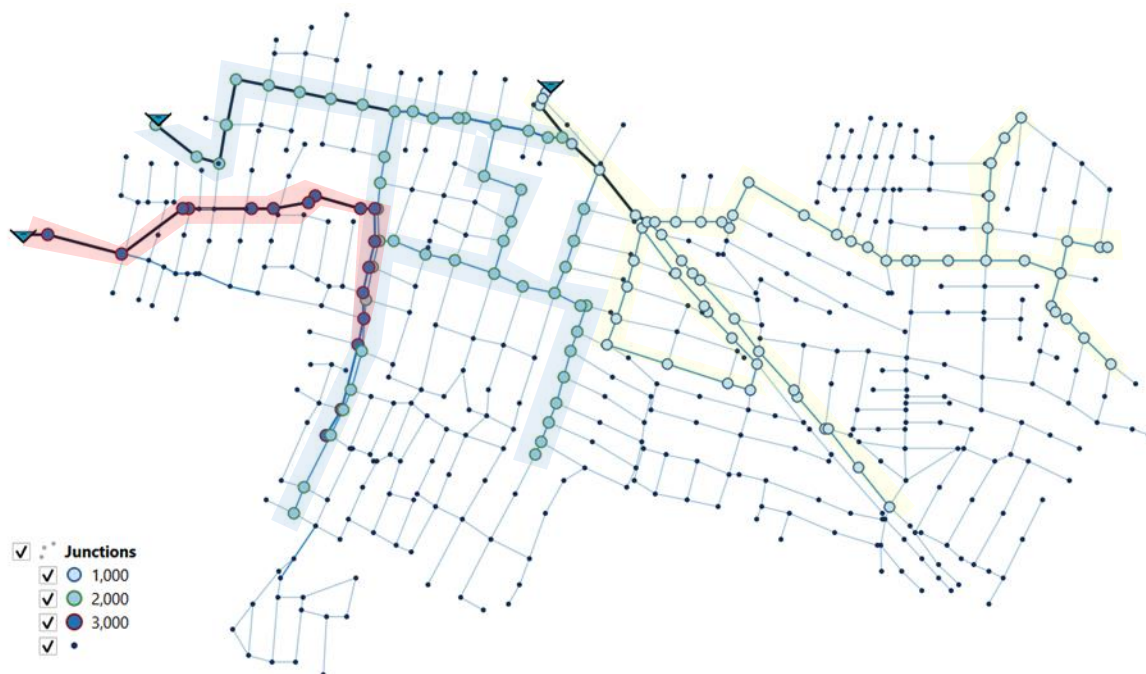


Ilustración 5-11 Red primaria Caldera

**5.1.2 Nodos con su reservorio de influencia.**

Ya definida la red primaria se realiza un nuevo recorrido, el cual se basa en la carga de posición obtenida en cada nodo según el reservorio por el cual llega el recorrido.

Se inicia con el recorrido en el reservorio 1.

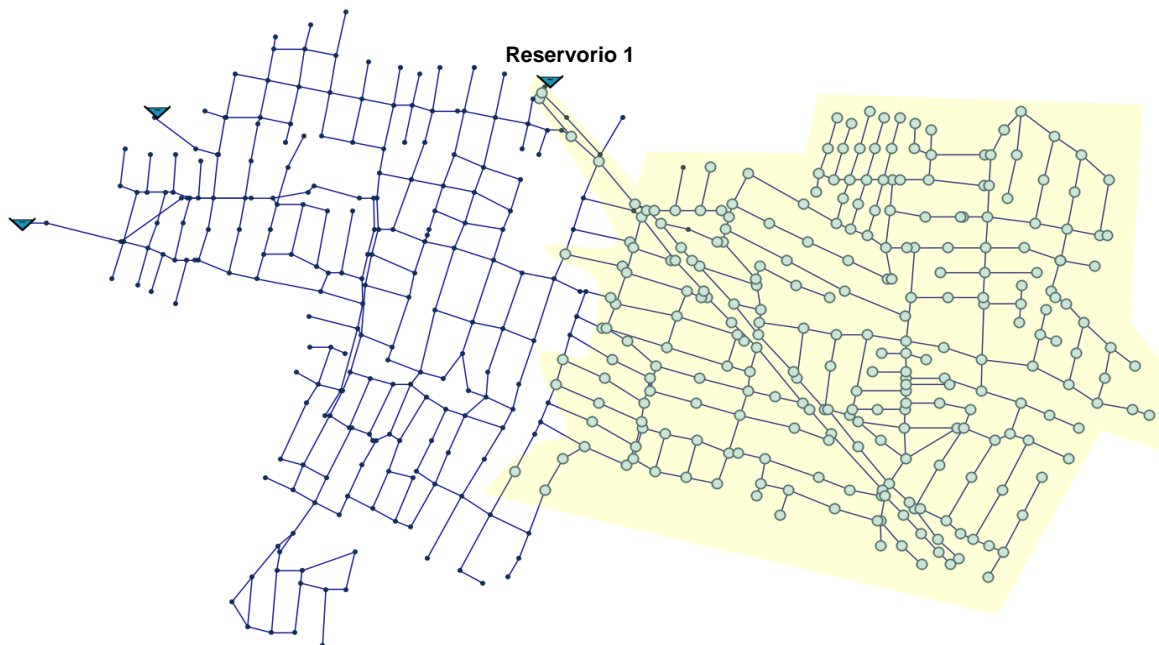
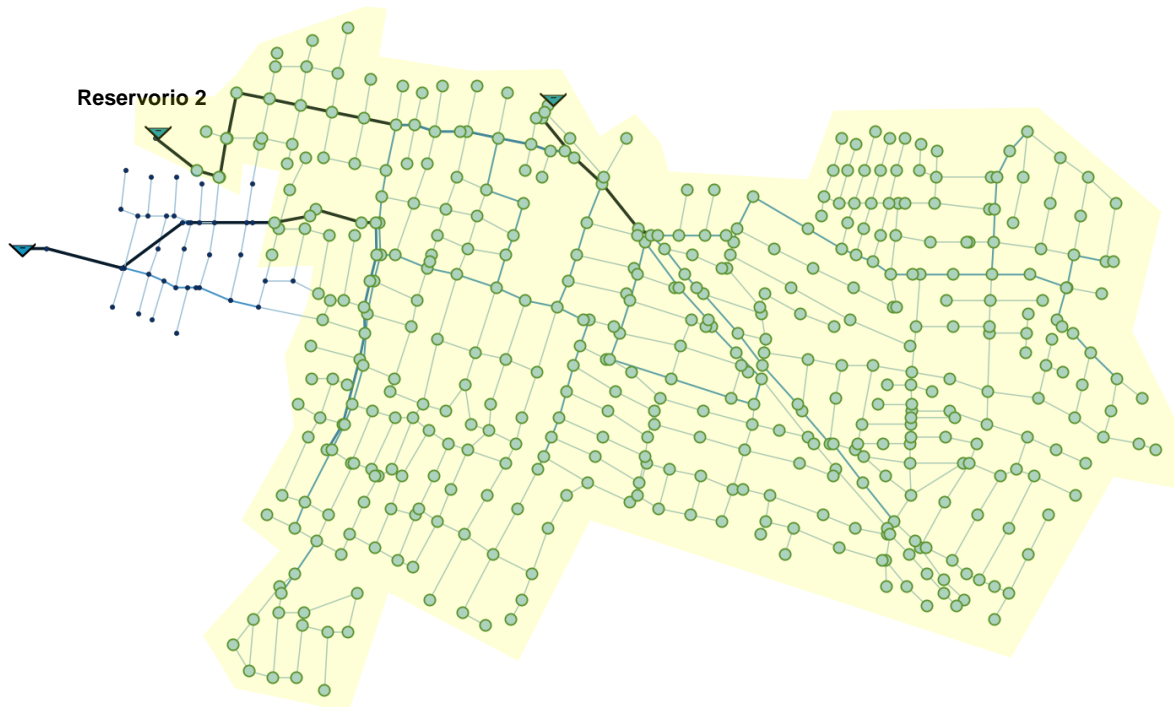


Ilustración 5-12 Primer recorrido total del primer reservorio de la red Caldera

Según Ilustración 5-12, el recorrido no se realiza por toda la red, aunque se encuentre conectada, esto es debido a las diferencias de elevaciones, el reservorio se encuentra en una cota baja y la carga de posición no es la suficiente para hacer llegar agua a los otros nodos con la carga mínima establecida.

### 5.1.2.1 Recorrido segundo reservorio.

El recorrido inicia en el reservorio 2.



*Ilustración 5-13 Segundo recorrido total de la red Caldera*

En este recorrido el reservorio se encuentra en una cota más elevada que el anterior, por lo cual logra hacer llegar agua a la mayoría de los nodos en esta red con suficiente carga.

### 5.1.2.2 Recorrido tercer reservorio.

El recorrido inicia en el reservorio 3.



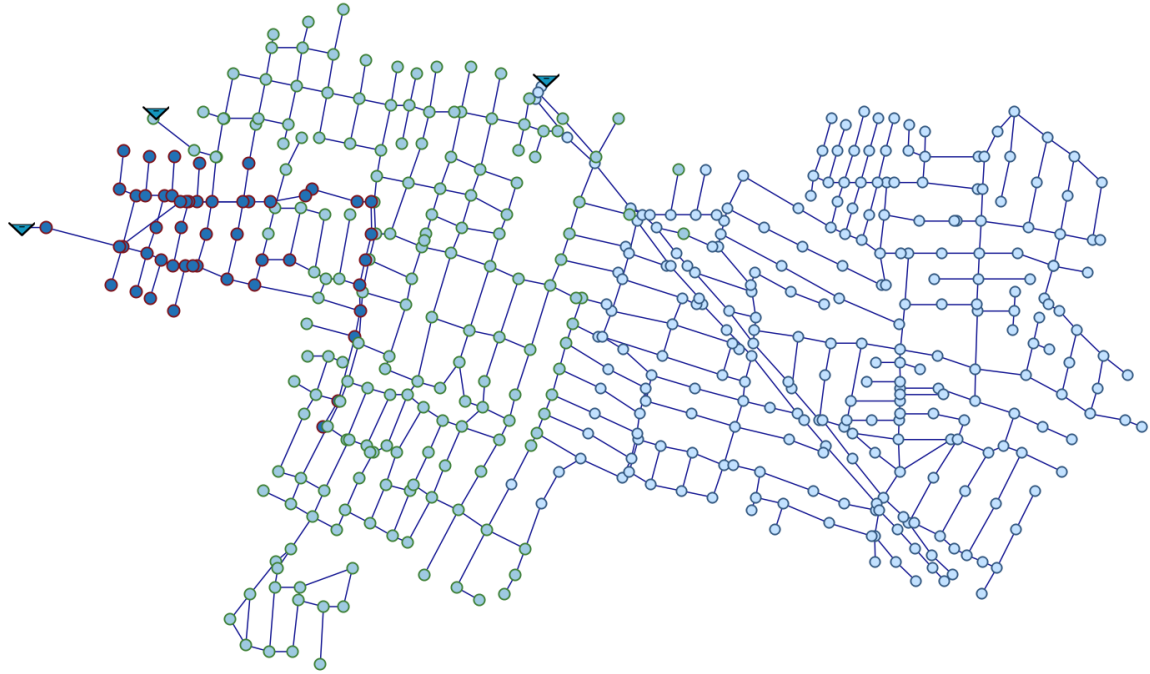
*Ilustración 5-14 Tercer recorrido total de la red Caldera*

Este reservorio se encuentra en el punto más alto, por lo cual logra que el recorrido almacene los datos de todos los nodos de esta red.

### 5.1.3 Condición de carga.

Los tres recorridos son almacenados en la misma matriz, la cual se organiza primero los nodos con cargas menores a 20 metros luego los mayores a 50 metros y por último los que se encuentran en el rango de 20 a 50 metros.

Al realizar la búsqueda de cada nodo en esta lista quedan nombrados como se muestra en Ilustración 5-15.

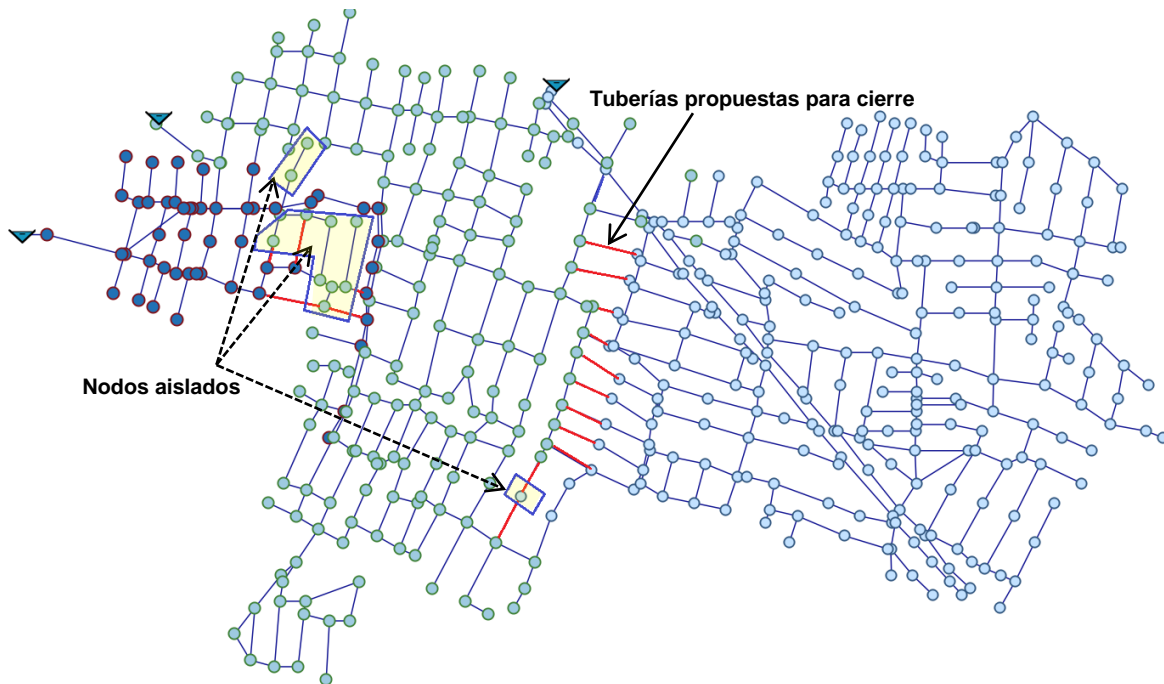


*Ilustración 5-15 Nodos según reservorio de influencia red Caldera*

Se puede observar que la red primaria definida en la Ilustración 5-11 Red primaria Caldera, no se modifica.

Al dar a cada nodo un reservorio de influencia según las condiciones que se han establecido de cargas, se obtienen tuberías para propuesta de cierre, y al realizar estos cierres se obtienen nodos aislados.

En la Ilustración 5-16 se encuentra en rojo las tuberías para cierre y en un polígono amarillo se encuentran los nodos aislados.



*Ilustración 5-16 Nodos aislados en toda la red Caldera*

#### **5.1.4 Nodos aislados**

Para realizar la unión de estos nodos a alguna zona, se realiza de nuevo el tratamiento de nodos aislados, el criterio es conectar el nodo a la zona donde al conectarse ésta entrega cargas cercanas a las establecidas inicialmente en el algoritmo.

#### **5.1.5 Sectores entregados**

La Ilustración 5-17 contiene los sectores propuestos y en color más oscuro se observa la red Principal de la Ilustración 5-11, mostrando con ello que la red principal no es modificada.

Los sectores pueden ser validados por medio de la herramienta QGISRed, mostrando que los cierres propuestos logran crear tres áreas hidráulicas.

