

# Trabajo Fin de Máster

*ANÁLISIS DE LAS PÉRDIDAS REALES DE AGUA  
EN UN SECTOR DE LA RED DE LA CIUDAD DE  
GUAYAQUIL Y MEDIDAS PARA SU REDUCCIÓN*

**Intensificación:** *HIDRÁULICA URBANA*

**Autor:**

*TANNIA NARCIZA CHÉRREZ CHÉRREZ*

**Tutor:**

*RICARDO COBACHO JORDÁN*

**Cotutor/es:**

*MIGUEL ÁNGEL PARDO PICAZO*

**SEPTIEMBRE, 2021**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**

## Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Análisis de las pérdidas reales de agua en un sector de la red de la ciudad de Guayaquil y medidas para su reducción.

**Título del TFM en inglés:** Analysis of real losses in a sector of Guayaquil network and management actions.

**Título del TFM en Valenciano:** Anàlisi de les pèrdues reals d'aigua en un sector de la xarxa de la ciutat de Guayaquil i mesures per a la seua reducció.

ALUMNO: TANNIA NARCIZA CHÉRREZ CHÉRREZ

TUTOR: RICARDO COBACHO JORDÁN

COTUTOR/ES: MIGUEL ÁNGEL PARDO PICAZO

FECHA DE LECTURA: SEPTIEMBRE, 2021

## Resumen

El suministro de agua potable es un servicio básico, vital y necesario. En general la gestión de este servicio impacta directamente a los usuarios, es decir una buena gestión mejora la calidad de vida de los habitantes de una determinada ciudad, mientras que la gestión inadecuada afecta la calidad del agua y como resultado los habitantes quedan expuestos a enfermedades asociadas a la intrusión de patógenos. Por otro lado, a nivel económico, el servicio intermitente conlleva a que los usuarios busquen otras alternativas de suministro, la mayoría de ellas a mayor costo. En tanto que una gestión eficiente garantiza el suministro continuo hasta el punto de medida del usuario con valores regulados y acorde al volumen de consumo.

Para llevar a cabo una buena gestión en un sistema de agua potable es imprescindible conocer el volumen que se entrega al mismo y el volumen consumido por los usuarios. Suministrar la cantidad de agua suficiente para brindar un servicio óptimo es uno de los objetivos principales de los gestores.

El presente estudio tiene como finalidad recoger información disponible de un sector hidráulico del sistema de agua potable de la ciudad de Guayaquil, de manera que sirva de línea base en el análisis de las pérdidas reales.

A partir de los registros de volumen inyectado y volumen consumido por los usuarios se conoce la eficiencia del sistema con lo cual se tiene indicios de globales de su rendimiento. Mediante la desagregación de consumos por componente se estableció el balance hídrico propuesto por la IWA de manera que se identifica el porcentaje de pérdidas reales y aparentes del sistema. Se presenta también un análisis económico de fugas que está relacionado con los costos marginales de agua y costos de inspección de la red.

El análisis planteado en este documento contempla la elaboración de un modelo matemático que permite conocer el comportamiento del sector en diferentes situaciones y escenarios.

Finalmente se interpreta el comportamiento del sector antes y después de la medida de mejora aplicada destacando los resultados.

*Palabras clave: Pérdidas de agua, modelo matemático, balance hídrico, caudal mínimo nocturno.*

## **Resum**

El subministrament d'aigua potable és un servei bàsic, vital i necessari. En general la gestió d'aquest servei impacta directament als usuaris, és a dir una bona gestió millora la qualitat de vida dels habitants d'una determinada ciutat, mentre que la gestió inadequada afecta la qualitat de l'aigua i com a resultat els habitants queden exposats a malalties associades a la intrusió de patògens. D'altra banda, a nivell econòmic, el servei intermitent comporta al fet que els usuaris busquen altres alternatives de subministrament, la majoria d'elles a major cost. En tant que una gestió eficient garanteix el subministrament continu fins al punt de mesura de l'usuari amb valors regulats i concorde al volum de consum.

Per a dur a terme una bona gestió en un sistema d'aigua potable és imprescindible conèixer el volum que s'entrega al mateix i el volum consumit pels usuaris. Subministrar la quantitat d'aigua suficient per a brindar un servei òptim és un dels objectius principals dels gestors.

