



**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA DE CUENCA**  
COMUNIDAD EDUCATIVA AL SERVICIO DEL PUEBLO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA  
SEDE AZOGUES

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA, INDUSTRIA Y  
CONSTRUCCIÓN.

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

INFORME FINAL DEL PROYECTO PROFESIONAL DE GRADO  
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO ACADÉMICO DE  
INGENIERA CIVIL.

TEMA:

**ANÁLISIS DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS PARA ESTIMAR LA  
LOCALIZACIÓN DE FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE.**

AUTOR: JESSICA CAROLINA PAGUAY GUAMÁN

TUTOR: ING. CRISTIAN ARTURO VINTIMILLA ULLOA MSC.

AZOGUES - ECUADOR

NOVIEMBRE- 2018



# APROBACIÓN DEL TUTOR

---

En calidad de tutor del trabajo de titulación, presentado por el Srta. Jessica Carolina Paguay Guamán para optar por el título de INGENIERA CIVIL, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Azogues, a los 28 días del mes de Noviembre de 2018.

Ing. Cristian Arturo Vintimilla Ulloa MSc.

**DOCENTE DE LA UNIDAD ACADEMICA**

**FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**

**CI: 0105001564**



# CERTIFICADO DE AUTORIA

---

El presente trabajo investigativo de proyecto profesional de grado previo a la obtención del título de Ingeniera Civil, cuyo tema es “ANÁLISIS DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS PARA ESTIMAR LA LOCALIZACIÓN DE FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE”, corresponden al trabajo de investigación del autor, además certifico que he cumplido con todas las observaciones realizadas por el tribunal evaluador.

Jessica Carolina Paguay Guamán

**ESTUDIANTE**

**CI: 0302714829**



# AGRADECIMIENTO

---

Agradezco a mis padres quienes con su esfuerzo, apoyo y amor permitieron realizar mis estudios académicos, y por ser ejemplo de valores morales para forjarme como persona de buenos principios.

A la Universidad Católica de Cuenca, a los profesores de la Facultad de Ingeniería Civil, quienes constituyen el fundamento de mi formación profesional en particular al Ing. Cristian Arturo Vintimilla Ulloa Director de Tesis; por sus valiosas sugerencias y orientaciones, para la realización del presente trabajo fin de grado.

A mis hermanos, familiares y amigos por brindarme sus palabras de ánimo, durante mi formación académica.



# DEDICATORIA

---

A mis padres José y Blanca; a mis hermanos quienes me apoyaron y estuvieron pendientes de mi formación académica.



# RESUMEN

---

Las fugas en la redes de distribución de agua potable producen pérdidas de agua, pérdidas económicas de los organismos que operan el sistema, y reducción de la presión de servicio, afectando la eficiencia hidráulica de las redes. Cuando el nivel de pérdida de agua excede el 20% del volumen suministrado al sistema, se aplica métodos de estimación y localización de fugas. Es por ello, que es oportuno centrar este trabajo fin de grado en la estimación del caudal y posición de fugas en una red de distribución de agua potable, mediante modelizaciones hidráulicas de la red.

En este trabajo, se expone un método para detectar fugas en las tuberías de la red, con el cual se estima el caudal y la posición de las mismas. Se supone que la red funciona en flujo permanente y que, por cada tubería, solo existe un punto de fuga. El procedimiento se basa en la esquematización del modelo experimental en EPANET, en las mediciones de la presión en algunos puntos de la red para identificar zonas probables de fuga, y en el desarrollo de escenarios de análisis considerando diferentes puntos de ubicación de fuga, conjuntamente con la estimación del caudal del mismo. Se emplea la teoría de calibración de modelos hidráulicos, en particular el error entre presiones medidas y simuladas, como mecanismo de búsqueda de la solución óptima. Este proceso de ubicación y estimación de caudal de fuga es iterativo hasta encontrar el mejor ajuste de presiones medidas y simuladas.

**Palabras clave:** fugas, redes de distribución, localización, EPANET



# ABSTRACT

---

Leaks in the potable water distribution networks produce water losses, economic losses of the organisms that operate the system, and the reduction of the service pressure, affecting the hydraulic efficiency of the networks. When the level of water loss exceeds 20% of the volume supplied to the system, it is applied a series of methods of estimation and location of leaks. In consequence, it is opportune to focus this graduation work on the estimation of the flow and position of leaks in a drinking water distribution network, by means of the network hydraulic modeling.

In this work, a method to detect leaks in the pipes of the network is exposed, estimating their flow and the position. It is assumed that the network operates in permanent flow and that, for each pipe, there is only one leak point. The procedure is based on the schematization of the experimental model in EPANET, in the pressure measurements in some points of the network to identify probable leakage zones, and in the development of analysis scenarios considering different leakage location points, together with the estimation of the flow. The theory of calibration of hydraulic models is used, in particular the error between measured and simulated pressures, as a search mechanism for the optimal solution. This process of location and estimation of leakage flow is iterative until finding the best adjustment of measured and simulated pressures.

**Keywords:** leaks, distribution networks, location, EPANET

## ÍNDICE

<b>APROBACIÓN DEL TUTOR .....</b>	<b>II</b>
<b>CERTIFICADO DE AUTORIA .....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VII</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.3 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3.1 <i>Definición del Área de Estudio</i> .....	2
1.4 JUSTIFICACIÓN .....	3
1.5 OBJETIVOS .....	4
1.5.1 <i>Objetivos General</i> .....	4
1.5.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	4
1.6 METODOLOGÍA.....	5
1.7 POBLACIÓN Y MUESTRA .....	5
1.8 HIPÓTESIS .....	6
<b>CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....</b>	<b>7</b>
2.1 RED HIDRÁULICA A PRESIÓN .....	7
2.1.1 <i>Comportamiento Hidráulico de la Red</i> .....	8
2.1.2 <i>Pérdidas de Energía</i> .....	9
2.2 PARÁMETROS HIDRÁULICOS .....	11
2.2.1 <i>Consumo</i> .....	11
2.2.2 <i>Dotación</i> .....	12
2.2.3 <i>Caudal</i> .....	12
2.2.4 <i>Velocidad</i> .....	13
2.2.5 <i>Presión</i> .....	13
2.3 PÉRDIDAS DE AGUA .....	14





2.4 FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN .....	14
2.4.1 Causas de Fugas .....	15
2.4.2 Nivel Óptimo de Fugas .....	16
2.4.3 Estimación de fugas .....	16
2.4.4 Reducción y control de fugas en la red. ....	16
2.4.5 Técnicas de Detección de Fugas .....	17
2.4.6 Equipos de Detección y Localización de Fugas no visibles.....	17
2.4.7 Beneficios de la reducción de fugas .....	18
2.5 MODELO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA.....	18
2.6 PROGRAMA EPANET .....	19
2.6.1 Características del Modelo Hidráulico EPANET .....	19
2.6.2 Componentes físicos del modelo de la red.....	20
<b>CAPÍTULO 3: MODELO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>23</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL SUBSECTOR ZA-11	
23	
3.2 MODELO HIDRÁULICO EPANET .....	25
3.2.1 Esquema del modelo.....	25
3.2.2 Parámetros de entrada al modelo .....	27
3.3 MEDICIONES DE PRESIÓN .....	31
3.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO .....	33
3.4.1 Verificación de la validez de los datos de entrada.....	34
3.4.2 Verificación de la validez de los resultados del modelo.....	36
3.4.3 Comparación de presiones observadas y simuladas. ....	40
<b>CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE FUGAS</b>	
<b>42</b>	
4.1 METODOLOGÍA DE LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE FUGA .....	42
4.2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	42
4.3 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS PROBABLES DE FUGA .....	46
4.4 CÁLCULO DEL CAUDAL MEDIO DE FUGAS TEÓRICO $Q_{ANR}$ .....	47
4.5 DESARROLLO DE ESCENARIOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL Y LOCALIZACIÓN DE FUGAS. ....	48



4.5.1	Escenario 1 .....	48
4.5.2	Escenario 2 .....	51
4.5.3	Escenario 3 .....	52
4.5.4	Escenario 4 .....	53
4.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	54
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....</b>		<b>56</b>
5.1	CONCLUSIONES.....	56
5.2	RECOMENDACIONES .....	58
6.	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>62</b>
ANEXO 1: ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE FUGA PARA EL ESCENARIO 1.....		62
ANEXO 2: ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE FUGA PARA EL ESCENARIO 2.....		63
ANEXO 3: ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE FUGA PARA EL ESCENARIO 3.....		64
ANEXO 4: ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE FUGA PARA EL ESCENARIO 4.....		65
ANEXO 5: FOTOGRAFÍAS DE LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN EN CAMPO. ....		66

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación del subsector ZA-11 .....	3
Figura 2: Diferencia entre tuberías y canales.....	7
Figura 3: Fugas en tuberías de redes de distribución. ....	15
Figura 4: Ubicación del Tanque de Reserva .....	23
Figura 5: Red de distribución del Subsector ZA-11 .....	24
Figura 6: Bosquejo del modelo de la red simplificada en EPANET.....	26
Figura 7: Esquema de las áreas de influencia para los nudos de demanda. ....	<b>¡Error!</b>
<b>Marcador no definido.</b>	
Figura 8: Registro de la variación de presiones en el Subsector ZA-11.....	31
Figura 9: Puntos de medición de presiones. ....	33
Figura 10: Gráfica comparativa de las cotas de los nudos del modelo y del plano. .	34
Figura 11: Gráfica comparativa de la demanda del modelo y la demanda calculada. .....	35
Figura 12: Gráfica comparativa de las longitudes del modelo y las longitudes del plano. ....	35
Figura 13: Gráfica comparativa de las longitudes del plano y las longitudes del mapa de Google Earth. ....	36
Figura 14: Gráfica de comparación de velocidades simuladas y velocidades calculadas. ....	37
Figura 15: Esquema de la red para la primera aplicación de la ecuación de energía. .....	37
Figura 16: Esquema de la red para la segunda aplicación de la ecuación de energía. ....	39
Figura 17: Gráfico 1 de comparación entre presiones simuladas y observadas (simulación 0).....	41
Figura 18: Zonas probables de fugas en la red de distribución.....	47



Figura 19: Gráfica de abastecimiento del tanque de reserva de la Zona Alta. ....	48
Figura 20: Simulación de los puntos de fuga para el Escenario 1.....	50
Figura 21: Simulación de los puntos de fuga para el Escenario 2.....	51
Figura 22: Simulación de los puntos de fuga para el Escenario 3.....	52
Figura 23: Simulación de los puntos de fuga para el Escenario 4.....	53
Figura 24: Gráfica del mejor ajuste entre presiones observadas y simuladas, como resultado de la estimación de fugas. ....	55
Figura 25: Localización estimada de los 3 puntos de fuga en la red de distribución del Subsector ZA-11.....	55

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Dotaciones Recomendadas por la INEN .....	12
Tabla 2: Dimensiones del Tanque de Reserva .....	23
Tabla 3: Características físicas de la Red.....	24
Tabla 4: Información general del modelo hidráulico construido. ....	26
Tabla 5: Demanda de consumo para los nudos del modelo. ....	28
Tabla 6: Cotas de nudos y longitudes de tuberías de la red. ....	29
Tabla 7: Datos de presiones medidas.....	32
Tabla 8: Cálculo de presiones para la primera aplicación de la ecuación de energía. .....	38
Tabla 9: Cálculo de la presión para la segunda aplicación de la ecuación de energía. .....	40
Tabla 10: Desviaciones entre valores observados y simulados de presión. ....	40
Tabla 11: Caudal de fuga para el escenario 1.....	50
Tabla 12: Caudal de fuga para el escenario 2.....	51
Tabla 13: Caudal de fuga para el escenario 3.....	52
Tabla 14: Caudal de fuga para el escenario 4.....	53
Tabla 15: Errores entre valores medidos y simulados de presión para los escenarios de análisis. ....	54



# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 INTRODUCCIÓN

En los sistemas de distribución de agua potable es común que se presenten fugas de este líquido a lo largo de las tuberías. Las fugas ocurren debido a las malas juntas de los tubos, falla de las válvulas, corrosión y sobrepresiones que provocan roturas. La existencia de fugas reduce la presión de servicio y el volumen de agua suministrado, que finalmente no es consumido por el cliente, ni facturado por el prestador de servicio. Existen instrumentos tradicionales para localizar fugas no visibles en redes de tuberías, pero no son económicamente viables.

El presente trabajo busca analizar los parámetros hidráulicos para estimar la localización de fugas en redes de distribución, utilizando el software EPANET. Para este fin se plantea esquematizar, modelizar y calibrar la red de distribución en estudio, para generar escenarios aplicando puntos de fuga sobre la red modelizada, y con los resultados hidráulicos de cada escenario buscar correlaciones entre la variación de parámetros hidráulicos y la ubicación de fugas.

## 1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En las redes de distribución de agua potable se presentan fugas causando desperdicio de agua, pérdidas económicas de los organismos que operan el sistema y reducción de la presión de servicio afectando la eficiencia hidráulica de las redes. Si el porcentaje de pérdidas de agua es más del 20%, se aplica acciones de localización y restauración de fugas.

Localizar fugas en las tuberías de distribución de agua potable no es tarea fácil, debido a que las tuberías se encuentran enterradas. La aplicación de instrumentos acústicos y equipos computarizados sobre la totalidad de una red

de distribución, para localizar fugas ocultas, resulta muy costosa y conlleva mucho tiempo. Por ello se ve necesario el desarrollo de metodologías que no demanden un gran costo económico para estimar la localización de fugas no visibles.

### **1.3 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA**

El presente trabajo busca analizar la variación de parámetros hidráulicos usando el software EPANET, para estimar la localización de fugas en redes de distribución de agua potable. EPANET es una herramienta que simula el funcionamiento de sistemas de distribución con flujo a presión bajo parámetros de diseño. Toda red modelizada debe calibrarse para obtener datos reales. Los métodos de calibración se basan en operaciones de prueba-error, ajustando los parámetros hidráulicos mediante iteraciones. Water Authorities Association (1989) propuso que, “el 100% de las presiones medidas en pruebas de campo no deben diferir en  $\pm 2$  m o  $\pm 15\%$  de la pérdida de carga registrada”. A partir de la calibración se generan escenarios de análisis con la aplicación de fugas en determinados puntos, buscando encontrar correlaciones entre caudales, presiones, velocidades y la ubicación de fugas.

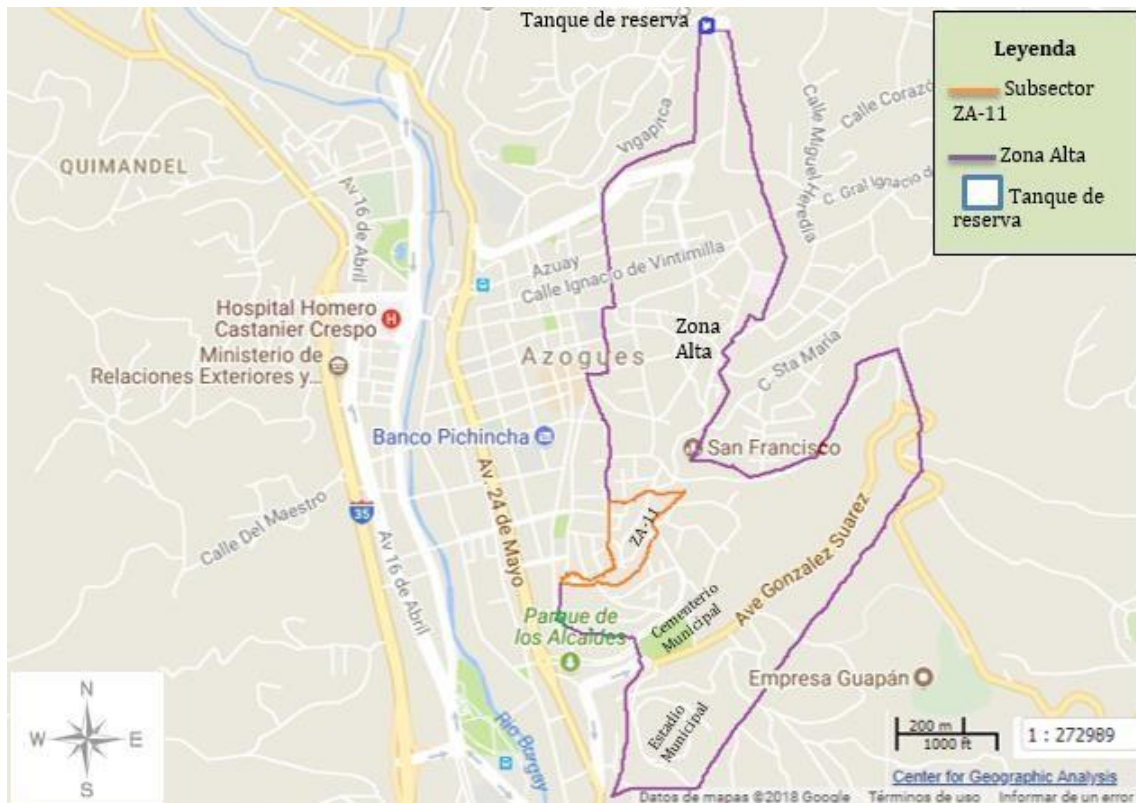
El informe técnico del Banco Mundial, por Okun y Ernst (1987) muestra que, en general, es normal que exista una pérdida de agua de 10-20%, pero una pérdida de más del 20% es señal de alerta que los organismos operadores del sistema deben considerar para el control de agua perdida, cuya gestión de regulación está estipulada dentro de la “Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua”, controlada por la SENAGUA (Secretaría del Agua).

#### **1.3.1 Definición del Área de Estudio**

Para el desarrollo del presente trabajo el área de estudio corresponde al Subsector ZA-11, situado en la parte central de la Zona Alta de la ciudad de Azogues; entre las calles Av. Rumiñahui, San Francisco, Juan Montalvo, José Joaquín de Olmedo, y dentro del territorio que conforma el santuario San Francisco, el mercado Franciscano y el cementerio municipal de Azogues (Figura 1). El subsector posee un área de aporte de 3,68 Ha. y un número de 99 usuarios.



El estudio realizado por parte de la empresa EMAPAL en el año 2015 indica que, el subsector ZA-11 tiene el 60,50% de pérdidas de agua, siendo uno de los Subsectores de la Zona Alta con mayor índice de fugas.



**Figura 1: Ubicación del subsector ZA-11**

Fuente: Imagen tomada de WorldMap.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

La importancia de localizar fugas de agua en una red de distribución radica en la conservación y manejo adecuado de este recurso, es por eso que los organismos operadores del sistema deben contar con un método que estime la localización de fugas. La cantidad de agua que se desperdicia al no localizar las fugas, no es consumida por el cliente, ni facturada por el prestador de servicio, provocando que los organismos operadores del sistema incrementen el costo de la tarifa para compensar estas pérdidas económicas.

La aplicación de instrumentos acústicos y eléctricos para detectar fugas sobre la totalidad de una red, sin un estudio previo, resulta muy costosa, requiere de



operadores especializados y conlleva mucho tiempo. Por ello se realizará modelizaciones hidráulicas en EPANET, buscando relacionar la variación de parámetros hidráulicos con la posible localización de fugas en redes de distribución de agua potable.

El desarrollo del presente trabajo es factible, debido a que la empresa EMAPAL del cantón Azogues dispone y colabora con la información de la zona de estudio, en el que incluye planos del sistema de distribución de la Zona Alta de la ciudad de Azogues, datos de consumo, población y porcentajes de pérdidas de agua de cada subsector. EPANET es un software gratuito y libre, que permite realizar modelos de simulación para observar el comportamiento hidráulico de los sistemas agua a presión.

## **1.5 OBJETIVOS**

### **1.5.1 Objetivos General**

Estimar la localización de fugas en una red de distribución de agua potable mediante el análisis de parámetros hidráulicos, utilizando el modelo EPANET.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Recopilar y procesar la información de la red de distribución de agua potable del Subsector ZA-11 para configurar el esquema de la red.
- Modelizar el esquema de la red en el software EPANET, introduciendo datos de la configuración hidráulica y patrones de demanda.
- Calibrar la red modelizada a partir de cálculos hidráulicos realizados manualmente, de tal manera que se obtenga datos reales.
- Desarrollar los escenarios de análisis considerando diferentes puntos de ubicación de fugas sobre la red modelizada, obteniendo resultados hidráulicos de cada escenario.
- Analizar los resultados determinando correlaciones entre la ubicación de la fuga admitida y la variación de los parámetros hidráulicos para generar tablas, gráficas y tendencias.

## **1.6 METODOLOGÍA**

La metodología que se realizará en el presente trabajo para estimar fugas en una red de distribución corresponde a un caso teórico, e hipotético. El método consiste en configurar el esquema de la red con todos sus elementos, utilizando como base la traza de nodos y tramos en el modelo EPANET. Es necesario recopilar y procesar toda la información de la red en estudio: diámetros de tubería, longitudes, coeficiente de rugosidad, válvulas, ubicación del tanque de reserva que abastece a la zona, cotas topográficas y demandas en los nodos.