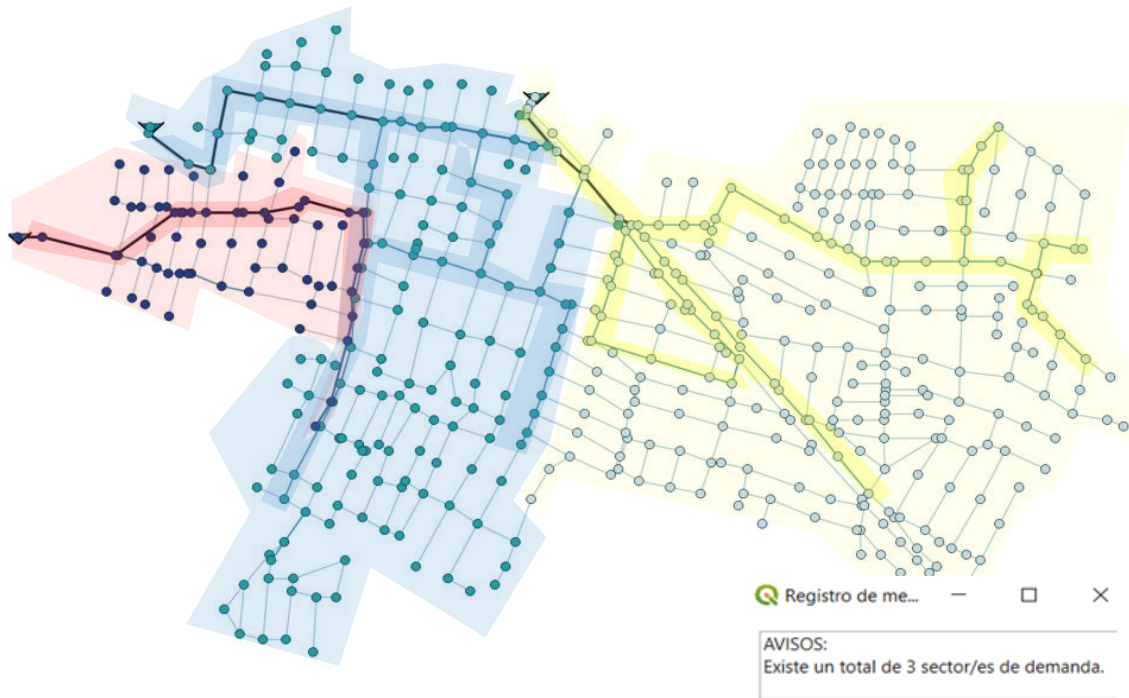


Ilustración 5-17 Sectores Propuestos red Caldera

### 5.1.6 Simulación

La sectorización propuesta es corrida en Epanet, entregando las siguientes presiones.

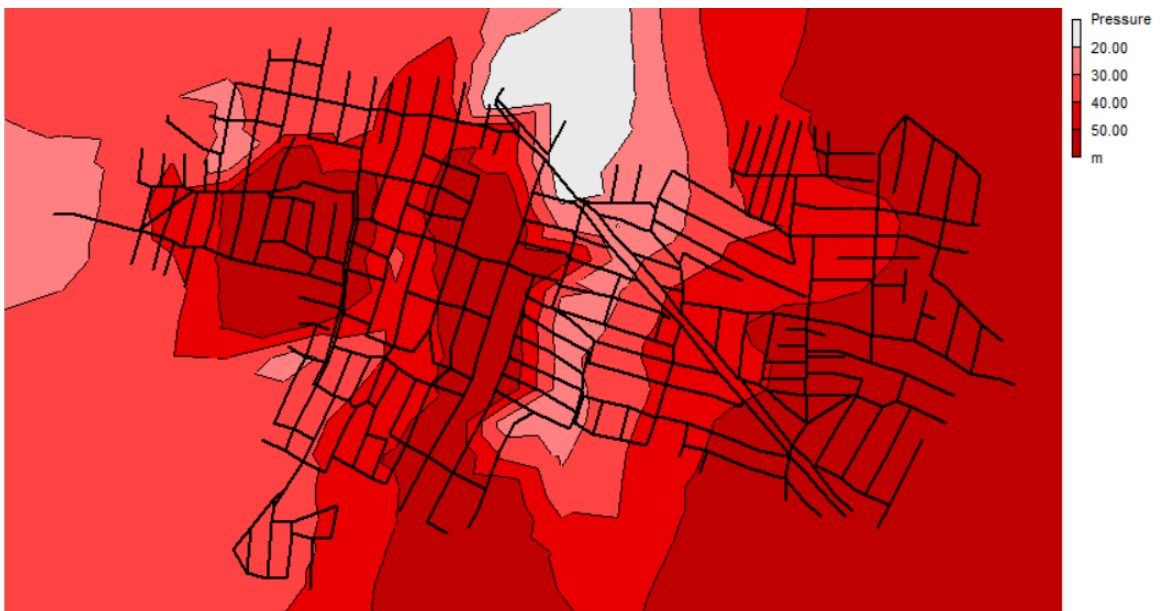


Ilustración 5-18 Presiones red Caldera sectorizada, en el tiempo 12:00 a.m.

La sectorización propuesta es evaluada por medio de la Toolkit de EPANET, la cual es incluida al algoritmo, y con ella es posible simular la sectorización en el tiempo de máxima demanda y obtener los valores de presiones en cada nodo.

Al evaluar la red en EPANET se logra incluir las variables de consumo y pérdidas en la red.

Para logra llamar a la Tollkit de Epanet, debe ser definida en la parte inicial del algoritmo el tiempo en el cual la red presenta la máxima demanda.

El análisis se realiza en el tiempo de máxima demanda debido a que se busca que los nodos en todo momento cumplan con el criterio de presión mínima de 20 metros.

Estos datos son evaluados y se identifican los nodos en los cuales se presentan presiones por debajo de las establecidas, estos nodos serán tratados de nuevo como aislados, y serán conectados a la zona que entregue presiones más cercanas a las establecidas al inicio del algoritmo.

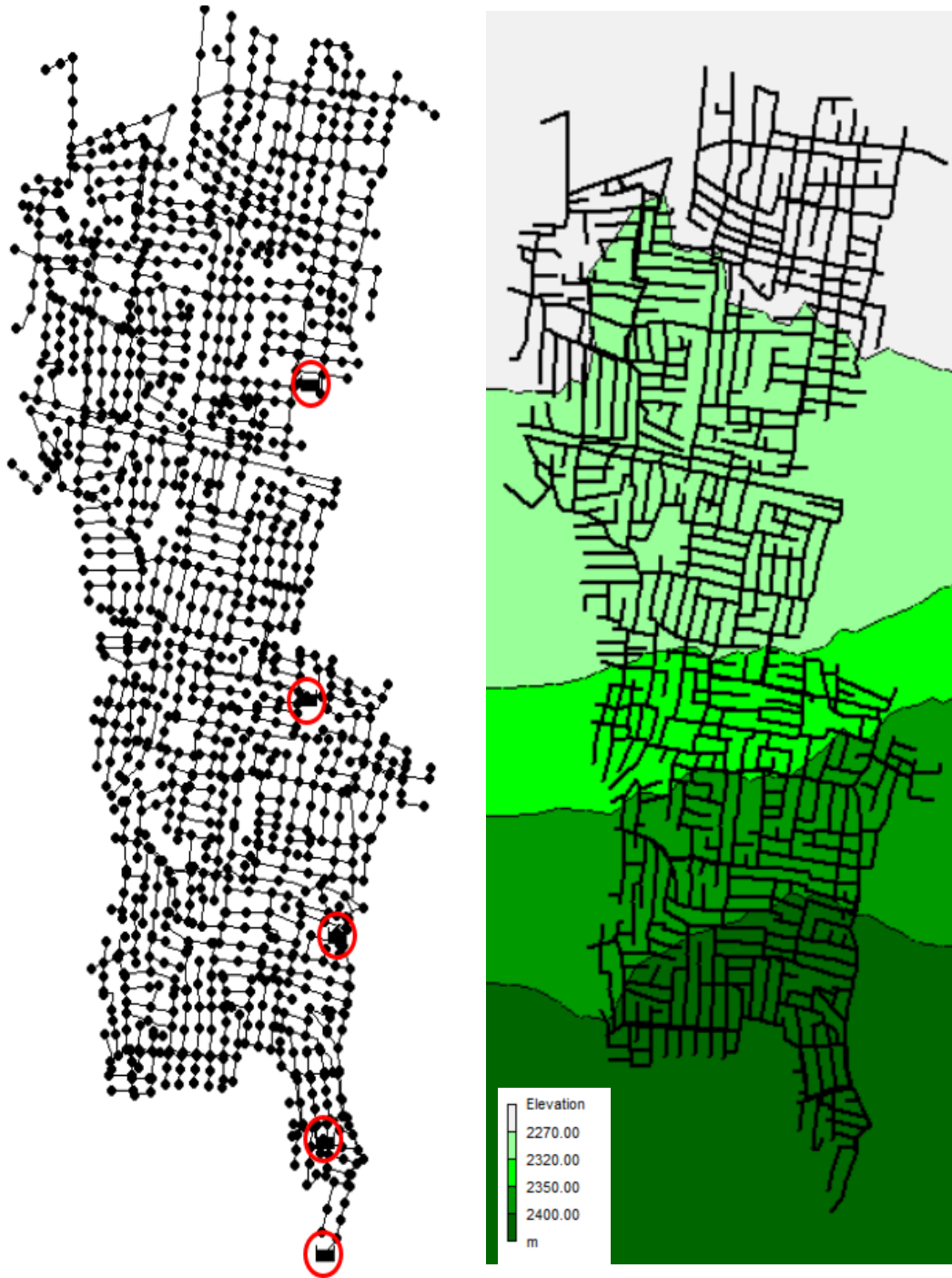
En la red de Acauntepec es mostrado el funcionamiento de la Toolkit.

## 5.2 RED ZARAGOZA.

La red Zaragoza se encuentra en un terreno con pendiente, tiene cinco reservorios y es una red de distribución de agua potable mallada. La Tabla 5.3 contiene información de la red.

<b>Zaragoza</b>	
Reservorios	5
Nodos	1343
Tuberías	1602
Válvulas	0
Bombas	0
Cota inicial (msnm)	2478.3
Cota final (msnm)	2241

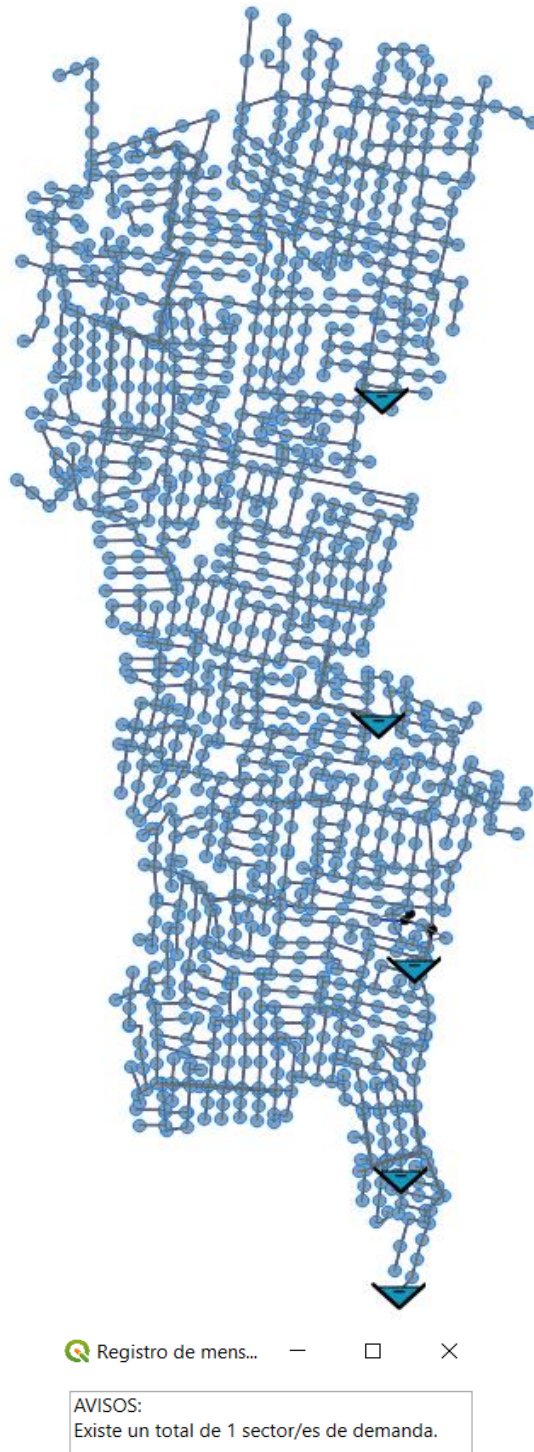
*Tabla 5.3 Información red Zaragoza*



*Ilustración 5-19 Planos de ubicación Reservorios y elevaciones de la red Zaragoza*

Se identifica si la red tiene sectores ya establecidos por medio de QGISRed. Ilustración 5-20.





*Ilustración 5-20 Sectores iniciales red Zaragoza*

Entregando que la red se encuentra totalmente conectada entre sí.

### 5.2.1 Sectores entregados por el algoritmo

Al correr el algoritmo entrega los sectores mostrados en la Ilustración 5-21.

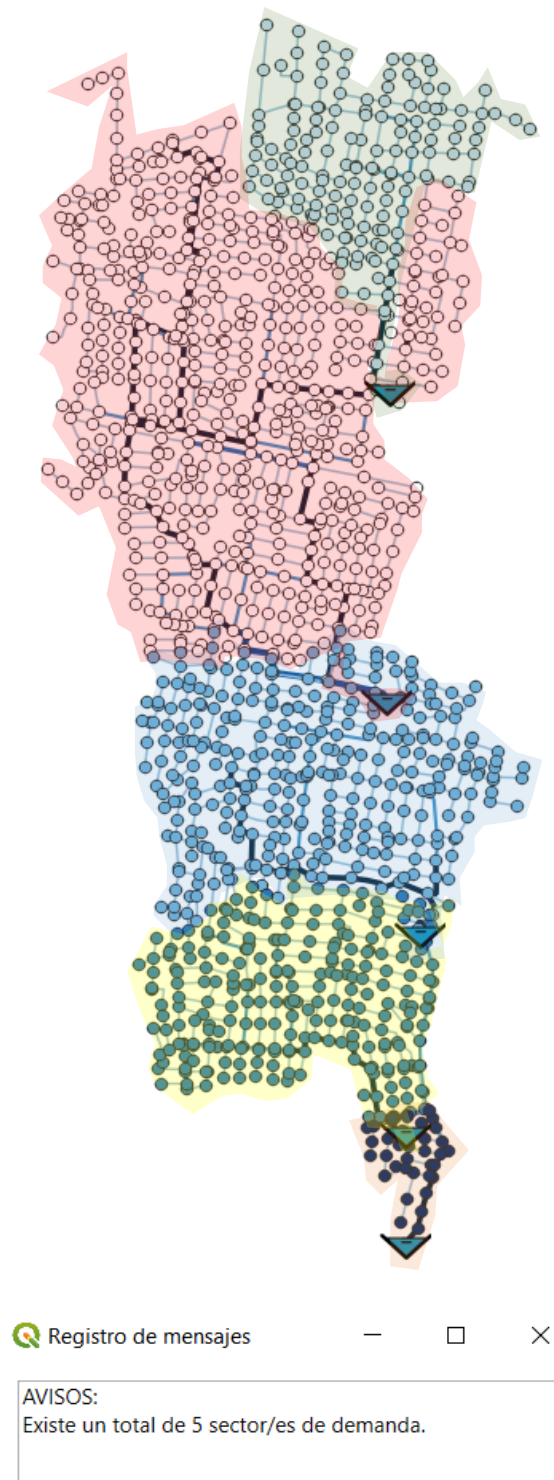


Ilustración 5-21 Sectores Propuestos red Zaragoza

## 5.2.2 Simulación

Se realiza en Epanet la simulación de la red sectorizada, entregando las presiones mostradas en la Ilustración 5-22.