El present estudi té com a finalitat recollir informació disponible d'un sector hidràulic del sistema d'aigua potable de la ciutat de \*Guayaquil, de manera que servisca de línia base en l'anàlisi de les pèrdues reals.

A partir dels registres de volum injectat i volum consumit pels usuaris es coneix l'eficiència del sistema amb la qual cosa es té indicis de globals del seu rendiment. Mitjançant la desagregació de consums per component es va establir el balanç hídric proposat per la \*IWA de manera que s'identifica el percentatge de pèrdues reals i aparents del sistema. Es presenta una anàlisi econòmica de fugides en relació amb els costos marginals d'aigua i costos de reparació.

L'anàlisi plantejada en aquest document contempla l'elaboració d'un model matemàtic que permet conèixer el comportament del sector en diferents situacions i escenaris.

Finalment s'interpreta el comportament del sector abans i després de la mesura de millora aplicada destacant els resultats.

*Paraules clau : Pèrdues d'aigua, model matemàtic, balanç hídric, cabal mínim nocturn.*

### ***Abstract***

Drinking water supply is a basic, vital and necessary service. In general, the management of this service has a direct impact on the users, thus a good management improves the quality of life of the inhabitants and of a certain city, but an inadequate management affects the quality of the water and as a result of this, the inhabitants are exposed to diseases associated with the intrusion of pathogens. On the other hand, at the economic level, intermittent service leads users to seek other supply alternatives, most of them at higher

cost. In this context, an efficient management ensures continuous supply to the user's metering point with regulated values and according to the volume of consumption.

A good management of a drinking water system requires knowledge of the volume delivered to the system and the volume consumed by users. Supplying sufficient water to provide an optimal service is one of the main objectives of the managers.

The purpose of this study is to collect available information from a hydraulic sector of the drinking water system of the city of Guayaquil, in order to serve as a baseline for the analysis of real losses.

From the records of the volume injected and the volume consumed by the users, the efficiency of the system is known, which provides global indications of its performance. By disaggregating consumption by component, the water balance proposed by the IWA was established in order to identify the percentage of real and apparent losses in the system. Furthermore, an economic analysis of leakage in relation to marginal water costs and repair costs is presented.

The analysis proposed in this document includes the elaboration of a mathematical model that allows knowing the behaviour of the sector in different situations and scenarios

Finally, the behaviour of the sector before and after the improvement measure applied is interpreted, highlighting the results.

*Keywords: Water losses, mathematical model, water balance, minimum night flow.*

# Contenido

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Introducción.....  | 1  |
| 1.1   | Objetivo General.....  | 2  |
| 1.2   | Objetivos específicos .....                                      | 2  |
| 1.3   | Justificación del trabajo .....                                  | 2  |
| 1.4   | Estructura del Trabajo de Fin de Máster .....                    | 4  |
| 2     | Descripción del Sistema .....                                    | 4  |
| 3     | Auditoria del Sistema .....                                      | 8  |
| 3.1   | Pérdidas reales .....  | 8  |
| 3.2   | Pérdidas aparentes.....  | 8  |
| 3.3   | Balance hídrico .....  | 9  |
| 3.4   | Exponente N1 .....   | 12 |
| 3.5   | Indicadores de pérdida.....                                      | 13 |
| 3.5.1 | Indicadores volumétricos .....                                   | 14 |
| 3.5.2 | Indicadores Relativos .....                                      | 14 |
| 3.5.3 | Indicador de Fugas estructurales IFE .....                       | 15 |
| 3.6   | Fiabilidad de los datos .....                                    | 17 |
| 4     | Optimización económica de la reducción de pérdidas de agua ..... | 18 |
| 4.1   | Índice de aumento natural de fugas.....                          | 18 |
| 4.2   | Cálculo de parámetros optimizados.....                           | 19 |
| 5     | Modelo hidráulico de la red en EPANET .....                      | 21 |
| 6     | Caso de estudio.....   | 22 |
| 6.1   | Indicadores de Pérdidas .....                                    | 27 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 6.1.1 | Indicadores volumétricos .....  | 28 |
| 6.1.2 | Indicadores Relativos .....   | 28 |
| 6.1.3 | Indicador de Fugas estructurales IFE .....                                    | 29 |
| 6.2   | Optimización económica de la reducción de pérdidas de agua.....               | 29 |
| 6.2.1 | Índice de aumento natural de fugas .....                                      | 29 |
| 6.2.2 | Cálculo de parámetros optimizados .....                                       | 34 |
| 6.3   | Modelo hidráulico del sector SGU-183 .....                                    | 36 |
| 6.3.1 | Calibración del modelo.....   | 39 |
| 6.3.2 | Comportamiento del sector representado en EPANET .....                        | 43 |
| 6.4   | Diagnóstico del sector analizado .....  | 47 |
| 6.5   | Resultados esperados.....   | 49 |
| 6.5.1 | Análisis del modelo hidráulico considerando el nivel económico de fugas ..... | 49 |
| 7     | Conclusiones .....  | 52 |
| 8     | Bibliografía .....  | 53 |

## Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1.</b> Características de las zonas norte, centro y sur del sistema de agua potable de la ciudad de Guayaquil. Datos proporcionados con corte a diciembre 2020..... | 3  |
| <b>Tabla 2.</b> Longitudes según diámetros de las tuberías del sector SGU-183.....   | 7  |
| <b>Tabla 3.</b> Componentes de las perdidas aparentes anuales. (Arregui et al., 2018) .....  | 9  |
| <b>Tabla 4.</b> Desglose consumos especificado por la IWA. ....  | 10 |
| <b>Tabla 5.</b> Parámetros requeridos para el cálculo del umbral mínimo de fugas. ....   | 16 |
| <b>Tabla 6.</b> Coeficientes para el cálculo del Umbral Mínimo de Fugas. ....  | 16 |
| <b>Tabla 7.</b> Banda de fiabilidad de datos .....   | 17 |
| <b>Tabla 8.</b> Banda de exactitud de datos.....   | 18 |
| <b>Tabla 9.</b> Balance hídrico obtenido por el método Botton up. ....   | 23 |
| <b>Tabla 10.</b> Información de caudal registrado. ....  | 24 |
| <b>Tabla 11.</b> Información de presión. ....  | 24 |
| <b>Tabla 12.</b> Información de caudal nocturno.....   | 25 |
| <b>Tabla 13.</b> Caudal y Presión registradas durante la prueba. ....  | 26 |
| <b>Tabla 14.</b> Caudal de pérdidas estimado con FAVAD. ....   | 26 |
| <b>Tabla 15.</b> Balance hídrico obtenido por el método Botton up. ....  | 27 |
| <b>Tabla 16.</b> Valores de INAF determinado en cada tramo.....  | 33 |
| <b>Tabla 17.</b> Parámetros optimizados para los diferentes INAF obtenidos. ....   | 36 |
| <b>Tabla 18.</b> Relación entre habitantes, abonados, longitud de red y nudos. ....  | 37 |
| <b>Tabla 19.</b> Coeficientes emisores obtenidos con UALEAKS, valores para los 213 nudos de consumo. ....  | 41 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Plano de ubicación del sector en la ciudad de Guayaquil .....                                       | 5  |
| <b>Figura 2.</b> Principales acueductos del abastecimiento de la ciudad de Guayaquil. ....                           | 6  |
| <b>Figura 3.</b> Plano de redes del sector en estudio .....  | 7  |
| <b>Figura 4.</b> Aumento natural de fugas. R. Cobacho 2019. ....   | 19 |
| <b>Figura 5.</b> Relación caudal – tiempo para obtener el volumen de fugas. R. Cobacho 2019. ....                    | 19 |
| <b>Figura 6.</b> Caudal y Presión registradas durante la prueba. ....  | 25 |
| <b>Figura 7.</b> Tendencia de caudal registrado en el sistema. ....  | 30 |
| <b>Figura 8.</b> Tendencia de caudal mínimo nocturno. ....   | 31 |
| <b>Figura 9.</b> Tendencia de caudal mínimo nocturno del tramo 5.....  | 31 |
| <b>Figura 10.</b> Esquema de asignación de demandas .....  | 37 |
| <b>Figura 11.</b> Esquema de asignación de demandas .....  | 38 |
| <b>Figura 12.</b> Esquema de la red representada en Epanet. ....   | 38 |
| <b>Figura 13.</b> Auditoría hídrica SGU-183 obtenida con UALEAKS.....  | 40 |
| <b>Figura 14.</b> Auditoría energética SGU-183 obtenida con UALEAKS.....   | 40 |
| <b>Figura 15.</b> Resultados de Auditoría SGU-183 obtenida con UALEAKS. ....   | 41 |
| <b>Figura 16.</b> Tendencia del caudal entregado. ....   | 44 |
| <b>Figura 17.</b> Distribución de velocidad en la red en hora de mínimo consumo. ....                                | 44 |
| <b>Figura 18.</b> Comportamiento del caudal del sector.....  | 45 |
| <b>Figura 19.</b> Comportamiento del caudal y presión mínima del sector.....   | 46 |
| <b>Figura 20.</b> Mapa de contorno de presión en hora de máximo consumo.....   | 47 |
| <b>Figura 21.</b> Actividades básicas de gestión de fugas que limitan las pérdidas reales anuales.....               | 48 |
| <b>Figura 22.</b> Auditoría hídrica SGU-183 obtenida con UALEAKS.....  | 50 |
| <b>Figura 23.</b> Auditoría energética SGU-183 obtenida con UALEAKS.....   | 50 |
| <b>Figura 24.</b> Simulación del comportamiento del sector SGU-183, después de aplicar Control activo de fugas. .... | 51 |