Con el esquema de la red, se procede a insertar en el programa EPANET datos de diámetros, longitudes, coeficiente de rugosidad, cotas topográficas y demandas para modelizar la red de distribución. Es importante introducir los datos correctamente para que el programa logre realizar la simulación de la red.

Se ejecuta la calibración de la red modelizada mediante cálculos hidráulicos realizados manualmente, esto es necesario para verificar que se obtenga datos de parámetros hidráulicos reales.

Una vez calibrado el modelo, se procede al desarrollo de los escenarios de análisis suponiendo que hay fugas en determinados puntos sobre la red modelizada. Para esto se toma un porcentaje de las pérdidas de agua que representa los nuevos consumos en los nodos de la red, de tal manera que en cuyos tubos se pueda medir gastos, presiones y velocidades que indiquen la variación y el comportamiento de la red.

Con todos los resultados de los escenarios de análisis, se procede a buscar correlaciones entre la ubicación de la fuga admitida y la variación de los parámetros hidráulicos para generar tablas, gráficas y tendencias que permitan estimar la localización de fugas en tuberías.

## **1.7 POBLACIÓN Y MUESTRA**

La población que forma parte del estudio es la Zona Alta de la ciudad de Azogues, provincia del Cañar. Su área de cobertura es de aproximadamente



123,50 Ha, con 1519 usuarios con servicio de agua potable. La Zona Alta esta sectorizada en 12 subsectores cada uno de ellos controlados por una o dos válvulas de cierre. El porcentaje de pérdidas de agua en esta zona es de 46,86%.

Para el desarrollo de este trabajo se toma como muestra de estudio el Subsector ZA-11, situado en la parte central de la Zona Alta. Para la selección de este subsector se tomó en consideración los porcentajes de pérdidas de agua en los 4 subsectores con estos problemas, siendo esta uno de los que presenta mayor índice de fugas.

## **1.8 HIPÓTESIS**

Con la modelización, calibración de la red de distribución, y el desarrollo de escenarios hidráulicos considerando fugas en determinados puntos sobre la red, usando EPANET, se obtiene datos de parámetros hidráulicos en tuberías y nodos que conforma la red. Con estos resultados es posible encontrar correlaciones entre la ubicación de fugas y la variación de parámetros hidráulicos para la estimación de fugas.

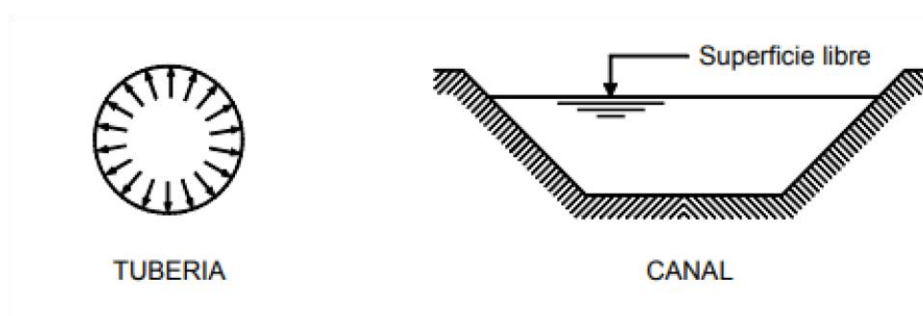


# CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

---

## 2.1 RED HIDRÁULICA A PRESIÓN

En las tuberías el flujo de agua trabaja a presión (tubo lleno), debido a que es un conducto cerrado y el líquido está confinado causando presión sobre el contorno de la tubería. A diferencia de un canal en la que el líquido tiene contacto con la presión atmosférica a través de la superficie libre (Rocha, 2007). En la Figura 2 se observa la diferencia entre tuberías y canales.



**Figura 2: Diferencia entre tuberías y canales.**

Fuente: Libro de Arturo Rocha Felices. Hidráulica de Tuberías y Canales

El suministro de agua potable está conformada por el transporte del líquido desde la captación hasta la planta de tratamiento, de ahí se dirige al sistema de distribución, llegando finalmente al consumidor. En los sistemas de distribución se debe asegurar una presión y caudal apropiada, para brindar al usuario un buen servicio en cantidad y calidad del agua (Rondán, 2016).

En estos sistemas los cambios de flujo dependen de la demanda de consumo del usuario (Rondán, 2016). La red de distribución está formada por la red principal, la red secundaria, redes terciarias, la conexión domiciliaria, y accesorios como: válvulas, cruces, codos, tés, etc. (Acuña, 2013).



Las redes pueden ser de tipo ramificadas, malladas o combinadas. La tipología de las redes depende de la topografía, de la disposición de viviendas y del desarrollo urbanístico de la localidad. La red mallada es la más conveniente debido a que brinda un servicio eficiente en caudal y presión, las mismas que deben satisfacer el consumo máximo horario (Romero, 2011).

### **2.1.1 Comportamiento Hidráulico de la Red**

La distribución de los flujos de líquido a través de las redes de agua está regida por algunas leyes físicas. Estas leyes determinan los gastos en cada tubería, en función de la diferencia de cargas piezométricas en sus extremos, para un estado de consumo y de alimentación dado, y las cargas de presión en sus extremos o nudos (Patiño, 2011).

Las ecuaciones fundamentales de la hidráulica son tres: ecuación de la continuidad, ecuación de la cantidad de movimiento y ecuación de la energía; estas se desarrollan en flujo permanente. La ecuación de la cantidad de movimiento para los fluidos compresibles, exige que la cantidad de fluido que transita por cada sección por unidad de tiempo sea constante (Rocha, 2007).

La ecuación de continuidad, para fluidos incompresibles, es una consecuencia de la ley de conservación de la materia, en donde la densidad es constante (Rocha, 2007). Esta ecuación se aplica en los nudos, e indica que el gasto que entra debe ser igual al gasto que sale (Patiño, 2011).

La ecuación de energía, para fluidos incompresibles, se obtiene del principio de conservación de energía. En un fluido en movimiento la energía está conformada por las energías debidas a la velocidad, presión y posición respecto a un plano de referencia. Para un fluido real habría una pérdida de energía entre el punto 1 y 2, en realidad no es energía que se pierde sino transformada en calor debido a la fricción (Rocha, 2007).

La ecuación de energía es aplicada en los tramos de tuberías y determina la energía de un fluido en determinado punto sobre el eje de una tubería (Patiño, 2011), se expresa como:



$$E_1 = E_2 + h_{1-2} \quad (1)$$

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{1-2} \quad (2)$$

Donde  $E_1$  es la energía en la sección aguas arriba,  $E_2$  es la energía en la sección aguas abajo,  $h_{1-2}$  es la sumatoria de las pérdidas de energía entre la sección 1 y 2,  $\frac{p}{\gamma}$  es la altura de presión, “ $p$ ” es la presión y “ $\gamma$ ” es el peso específico del fluido, “ $Z$ ” es la elevación con respecto a un plano horizontal de referencia y  $\frac{v^2}{2g}$  es la altura cinética.

### 2.1.2 Pérdidas de Energía

El comportamiento hidráulico del agua en la tubería radica en que el líquido se escurre porque hay un gradiente de energía, es por eso que el flujo de un líquido adquiere una pérdida de energía (Rocha, 2007).

Las pérdidas de energía o de carga se categorizan en dos grupos principales: las producidas por el rozamiento del fluido con las paredes internas del conducto, conocidas como pérdidas longitudinales o de fricción “ $h_f$ ”; y las producidas por elementos localizados en la red, denominadas pérdidas locales o menores “ $h_L$ ” (Patiño, 2011).

García (2006) describe que las pérdidas por fricción se calculan utilizando las siguientes formulaciones:

- Formulación de Darcy-Weisbach
- Formulación de Hazen-Williams
- Formulación de Chezy-Manning

La formulación propuesta por Weisbach a mediados del siglo XIX y modificada posteriormente por Darcy, considera las condiciones del régimen en qué se



desarrolla el flujo, ya sea laminar, de transición o turbulento (Patiño, 2011). La expresión es la siguiente:

$$hf = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (3)$$

En donde  $hf$  = pérdidas por fricción expresada en metros columna de agua (mca),  $f$  = factor de fricción (adimensional),  $L$  = longitud del tramo considerado,  $D$  = diámetro interior de la tubería expresada en metros (m),  $v$  = velocidad del flujo expresada en metros por segundo (m/s) y  $g$  corresponde al valor de aceleración de la gravedad en metros por segundo al cuadrado ( $m/s^2$ ). (Patiño, 2011, p.10)

El factor de fricción ( $f$ ) se determina según el régimen del flujo. En las redes de agua potable normalmente se presenta el flujo en régimen turbulento. En este régimen de flujo " $f$ " depende de la rugosidad y del número de Reynolds ( $Re > 4000$ ); dada en la ecuación de Colebrook-White. (Patiño, 2011, p.10)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \text{Log}_{10} \left( \frac{Ks}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (4)$$

En donde  $f$  es el factor de fricción,  $D$  es el diámetro interior de la tubería (m),  $ks$  es la rugosidad absoluta del tipo de tubería (mm), y  $Re$  corresponde al número de Reynolds (Patiño, 2011), representada en la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{4Q}{\pi D \nu} \quad (5)$$

Donde  $V$  es la velocidad media de circulación del líquido por la tubería (m/s);  $D$  es el diámetro interior de la misma (m); y  $\nu$  la viscosidad cinemática del líquido a la temperatura de servicio ( $m^2/s$ ). Para el caso del agua  $\nu = 1.0 \times 10^{-6} m^2/s$  a una temperatura de 20°C. (Patiño, 2011, p.11)

La ecuación de Hazen-Williams es semi-empírica, debido a su gran sencillez y aplicabilidad tiene gran aceptación en el campo de la hidráulica (Patiño, 2011). La expresión es la siguiente:





$$hf = \frac{10.6470L}{C_{HW}^{1.852} D^{4.871}} Q^{1.852} \quad (6)$$

Donde Q es el caudal del líquido expresada en metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ );  $C_{HW}$  es el coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams, que depende del material de la tubería (adimensional); L es la longitud de tubería en metros (m), D es el diámetro de tubería (interior) expresada en metros (m), y hf es la pérdida de energía en metros columna de agua (mca). El coeficiente  $C_{HW}$  de Hazen-Williams se encuentra tabulado en los manuales de hidráulica, y sus valores suelen estar entre 80 y 160. (Patiño, 2011, pp.22-23)

Las pérdidas locales “hL” son provocadas por accesorios de la red tales como válvulas, codos, té, cruces, etc. (Acuña, 2013). Estas pérdidas son representadas como una proporción de la carga de velocidad aguas debajo de la localización del accesorio. Las pérdidas locales se calculan con la expresión general (Patiño, 2011), representada en la siguiente ecuación:

$$hL = k \frac{V^2}{2g} \quad (7)$$

En donde hL son las pérdidas menores expresada en metros columna de agua (mca), k es el coeficiente de pérdida del accesorio, V es la velocidad del flujo expresada en m/s y g corresponde al valor de aceleración de la gravedad expresada en  $m/s^2$  (Patiño, 2011).

## 2.2 PARÁMETROS HIDRÁULICOS

### 2.2.1 Consumo

La cantidad de agua que utilizan los usuarios ya sea en las viviendas, industrias, comercios y servicios públicos, sin tener en cuenta las pérdidas de agua dentro del sistema se le conoce como consumo. Para su estimación se debe utilizar los datos de medición históricos, cuyo valor se expresa en litros por segundo (l/s), cuando se habla de consumo per cápita se expresa en litros por habitante por día l/hab/d (CONAGUA, 2009).

## 2.2.2 Dotación

“La dotación es la cantidad de agua asignada a cada habitante, considerando todos los consumos de los servicios y las pérdidas físicas en el sistema, en un día medio anual; sus unidades se expresan en l/hab/d” (CONAGUA, 2009, p.15). Las dotaciones recomendadas se indican en la normativa INEN, mostrada en la Tabla 1.

**Tabla 1: Dotaciones Recomendadas por la INEN**

Población (habitantes)	Clima	Dotación Media Futura (l/hab/día)
Hasta 5000	Frio	120 - 150
	Templado	130 – 160
	Cálido	170 – 200
5000 a 50000	Frio	180 – 200
	Templado	190 – 200
	Cálido	200 – 230
Más de 50000	Frio	>200
	Templado	>220
	Cálido	>230

**Nota** Fuente: Adoptada de INEN. (1992). *Normas para el estudio y diseño de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes* (p.42). Quito, Ecuador.

“La dotación media de un sector se obtiene a partir de los consumos registrados por el organismo operador, dividiendo el consumo total más las pérdidas físicas de agua, entre el número de habitantes del sector” (CONAGUA, 2009, p.15).

## 2.2.3 Caudal

La cantidad de agua que transita por una tubería por unidad de tiempo se le conoce como caudal o gasto, sus unidades están en m<sup>3</sup>/s. Se puede calcular multiplicando la velocidad del agua expresada en m/s por el área de la sección expresada en m<sup>2</sup> (Rocha, 2007).

“El caudal medio es la cantidad de agua requerida para satisfacer las necesidades de una población en un día de consumo promedio, se debe obtener anualmente de



las fuentes de abastecimiento y se determina con base en la dotación” (CONAGUA, 2009, p.18).

#### 2.2.4 Velocidad

A la relación entre el gasto y el área de una sección de tubería se le denomina velocidad media (Rocha, 2007), cuya expresión es:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (8)$$

Las velocidades admisibles del agua están dadas por el material de las tuberías. Generalmente se diseña con velocidades comprendidas entre 0,9 y 1,5 m/s, y en zonas rurales que son más flexibles se recomienda velocidades entre 0,4 y 2,5 m/s (López, 2011).

Los límites de los valores de velocidad se establecen de la siguiente manera: “La velocidad mínima de escurrimiento se fija, para evitar la sedimentación de partículas de arrastre en el agua, mientras que la velocidad máxima se fija para no ocasionar erosión en las paredes de las tuberías” (CONAGUA, 2009, p.19).

#### 2.2.5 Presión

Se establece un mínimo de 10 mca en los puntos y condiciones más desfavorables de la red. Para el caso de proyectos en los que el abastecimiento se realiza a través de grifos públicos, esta presión podrá ser reducida a 5 mca. La presión estática máxima, no deberá ser mayor a 70 mca y presión máxima dinámica será 50 mca. (INEN, 1992, p.177)

Si se tienen altas presiones en la red, habrá altos desperdicios en el consumo doméstico, esto se observa al abrir las llaves de los lavamanos, regaderas y otros elementos. Igualmente, se puede presentar un mayor número de rupturas de tubos dentro del domicilio o en la misma red de distribución, aumentando así el volumen de agua que se pierde. (López, 2011, p.54)



## 2.3 PÉRDIDAS DE AGUA

La diferencia entre la cantidad de agua producida y la cantidad de agua consumida por los abonados se le conoce como pérdida de agua. Las fugas que se dan en las tuberías de la red, en los depósitos de almacenamiento y en la toma domiciliaria son consideradas como pérdidas físicas; mientras que las pérdidas aparentes se deben a conexiones clandestinas y a deficiencias en la medición del consumo (López, 2011).

Las pérdidas aparentes pueden conseguir el 100% de control, a partir de un sistema de facturación efectivo y de un programa adecuado para la actualización del padrón de usuarios. Las pérdidas aparentes debido a usos clandestinos y debido a fraudes son un problema legal y administrativo de la empresa operadora del sistema de agua; ya que los abonados seguirán consumiendo agua después de ser asociados a la facturación. (CONAGUA, 2009, p.47)

## 2.4 FUGAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

En redes de distribución se define a la fuga como: “La salida no controlada del agua por cualquiera de los elementos del sistema de distribución” (Hurtado, 2006, p.04).

Los tipos de fugas que se encuentran en las redes son: “Fugas reportadas, fugas no reportadas y fugas de fondo” (Rondán, 2016, pp.30-31). Las fugas reportadas (visibles) son cuando el agua aflora a la superficie de manera rápida, esto depende de la presión del agua, de las características del suelo y la superficie. La ubicación de estas fugas es inmediata debido a que no se requiere de equipos especiales para su localización y por tanto su reparación es rápida (Rondán, 2016).

Las fugas no reportadas u ocultas no aparecen en la superficie. La identificación de estas fugas se realiza mediante el análisis del consumo de agua dentro de una zona definida en el sistema de distribución. Para su ubicación se utiliza instrumentos acústicos y no acústicos. (Rondán, 2016, p.31)

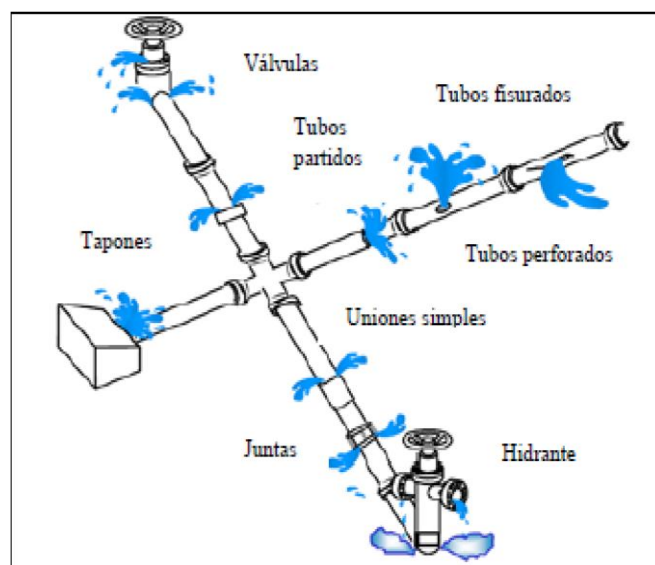


Las fugas de fondo son fugas muy pequeñas (filtración o goteo de uniones, válvulas o accesorios no herméticos) no se pueden detectar utilizando métodos de detección acústicos de fugas. Por lo tanto se asume que muchas fugas de fondo nunca se detectan ni reparan sino que fugan hasta que se reemplaza eventualmente la parte defectuosa. (Rondán, 2016, p.31)

### 2.4.1 Causas de Fugas

En la red, las fugas ocurren debido al: aplastamiento, y agrietamiento transversal y longitudinal; el primer caso es resultado de una contracción defectuosa; el segundo es producido por esfuerzos y vibraciones por cargas superficiales (tráfico); y el tercero se debe al golpe de ariete por errores operacionales, fatiga de materiales o defectos de fabricación. (Hurtado, 2006, p.05)

El incremento de fugas también se da por la corrosión de las tuberías, por las malas uniones de tuberías, y por las fallas de válvulas (Hurtado, 2006). Las presiones altas aumentan las tasas de fuga, mientras que las presiones bajas no permiten que el agua aflore a la superficie complicando la detección de fugas. Las presiones variadas dentro del sistema provoca la fatiga de materiales, estos a su vez causan fugas, principalmente en tuberías de plástico (Rondán, 2016).



**Figura 3: Fugas en tuberías de redes de distribución.**

Fuente: Adoptada de Medina, G. M. (2009). *Políticas para el control activo de fugas* (p.viii) (Tesis de Grado). Universidad Técnico Particular de Loja, Loja.

### **2.4.2 Nivel Óptimo de Fugas**

El informe técnico del Banco Mundial, por Okun y Ernst (1987) muestra que, en general, es normal que exista una pérdida de agua de 10-20%, pero una pérdida de más del 20% es señal de alerta.

### **2.4.3 Estimación de fugas**

La estimación de fugas consiste en: “Cuantificar la cantidad de agua pérdida en el sistema de distribución, sin considerar la ubicación de las mismas. Esta estimación se realiza mediante el método del balance hídrico y el método de caudales nocturnos” (Rondán, 2016, p.36).

El balance hídrico estima: “La cantidad anual de pérdidas totales a partir de los registros de caudales inyectados en la red de distribución y el volumen correspondiente al consumo” (Rondán, 2016, p.37).

El método de caudales nocturnos consiste en: “analizar los caudales nocturnos inyectados en zonas de dimensión pequeña, formados usualmente por 500 y 3000 conexiones domiciliarias” (Rondán, 2016, p.37).

El método de caudales nocturnos indica que: “Durante el periodo del caudal mínimo nocturno (CMN) el caudal consumido por los abonados es mínimo, por este motivo las fugas constituyen el mayor componente del caudal inyectado a la red” (Rondán, 2016, p.37).

### **2.4.4 Reducción y control de fugas en la red.**

Las medidas para controlar y reducir las fugas en la red de distribución son: mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo y control de las presiones. Estos proyectos están encaminados a disminuir la tasa de fuga en la red (Albarrán et al., 1997).

Cuando las fugas se hacen visibles o cuando estas provocan una reducción en las presiones y caudales, que son manifestadas por los usuarios, se lleva a cabo las medidas de mantenimiento correctivo. Estas medidas consisten en los trabajos de restauración de elementos de la red (Albarrán et al., 1997).