### 5.2.2.1 Red sectorizada.



*Ilustración 5-22 Presiones red Zaragoza sectorizada en el tiempo 12:00 am*

### 5.3 RED TEOTONGO

La Tabla 5.4 contiene los datos de los elementos que componen la red.

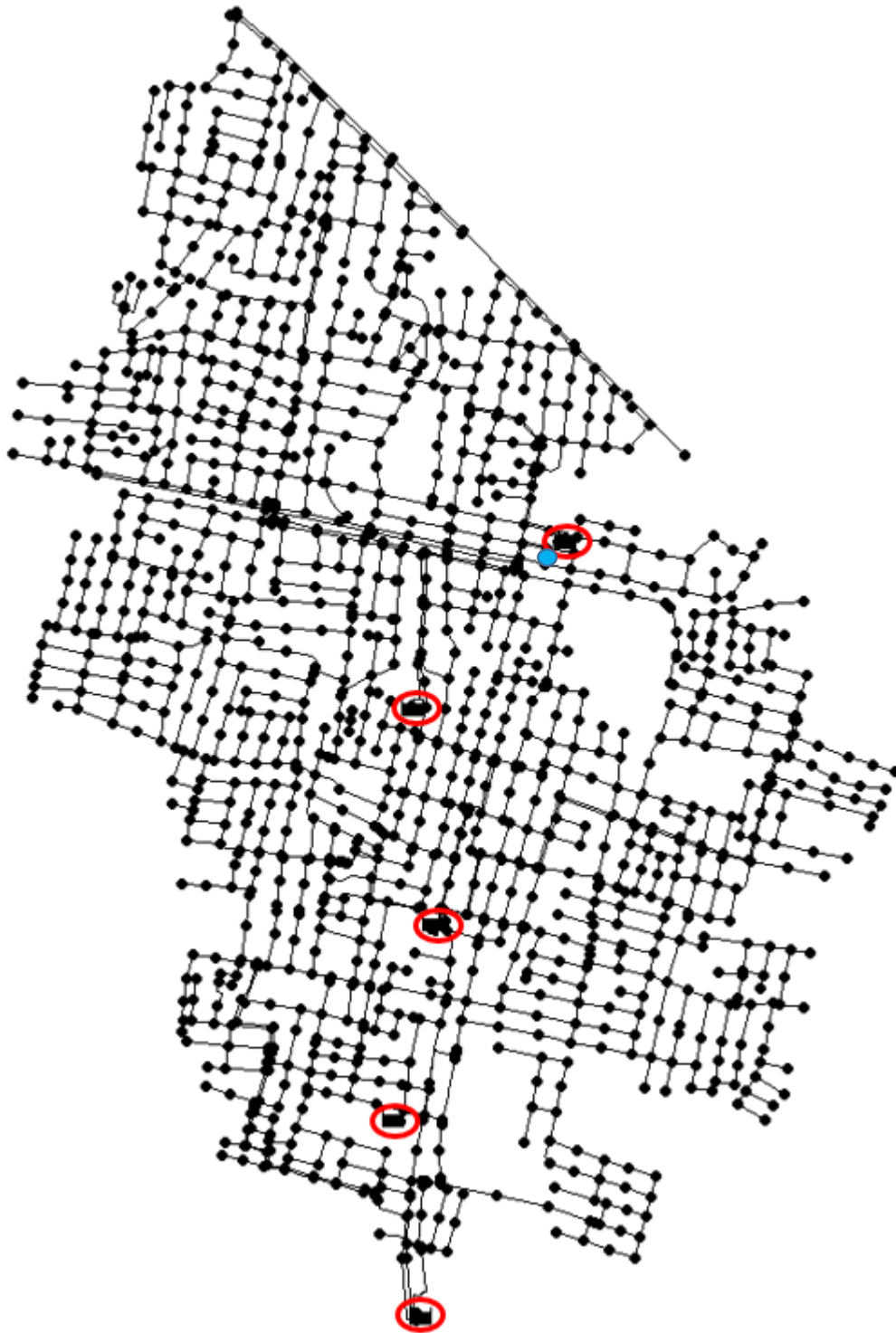
<b>Teotongo</b>	
Reservorios	5
Nodos	1401
Tuberías	1651
Válvulas	0
Bombas	2
Cota inicial (msnm)	2444.9
<u>Cota final (msnm)</u>	<u>2245</u>

*Tabla 5.4 Información red Teotongo*

En esta red se encuentran dos bombas, por lo cual el valor de la carga de los nodos pertenecientes a dicha bomba toma el valor de carga que entrega la bomba, sucede lo mismo con las válvulas.

Este arreglo se ha incluido de esta forma para tener un valor aproximado de la carga que tomaría el nodo debido a la presencia de la bomba.

La red y la ubicación de las bombas indicada con un punto azul, son mostradas en la Ilustración 5-23.

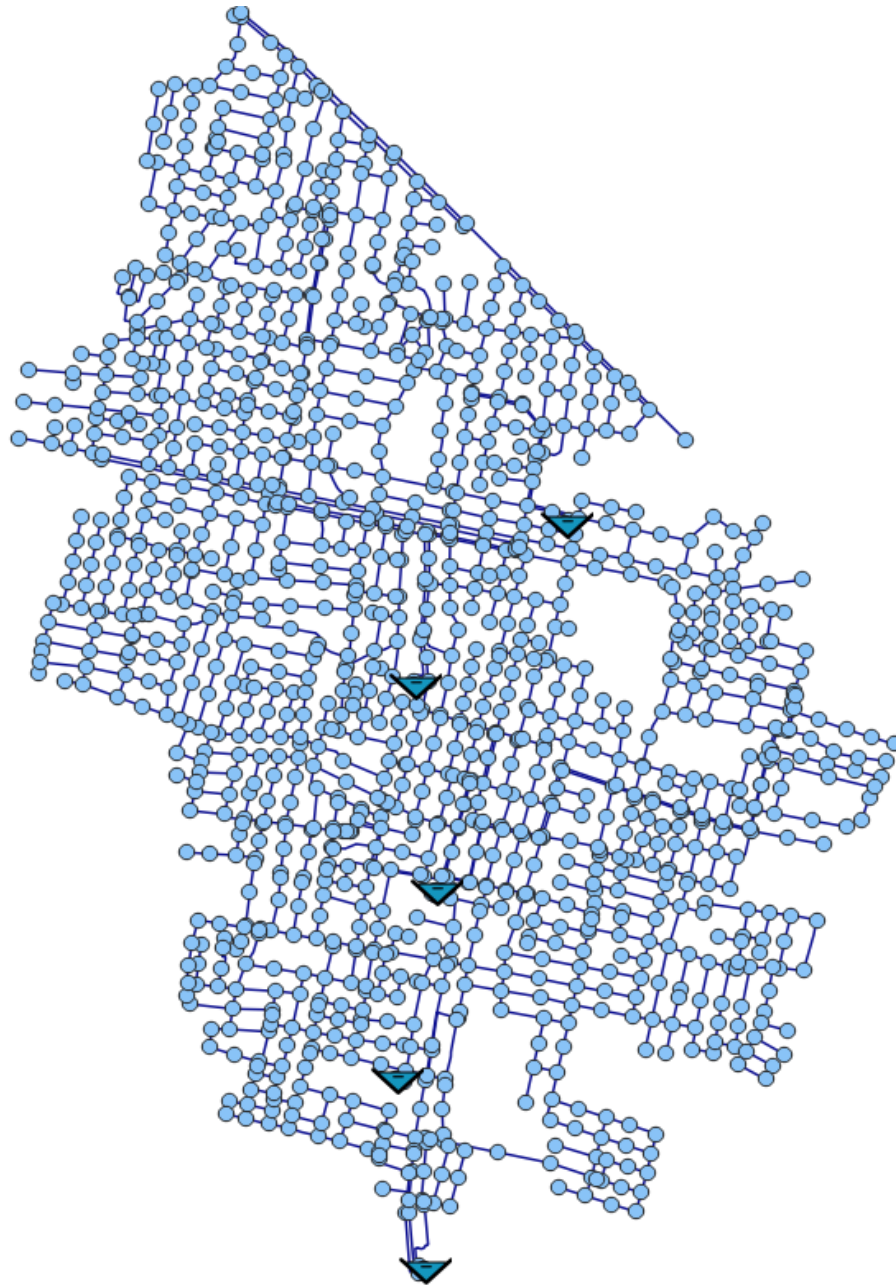


*Ilustración 5-23 Plano de ubicación Reservorios y bombas de la red Teotongo*



*Ilustración 5-24 Plano de elevaciones de la red Teotongo*

En QGIS, con el plugin de QGISRed, se observan los sectores iniciales de la red.



Registro de mensajes — □ ×

AVISOS:  
Existe un total de 1 sector/es de demanda.

*Ilustración 5-25 Sectores iniciales red Teotongo*

Entregando que la red se encuentra totalmente conectada.

### 5.3.1 Condición de carga.

Al ejecutar el algoritmo, entrega los siguientes sectores.

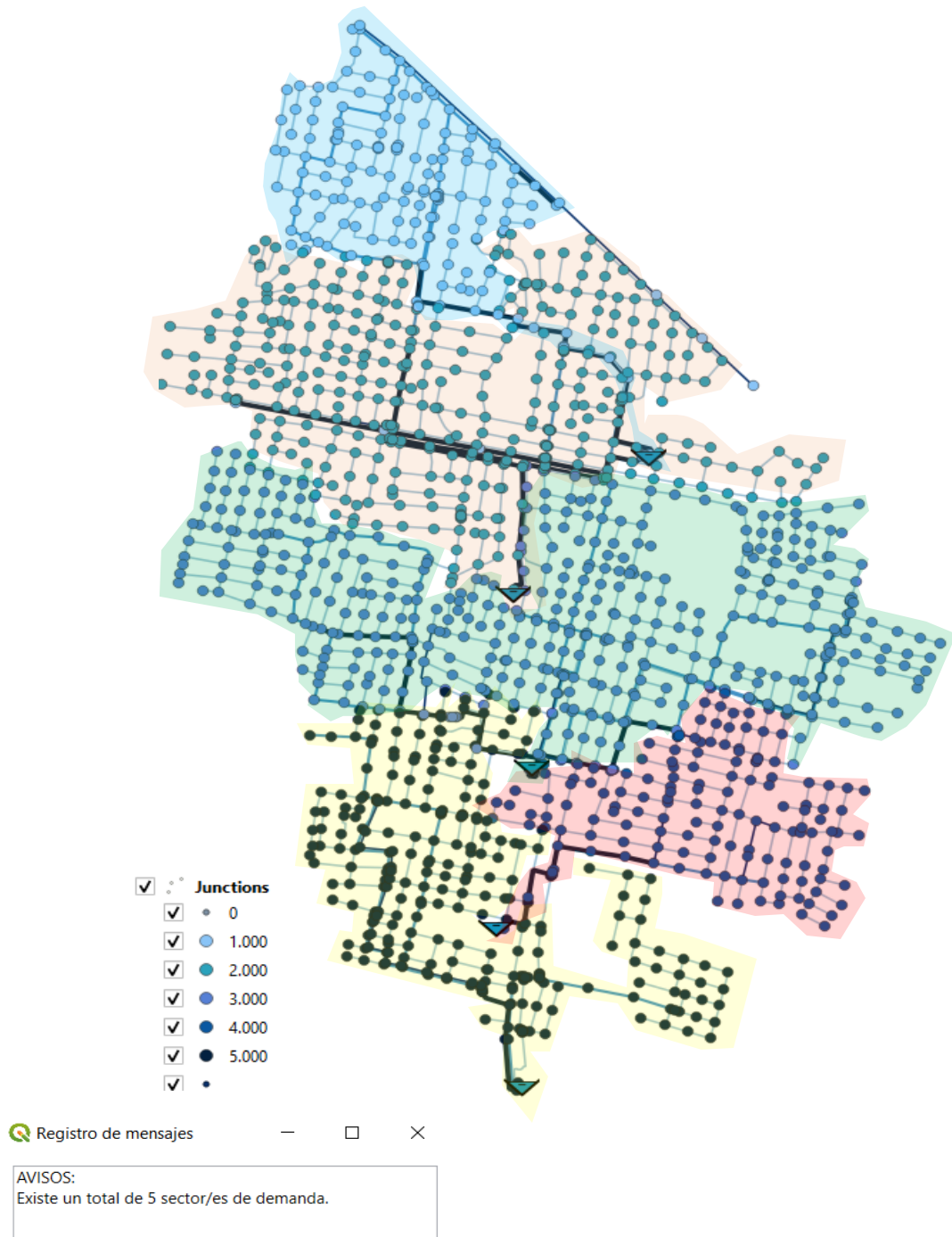


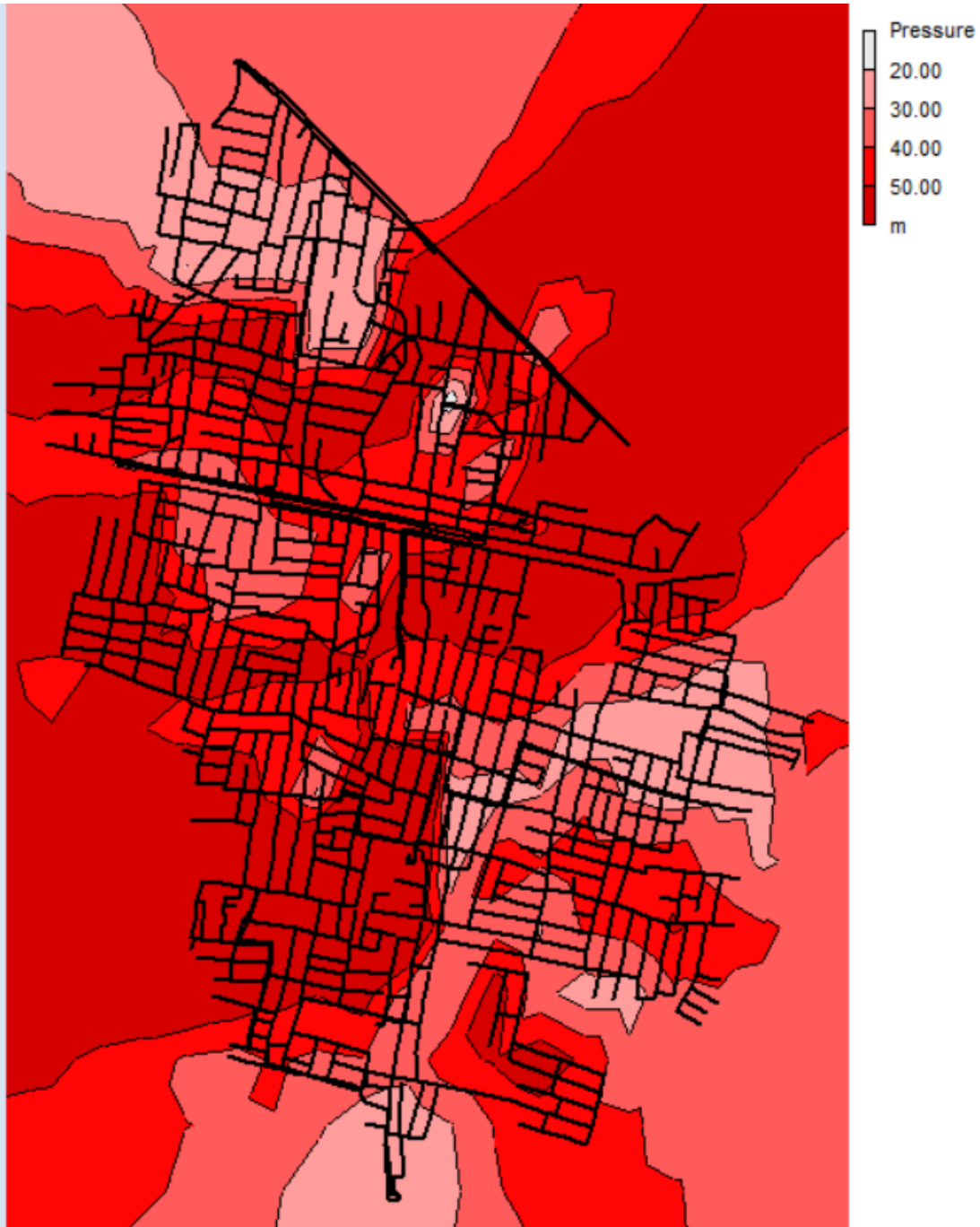
Ilustración 5-26 red Teotongo sectorizada



### 5.3.2 Simulaciones

Al simular la red sectorizada en Epanet, entrega las presiones mostradas en la Ilustración 5-27.