Cuando las fugas no son visibles se lleva a cabo las acciones de mantenimiento preventivo, que consisten en realizar trabajos periódicos para mantener en buenas condiciones los elementos del sistema, reduciendo así la tasa de fugas (Albarrán et al., 1997).

El método del control de las presiones consiste en mantener dentro de un rango definido las variaciones de la presión, para esto es necesario realizar la sectorización de la red (Albarrán et al., 1997).

## **2.4.5 Técnicas de Detección de Fugas**

### **2.4.5.1 Presión diferencial**

Para identificar la existencia y posición de una fuga se mide la presión a lo largo de la tubería que se analiza, con estos valores de presión se construye una gráfica de gradiente. Cuando el gradiente de presión indica una discontinuidad o cambio hacia ambos lados de la fuga, se verifica la existencia de una fuga. La medición de la presión en tuberías se realiza mediante el manómetro Bourdon o manómetros diferenciales. (Hurtado, 2006, p.07)

### **2.4.5.2 Distritos Hidrométricos**

La técnica de distritos hidrométricos consiste en definir la red por sectores, para realizar mediciones de volúmenes suministrados y consumidos por los usuarios en cada uno de ellos. Las mediciones se deben realizar durante un periodo de 24 horas como mínimo. Con los datos medidos se puede calcular el consumo total expresada en  $m^3/d$ , el consumo horario promedio expresada en  $m^3/h$ , consumo horario máximo en  $m^3/h$ , y el consumo mínimo nocturno en  $m^3/h$ . (Hurtado, 2006, p.07)

## **2.4.6 Equipos de Detección y Localización de Fugas no visibles**

El Geófono es un instrumento transmisor y amplificador del sonido de la fuga, está formado por un micrófono que capta y recoge el sonido, luego lo transmite como una señal acústica a los auriculares y mediante un micro amperímetro se visualiza el nivel del ruido. Los micrófonos son colocados



en puntos de contacto remotos tales como válvulas, llaves de corte, hidrantes, medidores domiciliarios. (Medina, 2009, p.xiii)

El correlador acústico es un equipo electrónico que transmite una onda acústica a través de la tubería de agua para indicar de manera precisa la distancia donde se encuentra la fuga. Para su aplicación es necesario que el ruido de la fuga sea registrado nítidamente por los sensores. (Medina, 2009, p.xii)

#### **2.4.7 Beneficios de la reducción de fugas**

Al reducir las fugas se conservan las fuentes de abastecimiento, existe mayor disponibilidad de cantidad, presión y calidad de agua entregada a los usuarios, mejora la imagen de los organismos operadores. A demás en caso de nueva construcción de la infraestructura del sistema permite el ahorro de los precios respectivos (CONAGUA, 2009).

### **2.5 MODELO DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA**

El modelo de simulación hidráulica es una versión simplificada de los elementos de una red de abastecimiento, que permita establecer una serie de relaciones físicas y matemáticas, de origen teórico. Con el modelo se reproduce el comportamiento hidráulico del sistema perteneciente a una localidad real, que puede verificarse con datos medidos de parámetros hidráulicos (Patiño, 2011).

El modelo hidráulico de una red a presión está compuesto por líneas y puntos topológicamente relacionados con las condiciones de abastecimiento y demanda de la red. Las líneas representan las tuberías, caracterizadas por un tipo de material, longitud, diámetro, espesor de pared y rugosidad interna. Los puntos corresponderían a los nudos de la red pueden ser de entrada y salida del fluido, o simplemente de conexión (Molina, 2014).

Existen otros elementos en las redes que, bajo ciertas condiciones, pueden llegar a tener alguna importancia en el comportamiento del sistema; como





cambios de dirección, bifurcaciones, cruces, ampliaciones o reducciones de sección, válvulas, medidores de flujo, bombas, entre otros. (Patiño, 2011, p.6)

Los modelos hidráulicos de una red a presión se clasifican en: “Modelos estáticos, también llamados modelos de análisis en régimen permanente, simulan el estado de la red en un solo instante y los modelos dinámicos o de periodo extendido simulan el comportamiento de la red a lo largo del tiempo” (Rondán, 2016, p.41).

## **2.6 PROGRAMA EPANET**

“EPANET es un software de uso libre, desarrollado por la Agencia de medio Ambiente de Estados Unidos de Norteamérica (U.S. EPA)” (Acuña, 2013, p.13).

A EPANET se le define como un: “Programa de ordenador que realiza simulaciones en periodo extendido del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de distribución a presión” (Acuña, 2013, p.13).

EPANET determina: “El caudal que circula por las tuberías, la presión en los nudos, el nivel de agua en los tanques, y la concentración de componentes químicos en el agua, durante un determinado periodo de simulación” (Acuña, 2013, p.13).

### **2.6.1 Características del Modelo Hidráulico EPANET**

Rossmann (2017), define a EPANET como “un simulador hidráulico muy avanzado”, brindando los beneficios siguientes:

No existe límite en cuanto al tamaño de la red que se desea analizar, las pérdidas de carga pueden calcularse mediante las fórmulas de Hazen-Williams, de Darcy-Weisbach o de Chezy-Manning, contempla pérdidas menores en codos, accesorios, etc; admite bombas de velocidad fija o variable, y permite considerar varios tipos de válvulas, tales como válvulas



de corte, de retención, y reguladoras de presión o caudal. (Rossman, 2017, pp.1-2)

A demás, permite el almacenamiento de agua en tanques de geometría variable (diámetro varía con el nivel), considera diferentes tipos de demanda en los nudos, modela tomas de agua cuyo caudal dependa de la presión como son los rociadores. (Rossman, 2017, pp.1-2)

## **2.6.2 Componentes físicos del modelo de la red.**

EPANET modela un sistema de distribución de agua potable como un conjunto de líneas conectadas por sus nudos extremos. Las líneas representan tuberías, bombas o válvulas de control. Los nudos representan puntos de conexión entre tuberías o extremos de las mismas, con o sin demandas, y también depósitos o embalses. (Rossman, 2017, p.25)

### **2.6.2.1 Nudos**

Los Nudos son los puntos de la red que a través de ellos el agua entra o sale de la misma, también pueden ser sólo puntos de paso. Los datos básicos que se carga a los nudos son: la cota respecto a un nivel de referencia (nivel del mar), demanda de agua (flujo de red) y la calidad inicial del agua. (Acuña, 2013, p.14)

Los resultados obtenidos para los nudos son: la altura piezométrica o suma de la carga de posición más la carga de presión, la presión y la calidad del agua. Los nudos también: presentan una demanda variable en el tiempo, tienen asignados distintos tipos de demanda (doméstica, industrial, etc.), presentan una demanda negativa, indicando que el caudal entra a la red a través del nudo, son puntos de entrada de una fuente contaminante a la red, tienen asociado un emisor, cuyo caudal de salida depende de la presión. (Acuña, 2013, p.14)



### **2.6.2.2 Embalses**

Los embalses son nudos que representan una fuente externa de alimentación, de capacidad ilimitada, o bien un sumidero de caudal. Se utilizan para modelar elementos como lagos, captaciones desde ríos, acuíferos subterráneos, o también puntos de entrada a otros subsistemas. Los embalses pueden utilizarse también como puntos de entrada de contaminantes. (Acuña, 2013, p.14)

### **2.6.2.3 Depósitos**

Los depósitos o tanques tienen cierta capacidad de almacenamiento, en los cuales el volumen de agua almacenada puede variar con el tiempo durante la simulación. Los datos básicos de un depósito son: cota de solera (nivel del agua cero), diámetro, nivel del agua inicial, mínimo y máximo del agua y la calidad inicial del agua. (Acuña, 2013, p.15)

Los principales resultados de un depósito son: cota de la superficie libre de agua, presión y calidad del agua. EPANET detiene el aporte de caudal si el nivel del tanque está al mínimo y detiene el consumo de caudal si el nivel del tanque se encuentra en su máximo. (Acuña, 2013, p.15)

### **2.6.2.4 Tuberías**

Las tuberías se definen como líneas de transporte del agua. “EPANET admite que las tuberías están completamente llenas en todo instante, y por consiguiente que el flujo es a presión; y que la dirección del flujo es siempre del nudo de mayor altura piezométrica al de menor altura piezométrica” (Acuña, 2013, p.15).

Los principales datos de entrada de la tubería son: “Los nudos inicial y final, diámetro, longitud, coeficiente de rugosidad para calcular las pérdidas de energía por fricción y su estado que puede ser abierta, cerrada, o con válvula de retención” (Acuña, 2013, p.15).

Los resultados de la tubería son: “Caudal de circulación, velocidad del flujo, pérdida de carga unitaria, factor de fricción para la fórmula de Darcy-Weisbach, velocidad media de reacción y la calidad media del agua” (Acuña, 2013, p.16).



### **2.6.2.5 Válvulas**

En EPANET, las válvulas se identifican como líneas que limitan la presión o el caudal en un punto determinado de la red. Los datos principales de una válvula son: nudos de entrada y salida, diámetro, consigna, y estado. Los resultados en una válvula son el caudal de paso y la pérdida de carga. (Acuña, 2013, p.17)

Las válvulas que se simulan en EPANET se detallan a continuación: “Válvulas reductoras de presión (PRV), válvulas sostenedoras de presión (PSV), válvulas de rotura de carga (PBV), válvulas limitadoras de caudal (FCV), válvulas de regulación (TCV) y válvulas de propósito general (GPV)” (Acuña, 2013, p.17).

Las válvulas reductoras de presión (PRV) limitan la presión en un punto aguas abajo de la válvula. EPANET diferencia tres estados en los que la válvula puede trabajar: parcialmente abierta para mantener una presión aguas abajo siempre que la presión aguas arriba sea superior a esta; totalmente abierta cuando la presión aguas arriba está por debajo de la consigna; y cerrada si la presión aguas abajo es superior a la presión aguas arriba. (Rossman, 2017, p.32)

Las válvulas de regulación TCV simulan una válvula parcialmente cerrada ajustando adecuadamente el valor del coeficiente de pérdidas menores. Normalmente los fabricantes proporcionan una relación entre el grado de cierre de la válvula y el coeficiente de pérdidas resultante. (Rossman, 2017, p.32)



# CAPÍTULO 3: MODELO EXPERIMENTAL

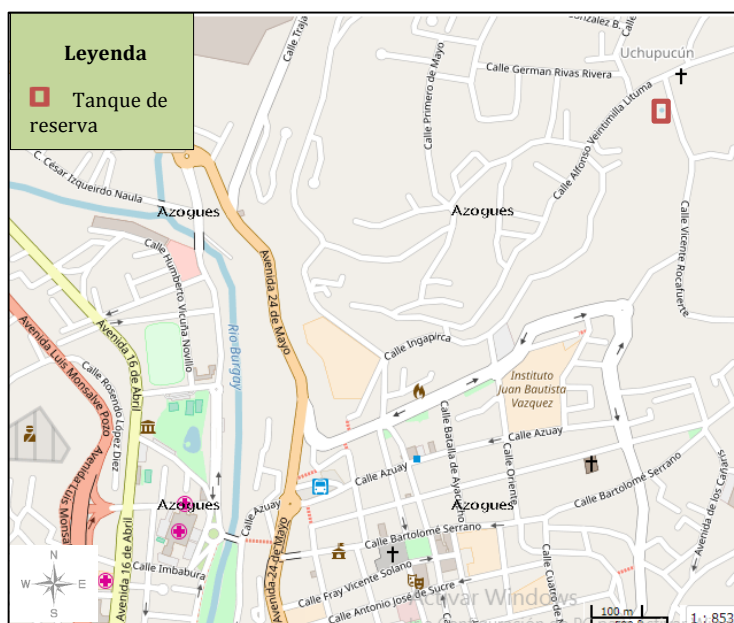
## 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL SUBSECTOR ZA-11

La red de distribución del Subsector ZA-11 se abastece de un tanque de reserva, ubicado en el sector Uchupucún de la ciudad de Azogues, en la calle Vicente Rocafuerte (Figura 4). Geográficamente está situado en las coordenadas x: 739894 m; y: 9698056 m, y se encuentra a una altura de 2624 msnm. El tanque de reserva posee las siguientes dimensiones:

**Tabla 2: Dimensiones del Tanque de Reserva**

Diámetro interno del tanque	14,60 m
Altura hasta el nivel de rebose	3,15 m
Volumen real del tanque	527,36 m <sup>3</sup>
Área de la reserva	167,42 m <sup>2</sup>

Fuente: EMAPAL EP.

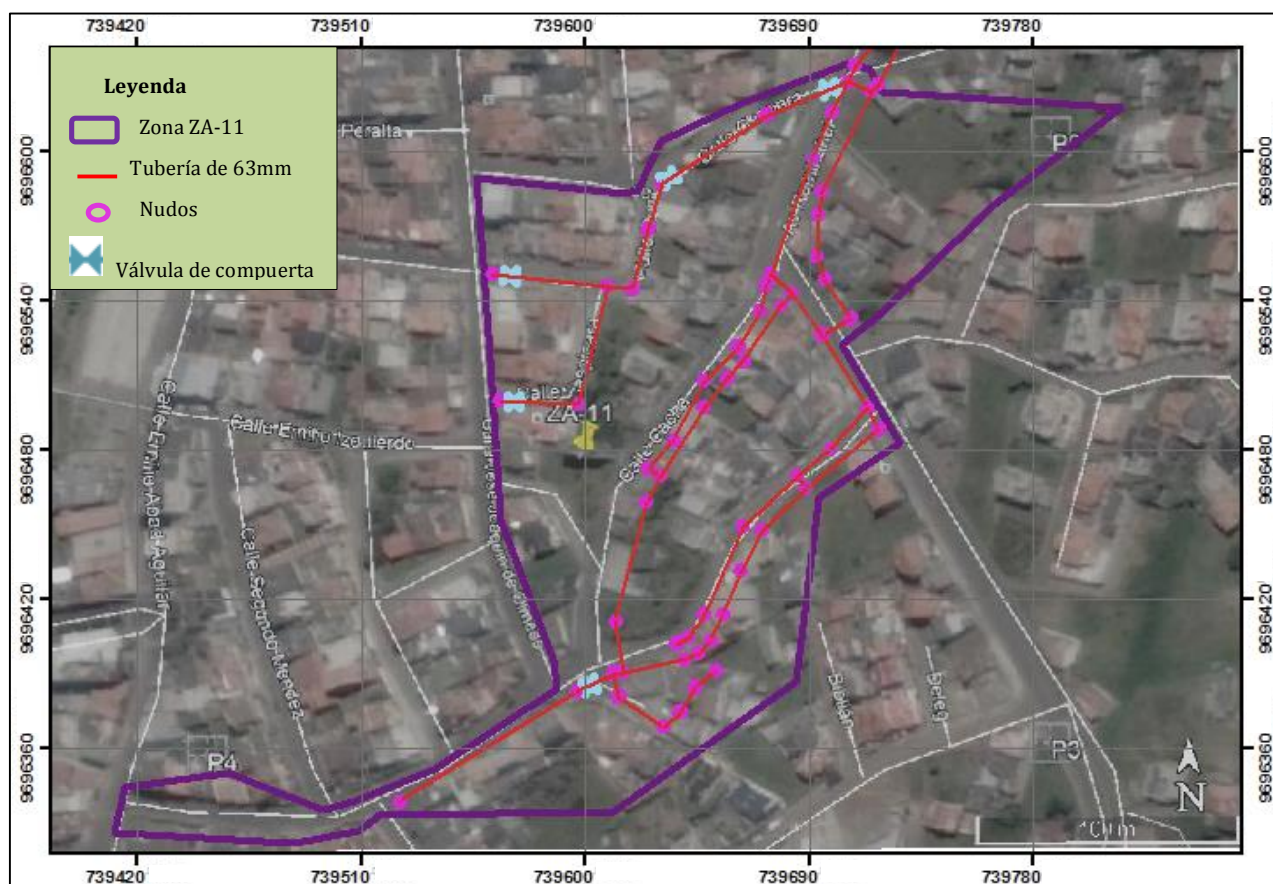


**Figura 4: Ubicación del Tanque de Reserva**

Fuente: Elaboración Propia



El subsector ZA-11 seleccionado como caso de estudio resulta ser representativo ya que es uno de los subsectores con mayor nivel de pérdidas de agua (61%). Su red de distribución está configurada por 60 tuberías del mismo diámetro y 57 nudos (Figura 5). La Tabla 3 presenta información de las características físicas de la red.



**Figura 5: Red de distribución del Subsector ZA-11**

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3: Características físicas de la Red.**

Zona de Estudio	Subsector ZA-11
Área (Ha)	3,68
Material (tubería)	PVC
Diámetro nominal tubería (mm)	63
Presión de trabajo tubería (MPa)	1
Diámetro interno tubería (mm)	58,2

Fuente: Elaboración propia.



La Empresa EMAPAL según los registros de facturación mensual de enero a diciembre del 2016, obtiene el volumen mensual facturado dentro del sector, siendo este de 2079,25 m<sup>3</sup>/mes. Además, se conoce el número total de conexiones domiciliarias (99 usuarios), el número de habitantes por casa es de 3,81 hab, cuyo valor ha sido calculado de las encuestas realizadas para la actualización del registro de usuarios en el año 2016.

Con los datos anteriores se estima la población para este sector siendo de 377 habitantes, con un consumo promedio de 0,79 l/s. La dotación media calculada de acuerdo a la micromedición es de 181,23 l/hab/d, valor que está dentro de las normas vigentes. Se debe hacer notar que esta dotación es la que realmente se estima en el sector, no se considera el caudal de pérdidas producidas en la red de distribución.

### **3.2 MODELO HIDRÁULICO EPANET**

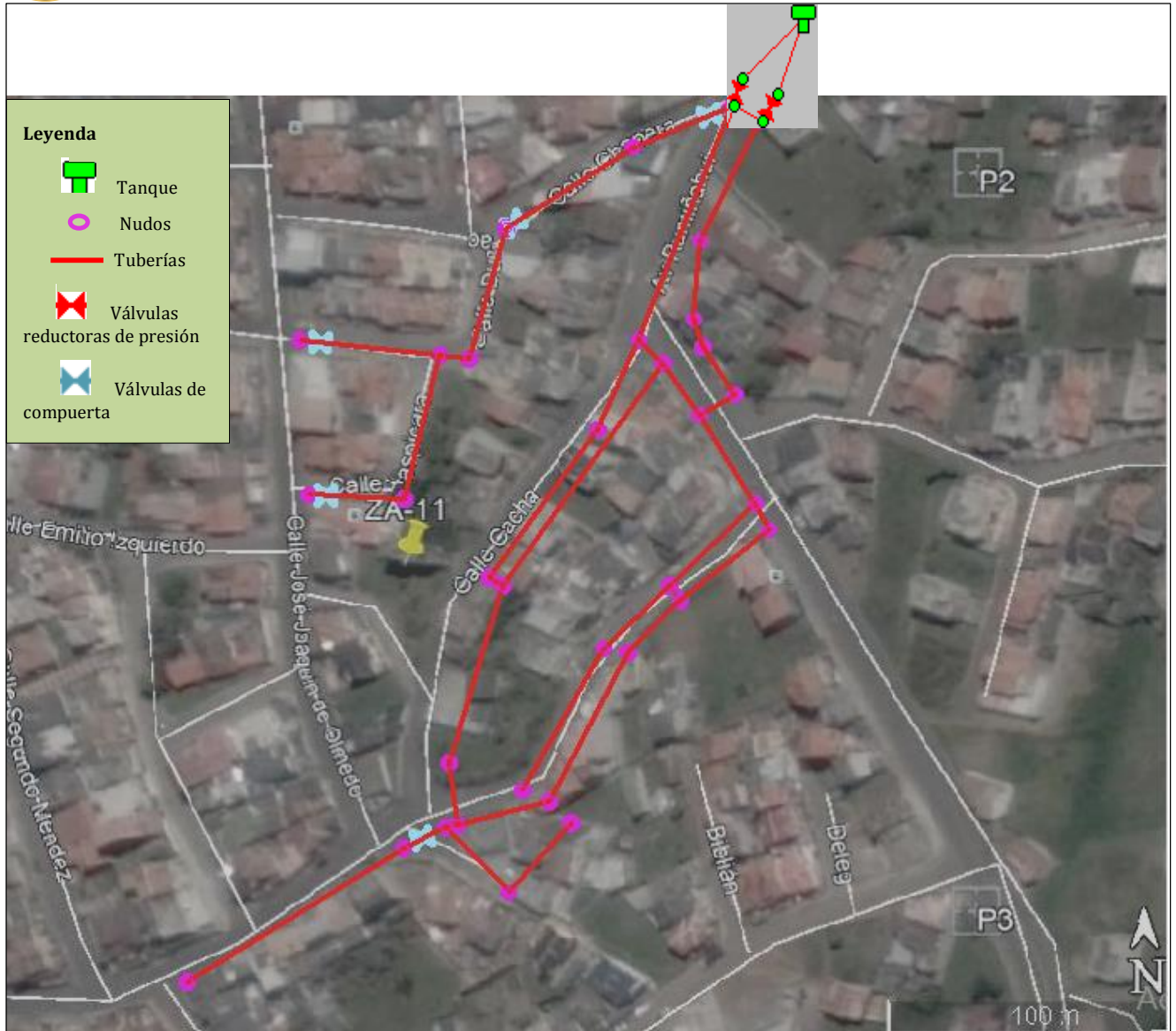
#### **3.2.1 Esquema del modelo**

La esquematización del modelo hidráulico se realizó a partir de ficheros AutoCAD, convertidos mediante el programa EpaCAD a un fichero INP leído por EPANET, de esta manera se tiene el modelo hidráulico esquematizado en el programa EPANET.