#### 5.3.2.1 Red sectorizada



*Ilustración 5-27 Presiones red Teotongo sectorizada tiempo 12:00 a.m.*

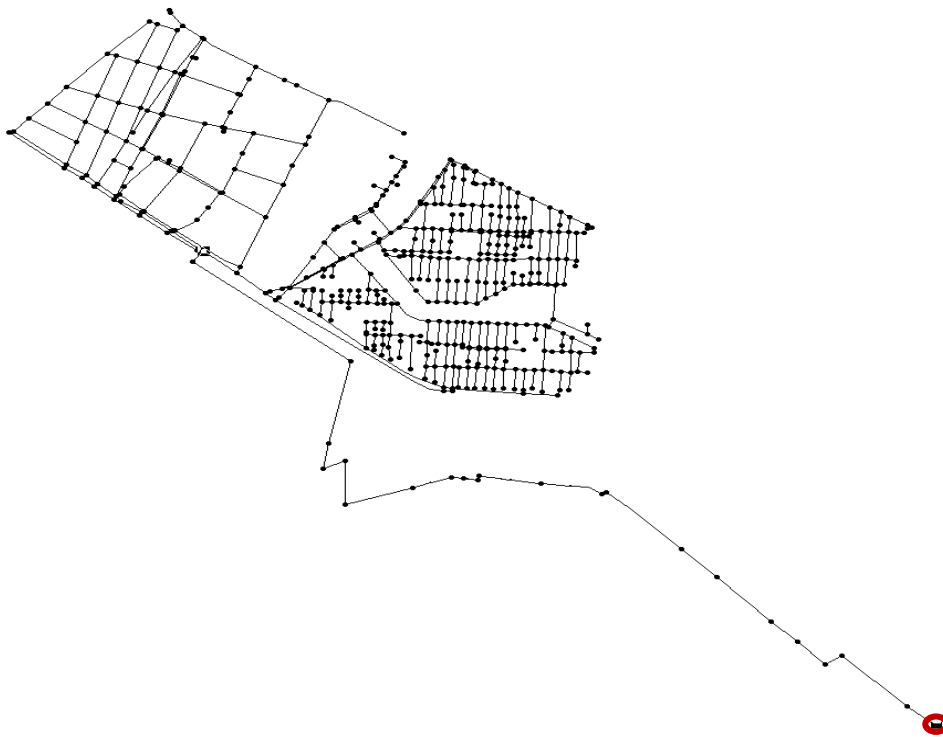
#### 5.4 RED ERMITA.

La Tabla 5.5 contiene los datos de los elementos que componen la red.

Ermita	
Reservorios	1
Nodos	467
Tuberías	572
Válvulas	0
Bombas	2
Cota inicial (msnm)	2274.3
Cota final (msnm)	2226

*Tabla 5.5 Información red Ermita*

Esta red es incluida, para observar como el algoritmo se comporta cuando la red por sectorizar solo presenta un punto de distribución de agua.



*Ilustración 5-28 Plano de ubicación Reservorios de la red Ermita*



Ilustración 5-29 Plano de elevaciones de la red Ermita

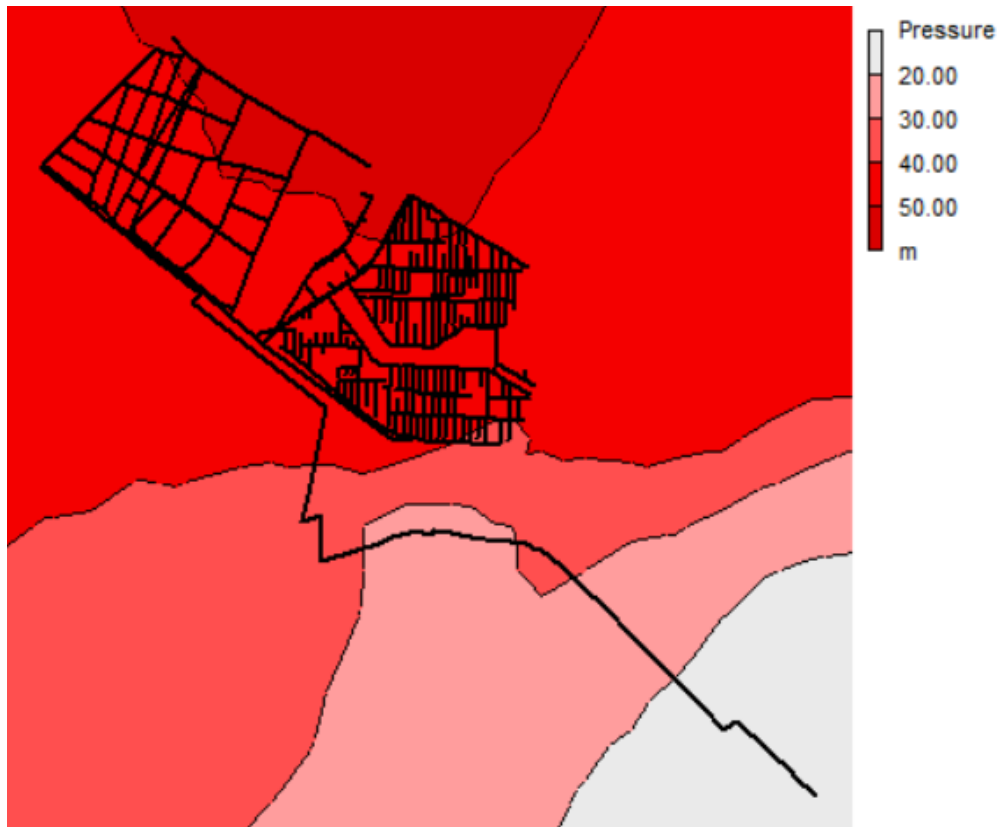
En QGIS, con el plugin de QGISRed, se identifican los sectores iniciales de la red.



Ilustración 5-30 Nodos según reservorio de influencia red Ermita

El algoritmo realiza los recorridos de red primaria y demás nodos, entregando como resultado un solo sector.

Con lo cual se puede observar que de ser el caso la red a tratar solo tenga un punto de almacenamiento, o varios, el algoritmo reconoce los casos donde solo se pueda realizar un sector.



*Ilustración 5-31 Presiones red Ermita tiempo 12:00 a.m.*

## 5.5 RED ACAUNTEPEC

En esta red será implementada la parte del algoritmo que contiene el plugin de EPANET, esto debido a que la sectorización inicial propuesta entrega presiones negativas en el tiempo de máxima demanda, lo cual es solucionado reconociendo a dichos nodos como asilados, para posteriormente lograr conectarlos a un área donde las cargas sean las adecuadas.

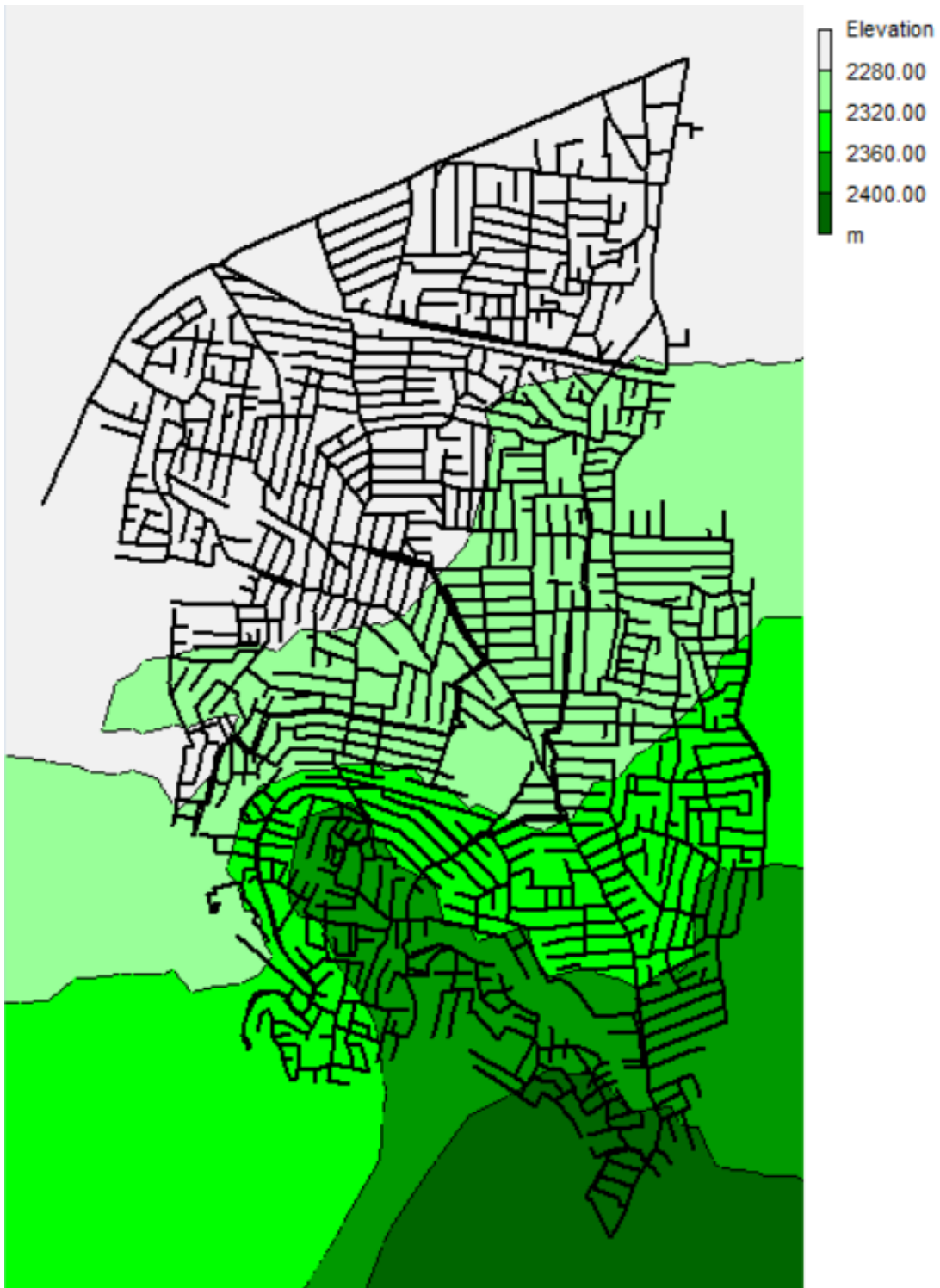
La Tabla 5.6 contiene los elementos que componen la red.

<b>Acauntepec</b>	
Reservorios	6
Nodos	2002
Tuberías	2342
Válvulas	0
Bombas	2
Cota inicial (msnm)	2446.6
<u>Cota final (msnm)</u>	<u>2241</u>

*Tabla 5.6 Información red Acauntepec*

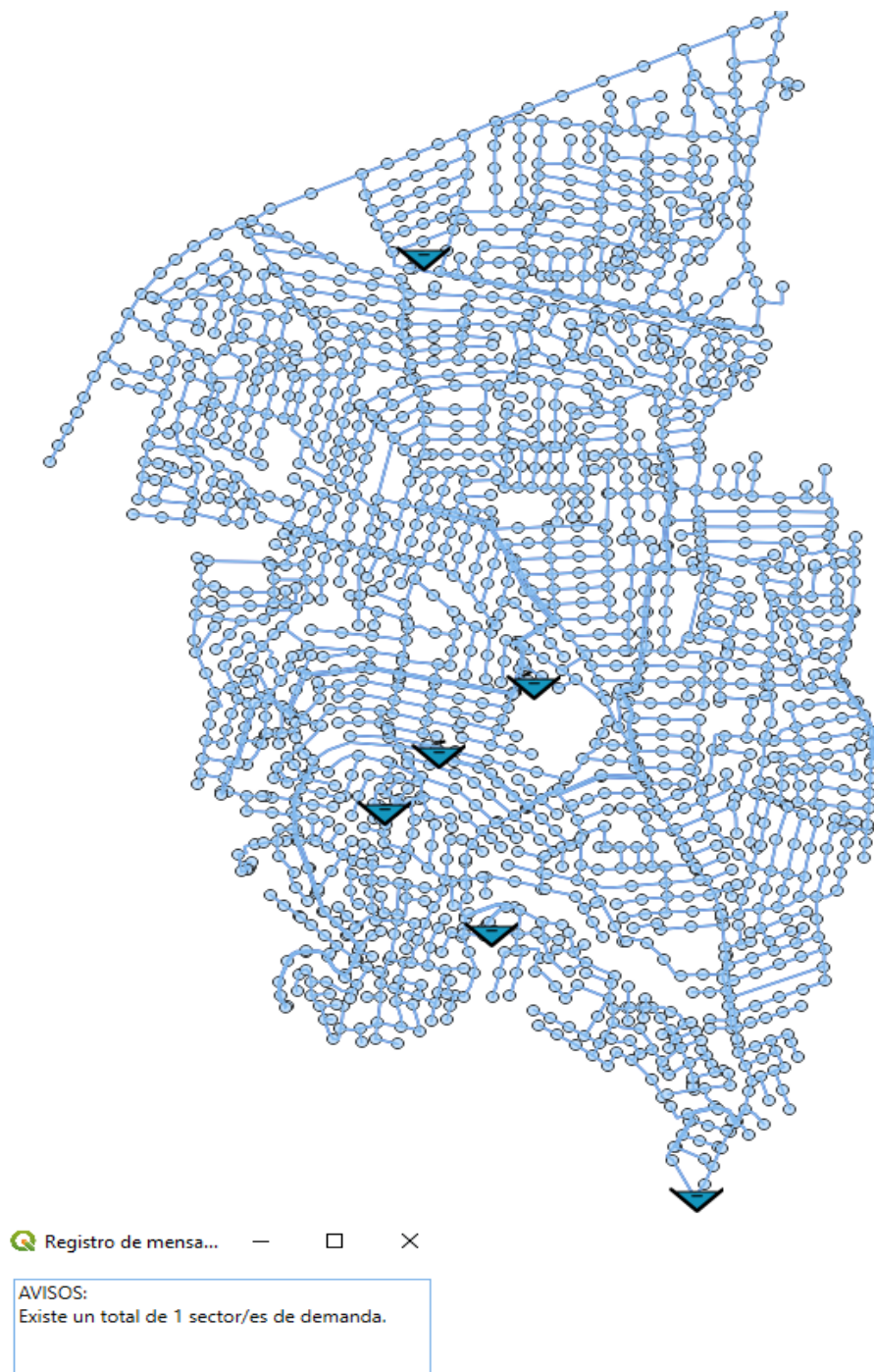


*Ilustración 5-32 Plano de ubicación Reservorios de la red Acauntepec*



*Ilustración 5-33 Plano de elevaciones de la red Acauntepec*

Se visualiza con la herramienta de QGISRed, si la red se encuentra totalmente conectada, o tiene sectores ya establecidos.



*Ilustración 5-34 Sectores iniciales red Acauntepec*

Entregando que la red se encuentra totalmente conectada.