Walski (1983) propone en su técnica para la calibración del modelo trabajar con redes simplificadas. La simplificación de la red se hizo de acuerdo a la topología del terreno, reduciendo nudos con conexiones próximas entre sí, y reemplazando las tuberías por tramos de tuberías equivalentes.

El esquema de la red simplificada consta de un tanque, tuberías, nudos, y 5 válvulas de compuerta para el mantenimiento de la red en ciertos tramos. Adicionalmente se introdujo al esquema 2 válvulas reductoras de presión con el propósito de regular la presión del sistema en estudio. En la Figura 6 se observa el esquema de la red simplificada y en la Tabla 4 se describe la información general del modelo hidráulico construido.





**Figura 6: Bosquejo del modelo de la red simplificada en EPANET.**

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 4: Información general del modelo hidráulico construido.**

Caso de Estudio	Subsector ZA-11
No. Tuberías (inicialmente)	60
No. Nudos (inicialmente)	57
No. Tuberías (R. Simplificada)	37
No. Nudos (R. Simplificada)	34
Cota máxima (msnm)	2550
Cota mínima (msnm)	2510

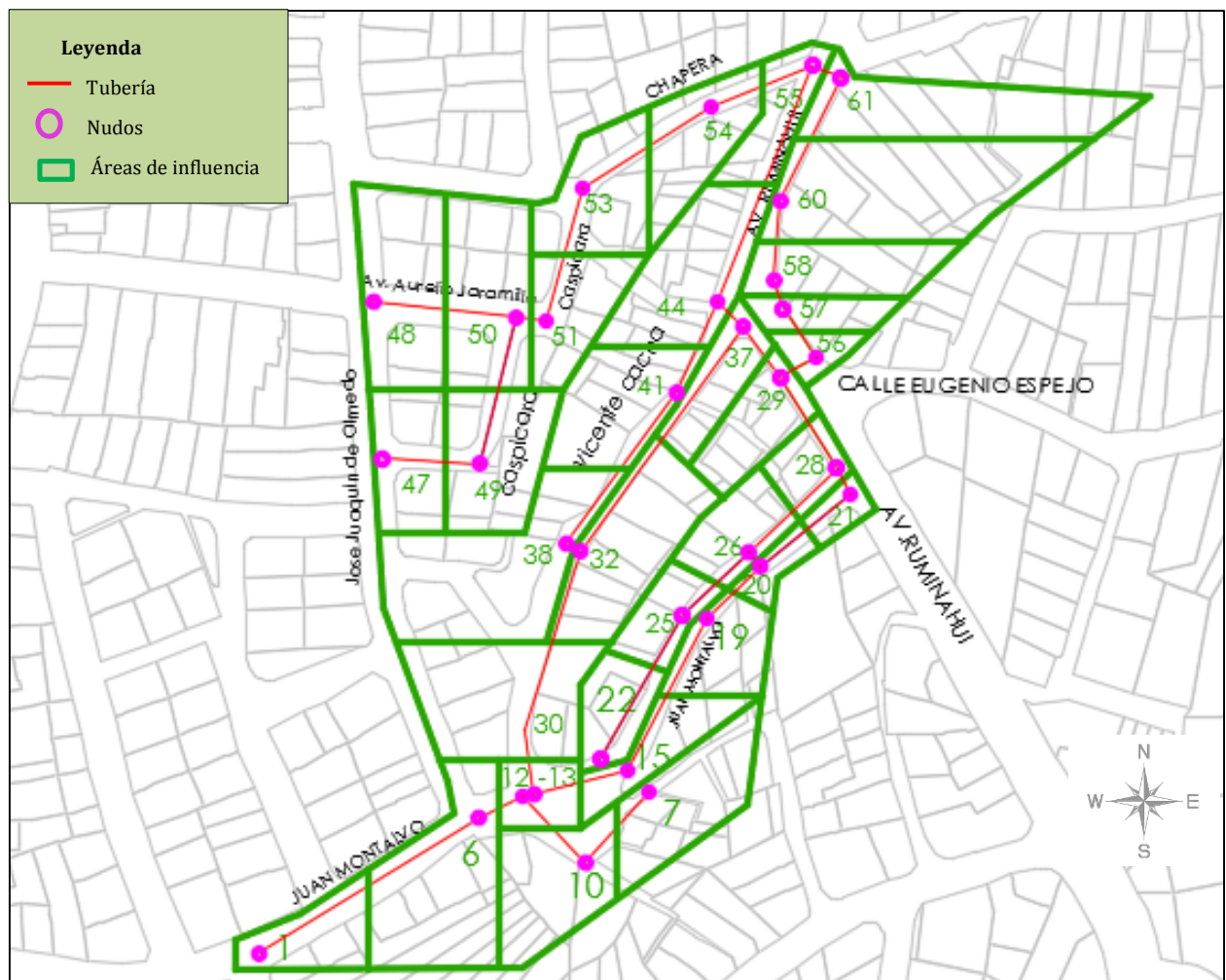
Fuente: Elaboración propia.



### 3.2.2 Parámetros de entrada al modelo

Las unidades seleccionadas para el modelo son las unidades métricas del Sistema Internacional (SI), es decir, diámetros de tubería en milímetros, longitudes de tubería en metros, dimensiones en metros, caudales en litros por segundo y presiones en metros columna de agua (Rossman, 2017).

Para los nudos los valores de las cotas se definieron en base al plano topográfico que contiene las curvas de nivel de la ciudad de Azogues, disminuyendo a cada cota el valor de un metro, debido a que las tuberías se encuentran a esta profundidad. La demanda de consumo para los nudos se determina mediante el método de las áreas de influencia. Este método consiste en asociar un área de aporte a cada nudo del modelo hidráulico. El esquema de las áreas de influencia para cada nudo se observa en la Figura 7.



**Figura 7: Esquema de las áreas de influencia para los nudos de demanda.**

Fuente: Elaboración propia.

Una vez generado las áreas, con la información relativa de las densidades de población en Habitantes por Hectárea (hab/ha) y dotaciones, en litros por segundo (l/s), se procede al cálculo y asignación de las demandas para los nudos (Piña, Medina & Mora, 2012). La estimación de la demanda en cada nudo, se realiza utilizando la siguiente ecuación:

$$Q = qi * Ai \quad (9)$$

Donde “ $qi$ ” es el factor de consumo dado por área de uso, calculado como el producto de la dotación y la densidad, cuyas unidades son l/s/Ha, “ $Ai$ ” es la superficie del área de uso con respecto al área servida por el nudo y “ $Q$ ” es la demanda total esperada por el nudo.

La dotación de la zona es un dato conocido, la densidad poblacional se obtiene mediante la relación entre la población (377 hab) y el área de la zona (3,68 Ha), cuyo valor resultante es de 102,45 hab/Ha.

Finalmente, se obtiene la demanda base asociada a cada nudo del modelo hidráulico cuyos resultados están indicados en la Tabla 5. Se debe hacer notar que el valor que se ingresa inicialmente al modelo es la demanda sin considerar el caudal de las pérdidas de agua.

**Tabla 5: Demanda de consumo para los nudos del modelo.**

N°	Id. Nudo	Área (m2)	Área (Ha)	Demanda sin fuga l/s
1	nu1	795,4477	0,0795	0,017
2	nu6	2018,4812	0,2018	0,043
3	nu7	1337,0658	0,1337	0,029
4	nu10	1301,0025	0,1301	0,028
5	nu12	545,0172	0,0545	0,006
6	nu13			0,006
7	nu15	762,5958	0,0763	0,016
8	nu19	802,7615	0,0803	0,017
9	nu20	287,0214	0,0287	0,006
10	nu21	267,8729	0,0268	0,006
11	nu22	672,5635	0,0673	0,014
12	nu25	601,8455	0,0602	0,013
13	nu26	743,5485	0,0744	0,016
14	nu28	501,8658	0,0502	0,011



N°	Id. Nudo	Área (m <sup>2</sup> )	Área (Ha )	Demanda sin fuga l/s
15	nu29	839,7347	0,0840	0,018
16	nu30	1945,7114	0,1946	0,042
17	nu32	1683,0935	0,1683	0,036
18	nu37	755,4551	0,0755	0,016
19	nu38	2347,1197	0,2347	0,050
20	nu41	1294,613	0,1295	0,028
21	nu44	1622,9197	0,1623	0,035
22	nu47	1012,7176	0,1013	0,022
23	nu48	1670,9075	0,1671	0,036
24	nu49	1372,5012	0,1373	0,030
25	nu50	1568,6058	0,1569	0,034
26	nu51	989,9468	0,0990	0,021
27	nu53	1213,0541	0,1213	0,026
28	nu54	1106,6536	0,1107	0,024
29	nu55	742,1391	0,0742	0,016
30	nu56	291,2353	0,0291	0,006
31	nu57	485,3902	0,0485	0,010
32	nu58	1014,4366	0,1014	0,022
33	nu60	2507,7026	0,2508	0,054
34	nu61	1706,2108	0,1706	0,037
	<b>Total</b>	<b>36807,2376</b>	<b>3,68</b>	<b>0,79</b>

Fuente: Elaboración propia.

Las longitudes de las tuberías se definieron de acuerdo al plano de la red del archivo AutoCAD. En la Tabla 6 se indica los valores de cotas de nudos de la red y longitudes de tuberías. El cálculo respectivo de las pérdidas de energía por fricción ( $h_f$ ) se realizó utilizando la expresión de Hazen Williams, cuyo coeficiente de rugosidad C es de 150 para tuberías PVC, valor tomado del catálogo “Tuberías y Accesorios de PVC y PE BD” de Plastigama.

**Tabla 6: Cotras de nudos y longitudes de tuberías de la red.**

N°	Nudo	Cota	Tubería	Longitud
	ID	m	ID	m
1	nu1	2510,5	tb3	80,9156
2	nu6	2527	tb4	19,5695
3	nu7	2528	tb5	29,7849
4	nu10	2529	tb6	30,221
5	nu12	2530	tb7	3,7779
6	nu13	2530,5	tb8	30,0889
7	nu15	2531	tb9	53,8552



N°	Nudo	Cota	Tubería	Longitud
	ID	m	ID	m
8	nu19	2532	tb10	23,3801
9	nu20	2532	tb11	36,01
10	nu21	2532	tb12	9,346
11	nu22	2532	tb13	55,6657
12	nu25	2533	tb14	25,9775
13	nu26	2533	tb15	5,758
14	nu28	2533	tb16	38,0192
15	nu29	2539	tb17	33,1238
16	nu30	2532	tb18	19,9429
17	nu32	2544	tb19	19,8745
18	nu37	2541	tb20	58,7638
19	nu38	2544	tb21	5
20	nu41	2542	tb22	86,8804
21	nu44	2542	tb23	10,91
22	nu47	2526	tb24	58,8228
23	nu48	2522	tb25	31,4544
24	nu49	2530,5	tb26	79,6989
25	nu50	2528	tb27	12,6522
26	nu51	2529	tb28	18,237
27	nu53	2529	tb29	9,217
28	nu54	2539	tb30	24,937
29	nu55	2550	tb31	42,9518
30	nu56	2539	tb32	9,724
31	nu57	2541	tb33	32,3814
32	nu58	2542	tb34	47,6365
33	nu60	2546	tb35	42,7881
34	nu61	2550	tb36	9,339
35			tb37	44,6165
36			tb38	46,97
37			tb39	30,35
			<b>Total</b>	<b>1218,642</b>

Fuente: Elaboración propia.

Las válvulas de compuerta se modelizan en EPANET como válvulas reguladoras por estrangulación (TCV). El coeficiente de pérdidas menores para una válvula de compuerta totalmente abierta es de 0,2, valor tomado del Manual de EPANET de Rossman (2017).

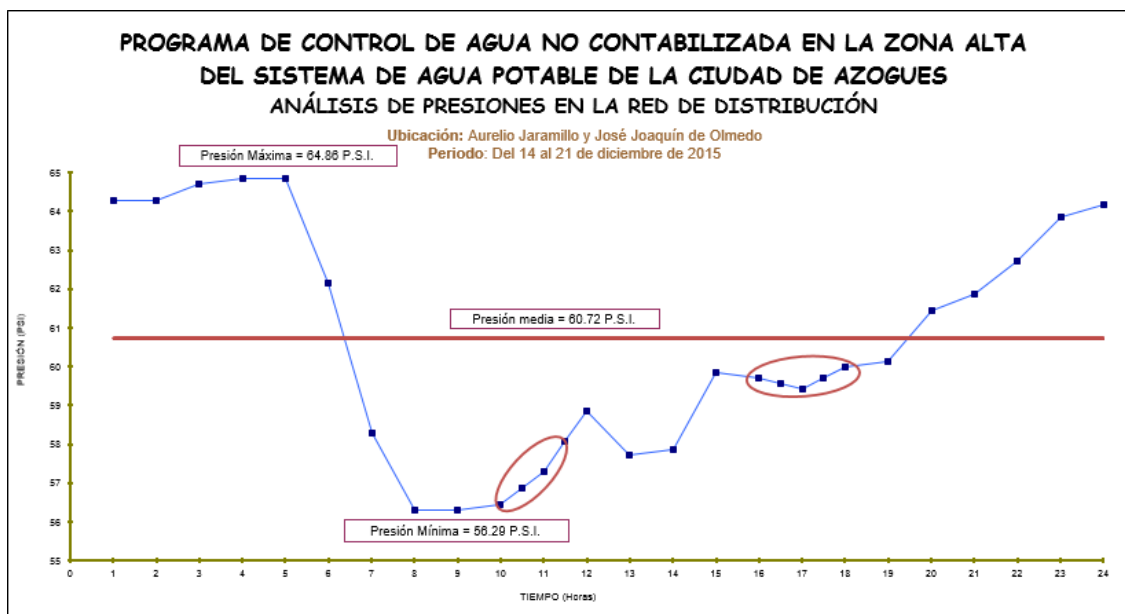
Las válvulas reductoras de presión se modelizan como válvulas (PRV), ya que estas cumplen con el objetivo de limitar la presión aguas abajo. El valor de consigna

para estas válvulas es de 37 mca, presión observada en los nudos iniciales de la red. Con este valor medido se regula la presión del sistema.

### 3.3 MEDICIONES DE PRESIÓN

La calibración del modelo y la estimación de fugas se realizaron en base a presiones medidas en puntos establecidos de la red en estudio. Las medidas se efectuaron en dos ocasiones, la primera dentro de un horario de 10H30 hasta las 11H30 el día 27 de abril del 2018, la segunda el día 06 de Agosto del 2018 en horario de 16H00 a 18H00, todos estos registros se realizaron con el manómetro de presión.

Las presiones observadas en campo fueron relacionadas con la gráfica del registro de presiones del sector, determinadas en el año 2015 por parte de la empresa EMAPAL. En este registro se obtiene una presión mínima de 52 PSI, una máxima de 66 PSI y una presión media de 60,72 PSI. En la Figura 8 se observa la gráfica de registro de presiones durante 24 horas tomadas en el año 2015.



**Figura 8: Registro de la variación de presiones en el Subsector ZA-11**  
Fuente: EMAPAL EP.

De acuerdo al periodo de tiempo en las que se realizó las observaciones de campo, datos marcados en la figura 8, se determina que los valores observados

corresponden a presiones por debajo de la media, esto a su vez indica consumos máximos en el instante de las mediciones.

La simulación del modelo se realiza con un análisis hidráulico en régimen permanente, es decir que los parámetros hidráulicos no varían con el tiempo. Para la modelización se trabaja con valores de consumos medios, de ahí que es necesario estimar presiones medias a partir de las presiones mínimas observadas en campo. La relación que se utiliza para la estimación de la presión media para el modelo se presenta a continuación, considerando que la presión media en el registro es de 60,72 PSI.

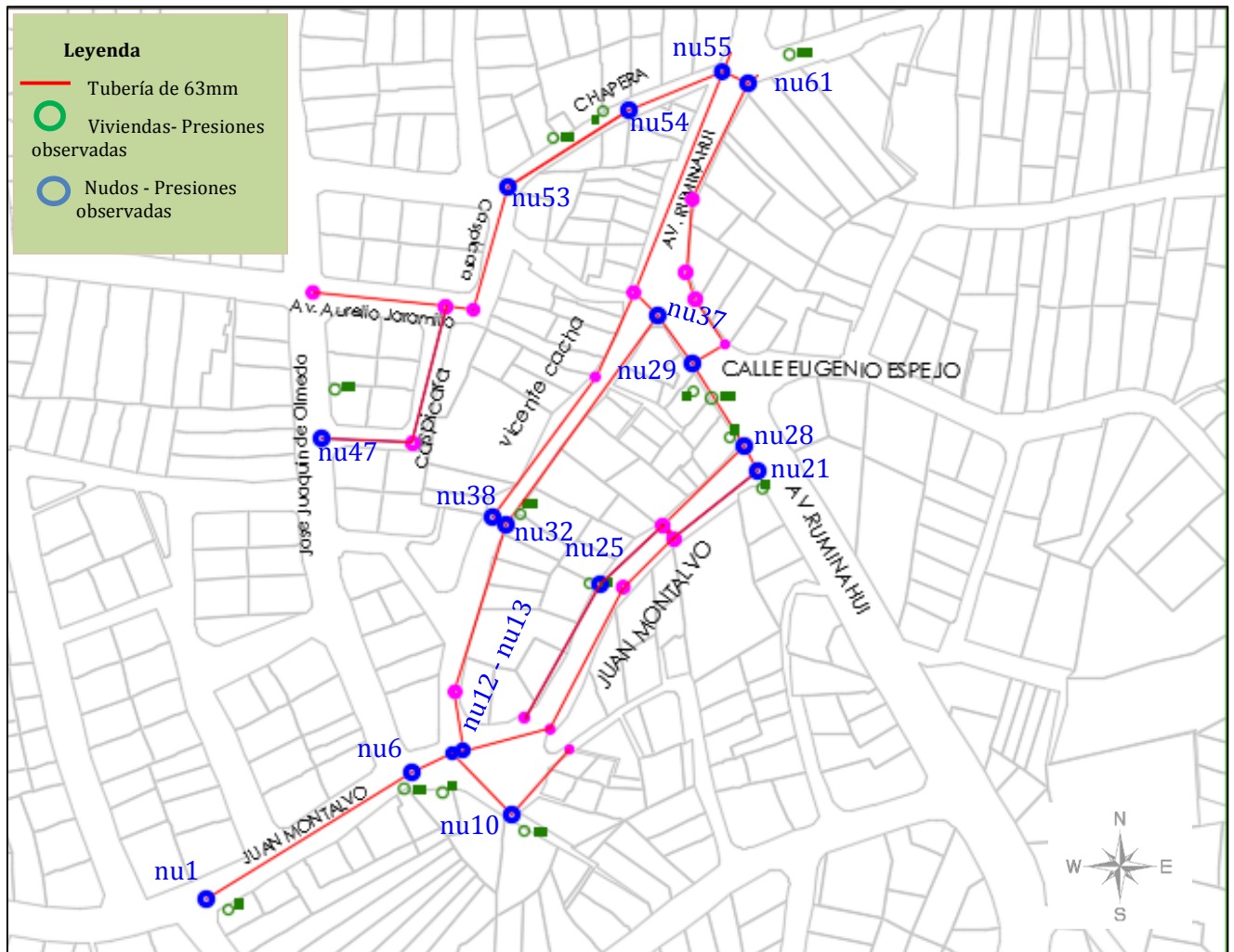
$$P. media modelo = \frac{P. media en el registro}{P. en el registro} * P. observada \quad (10)$$

En la Tabla 7 se muestra las presiones observadas en campo, las presiones medias estimadas del modelo y el nudo al que pertenece cada observación. En la Figura 9 se observa la ubicación de los puntos de presión medida.