### 5.5.1 Sectores por condición de carga (inicial).

Al ejecutar el algoritmo entrega los siguientes sectorización inicial

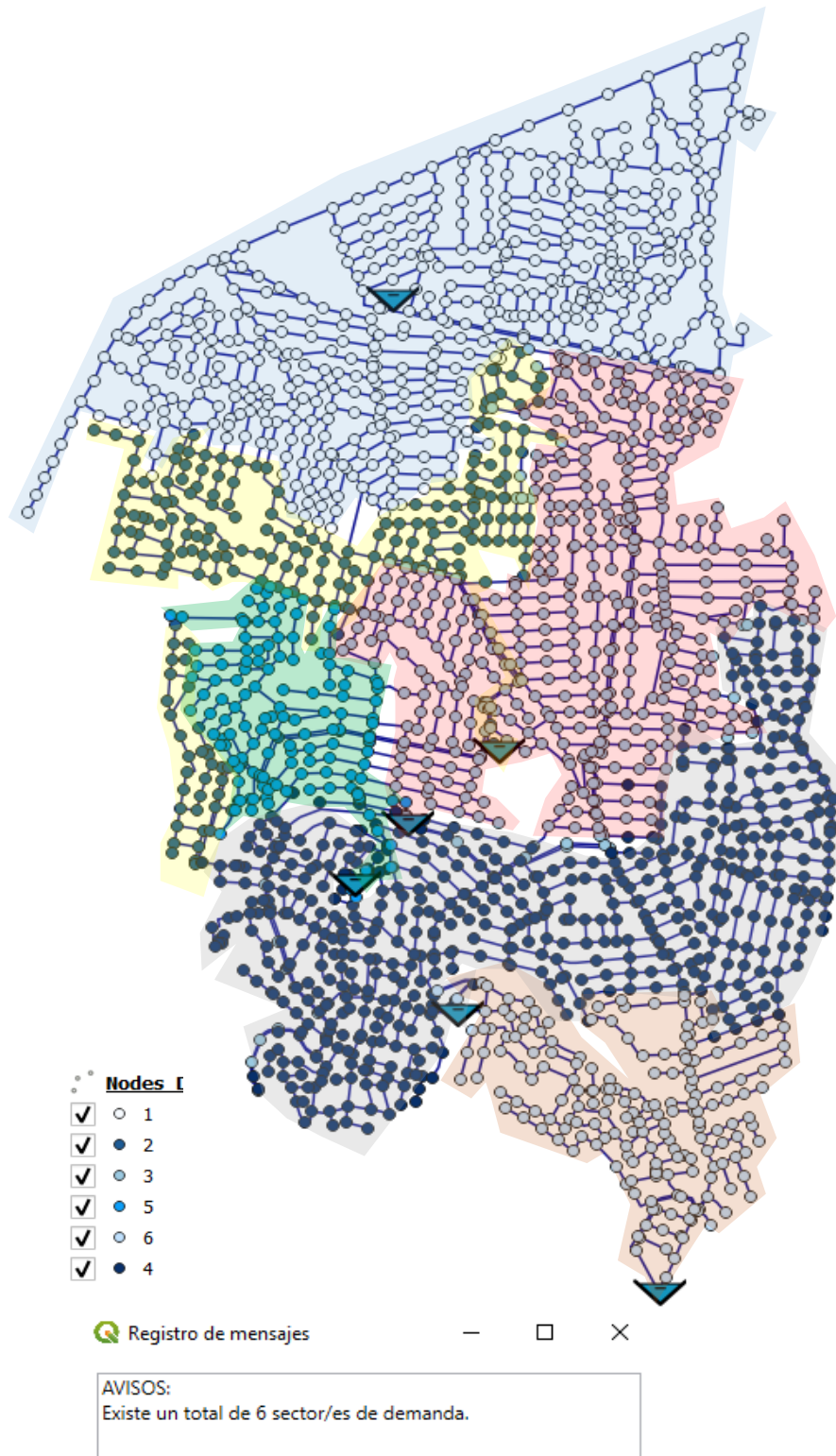
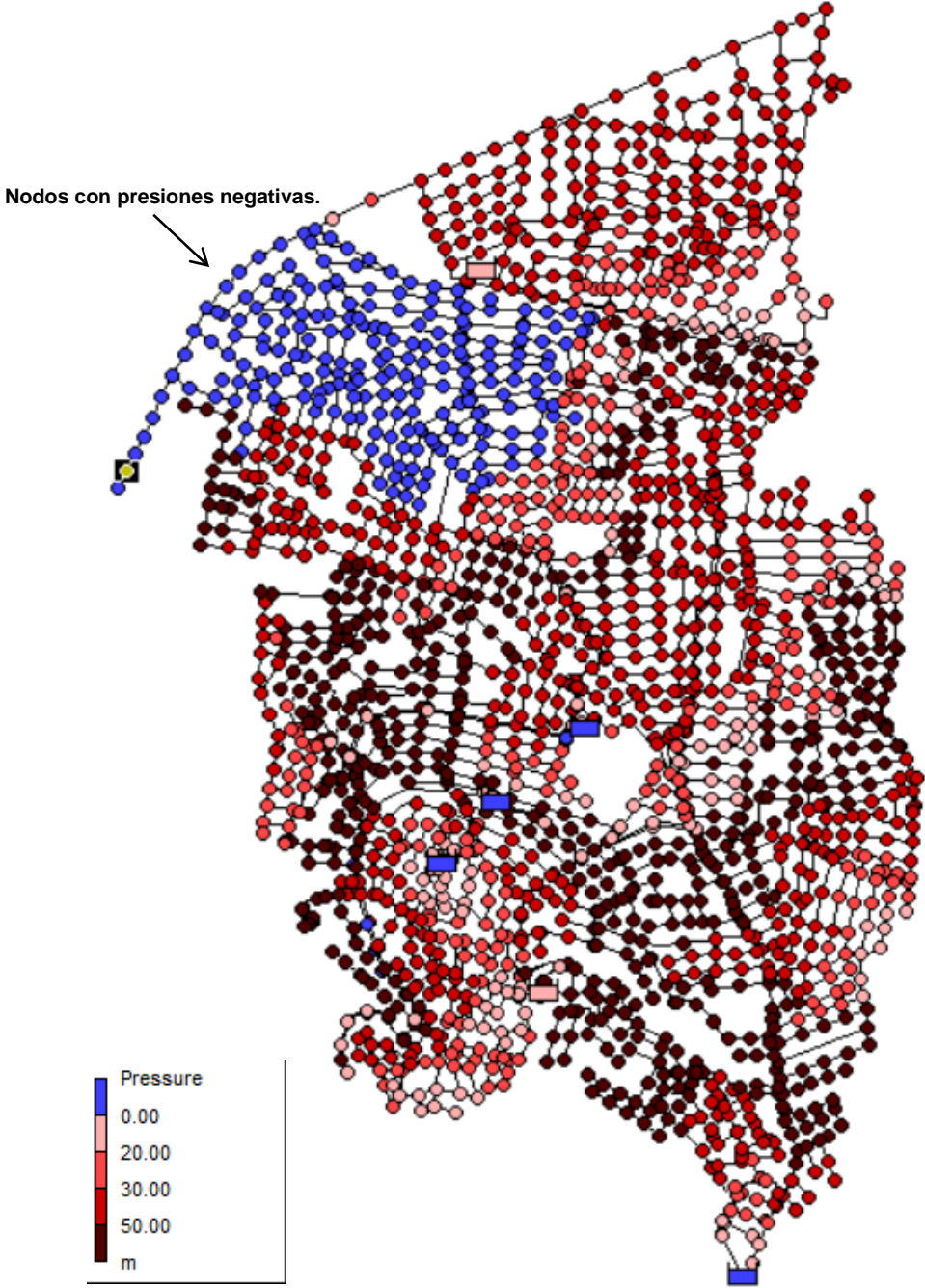


Ilustración 5-35 Nodos según reservorio de influencia red Acauntepec

Para poder visualizar los nodos negativos que entrega esta inicial propuesta de sectorización, es evaluada en EPANET en la hora de máxima demanda, entregando presiones negativas.

**5.5.2 Simulación primera propuesta**

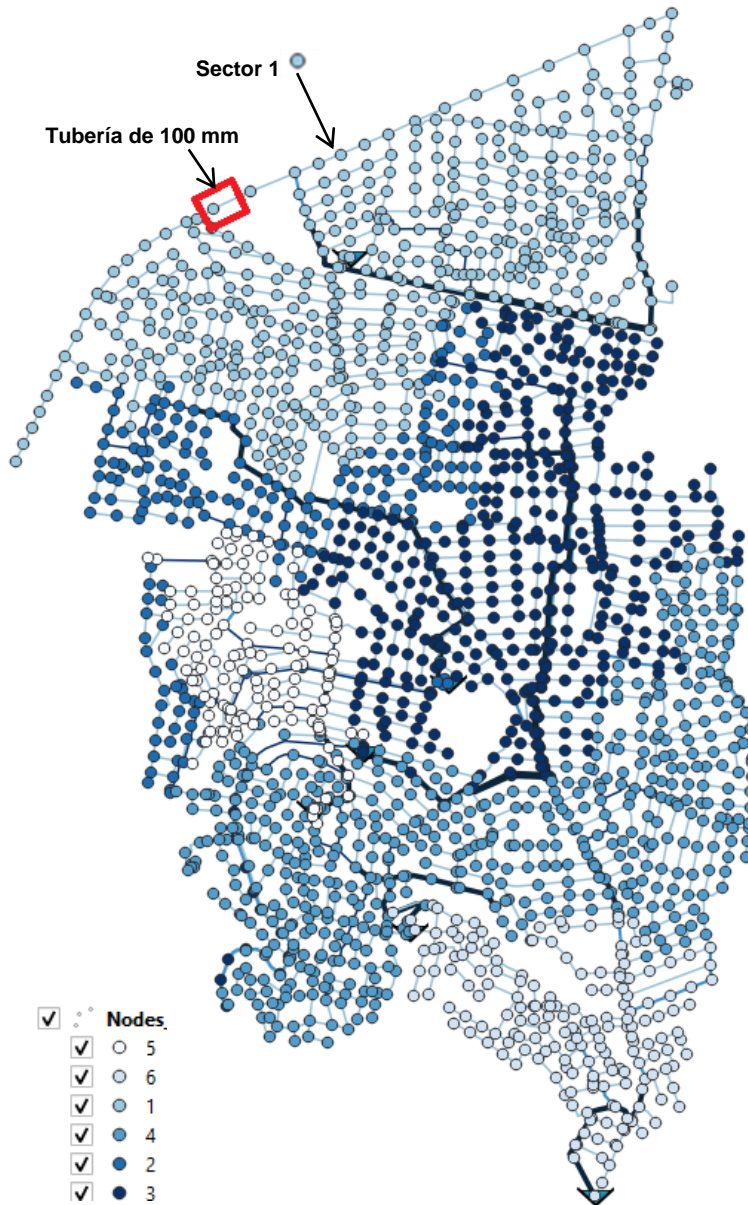
**5.5.2.1 Red sectorizada.**



*Ilustración 5-36 Presiones red Acauntepec sectorizada en el tiempo de máxima demanda*

Los nodos en color azul, nodos con presiones negativas.

En el sector 1, existe una única tubería de 100 milímetros de diámetro, identificada en un rectángulo rojo, que abastece al resto de su sector hidráulico, por la cual pasa agua para distribuir a todos los siguientes nodos, lo que provoca velocidades altas y por ende bajas presiones en el tiempo de máxima demanda en todos los nodos siguientes a esa tubería.



*Ilustración 5-37 Tubería con altas velocidades*

Con la Toolkit de EPANET, se logra incluir todas las variables que se presentan en una red, con la cual realiza una simulación en el tiempo de máxima demanda y obtiene los nodos que presentan presiones negativas, los cuales son tratados como nodos aislados, logrando con ello, conectarlos a un área donde se entreguen presiones dentro del rango establecido, modificando la sectorización anterior propuesta.

Con la herramienta de QGISRed se ven los nuevos sectores, Ilustración 5-38.

### 5.5.3 Sectores propuestos plug-in.

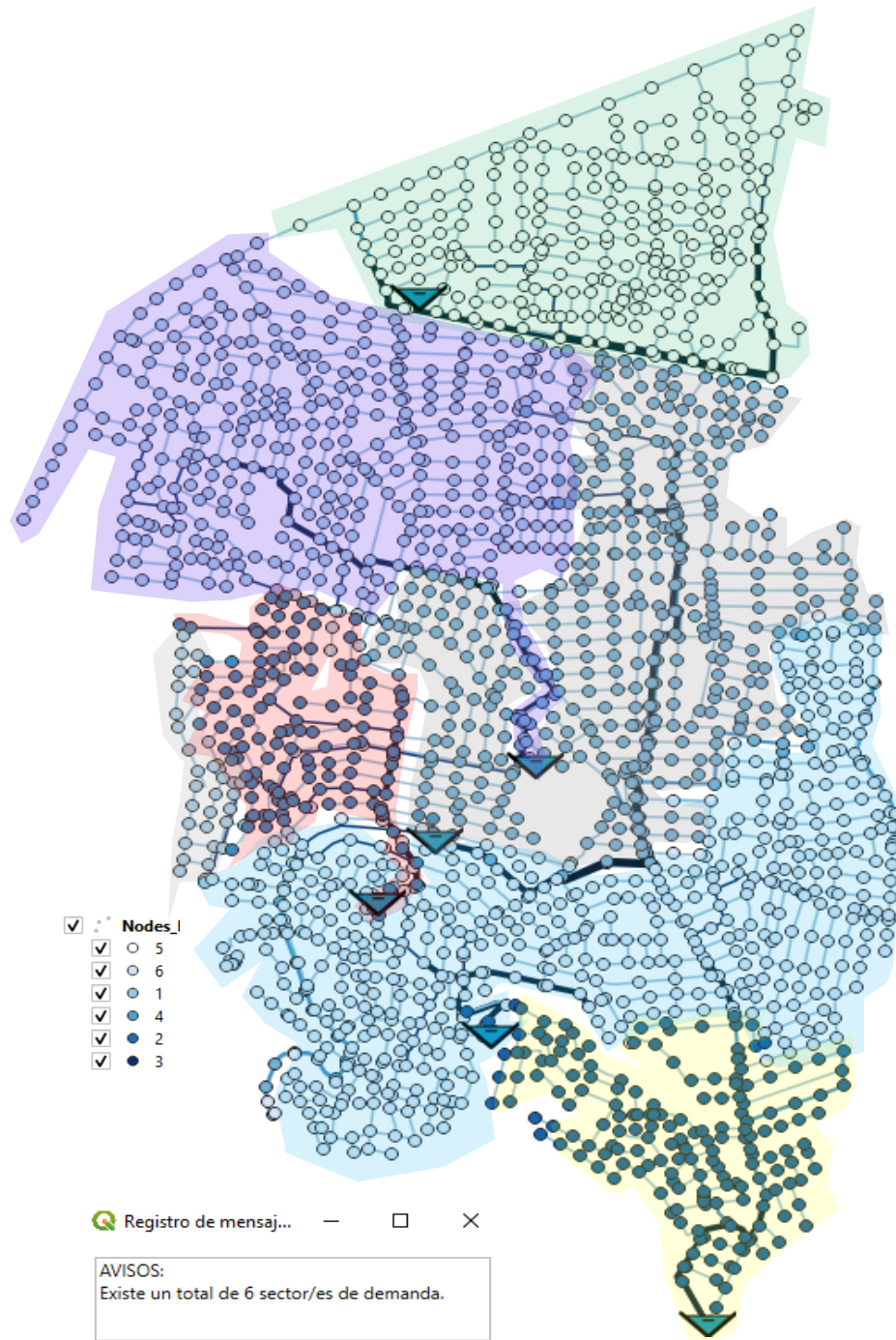


Ilustración 5-38 Nodos según reservorio de influencia corrección por medio del Plug-in de EPANET

Al evaluar esta nueva propuesta, se observa que los nodos que presentaban cargas negativas ahora presentan presiones dentro de los rangos establecidos.