**Tabla 7: Datos de presiones medidas.**

Fecha de observaciones	Id. Nudos	Presión observada (PSI)	Presión en el registro (PSI)	Presión media del modelo (PSI)	Presión media del modelo (mca)
27-abr-18 10H30 a 11H30	nu55	50	56,86	53	37,00
	nu61	50	56,86	53	37,00
	nu25	58	57,29	61	43,00
	nu10	70	57,29	74	54,00
	nu47	60	57,29	64	45,00
	nu53	65	58,08	68	51,00
	nu38	50	58,08	52	37,00
06-ago-18 16H00 a 18H00	nu54	80	59,57	82	54,00
	nu37	78	59,57	80	56,00
	nu29	85	59,43	87	59,00
	nu28	85	59,71	86	61,00
	nu21	90	59,71	92	64,00
	nu13	101	59,71	103	72,00
	nu12	101	59,71	103	72,00
	nu6	86	60	87	61,00
nu1	102	60	103	73,00	

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9: Puntos de medición de presiones.**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración de la red consiste en verificar que el modelo esté funcionando correctamente de acuerdo a la realidad. Para esto se comprobó la validez de los datos de entrada y de salida del modelo.

Ormsbee (1989) propone que para calibrar modelos hidráulicos se considera el error relativo porcentual entre los valores simulados y observados. Este criterio se considera para evaluar la validez de los datos mencionados anteriormente. La expresión del error relativo es la siguiente:



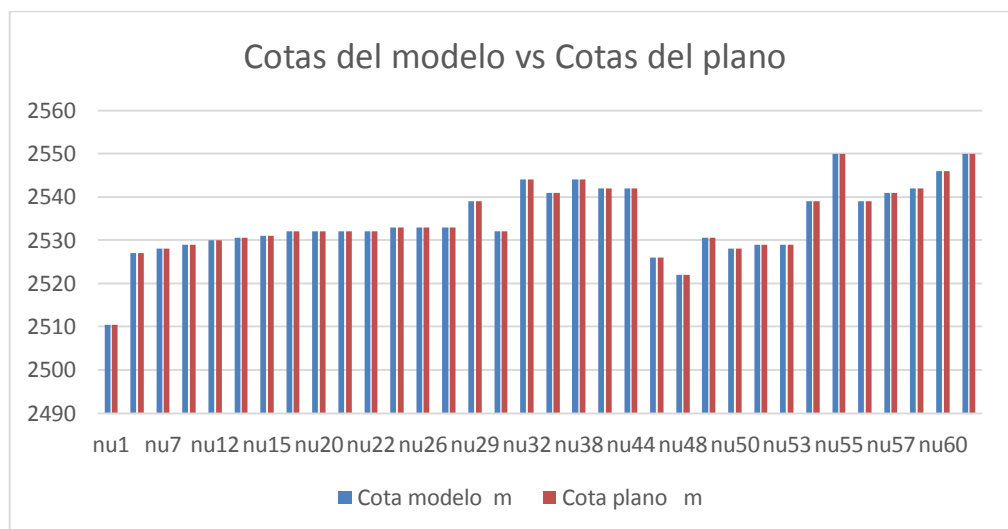


$$Error\ relativo = \left[ \frac{Si - Oi}{Oi} \right] * 100 \quad (11)$$

Donde  $Si$ =valores simulados,  $Oi$  =valores observados. Boulos y Ormsbee (1991) proponen una precisión de los resultados del modelo con respecto a valores medidos de  $\pm 5\%$ , valor que se considera para valorar la bondad de ajuste.

### 3.4.1 Verificación de la validez de los datos de entrada.

Para comprobar que se ingresó correctamente las cotas de los nudos al modelo, se utilizó la fórmula del error relativo porcentual entre las cotas ingresadas al modelo y las cotas indicadas en el plano, cuyo resultado es de 0% para todos los nudos. Estos resultados indican que los valores mencionados son iguales, por lo tanto es válido el ingreso de los valores de cotas en el modelo. La gráfica comparativa entre cotas del modelo y del plano se observa en la Figura 10.

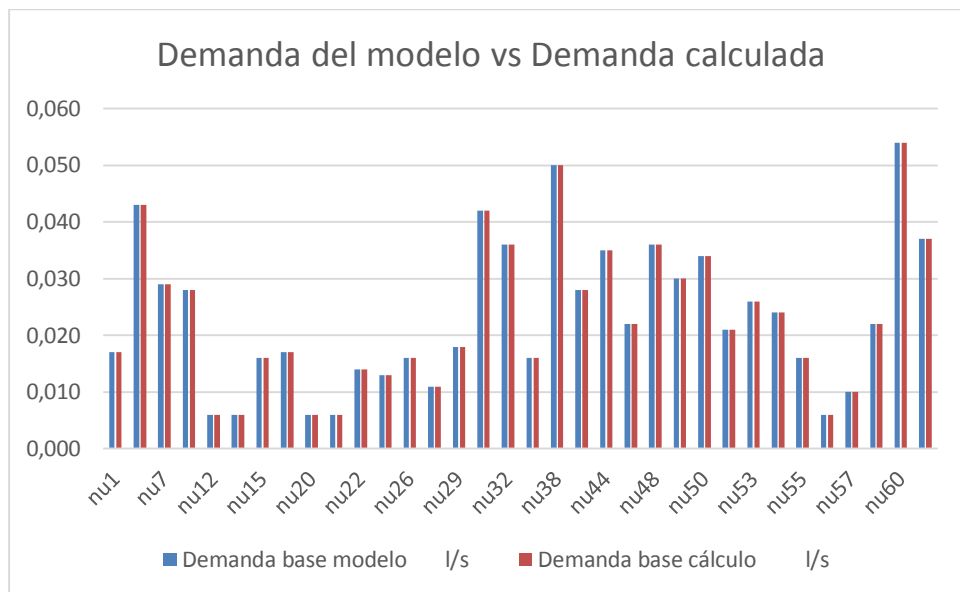


**Figura 10: Gráfica comparativa de las cotas de los nudos del modelo y del plano.**

Fuente: Elaboración propia

De igual manera se comparó los valores de la demanda del modelo y la demanda de la tabla de cálculo, obteniendo un error relativo de 0% para todos los nudos. Estos resultados indican que los valores mencionados son iguales, dando por válido el ingreso de la demanda en los nudos del modelo. La gráfica comparativa entre demanda del modelo y del cálculo se observa en la Figura 11.



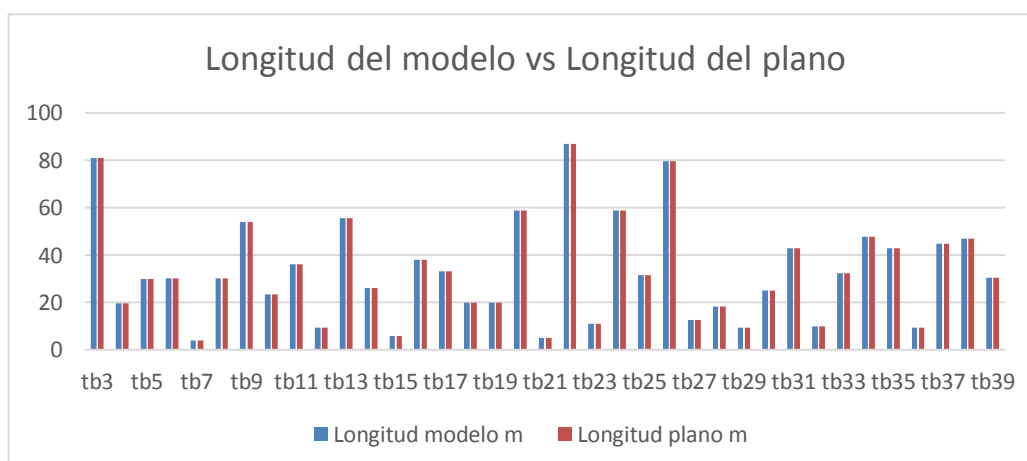


**Figura 11: Gráfica comparativa de la demanda del modelo y la demanda calculada.**

Fuente: Elaboración propia

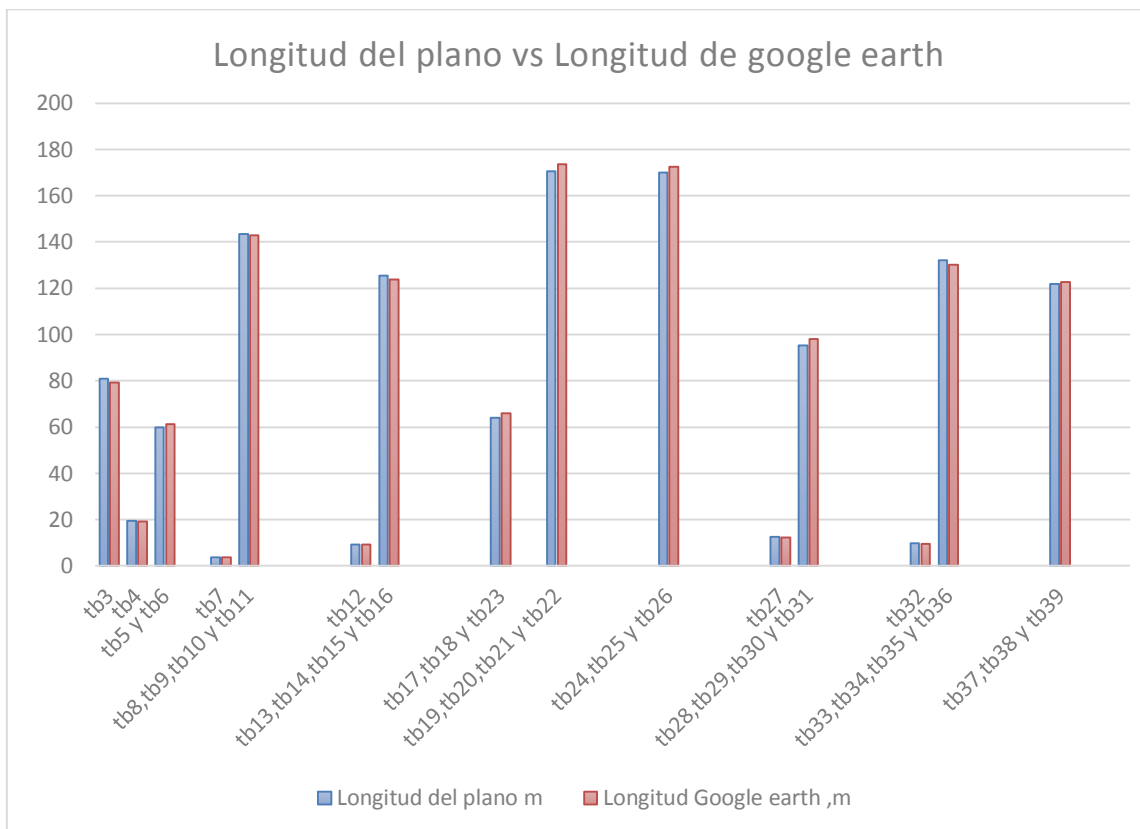
El error relativo entre las longitudes de las tuberías del modelo, y las longitudes establecidas en el plano es de 0 % para todos los casos. El error relativo promedio entre las longitudes de tuberías en el plano y las longitudes de tuberías medidas en el mapa de Google Earth es de 1,69%, valor aceptable con respecto al criterio de la bondad de ajuste ( $\pm 5\%$ ).

Estos resultados indican que es válido el ingreso de las longitudes de tuberías en el modelo, y que las longitudes en el plano son correctos acorde a la realidad de la red. Las gráficas de comparación entre longitudes de tuberías del modelo, del plano y del mapa de Google Earth se observa en la Figura 12 y Figura 13.



**Figura 12: Gráfica comparativa de las longitudes del modelo y las longitudes del plano.**

Fuente: Elaboración propia



**Figura 13: Gráfica comparativa de las longitudes del plano y las longitudes del mapa de Google Earth.**

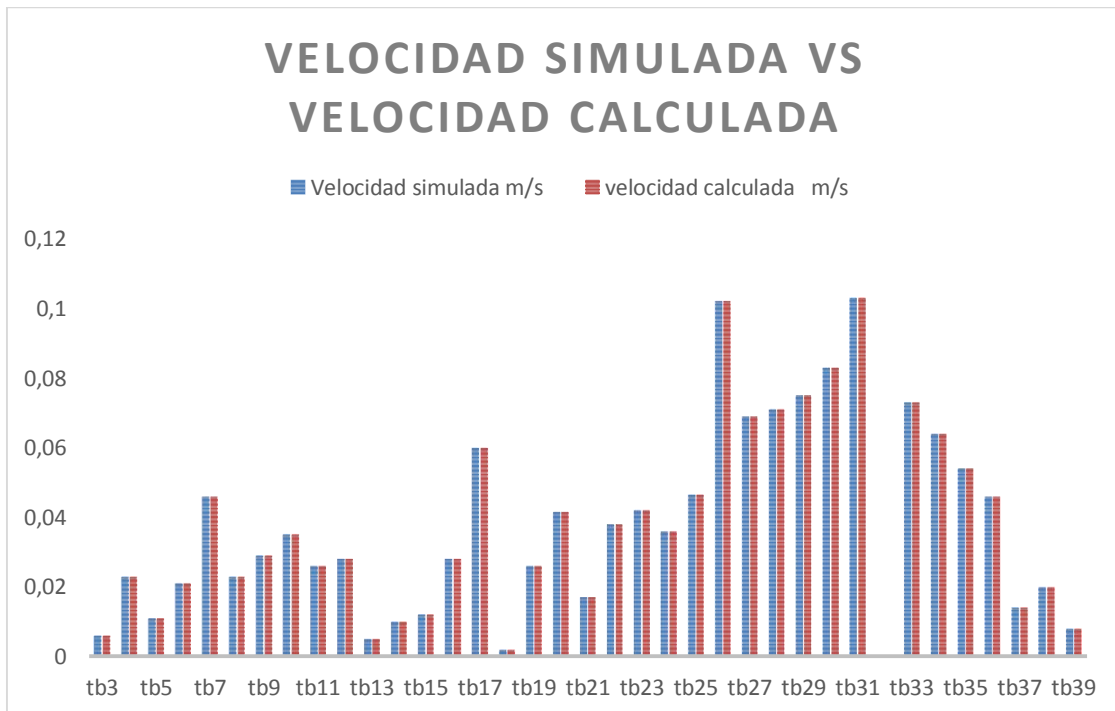
Fuente: Elaboración propia

### 3.4.2 Verificación de la validez de los resultados del modelo.

Para comprobar que los resultados de la simulación son correctos, se realiza una primera simulación de la red en régimen permanente, denominada simulación 0. Los resultados para verificación son los caudales, velocidades y presiones.

Con los caudales obtenidos por simulación y con la ecuación de la velocidad media (ecuación 8) se calcula la velocidad del agua que pasa por las tuberías. Para comprobar que los resultados de velocidad en la simulación sean correctos, se compara estas velocidades con las velocidades calculadas manualmente.

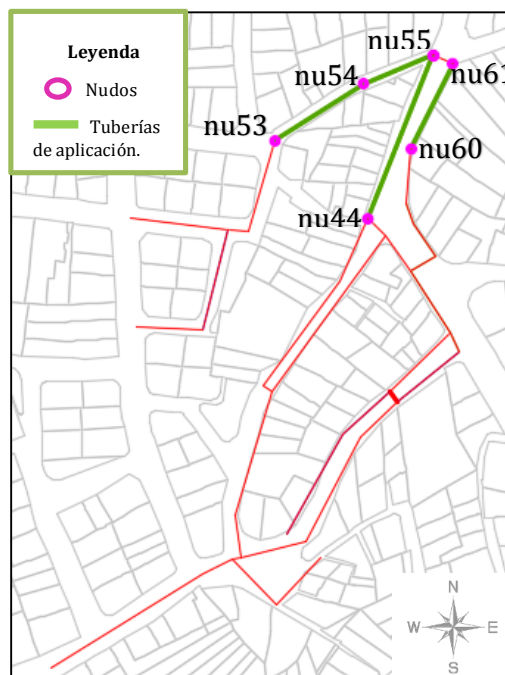
El error relativo entre los valores mencionados es de 0 % para todas las tuberías, indicando que las velocidades calculadas son iguales a las velocidades simuladas. Por lo tanto son válidos los valores de velocidades simuladas del modelo. La gráfica comparativa entre velocidad calculada y simulada se observa en la Figura 14.



**Figura 14: Gráfica de comparación de velocidades simuladas y velocidades calculadas.**

Fuente: Elaboración propia

El cálculo manual de las presiones se efectúa mediante la aplicación de la ecuación de energía, en determinados tramos de la red. La primera aplicación de esta ecuación se desarrolla en las tuberías que están esquematizadas en la Figura 15.



**Figura 15: Esquema de la red para la primera aplicación de la ecuación de energía.**

Fuente: Elaboración propia

Para la aplicación de la ecuación de energía (ecuación 2), se tiene como datos conocidos la carga de presión en la sección de entrada, la carga de posición y de velocidad en la sección de entrada y salida. Lo que se busca es calcular la carga de presión en la sección de salida (nu54, nu53, nu44, nu60), aquí no se considera la carga de velocidad ya que la velocidad de entrada es igual al de salida en la tubería.

Para el cálculo de la pérdida de energía por fricción ( $h_f$ ) entre la sección 1 y 2 se utiliza la expresión de Hazen Williams (ecuación 6), y las pérdidas locales ( $h_L$ ) generadas por las válvulas se calculan mediante la ecuación general (ecuación 7). La ecuación de Hazen Williams requiere de datos como la longitud, diámetro, coeficiente de rugosidad de la tubería y caudal de agua que pasa por dicha tubería, cuyos valores son conocidos.

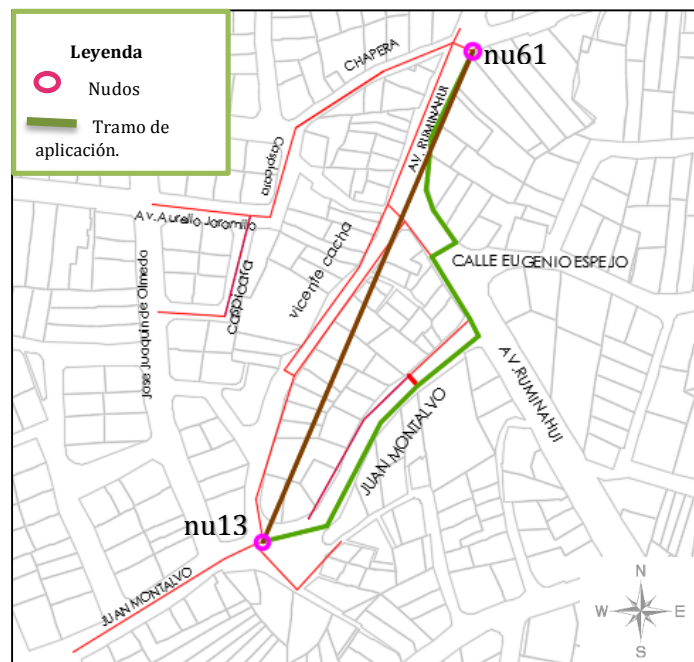
Las presiones calculadas se comparan con las presiones simuladas de los nudos mencionados, dando un error relativo de 0% en todos los casos. Con esto se demuestra que los resultados del modelo en cuanto a presiones son correctas. En la tabla 8 se aprecia el cálculo de las presiones y su error relativo con respecto a las presiones simuladas.

**Tabla 8: Cálculo de presiones para la primera aplicación de la ecuación de energía.**

Tubería tb33				Tubería tb26			
Entrada (nu55)		Salida (nu54)		Entrada (nu55)		Salida (nu44)	
z1 (m)=	2550	z2 (m)=	2539	z1 (m)=	2550	z2 (m)=	2542
p1 (m) =	37,000	p2 calculada (mca)=	47,996	p1 (m)=	37	p2 calculada (mca)=	44,980
L (m)=	32,3814	p2 simulada (mca)=	47,996	L (m)=	79,6989	p2 simulada (mca)=	44,980
D (m)=	0,0582	Error relativo %	0	D (m)=	0,0582	Error relativo %	0
C =	150	Condición	aceptable	C =	150	Condición	aceptable
Q (m3/s)=	0,000193			Q (m3/s)=	0,000271		
hf calculada (m)=	0,0044			hf calculada (m)=	0,0203		
hl calculada (m)=	0,000054			hl calculada (m) =	0		
Tubería tb31				Tubería tb34			
Entrada (nu61)		Salida (nu60)		Entrada (nu54)		Salida (nu53)	
z1 (m)=	2550	z2 (m)=	2546	z1 (m)=	2539	z2 (m)=	2529
p1 (m)=	37	p2 calculada (mca)=	40,989	p1 calculada (m)=	47,996	p2 calculada (m)=	57,991
L (m)=	42,9518	p2 simulada (mca)=	40,989	L (m)=	47,6365	p2 simulada (m)=	57,991
D (m)=	0,0582	Error relativo %	0	D (m)=	0,0582	Error relativo %	0
C =	150	Condición	aceptable	C =	150	Condición	aceptable
Q (m3/s)=	0,000275			Q (m3/s)=	0,000169		
hf calculada (m)=	0,0112			hf calculada (m)=	0,0051		
hl calculada (m) =	0			hl calculada (m) =	0,000042		

Fuente: Elaboración propia

La segunda aplicación de la ecuación de energía, se desarrolla en el tramo de tubería limitada por el nudo nu61 y nu13 del modelo, como se indica en la Figura 16. Lo que se busca es calcular la carga de presión en la sección de salida (nu13). Para esto se reemplaza los tramos de tuberías por una sola tubería equivalente de igual diámetro y coeficiente de rugosidad, la longitud equivalente es la suma de todas las tuberías que conforma el tramo, aquí de igual manera no se considera la carga de velocidad porque sus valores son iguales a la entrada y salida de la tubería.



**Figura 16: Esquema de la red para la segunda aplicación de la ecuación de energía.**

Fuente: Elaboración propia

La comparación entre la presión calculada y presión simulada en el nudo “nu13”, da un error relativo de 0,087%, indicando que la presión simulada en ese nudo es correcto. En la tabla 9 se exhibe el cálculo de la presión y su error relativo con respecto a la presión simulada.



**Tabla 9: Cálculo de la presión para la segunda aplicación de la ecuación de energía.**

nu61-nu13		
z1 (nu61)=	2550	m
z2 (nu13)=	2530,5	m
p1 (nu61)=	37,000	m
Ltotal tramo =	293,799	m
Diámetro =	0,0582	m
Q simulado (tb31)=	0,000275	m <sup>3</sup> /s
hf calculada	0,0768	m
hl calculada	0,000000	m
p2 calculada (nu13)=	56,423	m
p2 simulada (nu13)=	56,472	m
Error relativo porcentual %	0,087	aceptable

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.3 Comparación de presiones observadas y simuladas.

Una vez comprobado que los datos de entrada y de salida de la modelización son correctos, se verifica que el modelo hidráulico de la red reproduzca la realidad del sistema, esto se hace mediante la comparación entre presiones observadas y simuladas de la red. La tabla 10 presenta el error medio absoluto y el error cuadrático medio entre las presiones simuladas y observadas, obtenida en el reporte de calibración de EPANET, además se incluye el error relativo.

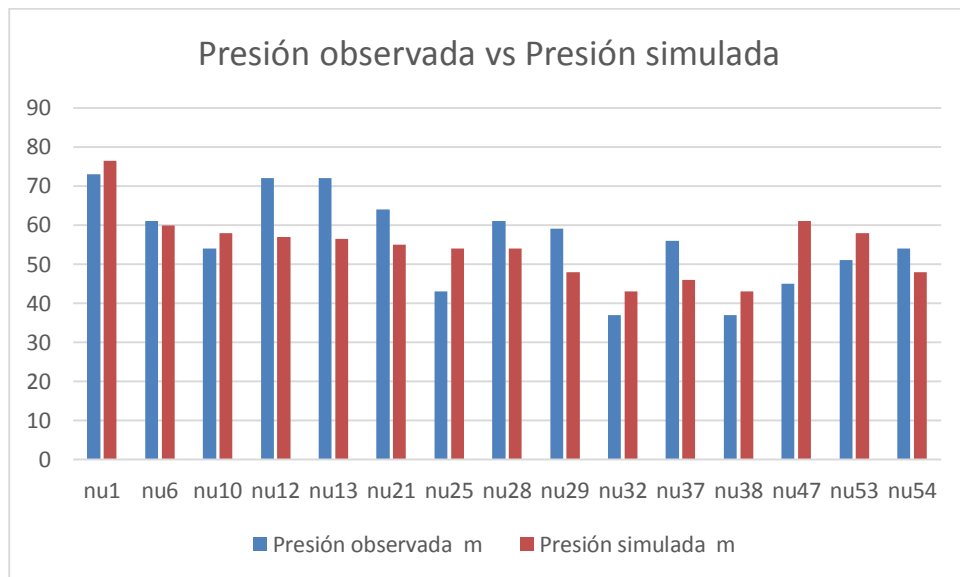
**Tabla 10: Desviaciones entre valores observados y simulados de presión.**

Nudo	Presión observada	Presión simulada	Error medio absoluto	Error cuadrático medio	Error relativo
ID	m	m	M		%
nu1	73	76,472	3,472	3,472	4,756
nu6	61	59,972	1,028	1,028	1,685
nu10	54	57,972	3,972	3,972	7,356
nu12	72	56,973	15,027	15,027	20,871
nu13	72	56,473	15,527	15,527	21,565
nu21	64	54,975	9,025	9,025	14,102
nu25	43	53,975	10,975	10,975	25,523
nu28	61	53,976	7,024	7,024	11,515
nu29	59	47,979	11,021	11,021	18,680
nu32	37	42,976	5,976	5,976	16,151
nu37	56	45,979	10,021	10,021	17,895
nu38	37	42,976	5,976	5,976	16,151
nu47	45	60,986	15,986	15,986	35,524
nu53	51	57,991	6,991	6,991	13,708
nu54	54	47,996	6,004	6,004	11,119
			<b>8,535</b>	<b>9,594</b>	<b>15,773</b>

Fuente: Elaboración propia



En la Figuras 17 se puede ver la gráfica comparativa entre presiones simuladas y observadas para la simulación 0. En la gráfica se refleja que no existen diferencias grandes entre las presiones observadas y simuladas, teniendo así que el máximo error absoluto es de 15 mca. Con este criterio se deduce que el modelo está reproduciendo valores semejantes a la realidad de la red, por lo tanto se da por calibrado el modelo hidráulico.



**Figura 17: Gráfico 1 de comparación entre presiones simuladas y observadas (simulación 0).**

Fuente: Elaboración propia



# CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE FUGAS

---

## 4.1 METODOLOGÍA DE LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE FUGA

Para la estimación del caudal de fuga se aplica una metodología práctica, que requiere de mediciones disponibles de caudal o presión. “El método consiste en estimar un coeficiente emisor de fugas en cada nudo del modelo, a partir de un emisor global de fugas, y representar las pérdidas de carga en la red de distribución” (Molina, 2014, p.51). La metodología expuesta radica. “En un proceso iterativo para el ajuste de los emisores de fugas asignados a los nudos del modelo” (Molina, 2014, p.51).

El método requiere de los siguientes supuestos de partida: “Demanda base correspondiente al volumen consumido por los usuarios, asumiendo un único patrón de consumo; el volumen no facturado asociado a consumos no registrados; el coeficiente de rugosidad de las tuberías no estará incluido en el proceso de estimación de fuga propuesto, y se asumirá las rugosidades de las tuberías constante para toda la red de distribución, y la posibilidad de realizar agrupaciones de tuberías” (Molina, 2014, p.51).

## 4.2 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

Las fugas son tratadas como una demanda que depende de la presión. El método para modelizar las fugas se fundamenta en: “Utilizar la ecuación de emisores de flujo, para simular el caudal de fuga a través de un orificio” (Rondán, 2016, p.46).



La ecuación es la siguiente:

$$Q_F = K (P^N) \quad (12)$$

Donde: “ $K$  = coeficiente emisor de fuga, depende de la forma y del tamaño del orificio de la fuga,  $P$  = presión,  $N$  es el exponente de fugas y  $Q_F$  = caudal de fuga” (Rondán, 2016, p.46).

“Walski et al (2009) realiza ensayos en tuberías plásticas entre 25 y 150 mm de diámetro, simulando fugas a través orificios circulares, y fisuras tanto longitudinales como transversales. Definiendo que el valor medio del exponente de fugas es 0.58” (Rondán, 2016, p.45).

“Tabesh et al (2009) propone, determinar el caudal de fuga, mediante un coeficiente emisor global de fugas que utiliza el valor del caudal de fugas estimado en el instante de caudal mínimo nocturno” (Rondán, 2016, p.49). La ecuación es la siguiente:

$$Q_{F,i} = \sum_{j=1}^{Np} \frac{L_{ij}}{2} C_F P_i^N \quad (13)$$

Donde: “ $Q_{F,i}$  es el caudal de fugas en el nudo  $i$  para todo instante,  $Np$  es el número de tuberías conectadas al nudo  $i$ ,  $L_{ij}$  es la longitud de la tubería  $j$  conectada al nudo  $i$ ,  $C_F$  es el coeficiente global de fugas,  $P_i$  es la presión en el nudo  $i$ ,  $N$  es el exponente de fugas” (Rondán, 2016, p.49).

“El caudal de fugas en el instante del caudal mínimo nocturno ( $Q_{F,CMN}$ ) se determina a partir de la diferencia entre el caudal mínimo nocturno inyectado a la red de distribución ( $Q_{CMN}$ ) y el caudal asociado a usos legítimos durante el instante del caudal mínimo nocturno CMN ( $Q_{uso\_nocturno}$ )” (Rondán, 2016, p.49).

$$Q_{F,CMN} = Q_{CMN} - Q_{uso\_nocturno} \quad (14)$$

“La expresión anterior es equivalente al caudal medio de fugas  $Q_{ANR}$ , estimado a partir de la diferencia entre el caudal medio inyectado  $Q_{iny}$  y el caudal consumido por los usuarios  $Q_c$ ” (Molina, 2014, p.53).

$$Q_{ANR} = Q_{iny} - Q_c \quad (15)$$

La demanda total en cualquier nudo  $i$  es igual a la “sumatoria de la demanda de consumo y la demanda de fuga” (Molina, 2014, p.55); definida en la siguiente ecuación:

$$Q_T = q_C + q_F, \quad (16)$$

“Donde  $q_C$  es el caudal de consumo en el nudo  $i$ ,  $q_F$  es el caudal de fugas en el nudo  $i$ ,  $Q_T$  es la demanda total del nudo  $i$ ” (Molina, 2014, p.56).

Molina (2014) propone que, para la aproximación inicial del emisor global de fugas se considera las siguientes hipótesis:

- “El caudal medio total simulado ( $Q_T$ ) es equivalente al caudal medio inyectado ( $Q_{iny}$ )” (Molina, 2014, p.47).
- “El caudal consumido ( $Q_C$ ) es conocido” (Molina, 2014, p.47).
- “La presión promedio de la red para todos los instantes de tiempo  $t$  puede ser obtenida mediante simulación hidráulica” (Molina, 2014, p.47).

“El coeficiente global de fugas  $C_{e, global}$  depende del caudal medio de fugas estimado  $Q_{ANR}$  y de la presión promedio  $P$  para toda la red en todos los instantes de simulación” (Molina, 2014, p.57).

$$C_{e, global} = \frac{Q_{ANR}}{(P)^N} \quad (17)$$

En primera instancia se considera que “El emisor de fugas  $C_{ei}$  es igual para todos los nudos del modelo, por lo tanto se define un emisor global de fugas repartido equitativamente entre los nudos de fuga del modelo  $ND$ ” (Molina, 2014, p.56).

$$C_{ei} = \frac{C_{e, global}}{ND} \quad (18)$$

“El emisor de fugas de una iteración  $n$  es ajustado mediante un factor de corrección  $FC$ ” (Molina, 2014, p.58). El factor de corrección se calcula con la siguiente ecuación:

$$FC = \frac{Q_{ANR}}{Q_{F, sim}} \quad (19)$$



“Donde  $Q_{ANR}$  es el caudal teórico de fugas (caudal de agua no registrada) y  $Q_F$ , es el caudal medio de fugas obtenido mediante simulación. Este factor ajusta el valor del emisor global de fugas de la iteración anterior” (Molina, 2014, p.58); y está representada en la siguiente ecuación

$$C_{e,global}^n = FC \cdot C_{e,global}^{n-1} \quad (20)$$

“Este proceso se repite hasta que en dos iteraciones sucesivas el caudal medio de fugas simulado se aproxime al caudal medio de fugas teórico con un nivel de precisión previamente definido” (Molina, 2014, p.59). En este caso el nivel de precisión es del +- 5%.

$$\left[ \left( Q_{T,sim} - \sum_{i=1}^{ND} q_{db,i} \right) - Q_{ANR} \right] \leq \varepsilon \quad (21)$$

Donde  $Q_{T,sim}$  es el caudal medio total simulado,  $ND$  es el número de nudos de fuga en el modelo  $q_{db,i}$  es la demanda base en el nudo  $i$ ,  $Q_{ANR}$  es el caudal de fugas teórico,  $\varepsilon$  es el margen de error admisible en función del nivel de precisión deseado en el modelo. (Molina, 2014, p.59)

En segunda instancia el emisor de fugas  $C_{ei}$  es distinto para todos los nudos de fuga. En el modelo hidráulico cada nudo  $i$  de fuga tendrá asignado un emisor de fugas  $C_{ei}$  que dependerá del 50% de longitud de las tuberías conectadas al nudo  $i$ , y de un coeficiente de fuga por unidad de longitud de red. (Molina, 2014, p.62)

$$C_{e,i} = \beta_{K,j} \sum_{j=1}^{NT} \frac{L_{ij}}{2} \quad (22)$$

Donde  $\beta_{K,j}$  es el coeficiente de fuga por unidad de longitud de red para el sector  $k$  asignado a la tubería  $j$ ,  $L_{ij}$  es la longitud de tubería  $j$  conectada al nudo  $i$ , y  $NT$  es el número de tuberías conectadas al nudo  $i$ . (Molina, 2014, p.62)

“El valor del coeficiente de fuga  $\beta_K$ , se calcula multiplicando el emisor global de fugas calibrado por un factor de ponderación obtenido a partir de los resultados de pruebas de detección de fugas. El factor de ponderación para el sector  $k$  corresponderá al peso porcentual del indicador de fugas obtenido para el sector  $k$  respecto a la sumatoria de indicadores de fugas de cada sector definido en la red” (Molina, 2014, p.63).

$$\beta_K = \frac{W_K C_{e,global}}{L_K} \quad (23)$$

$$W_K = \frac{IF_K}{\sum_{k=1}^{NS} IF_K} \quad (24)$$

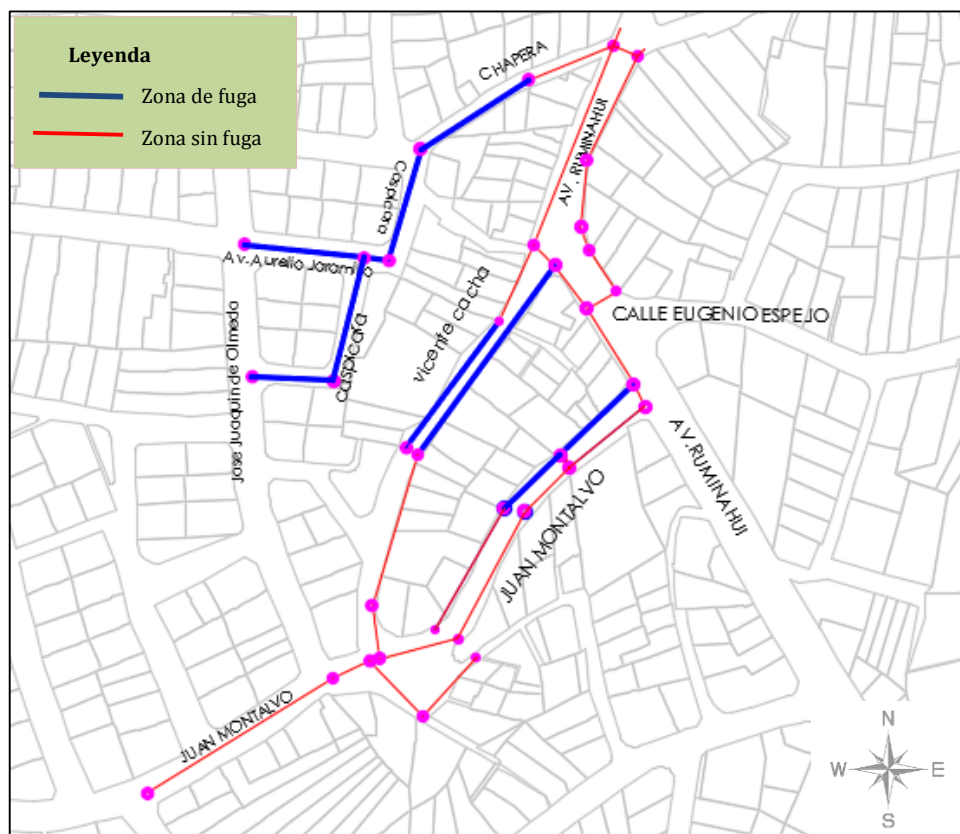
“Donde  $W_K$  es el factor de ponderación del emisor global de fugas para el sector  $k$ ,  $L_K$  es la longitud total de red existente en el sector  $k$ ,  $IF_K$  es el indicador de fugas para el sector  $k$ ,  $NS$  es el número de sectores definidos en la red de distribución” (Molina, 2014, p.63).

La estimación del indicador de fugas “se basa en el método de caudales nocturnos. Este método parte del supuesto que el caudal nocturno está compuesto por los usos nocturnos y las fugas en la red de distribución” (Molina, 2014, p.63). Debido a que no se cuenta con mediciones de caudales nocturnos dentro de la zona de estudio, se considera a todo esta zona como un solo sector, es decir  $NS=1$  por lo tanto el factor de ponderación  $Wk$  es igual a 1.

### 4.3 IDENTIFICACIÓN DE ZONAS PROBABLES DE FUGA

De la gráfica comparativa de presiones simuladas y observadas, se identifica que en los nudos 12, 13, 21, 28, 29, 37 y 54 las presiones observadas son mayores que los simulados (Figura 17), esto indica que en las zonas limitadas por estos nudos no existe pérdidas de agua, mientras que, en los nudos 25, 32, 38, 47 y 53 la presión observada es menor que la simulada (Figura 17), indicando la existencia de fugas en las zonas limitadas por estos nudos. Este criterio de análisis se considera debido a que la presencia de fugas hace que disminuya la presión.

Para estimar la localización de fugas, se aplica el caudal de fugas estimado en zonas donde la presión observada es menor que la simulada, de tal manera que las presiones simuladas disminuyan acercándose a la presión medida. En la Figura 18 se indica las zonas probables de fuga identificadas en la red de distribución.



**Figura 18: Zonas probables de fugas en la red de distribución.**  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.4 CÁLCULO DEL CAUDAL MEDIO DE FUGAS TEÓRICO $Q_{ANR}$

“El cálculo del caudal medio de fugas teórico  $Q_{ANR}$  se realiza a partir del balance hídrico técnico, mediante la diferencia entre el caudal medio inyectado a la red de distribución y el caudal consumido por los usuarios” (Molina, 2014, p.53).

Se conoce el caudal nocturno inyectado a la red de distribución del Subsector ZA-11, pero la metodología descrita para el caudal de fugas, requiere de la medición del caudal medio inyectado a la red  $Q_{iny}$ , por lo que se estima este valor a partir del caudal mínimo nocturno. La estimación se efectúa relacionando los caudales inyectados al Subsector ZA-11 con los caudales inyectados al tanque de



abastecimiento de la Zona Alta (Figura 19), esto es, debido a que la red de distribución del subsector forma parte del sistema de distribución de la Zona Alta.

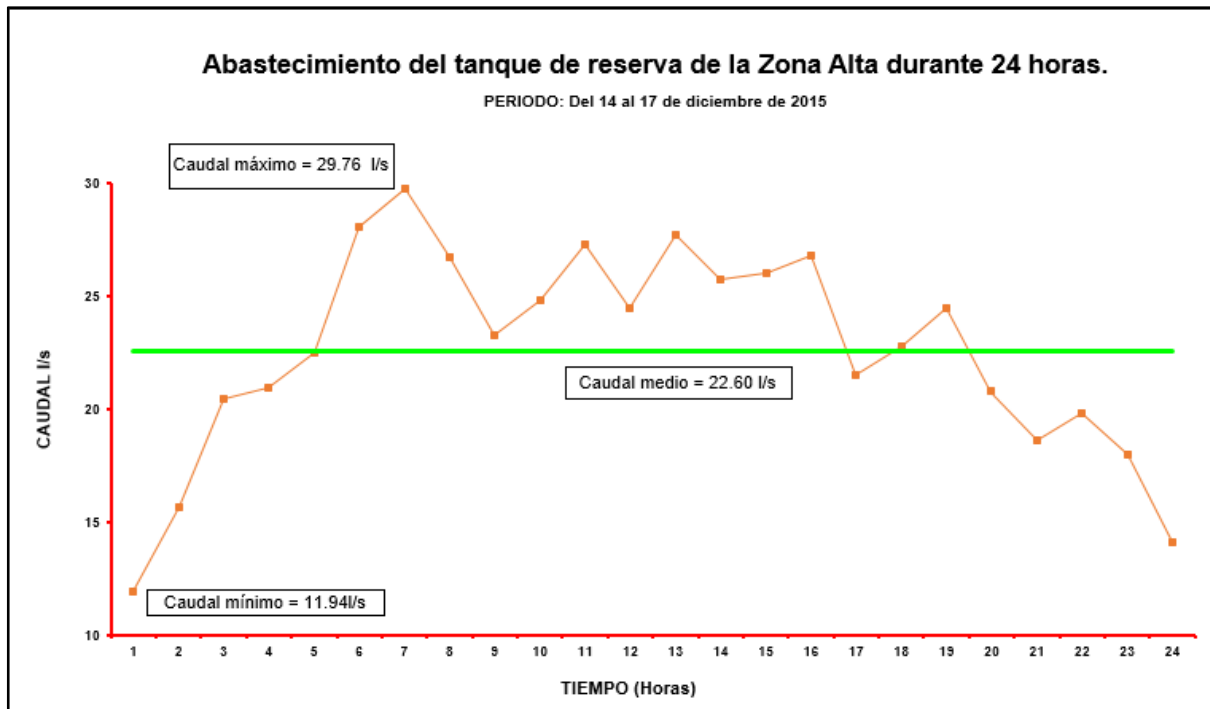


Figura 19: Gráfica de abastecimiento del tanque de reserva de la Zona Alta.