#### 5.5.4 Simulación propuesta final en Epanet.

##### 5.5.4.1 Red sectorizada.

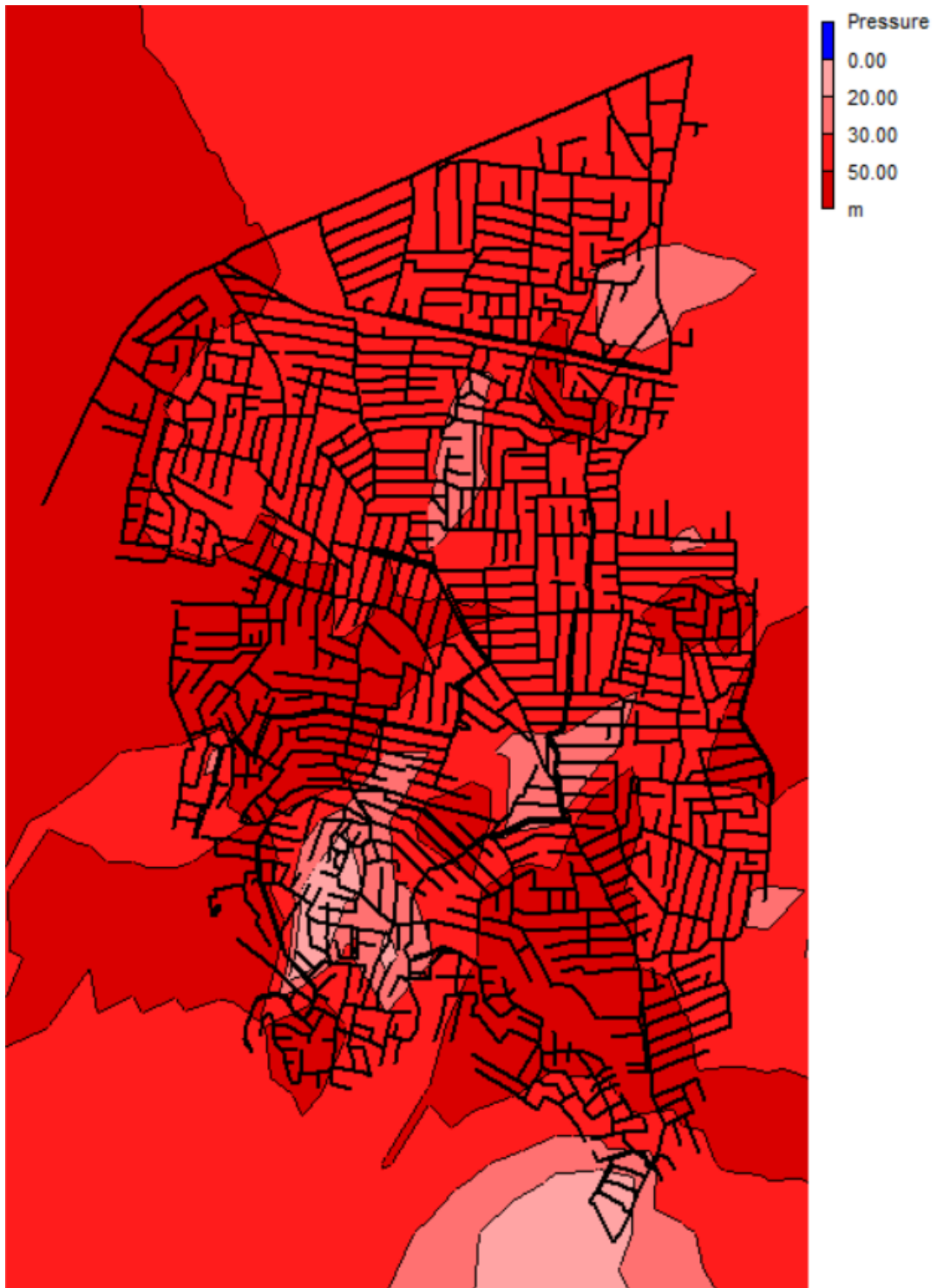


Ilustración 5-39 Presiones red Acauntepec sectorizada Plug-in EPANET, en el tiempo de máxima demanda.

## 6 RESULTADOS.

### Red Caldera.

La red Caldera es dividida en tres sectores, los cuales se logran al realizar el cierre de 20 tuberías.

Las Ilustración 6-2 e Ilustración 6-1 contienen los resultados de las presiones obtenidas en la red sin sectorizar y sectorizada.

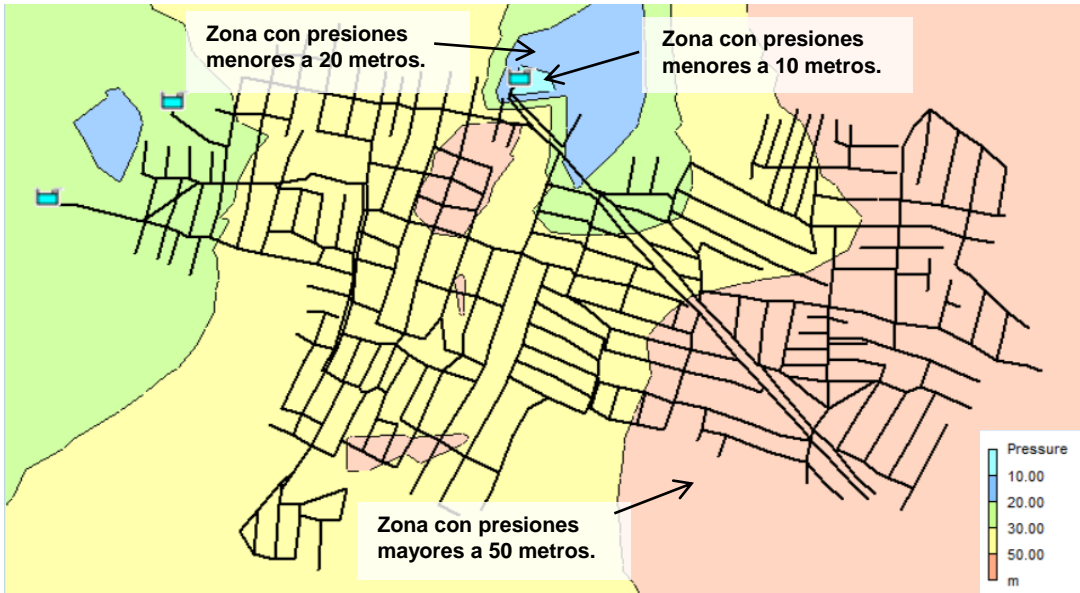


Ilustración 6-2 Presiones Red Caldera sin sectorizar

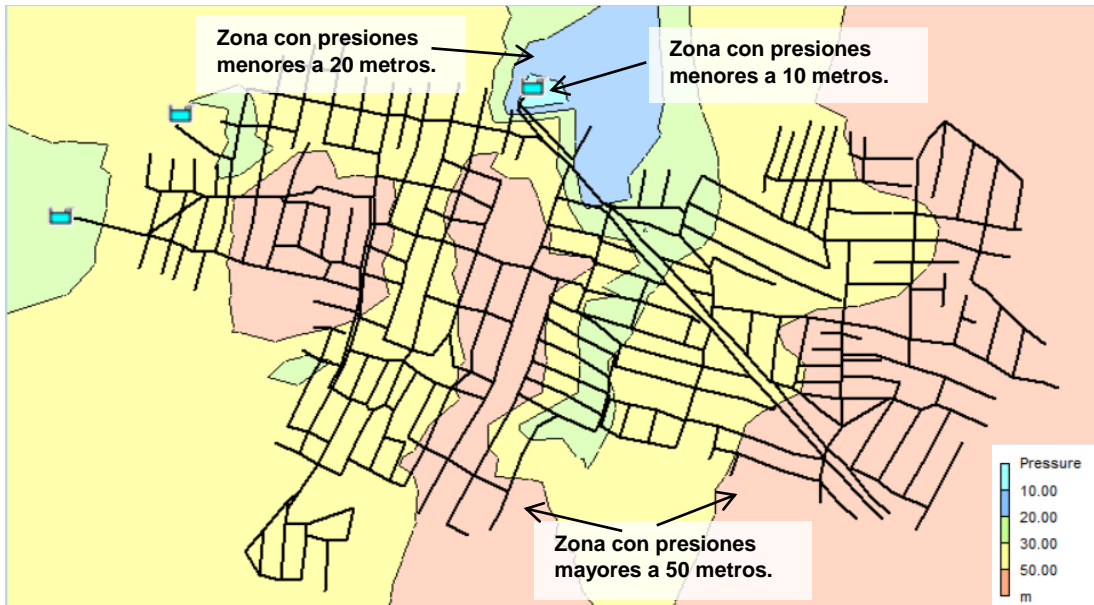


Ilustración 6-1 Presiones Red Caldera Sectorizada

La Tabla 6.1 contiene el valor de las presiones presentes en la red Caldera, antes de sectorizar y después de ser sectorizada para el tiempo 12:00 a.m.

**Red Caldera  
12:00 a.m.**

<b>Presión</b>	<b>Sin sectorizar</b>	<b>Sectorizado</b>
100-90	0	0
90-80	6	0
80-70	34	30
70-60	47	63
60-50	97	99
50-40	163	130
40-30	89	92
30-20	42	64
20-10.	12	11
<10	5	6
<b>Nodos</b>	<b>495</b>	<b>495</b>

*Tabla 6.1 Presiones red Caldera sin sectorizar y sectorizada*

La red sectorizada presenta mayores áreas con presiones superiores a los 50 metros y menores nodos con cargas inferiores a 10 y 20 metros.

## Red Zaragoza.

La red Zaragoza es dividida en 5 sectores, los cuales se logran con el cierre de 32 tuberías.

La Ilustración 6-3, contienen los resultados de las presiones obtenidas en la red sin sectorizar y sectorizada para el tiempo 12:00 a.m.

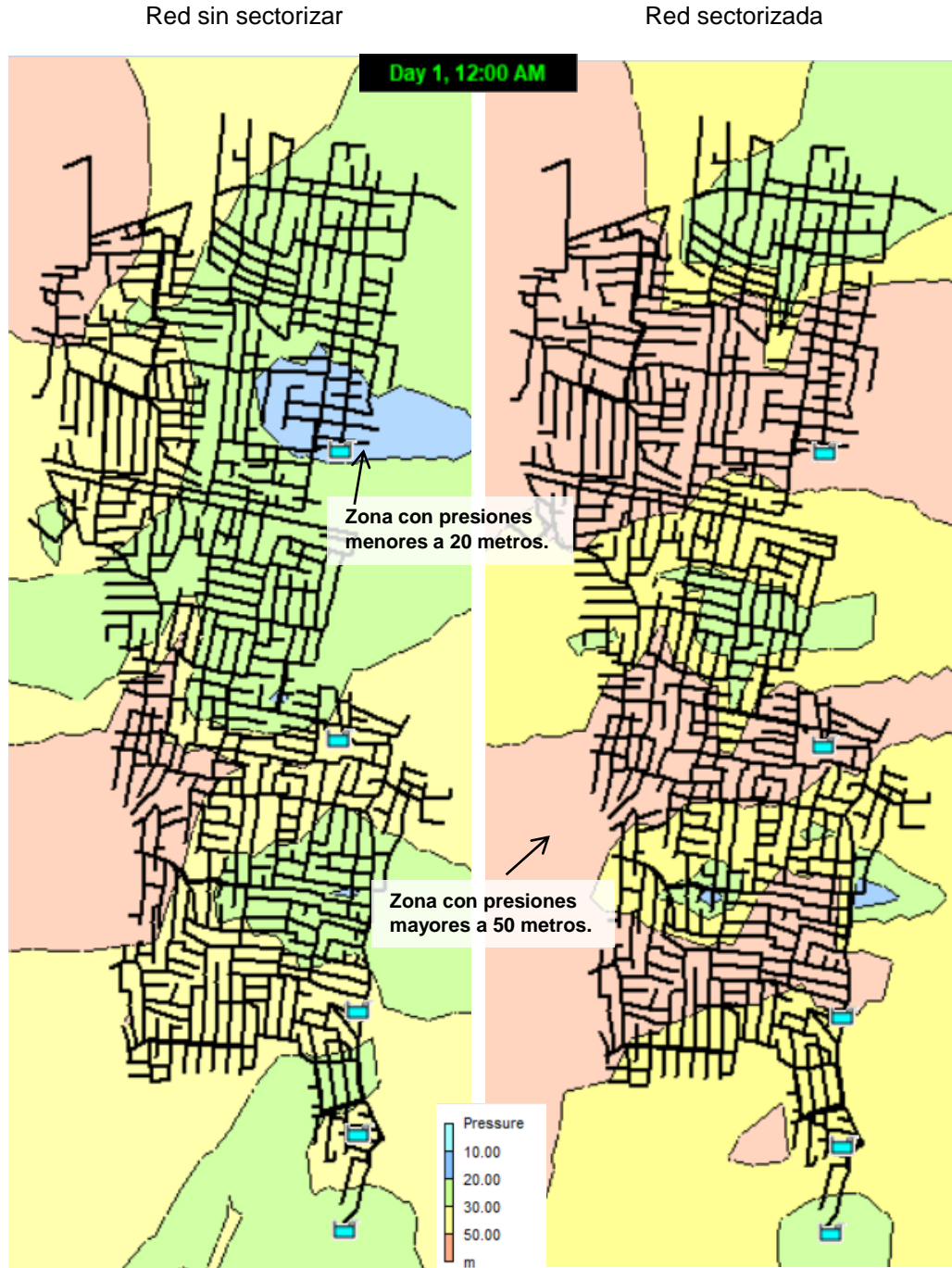


Ilustración 6-3 Simulaciones red sin sectorizar y red sectorizada en el tiempo 12:00 a.m.



La Tabla 6.2 contiene el valor de las presiones presentes en la red Zaragoza, antes de sectorizar y después de ser sectorizada para el tiempo 12:00 a.m.

<b>Red Zaragoza 12:00 a.m.</b>		
<b>Presión</b>	<b>Sin sectorizar</b>	<b>Sectorizado</b>
100-90	0	5
90-80	6	40
80-70	9	127
70-60	61	218
60-50	122	302
50-40	171	187
40-30	314	135
30-20	346	239
20-10.	237	72
<10	77	18

*Tabla 6.2 Presiones Red Zaragoza sectorizada y sin sectorizar tiempo 12:00 a.m.*

La red sin sectorizar muestra un área más amplia con presiones menores a los 20 metros, en comparación con la red sectorizada.

Las zonas con presiones mayores a 50 metros son menores en la red sin sectorizar que en la sectorizada.

El resultado de presiones para ambas redes en el tiempo de máxima demanda (12:00 p.m.) se muestra en la Ilustración 6-4.