Fuente: EMAPAL

De la gráfica de abastecimiento del tanque de reserva de la Zona Alta (Figura 20) se obtiene el factor de relación entre el caudal medio y mínimo siendo de 1,89, este valor se multiplica para el caudal mínimo nocturno inyectado del subsector (2 l/s), obteniendo el caudal medio inyectado de 3,79 l/s. A partir de la ecuación 15 se estima el caudal medio teórico de fugas, cuyo resultado es de 3 l/s.

## 4.5 DESARROLLO DE ESCENARIOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL CAUDAL Y LOCALIZACIÓN DE FUGAS.

### 4.5.1 Escenario 1

Para el primer escenario de estimación de fugas, se adiciona nudos intermedios en todas las tuberías de las zonas de fuga identificadas anteriormente. Es decir se estima o se aproxima en primera instancia que las fugas están a la mitad de la longitud de las tuberías.



1. Se procede a la estimación inicial del emisor global de fugas, la misma que dependerá de la presión promedio obtenida de la simulación 0 y el caudal teórico de fugas calculado anteriormente. Al distribuir equitativamente este valor se obtiene el coeficiente emisor  $C_e$  para los nudos de fuga. Con esto se realiza la primera simulación que corresponde a la **iteración 1**. En esta iteración se compara el caudal teórico de fugas  $Q_{ANR}$  con el caudal de fugas simulado  $Q_F$  para evaluar la precisión de la misma (Molina, 2014), cuyo error absoluto entre estos valores deber ser igual a 0.
2. Si no cumple con el criterio anterior, se utiliza el factor de corrección para ajustar el coeficiente emisor global de fugas. Con esto se realiza una nueva simulación correspondiente a la **iteración 2** y se repite el proceso hasta que el caudal medio de fugas simulado sea igual al caudal medio de fugas teórico (Molina, 2014).
3. Una vez ajustado el coeficiente emisor global se distribuye espacialmente este valor entre los nudos de fuga. La distribución se hace “En función del coeficiente de fuga por unidad de longitud de tuberías” (Molina, 2014, p.65). Se realiza una nueva simulación correspondiente a la **iteración 3**, en esta iteración se evalúa la precisión del caudal de fugas simulado (Molina, 2014).
4. Se repite el paso 2

La igualdad del caudal de fugas teórico y simulado se cumplió en la iteración 5. Los resultados de estos caudales ajustados para los primeros 10 nudos de fuga probables se presenta en la Tabla 11, y en la Figura 20 se aprecia la simulación del escenario 1.



Tabla 11: Caudal de fuga para el escenario 1.

#	Nudo ID	Caudal de fuga (qf) l/s
1	fuga1	0,34
2	fuga2	0,32
3	fuga3	0,07
4	fuga4	0,35
5	fuga5	0,23
6	fuga6	0,34
7	fuga7	0,36
8	fuga8	0,55
9	fuga9	0,27
10	fuga10	0,18
	<b>Qfuga simulado</b>	<b>3,00</b>

Fuente: Elaboración propia

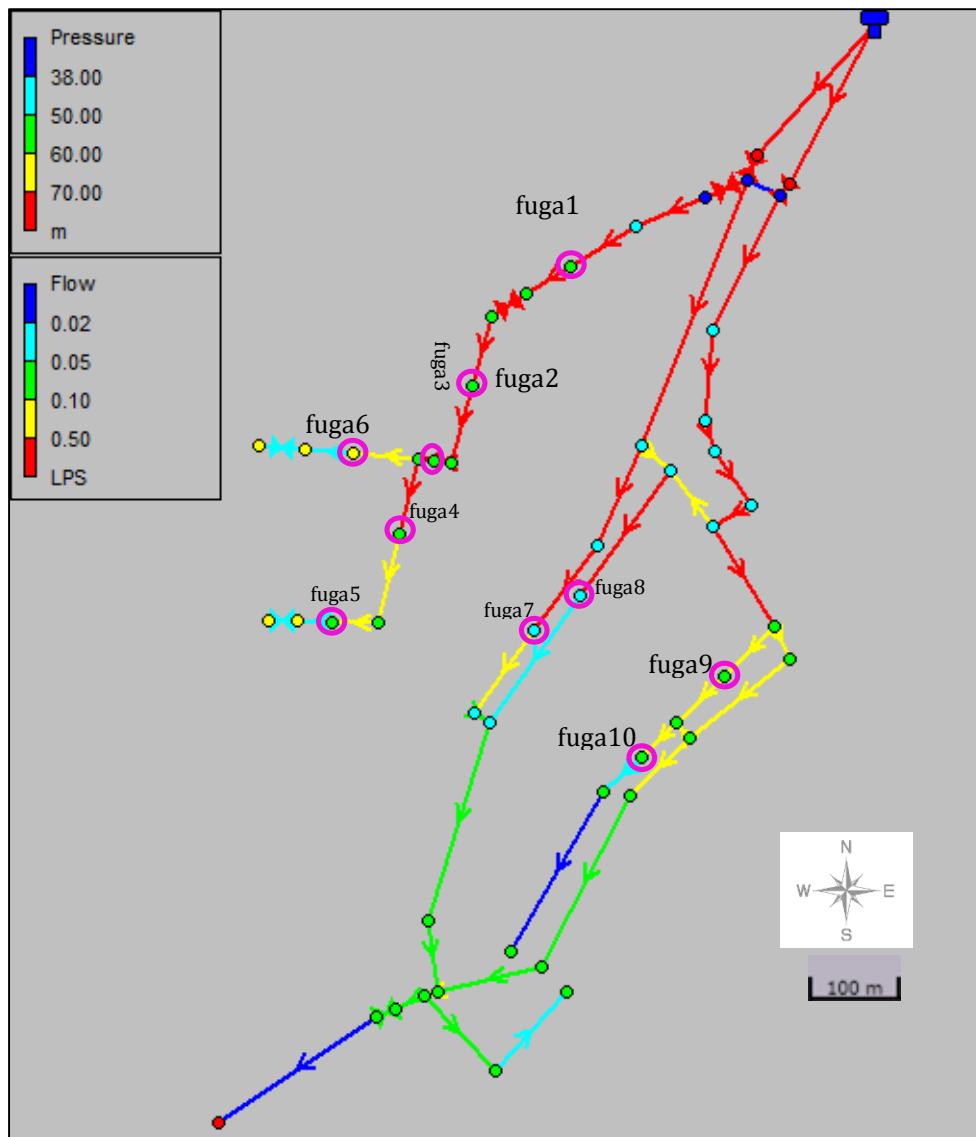


Figura 20: Simulación de los puntos de fuga para el Escenario 1.

Fuente: Elaboración propia



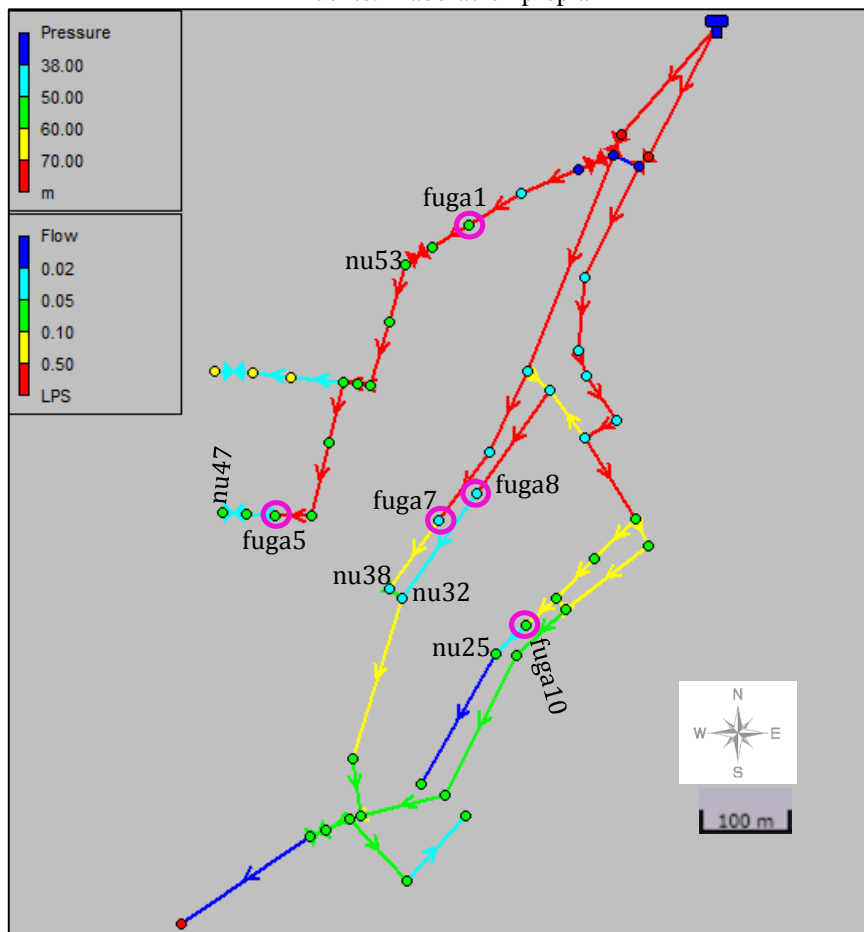
#### 4.5.2 Escenario 2

Para el segundo escenario, se estima puntos de fuga en la tubería más cercana al nudo en donde se tiene el valor de presión medida, en las zonas de fuga ya identificadas. Para estimar el caudal de fuga respectivo se sigue el mismo procedimiento del escenario 1 y se tiene los siguientes resultados indicados en la Tabla 12. En la Figura 21 se encuentra la simulación del escenario 2.

**Tabla 12: Caudal de fuga para el escenario 2**

#	Nudo ID	Caudal de fuga (qf) l/s
1	fuga1	0,34
2	fuga5	1,30
3	fuga7	0,37
4	fuga8	0,55
5	fuga10	0,45
<b>Qfuga simulado</b>		<b>3,00</b>

Fuente: Elaboración propia



**Figura 21: Simulación de los puntos de fuga para el Escenario 2.**

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 12 se aprecia que el caudal de fuga 1 y fuga 7 son valores pequeños que pueden ser despreciables. Este criterio se considera para el desarrollo del siguiente escenario de caudal de fugas.

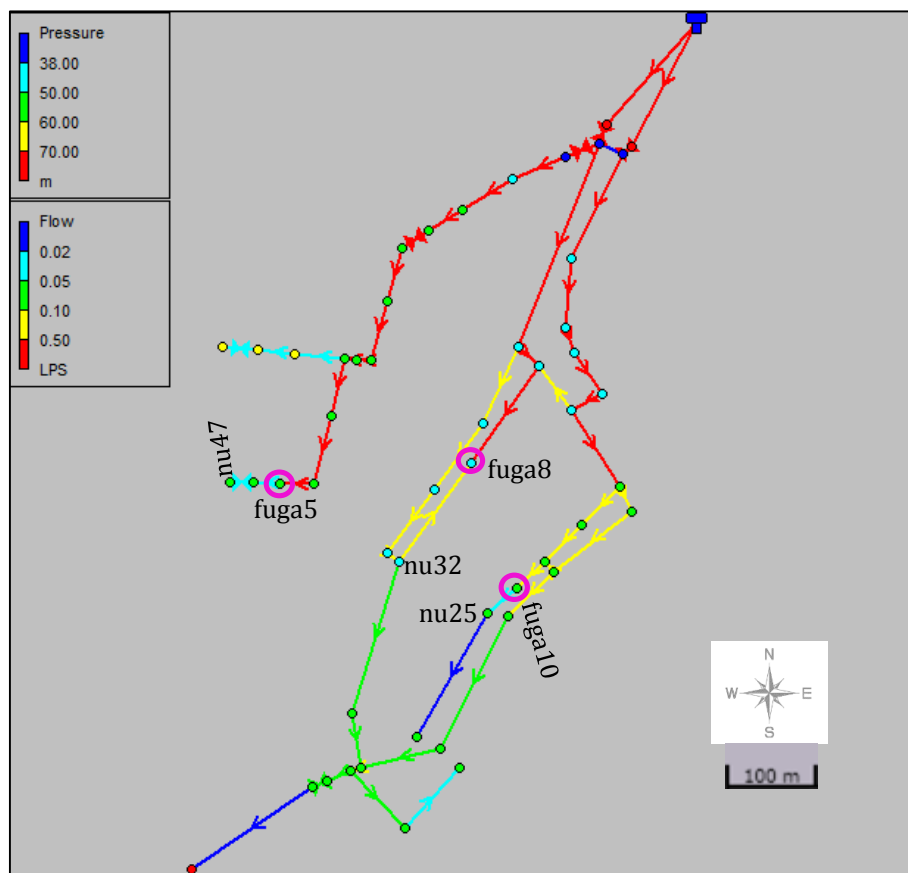
### 4.5.3 Escenario 3

Para el tercer escenario, se estima puntos de fuga en los nudos donde el caudal estimado anteriormente es bajo y pueden ser despreciable. Para estimar el caudal de fuga respectivo en los nuevos nudos se sigue el procedimiento del escenario 1. Los valores de caudales estimados se indican en la Tabla 13 y en la Figura 22 se encuentra la simulación del escenario 3.

**Tabla 13: Caudal de fuga para el escenario 3.**

#	Nudo ID	Caudal de fuga (qf) l/s
1	fuga5	1,64
2	fuga8	0,91
3	fuga10	0,45
	Q.fuga simulado=	3,00

Fuente: Elaboración propia



**Figura 22: Simulación de los puntos de fuga para el Escenario 3.**

Fuente: Elaboración propia

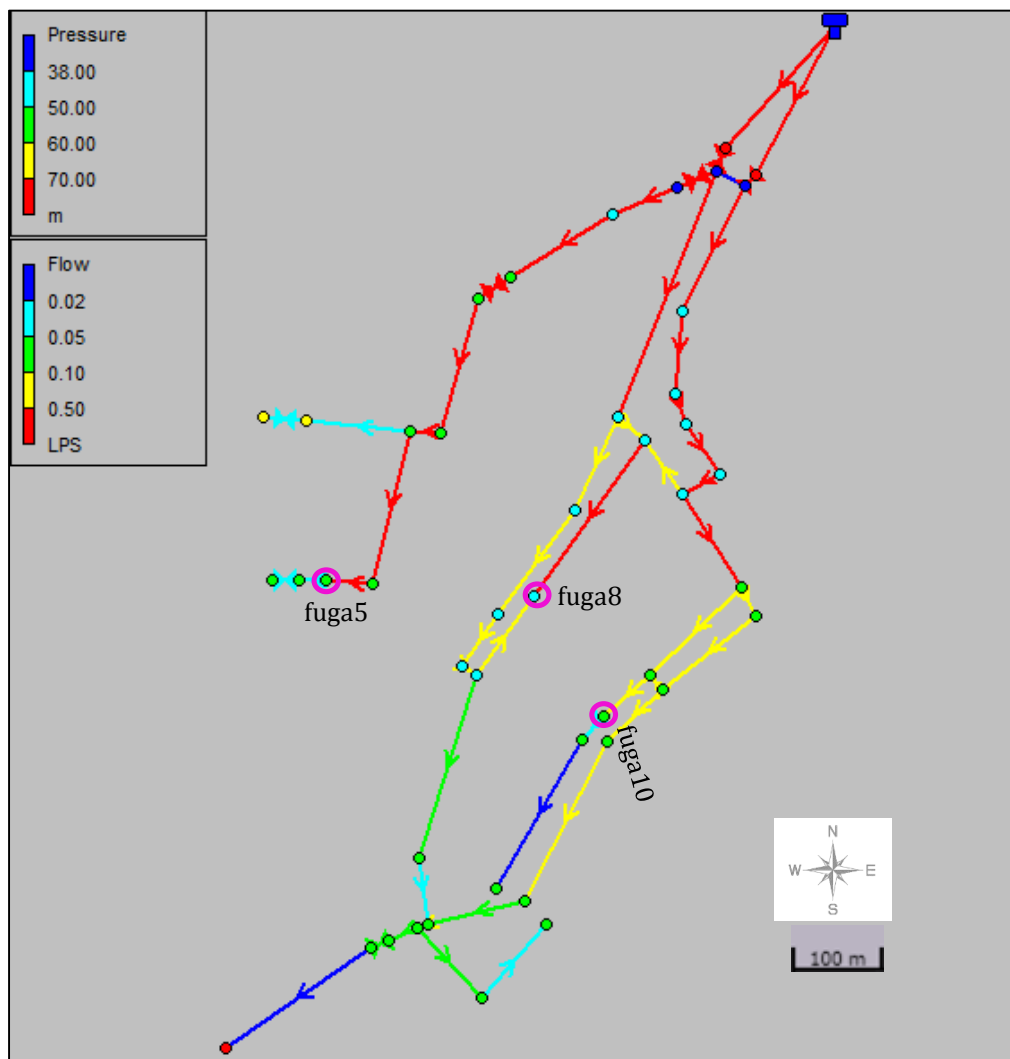
#### 4.5.4 Escenario 4

Para el escenario 4, los puntos de fuga son las mismas del escenario 3, pero ubicados en el tercio de la longitud de la tubería. Los resultados de caudales estimados se muestran en la Tabla 14 y la simulación del escenario 4 se observa en la Figura 23.

**Tabla 14: Caudal de fuga para el escenario 4.**

#	Nudo ID	Caudal de fuga (qf) l/s
1	fuga5	1,65
2	fuga8	0,90
3	fuga10	0,45
Qfuga simulado=		3,00

Fuente: Elaboración propia



**Figura 23: Simulación de los puntos de fuga para el Escenario 4.**

Fuente: Elaboración propia

## 4.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La selección del escenario con el mejor resultado para la estimación de fugas, se hace de acuerdo a la Tabla 15 que contiene el error medio absoluto y el error medio cuadrático entre valores observados y simulados de presión, obtenidas en EPANET, al simular todos los escenarios. También contiene el error relativo porcentual calculado según el criterio de Ormsbee (1989).

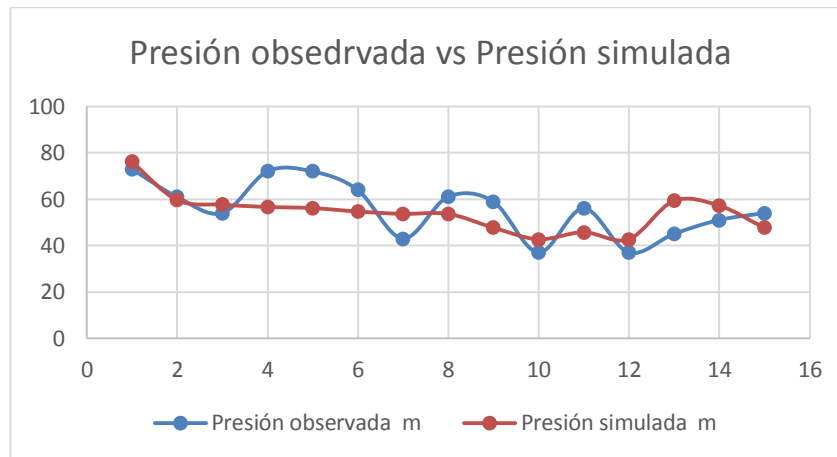
**Tabla 15: Errores entre valores medidos y simulados de presión para los escenarios de análisis.**

Simulaciones	Error medio absoluto	Error cuadrático medio	Error relativo %	Descripción
<b>Simulación 0</b>	8,535	9,594	15,773	sin caudal de fuga
<b>Escenario 1</b>	8,483	9,548	15,587	puntos de fuga en la mitad de las 10 tuberías que conforma las zonas de fuga
<b>Escenario 2</b>	8,458	9,511	15,535	puntos de fuga en la mitad de las tuberías más cercanas al nudo de presión medida en las zonas de fuga
<b>Escenario 3</b>	8,429	9,470	15,471	puntos de fuga en la mitad de las tuberías con mayor caudal de fuga estimado en el escenario 2.
<b>Escenario 4</b>	8,423	9,463	15,459	puntos de fuga en el tercio de las tuberías con mayor caudal de fuga estimado en el escenario 2.

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los errores cuadráticos y relativos entre presiones observadas y simuladas, se deduce que el mejor ajuste de presiones se encuentra en el escenario 4, debido a que los errores son menores con respecto a los demás escenarios. Entonces, con esto finalizamos la estimación de fugas, teniendo entre presiones observadas y simuladas un error cuadrático medio de 9 y un error relativo promedio de 15%, considerando todas las presiones medidas en pruebas de campo.

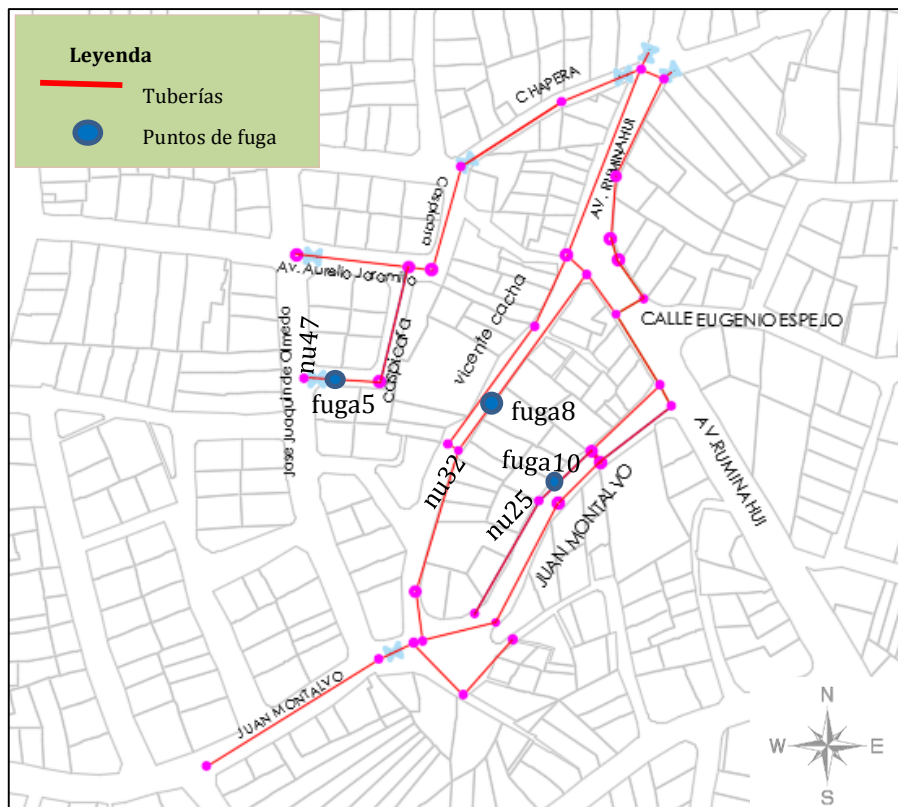
El 15% de error relativo es aceptable según el criterio de Water Authorities Association (1989). La gráfica del mejor ajuste entre valores observados y simulados de presión, se observa en la Figura 24.



**Figura 24: Gráfica del mejor ajuste entre presiones observadas y simuladas, como resultado de la estimación de fugas.**

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, de acuerdo al escenario del mejor ajuste de presiones, se estima 3 puntos de fuga en la red de distribución del Subsector ZA-11. Los respectivos caudales de fuga estimados se especifica en la Tabla 14 y su ubicación probable se detalla a continuación: la fuga 5 se encuentra a 10 m del nudo 47, la fuga 8 a 29 m del nudo 32, y la fuga 10 se encuentra a 9 m del nudo 25. En la figura 25 se presenta la localización estimada de fugas en la red de distribución del subsector ZA-11.



**Figura 25: Localización estimada de los 3 puntos de fuga en la red de distribución del Subsector ZA-11.**

Fuente: Elaboración propia



# CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

---

## 5.1 CONCLUSIONES

El trabajo de titulación desarrollado, planteó estimar la localización de fugas en redes de distribución a partir del análisis de parámetros hidráulicos. El análisis respectivo se hizo de acuerdo a las presiones observadas y simuladas del modelo hidráulico experimentado. Al ser este un trabajo aplicativo a una red de distribución real y al no tener suficientes datos de medición de parámetros hidráulicos, se realizaron algunas estimaciones de caudales y presiones para aproximar dicho modelo a la realidad. Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica de los fundamentos teóricos de las fugas, su incidencia en el funcionamiento hidráulico de la red y que aspectos lo ocasionan.

El caso de estudio seleccionado para el desarrollo de este trabajo, se centró en la red de distribución del subsector ZA-11, perteneciente al sistema de suministro de agua potable de la Zona Alta de la ciudad de Azogues. El desarrollo del esquema del modelo hidráulico incluyó, la recopilación y revisión de la información técnica del subsector; tales como: la configuración de la red cuantificando las tuberías y nudos existentes, la elevación de los nudos, material de las tuberías, caudal inyectado, gráfica del registro de presiones, gráfica del abastecimiento de agua en el tanque de suministro y volumen consumido por los usuarios de la zona.

La determinación de las demandas en los nudos del modelo EPANET, se realizó mediante el método de las áreas de influencia, con el cual se distribuye el consumo total de los abonados del sector en cada uno de los nudos. La simulación del modelo se realizó en régimen permanente, utilizando los caudales, consumos y presiones medias.

La calibración de la red incluyó verificaciones del ingreso de los datos al modelo y de los resultados de velocidades y presiones simuladas. Dando



como resultado la validez de los datos de entrada y de salida del modelo. En esta etapa se efectuó las mediciones de presión en campo con la ayuda del manómetro de presión, debido a que no existían datos medidos de presión en la zona de análisis por parte de la empresa aoperadora del servicio. Al comparar los valores de presión medidas y simuladas, se concluye que el modelo se aproxima a la realidad de operación de la red. La importancia de haber realizado estas mediciones en campo radica en que, con la presión observada se identificó zonas probables de fuga en la red de distribución.

Analizando la bibliografía para la calibración de modelos hidráulicos, se encontró una metodología iterativa para la estimación del caudal de fugas. Esta metodología se basa en la modelización de fugas, cuyo caudal depende de la presión en el nudo de aplicación y de la longitud de la tubería analizada. Las iteraciones realizadas en este método fueron pocas, dando resultados inmediatos. Para validar la metodología aplicada, se ha desarrollado 4 escenarios de aplicación de fuga en diferentes puntos de la red.

Analizando las variaciones de presiones simuladas y la ubicación de la fuga en los distintos escenarios, se estima que el mejor ajuste de presiones simuladas y observadas, a su vez que el mejor ajuste del modelo hidráulico a la realidad del funcionamiento de la red da como resultado 3 puntos de fuga, ubicados al tercio de la longitud de la tubería donde se estima la fuga.



## 5.2 RECOMENDACIONES

Las fugas en la red de distribución fue posible estudiarlas mediante simulaciones hidráulicas. El estudio respectivo requiere de un modelo hidráulico capaz de representar la realidad del sistema, por lo tanto se recomienda trabajar con varias mediciones puntuales de caudales y presiones dentro de la red, si es posible con una curva que indique la variación de la demanda de los usuarios, durante un determinado periodo de tiempo, para obtener un modelo hidráulico más realista.

Las modelizaciones hidráulicas se realizaron en el programa EPANET, mostrando la capacidad de esta herramienta para simular el funcionamiento de una red de agua a presión, y visualizando de manera rápida el proceso de simulación. Pero se recomienda realizar las modelizaciones respectivas en programas como SCADRED, WaterCAD, o SARA, con el objetivo de comparar los resultados de uno de estos programas con el programa EPANET.

En cuanto a la metodología aplicada para la estimación de fugas en la red de estudio, se recomienda validar y comprobar el método con varias mediciones de presiones campo. Además, con la idea de continuar con este trabajo, se recomienda comparar diferentes métodos de estimación del caudal de fugas, y desarrollar algoritmos que mejore el proceso de la metodología para estimar el caudal de fuga.



## 6. Bibliografía

---

- Acuña Pittari, M. I. (2013). *Modelación con EPANET de red de distribución de valle hermoso* (Informe Técnico Final). Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- Albarrán, M., Banda, F., Colla, E., Concha, H., Ferreira, M., Figueroa, A., y Orellana, J. (1997). *Cepal*. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado de <https://www.cepal.org/ilpes/noticias/paginas/1/52961/Doc-86.pdf>
- CONAGUA (2009). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: *Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado*. México.
- CONAGUA (2009). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: *Mejora de Eficiencia Física*. México.
- CONAGUA (2009). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: *Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Distribución*. México.
- López, R. A. (2011). *Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillados* (Séptima reimpresión ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Hurtado, A. (2006). *Cálculo del porcentaje de pérdidas por fugas en la red de agua potable en Celeya, GTO* (Trabajo de Investigación). Universidad popular autónoma del Estado de Puebla, México.
- INEN. (1992). *Normas para el estudio y diseño de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes*. Quito, Ecuador.



- Medina, G. M. (2009). *Políticas para el control activo de fugas* (Tesis de Grado). Universidad Técnica Particular de Loja, Loja.
- Molina, S.X. (2014). *Metodología para la calibración preliminar de modelos de redes de distribución de agua mediante la utilización conjunta de demandas y consumos dependientes de la presión* (Trabajo Fin de Master). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Rocha, F. A. (2007). *Hidráulica de Tuberías y Canales*. Lima, Perú.
- Romero, F. C. (2011). *Acueductos teoría y diseño*. Medellín, Colombia: Universidad de Medellín.
- Rondán, E. (2016). *Estado del arte de la calibración de modelos hidráulicos. Modelado de fugas con Epanet* (Trabajo fin de grado). Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Patiño, J. A. (2011). *Pérdidas menores de energía en redes de tubería de Agua Potable* (Tesis de grado para obtener el título de ingeniería hidráulica). Universidad Nacional autónoma de México, México.
- Walski, T. (1983). *Technique for calibrating network models.* *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 109, No. 4, Octubre 1983
- Ormsbee L.E. (1989). *Implicit network calibration.* *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 115, No. 2, Marzo 1989
- Water Authorities Association y Water Research Centre (1989). *Network Analysis: A Code of Practice*. Water Research Centre.
- Rossmann, L. (2017). *Manual del Usuario EPANET 2.0 en Español. Versión 2.00.12*. Grupo REDHISP Inst. Ingeniería del Agua y M.A. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia.



García, M. (2006). *Modelación y simulación de redes hidráulicas a presión mediante herramientas informáticas* (Proyecto Fin de Carrera). Universidad Politécnica de Cartagena. , Cartagena.



# ANEXOS

## Anexo 1: Estimación del caudal de fuga para el Escenario 1.

Nudo ID	Presión (s.t) m	Distribución equitativa del emisor global de fugas					Distribución espacial del emisor global de fugas										
		Iteración 1		Iteración 2			Iteración 3		Iteración 4		Iteración 5						
		Cei	qf,i l/s	Cei	qf (ajustado) l/s	Cei	qf (ajustado) l/s	Cei	qf (ajustado) l/s	Cei	qf (ajustado) l/s	Cei	qf (ajustado) l/s				
fuga1	53,993	0,04064	0,411	0,02959	0,299	0,0163	0,165	0,0167	0,168	0,0333	0,337	0,0163	0,165	0,0167	0,168	0,0333	0,337
fuga2	58,989	0,04064	0,432	0,02959	0,315	0,0147	0,156	0,0150	0,159	0,0299	0,318	0,0147	0,156	0,0150	0,159	0,0299	0,318
fuga3	58,187	0,04064	0,429	0,02959	0,312	0,0032	0,034	0,0033	0,034	0,0065	0,069	0,0032	0,034	0,0033	0,034	0,0065	0,069
fuga4	57,986	0,04064	0,428	0,02959	0,312	0,0161	0,170	0,0164	0,173	0,0328	0,346	0,0161	0,170	0,0164	0,173	0,0328	0,346
fuga5	58,986	0,04064	0,432	0,02959	0,315	0,0104	0,111	0,0106	0,113	0,0212	0,226	0,0104	0,111	0,0106	0,113	0,0212	0,226
fuga6	61,986	0,04064	0,445	0,02959	0,324	0,0153	0,168	0,0156	0,171	0,0312	0,342	0,0153	0,168	0,0156	0,171	0,0312	0,342
fuga7	42,977	0,04064	0,360	0,02959	0,262	0,0202	0,179	0,0206	0,182	0,0411	0,364	0,0202	0,179	0,0206	0,182	0,0411	0,364
fuga8	43,977	0,04064	0,365	0,02959	0,266	0,0298	0,267	0,0304	0,273	0,0608	0,545	0,0298	0,267	0,0304	0,273	0,0608	0,545
fuga9	53,975	0,04064	0,411	0,02959	0,299	0,0130	0,132	0,0133	0,134	0,0266	0,269	0,0130	0,132	0,0133	0,134	0,0266	0,269
fuga10	53,975	0,04064	0,411	0,02959	0,299	0,0089	0,090	0,0091	0,092	0,0182	0,184	0,0089	0,090	0,0091	0,092	0,0182	0,184
Promedio =	54,5031	qf (l/s)=	4,12	∑Cei =	3,00	0,1479	1,471	0,1508	1,50	0,3017	3,00	0,1479	1,471	0,1508	1,50	0,3017	3,00
QARN (l/s)=	3	qc (l/s)=	0,790		0,790		0,790		0,790		0,790		0,790		0,790		0,790
		Qt-sim (l/s)=	4,91		3,79		2,261		2,290		3,790		2,261		2,290		3,790
		Error absoluto=	1,12		0,000		1,53		1,500		0,000		1,53		1,500		0,000
		Condición	no cumple		cumple		no cumple		no cumple		cumple		no cumple		no cumple		cumple

Fuente: Elaboración propia



## Anexo 2: Estimación del caudal de fuga para el Escenario 2.

Nudo ID	Presión (s.0) m	Distribución equitativa del emisor global de fugas					Distribución espacial del emisor global de fugas						
		Iteración 1		Iteración 2			Iteración 3		Iteración 4			Iteración 5	
		Cei	qF,i l/s	Cei	qF (ajustado) l/s		Cei	qf(ajustado) l/s	Cei	qf(ajustado) l/s	Cei	qf l/s	
fuga1	53,993	0,08180	0,827	0,06166	0,623	0,0170	0,172	0,0167	0,169	0,0334	0,34		
fuga5	58,986	0,08180	0,871	0,06166	0,656	0,0622	0,662	0,0610	0,649	0,1220	1,30		
fuga7	42,977	0,08180	0,724	0,06166	0,546	0,0210	0,186	0,0206	0,183	0,0412	0,37		
fuga8	43,977	0,08180	0,734	0,06166	0,553	0,0310	0,279	0,0304	0,273	0,0609	0,55		
fuga10	53,975	0,08180	0,827	0,06166	0,623	0,0229	0,231	0,0224	0,227	0,0448	0,45		
Promedio =	50,7816	qF (l/s)=	3,98		3,00	0,1541	1,530	0,1511	1,50	0,3023	3,00		
QARN (l/s)=	3	qC (l/s)=	0,790		0,790		0,790		0,790		0,790		
		Qt sim (l/s)=	4,77		3,79		2,320		2,290		3,790		
		Error absoluto=	0,98		0,000		1,47		1,500		0,000		
		Condición	no cumple		cumple		no cumple		no cumple		cumple		

Fuente: Elaboración propia



### Anexo 3: Estimación del caudal de fuga para el Escenario 3.

Nudo	Presión (s.0) ID	Distribución equitativa del emisor global de fugas						Distribución espacial del emisor global de fugas									
		Iteración 1			Iteración 2			Iteración 3		Iteración 4		Iteración 5					
		Cei	qF,i	l/s	Cei	qF (ajustado)	l/s	Cei	qf(ajustado)	l/s	Cei	qf(ajustado)	l/s	Cei	qf(ajustado)	l/s	
fuga5	58,986	0,13826	1,471	0,10092	1,074	0,0778	0,828	0,0771	0,820	0,1542	1,641	0,0511	0,459	0,0507	0,455	0,1013	0,909
fuga8	43,977	0,13826	1,241	0,10092	0,906	0,0225	0,227	0,0223	0,225	0,0445	0,450	0,0225	0,227	0,0223	0,225	0,0445	0,450
fuga10	53,975	0,13826	1,398	0,10092	1,020	0,1514	1,514	0,1500	1,50	0,3000	3,00	0,1514	1,514	0,1500	1,50	0,3000	3,00
Promedio =	52,31266667	qF (l/s)=	4,11		3,00	ΣCei =											
QARN (l/s)=	3	qc (l/s)=	0,790		0,790		0,790		0,790		0,790		0,790		0,790		0,790
		Qt sim (l/s)=	4,90		3,79		2,304		2,290		3,790		2,304		2,290		3,790
		Error absoluto=	1,11		0,000		1,49		1,500		0,000		1,49		1,500		0,000
		Condición	no cumple		cumple		no cumple		no cumple		cumple		no cumple		no cumple		cumple

Fuente: Elaboración propia



### Anexo 4: Estimación del caudal de fuga para el Escenario 4.

Nudo ID	Presión (s.0) m	Distribución equitativa del emisor global de fugas				Distribución espacial del emisor global de fugas											
		Iteración 1		Iteración 2		Iteración 3			Iteración 4			Iteración 5					
		Cei	qF, i l/s	Cei	qF (ajustado) l/s	Cei	qf (ajustado) l/s	Cei	qf (ajustado) l/s	Cei	qf (ajustado) l/s	Cei	qf (ajustado) l/s	Cei	qf (ajustado) l/s		
fuga5	59,986	0,13826	1,486	0,10092	1,085	0,0778	0,836	0,0770	0,827	0,1540	1,655	0,0511	0,453	0,0506	0,448	0,1012	0,896
fuga8	42,977	0,13826	1,225	0,10092	0,894	0,0225	0,227	0,0222	0,225	0,0444	0,449	0,0225	0,227	0,0222	0,225	0,0444	0,449
fuga10	53,975	0,13826	1,398	0,10092	1,020	0,1514	1,516	0,1498	1,50	0,2996	3,00	0,1514	1,516	0,1498	1,50	0,2996	3,00
Promedio =	52,31266667	qF (l/s)=	4,11		3,00	$\sum$ Cei =											
QARN (l/s)=	3	qC (l/s)=	0,790		0,790		0,790		0,790		0,790		0,790		0,790		0,790
		Qt sim (l/s)=	4,90		3,79		2,306		2,290		3,790		2,306		2,290		3,790
		Error absoluto=	1,11		0,000		1,48		1,500		0,000		1,48		1,500		0,000
		Condición	no cumple		cumple		no cumple		no cumple		cumple		no cumple		no cumple		cumple

Fuente: Elaboración propia

## Anexo 5: Fotografías de la medición de la presión en campo.



Manómetro de presión.



Llave de chorro para la toma presión.



# **ANEXOS**



Oficio Nro. UCACUE-GG-UAIC-A-2018-021-O  
Azogues, 13 de noviembre de 2018

Ing.  
Cristian Vintimilla Ulloa  
*Docente Tutor de la Carrera de Ingeniería Civil*  
**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA SEDE AZOGUES**  
Presente.


De mi consideración:

Referente al control antiplagio del trabajo de titulación, de la alumna JESSICA CAROLINA PAGUAY GUAMAN; le informo que se ha realizado el ingreso del trabajo de titulación al Servicio de prevención de plagio TURNITIN de la Universidad y el resultado del mismo, se detalla en el siguiente cuadro:

AUTOR	TÍTULO	SIMILITUD	ARCHIVO	N° DEL TRABAJO	FECHA
Jessica Carolina Pag...	TRABAJO DE TITULACION	5%		1037868138	12-nov.-2018

Particular que le informo para los fines pertinentes, suscribo.

Atte.

  
Ing. Geovanny González Rodríguez  
**DOCENTE**

14/11/2018  
21h23  


## PERMISO DEL AUTOR DE TESIS PARA SUBIR AL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo Jessica Carolina Paguay Guamán portadora de la cedula de ciudadanía Nro. 0302714829. En calidad de autora y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis de Parámetros Hidráulicos para Estimar la Localización de Fugas en Redes de Distribución de Agua Potable" de conformidad a lo establecido en el artículo 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos. Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 114 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Azogues, 14 de Noviembre del 2018



---

Egda. Jessica Carolina Paguay Guamán

CI: 0302714829



## El Bibliotecario de la Sede Azogues

### CERTIFICA:

Que: **PAGUAY GUAMÁN JÈSSICA CAROLINA**, Con cédula de ciudadanía Nro. **0302714829** de la Carrera de **INGENIERIA CIVIL**.

No adeuda libros, a esta fecha: 13 de noviembre del 2018.

Byron Alonso Torres Romo  
Bibliotecario de la Sede Azogues

Biblioteca Universitaria  
MONS. "FROILAN POZO QUEVEDO"