Sin sectorizar

Sectorizada

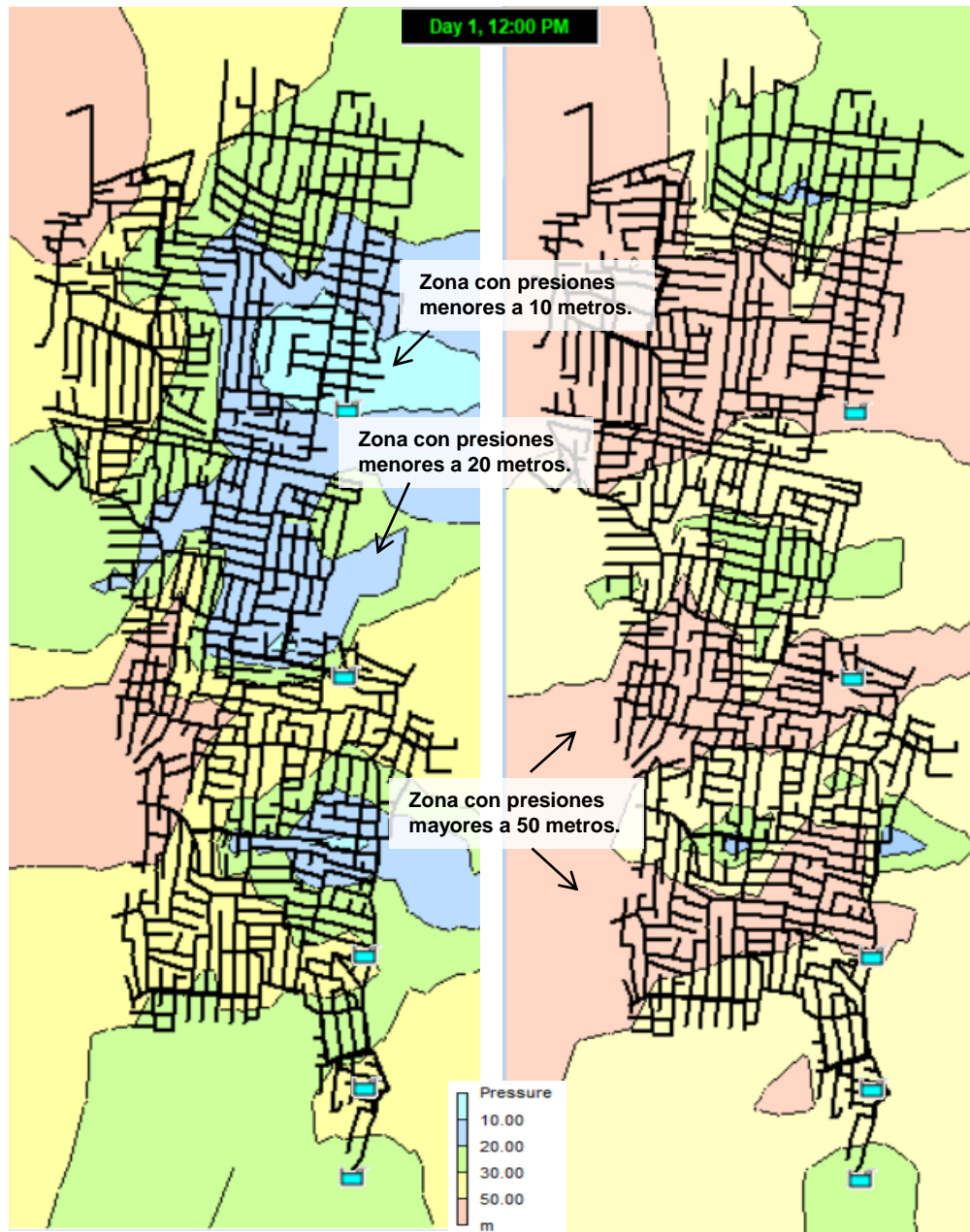


Ilustración 6-4 Simulaciones red sin sectorizar y sectorizada en el tiempo de máxima demanda

Existe un aumento de las zonas con presiones menores a 10 y 20 metros en la red sin sectorizar.

La Tabla 6.3 contiene el valor de las presiones presentes en la red Zaragoza, antes de sectorizar y después de ser sectorizada para el tiempo 12:00 p.m.

<b>Zaragoza 12:00 pm</b>		
<b>Presión</b>	<b>Sin sectorizar</b>	<b>Sectorizada</b>
100-90	0	5
90-80	3	31
80-70	9	115
70-60	34	207
60-50	104	316
50-40	141	188
40-30	294	135
30-20	386	228
20-10.	273	99
<10	99	19

*Tabla 6.3 Presiones Red Zaragoza sin sectorizar y sectorizada para el tiempo 12:00 p.m.*

En la red sectorizada se presenten presiones mayores a los 50 metros.

En la Tabla 6.4 se encuentran los resultados de las presiones en las redes sectorizada y sin sectorizar en los tiempos 12:00 a.m. y 12:00 p.m.

<b>Presión</b>	<b>Red Zaragoza</b>			
	<b>12:00 a.m.</b>		<b>12:00 p. m.</b>	
	<b>Sin sectorizar</b>	<b>Sectorizado</b>	<b>Sin sectorizar</b>	<b>Sectorizada</b>
100-90	0	5	0	5
90-80	6	40	3	31
80-70	9	127	9	115
70-60	61	218	34	207
60-50	122	302	104	316
50-40	171	187	141	188
40-30	314	135	294	135
30-20	346	239	386	228
20-10.	237	72	273	99
<10	77	18	99	19
<b>Nodos</b>	<b>1343</b>	<b>1343</b>	<b>1343</b>	<b>1343</b>

*Tabla 6.4 Presiones red Zaragoza sin sectorizar y sectorizada para los tiempos 12:00 a.m. y 12:00 p.m.*

La red sectorizada en los tiempos de 12:00 a.m. a 12:00 p.m. no presenta mayor variación de presiones.

## Red Teotongo

Esta red es dividida en 5 sectores, los cuales se logran con el cierre de 20 tuberías.

La Ilustración 6-5, contienen los resultados de las presiones obtenidas en la red sin sectorizar y sectorizada para el tiempo 12:00 a.m.

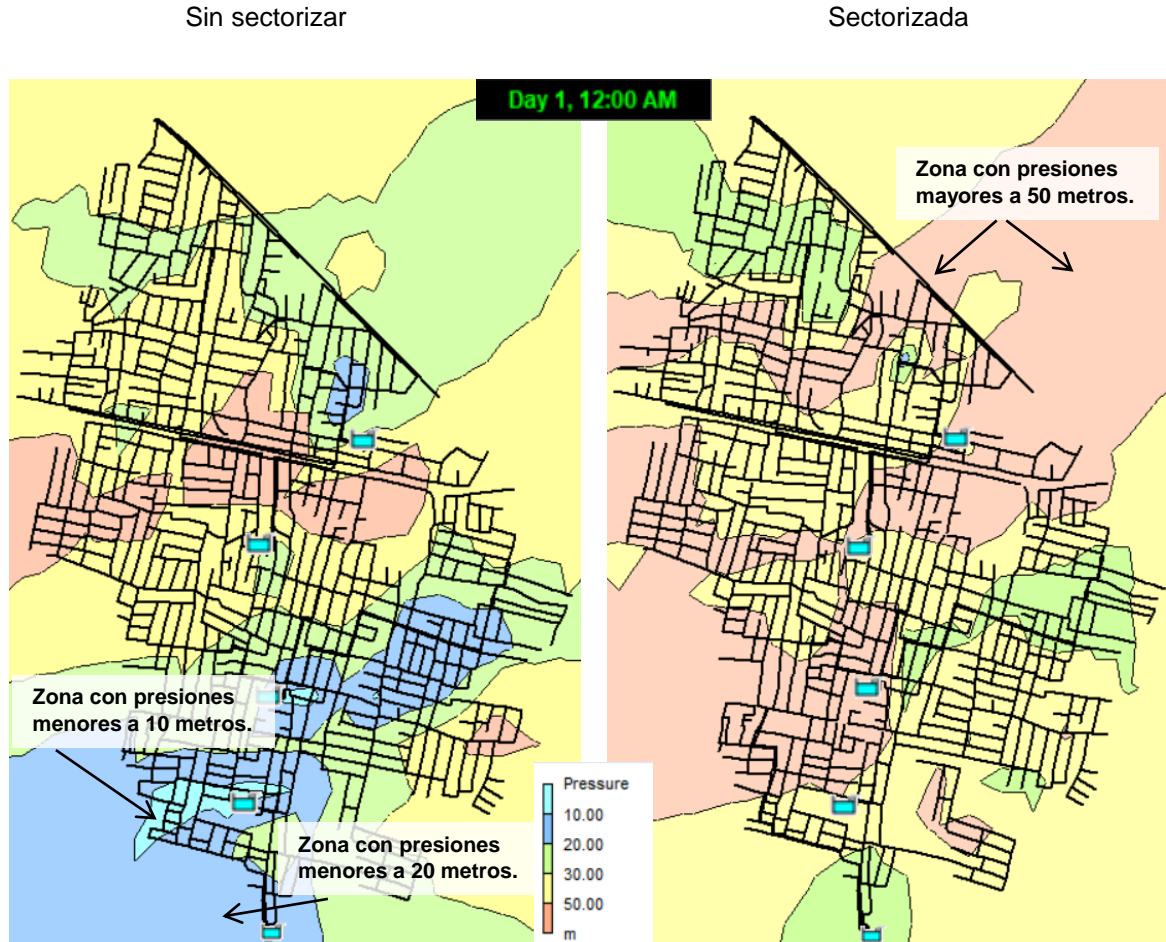


Ilustración 6-5 Presiones red Teotongo sin sectorizar y sectorizada en el tiempo 12:00 a.m.

La red sin sectorizar presenta mayor áreas de presiones por debajo de los 10 metros y 20 metros, en comparación con la red sectorizada.

La red sectorizada presenta mayores áreas con presiones sobre los 50 metros.

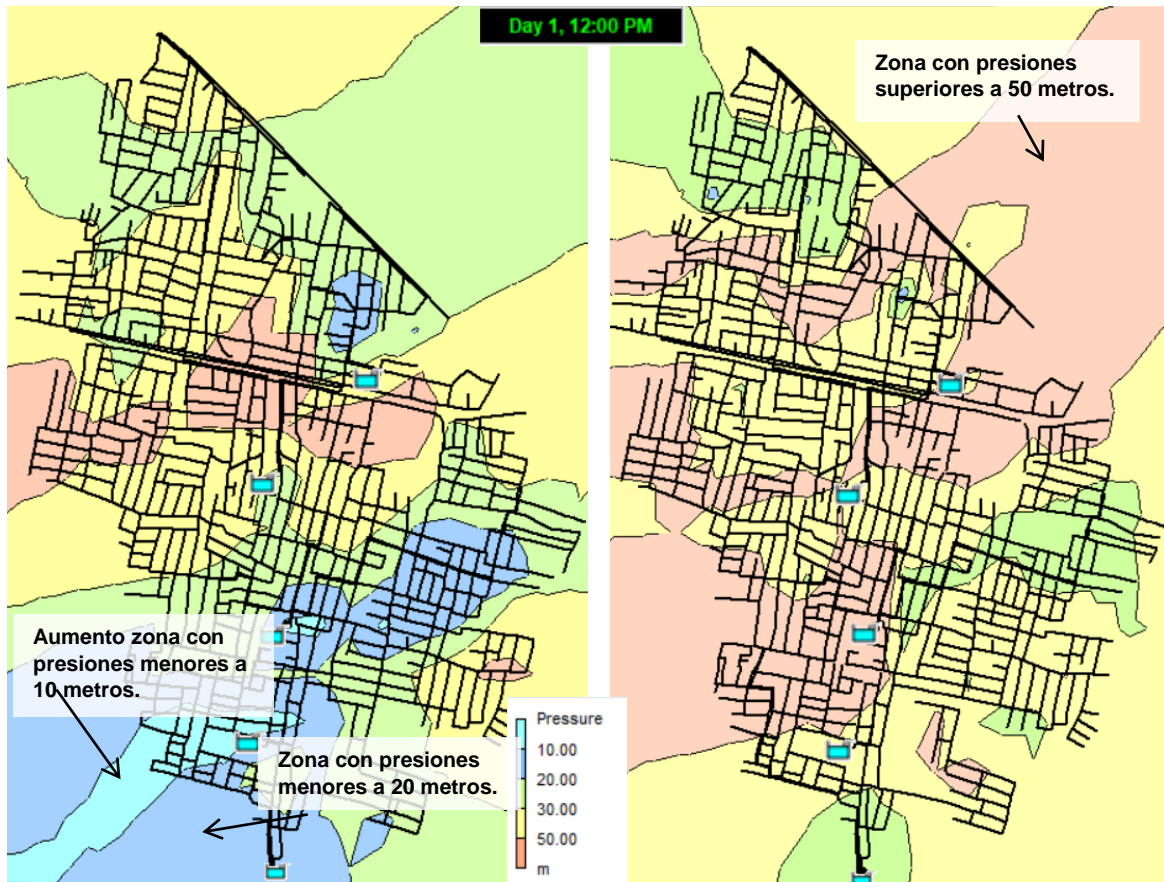
La Tabla 6.5 contiene el valor de las presiones presentes en la red Teotongo, antes de sectorizar y después de ser sectorizada para el tiempo 12:00 a.m.

**Red Teotongo**  
**12:00 a.m.**

Presión	Sin sectorizar	Sectorizado
100-90	0	39
90-80	2	16
80-70	18	97
70-60	109	131
60-50	66	260
50-40	174	270
40-30	384	277
30-20	371	239
20-10.	200	56
<10	77	16

*Tabla 6.5 Presiones red Teotongo sin sectorizar y sectorizada en el tiempo 12:00 a.m.*

El resultado de presiones para ambas redes en el tiempo de máxima demanda (12:00 p.m.) se muestra en la Ilustración 6-6.



*Ilustración 6-6 Presiones red Teotongo sin sectorizar y sectorizada en el tiempo 12:00 p.m.*

Las áreas con presiones menores a 10 y 20 metros aumentan en la red sin sectorizar.

La red sectorizada no presenta mayores variaciones en sus presiones.

La Tabla 6.6 contiene el valor de las presiones presentes en la red Teotongo, antes de sectorizar y después de ser sectorizada para el tiempo 12:00 p.m.

<b>Red Teotongo</b>		
<b>12:00 p. m.</b>		
<b>Presión</b>	<b>Sin</b>	
	<b>sectorizar</b>	<b>Sectorizada</b>
100-90	0	39
90-80	0	15
80-70	14	85
70-60	110	125
60-50	62	249
50-40	126	278
40-30	353	283
30-20	418	244
20-10.	233	67
<10	85	16

*Tabla 6.6 Presiones red Teotongo sin sectorizar y sectorizada en el tiempo 12:00 p.m.*

En la Tabla 6.7 se encuentran los resultados de las presiones en las redes sectorizada y sin sectorizar en los tiempo 12:00 a.m. y 12:00 p.m.

<b>Presión</b>	<b>Red Teotongo</b>			
	<b>12:00 a.m.</b>		<b>12:00 p. m.</b>	
	<b>Sin sectorizar</b>	<b>Sectorizado</b>	<b>Sin sectorizar</b>	<b>Sectorizada</b>
100-90	0	39	0	39
90-80	2	16	0	15
80-70	18	97	14	85
70-60	109	131	110	125
60-50	66	260	62	249
50-40	174	270	126	278
40-30	384	277	353	283
30-20	371	239	418	244
20-10.	200	56	233	67
<10	77	16	85	16
<b>Nodos</b>	<b>1401</b>	<b>1401</b>	<b>1401</b>	<b>1401</b>

*Tabla 6.7 Presiones red Teotongo sin sectorizar y sectorizada para los tiempos 12:00 a.m. y 12:00 p.m*

La red sectorizada en los tiempos de 12:00 a.m. a 12:00 p.m. no presenta mayor variación de presiones.

## Red Acauntepec

Esta red es dividida en 6 sectores, por medio del cierre de 57 tuberías.

La Ilustración 6-7, contiene los resultados de las presiones obtenidas en la red sin sectorizar y sectorizada para el tiempo 12:00 a.m.

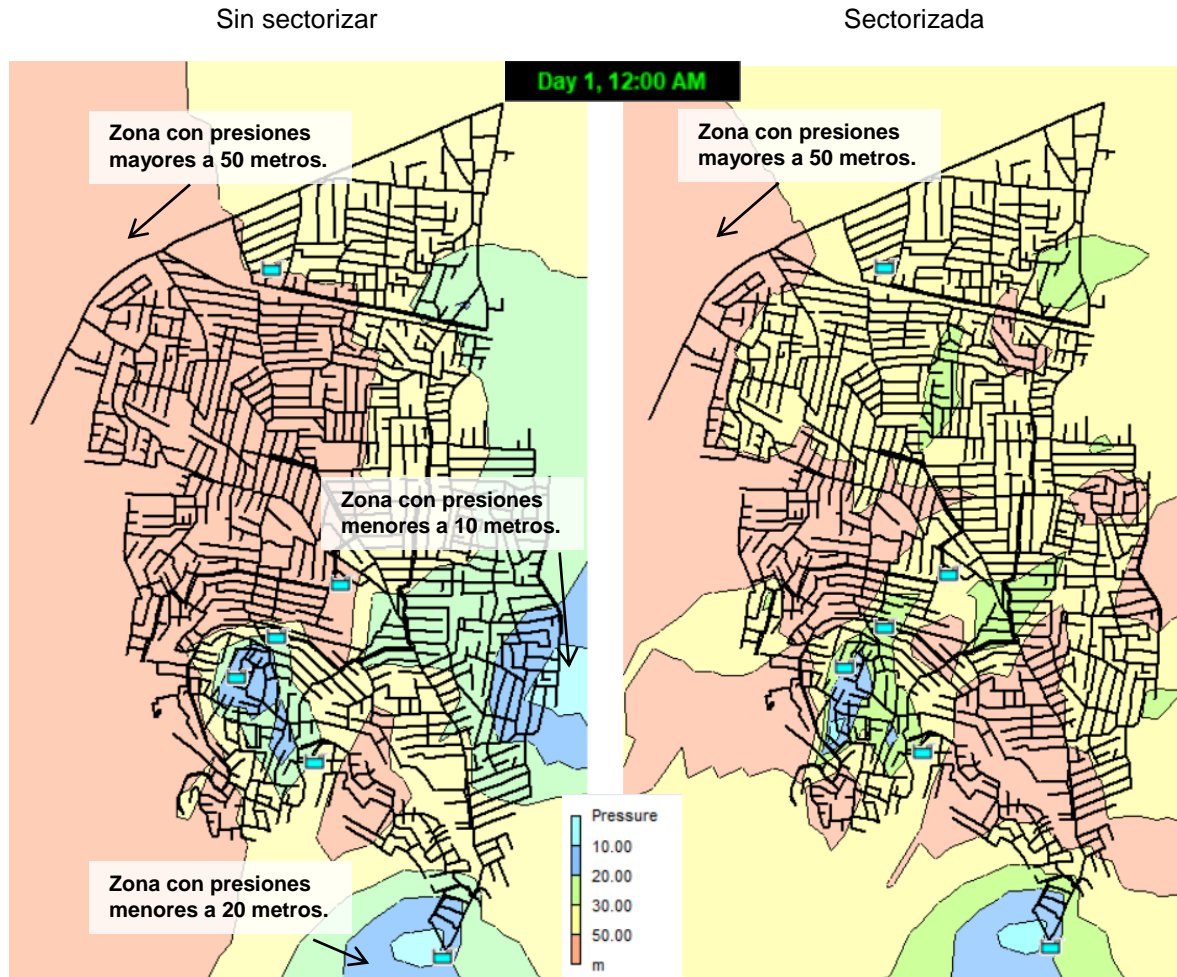


Ilustración 6-7 Presiones Red Acauntepec sin sectorizar y sectorizada para el tiempo 12:00 a.m.

La red sin sectorizar presenta zonas con presiones por debajo de los 10 y 20 metros, y una amplia zona con presiones superiores a los 50 metros.

Las presiones resultantes de la sectorización entregan una reducción de las zonas con presiones superiores a 50 metros e inferiores a 10 y 20 metros.

La Tabla 6.8 contiene el valor de las presiones presentes en la red Acauntepec, antes de sectorizar y después de ser sectorizada para el tiempo 12:00 a.m.

**Red Acauntepec**

**12:00 a.m**

Presión	Sin	
	sectorizar	Sectorizado
100-90	132	111
90-80	155	44
80-70	197	98
70-60	185	165
60-50	176	291
50-40	326	421
40-30	343	440
30-20	303	305
20-10.	146	100
<10	38	27

Tabla 6.8 Presiones red Acauntepec sin sectorizar y sectorizada en el tiempo 12:00 a.m.

El resultado de presiones para ambas redes en el tiempo de máxima demanda (12:00 p.m.) se muestra en la Ilustración 6-6.

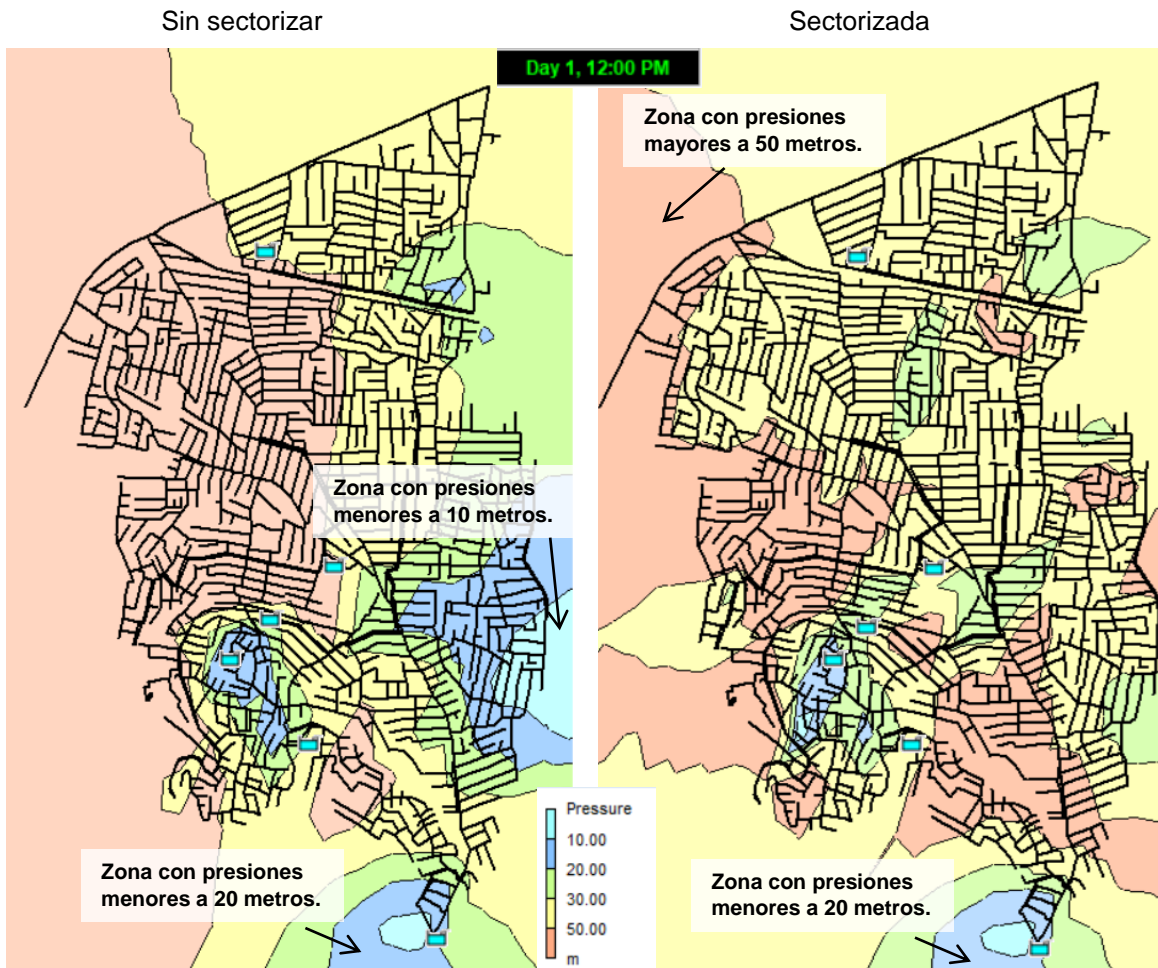


Ilustración 6-8 Presiones red Acauntepec sin sectorizar y sectorizada en el tiempo 12:00 p.m.



La red sin sectorizar presenta un aumento en las presiones inferiores a 10 y 20 metros.

Los resultados de las presiones en la red sectorizada no presenta mayores variaciones en comparación con los resultados de presiones en el tiempo 12:00 a.m.

La Tabla 6.9 contiene el valor de las presiones presentes en la red Acauntepec, antes de sectorizar y después de ser sectorizada para el tiempo 12:00 p.m.

<b>Red Acauntepec</b>		
<b>12:00 p. m.</b>		
<b>Presión</b>	<b>Sin</b>	
	<b>sectorizar</b>	<b>Sectorizada</b>
	12:00	
100-90	117	111
90-80	94	43
80-70	166	64
70-60	221	158
60-50	193	268
50-40	308	437
40-30	343	444
30-20	283	326
20-10.	215	121
<10	61	29

*Tabla 6.9 Presiones red Acauntepec sin sectorizar y sectorizada en el tiempo 12:00 p.m.*

En la Tabla 6.10 se encuentran los resultados de las presiones en las redes sectorizada y sin sectorizar en los tiempo de 12:00 a.m. y 12:00 p.m.

<b>Presión</b>	<b>Red Acaunpetec</b>			
	<b>12:00 a.m.</b>		<b>12:00 p. m.</b>	
	<b>Sin sectorizar</b>	<b>Sectorizado</b>	<b>Sin sectorizar</b>	<b>Sectorizada</b>
100-90	132	111	117	111
90-80	155	44	94	43
80-70	197	98	166	64
70-60	185	165	221	158
60-50	176	291	193	268
50-40	326	421	308	437
40-30	343	440	343	444
30-20	303	305	283	326
20-10.	146	100	215	121
<10	38	27	61	29
<b>Nodos</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2001</b>	<b>2001</b>

*Tabla 6.10 Presiones red Acauntepec sin sectorizar y sectorizada para los tiempos 12:00 a.m. y 12:00 p.m*

La red sectorizada para el tiempo 12:00 p.m. no presenta mayor variación de presiones en comparación con los resultados en el tiempo 12:00 a.m. de la red sectorizada.

## 7 CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES.

El algoritmo desarrollado cumple el objetivo de determinar sectores bajo las condiciones de alta pendiente y ser alimentadas por reservorios. Es necesario hacer modificaciones para otro tipo de condiciones.

Este trabajo se centró en redes ya construidas y operando, los datos fueron proporcionados por SACMEX.

El criterio de sectorización se basó en el reconocimiento de la red primaria, con lo cual se pudo establecer las conexiones con la red secundaria y hacer propuestas de cierre, se verificó que no hubiera nodos aislados. Por último, se revisaron velocidades y presiones dentro de la red.

La conectividad que presenta una red, fue un factor determinante en la creación de este algoritmo para realizar sectores.

La adecuada inspección de la red es importante, ya que se deben definir los diámetros de la red principal.

En las sectorizaciones finales propuestas se basa en rangos de presión, si aparecen nodos que están fuera de rango, estos nodos son redistribuidos a otras áreas, generando un sector con presiones estables.

El objetivo es crear sectores que no entreguen presiones inferiores a los 20 metros, sin embargo, en algunos casos la fuente de abastecimiento está a una elevación con la cual no es posible cumplir con este criterio.

Debido a la topografía, en las sectorizaciones realizadas, se presentan presiones superiores al máximo establecido inicialmente (50 m.c.a.). Para evitar estas presiones se debe de realizar la sub-sectorización de la red para cumplir con el rango de presiones admitidas por la red. En este trabajo no se desarrolló ningún algoritmo para el análisis de subsectores, es uno de los temas que se pueden seguir trabajando.

En la propuesta inicial de sectores por el criterio de carga de posición que entrega el algoritmo, las redes de Caldera, Zaragoza y Teotongo, logran ser sectorizadas de forma satisfactoria, puesto que al evaluar la sectorización en el tiempo de máxima demanda, las presiones entregadas se encuentran dentro de los rangos establecidos.

Para la red Acauntepec, la propuesta inicial de sectores por el criterio de carga de posición que entrega el algoritmo, al ser evaluada en el tiempo de máxima demanda entrega zonas con presiones negativas, esto es debido a que la elevación del reservorio que abastece dicha zona presenta suficiente carga de posición a dicha área, pero debido a su conectividad (una sola tubería), el agua que ingresa por dicha tubería no es la suficiente para abastecer a toda el área siguiente. Por lo cual en esta red los nodos con dichas cargas negativas son conectados al área que entregue mejores presiones según el rango establecido, modificando la propuesta inicial de sectores.

En este algoritmo se encuentra contemplado de forma general las bombas y las válvulas que pueda tener una red de distribución de agua potable, puesto que para su manejo se estima que en los archivos de entrada se ingrese la carga de salida de dichos elementos, con lo cual no se está contemplando las curvas de funcionamiento ni las operaciones de las bombas o válvulas. Se incluyeron de ésta forma para poder trabajar con las redes en las cuales se encuentran válvulas o bombas, sin tener que cambiar dichos elementos por tuberías, para acercarse un poco más a las cargas que tendría una red que presente dichos elementos.

El tiempo que tarda el algoritmo en entregar la propuesta de sectorización de la red más grande (Acauntepec) con 2002 nodos y 2342 tuberías, es aproximadamente de 1 min.

La parte del algoritmo denominada Recorrido, es necesaria para la delimitación de la red primaria, puesto con ello se logra identificar los puntos en los cuales el recorrido pasa de una tubería de menor diámetro a uno mayor.

Si existiera una red principal que tiene el mismo diámetro en toda su longitud y comunicara a dos reservorios, el algoritmo logra dividir dicha red, debido al almacenamiento de las cargas de posición obtenidas en el recorrido, dándole a cada nodo el reservorio de influencia que entregue la carga más cercana al rango establecido.

## REFERENCIAS.

Campbell E. Propuesta Para una Metodología de Sectorización de Redes de Abastecimiento de Agua Potable, 2013.

EPANET 2 (2001). EPA: MANUAL DEL USUARIO. Recuperado de [https://epanet.es/wp-content/uploads/2012/10/epanet2\\_manual.pdf](https://epanet.es/wp-content/uploads/2012/10/epanet2_manual.pdf)

Gonzalez, E. (2013). Riunet: Propuesta Para una Metodología de Sectorización de Redes de Abastecimiento de Agua Potable.: UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/39139/Tesina%20Master%20Ingenieria%20hidraulica.pdf?sequence=1>

MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO. DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE. COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA [https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/CONAGUA%20s.f.a.%20Dise%C3%B1o%20de%20redes%20de%20distribuci%C3%B3n%20de%20agua%20potable.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/CONAGUA%20s.f.a.%20Dise%C3%B1o%20de%20redes%20de%20distribuci%C3%B3n%20de%20agua%20potable.pdf)

MathWorks, Descripción del producto MATLAB. Recuperado de [https://es.mathworks.com/help/matlab/learn\\_matlab/product-description.html](https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html)

MILENIO 2020. Por fugas en red hidráulica, CdMx pierde 40% de agua: Sacmex. Recuperado de <https://www.milenio.com/politica/cdmx-pierde-40-ciento-agua-fugas-redes-revela-sacmex>

QGIS. QGIS - El SIG Líder de Código Abierto para Escritorio. Recuperado de <https://qgis.org/es/site/about/index.html>

QGISRed, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (iiama): Extensión del software libre QGIS para la confección y explotación de modelos de redes de abastecimiento de agua a presión. Recuperado de <https://www.iiama.upv.es/iiama/es/transferencia/software/qgisred-e.html>

Salguero et al. (2017). JIA: Sectorización de redes de distribución de agua según criterios de eficiencia energética. Recuperado de [http://geama.org/jia2017/wp-content/uploads/ponencias/tema\\_D/d17.pdf](http://geama.org/jia2017/wp-content/uploads/ponencias/tema_D/d17.pdf)

Sotelo G. HIDRÁULICA GENERAL VOLUMEN 1- FUNDAMENTOS: LIMUSA NORIEGA EDITORES.