## Índice de abreviaturas

|       |                                      |
|-------|--------------------------------------|
| PEAD  | polietileno de alta densidad         |
| DMA   | district metered area                |
| SGU   | Sur Guasmo                           |
| IWA   | International water association      |
| FAVAD | Fixed and Variable Area of Discharge |
| INAF  | Índice de aumento natural de fugas   |

## 1 Introducción

Los sistemas de agua potable en los países en vías de desarrollo presentan deficiencias a causa del poco o nulo mantenimiento que recibe la infraestructura. En general, ofrecen el servicio con intermitencia y dotación de agua con baja presión, lo cual afecta directamente a la calidad del agua ya que facilita la intrusión de patógenos (Lee & Schwab, 2005).

La gestión del agua constituye una problemática ambiental y social y uno de los retos más complejos que deben afrontar los gestores de la red. En Ecuador donde se enmarca el presente trabajo es frecuente que el manejo del agua potable lo realicen organismos gubernamentales de dominio público.

En general y debido al tipo de servicio los esfuerzos se centran en el impacto social, a nivel político resultará más rentable invertir en obras visibles como por ejemplo expansión de red y serán poco o casi nada reconocidas los trabajos ejecutados que correspondan a obras que no se puedan palpar como es el caso de la renovación de red, la mejora de la presión de servicio o la disminución de agua porcentaje de agua perdida.

Ciertos municipios del país han cambiado la política del manejo del servicio de Agua Potable y es así como en el año 2001 el municipio de Guayaquil, apostando a la mejora de la gestión del sistema de agua potable y alcantarillado, optó por lanzar un concurso para concesionar el servicio a una empresa privada.

A partir del inicio de la concesión, en la ciudad de Guayaquil se han establecido planes de trabajos estratégicos dentro de los cuales se detalla la reducción del Agua no Contabilizada. Para poder conocer los efectos de las acciones aplicadas a la red se realizan monitoreos continuos en Distritos de Medición y, mediante el análisis de indicadores, se conoce el estado y se da seguimiento a los sectores hidráulicos.

## 1.1 Objetivo General

Delinear estrategias para mitigar las pérdidas de agua una vez que se conozca el estado real de la red de un sector de la zona del Guasmo ubicado al sur de la ciudad de Guayaquil. Se trata de una red que suministra agua a 1431 habitantes y cuenta con una longitud total de tubería de 16838 m principalmente PEAD con predominancia de diámetros de 90mm. El análisis de las pérdidas reales es a través de información de caudales registrados con la ayuda de equipos de monitoreo continuo.

## 1.2 Objetivos específicos

- Obtener el balance hídrico detallado por componentes de pérdidas reales y aparentes.
- Determinar el índice de aumento natural de fugas a partir de información histórica de caudal registrado.

## 1.3 Justificación del trabajo

Gran parte de la red de la ciudad de Guayaquil tiene en promedio 40 años de instalación y en su momento no se contemplaron las especificaciones técnicas necesarias durante su instalación, por lo que es normal que existan cada vez más roturas en la red de distribución de agua potable. Bajo esta premisa es razonable pensar que las pérdidas reales representan volúmenes importantes en el abastecimiento.

En general la empresa gestora debe afrontar dos problemáticas: reducir el volumen debido a pérdidas reales y minimizar el nivel de pérdidas aparentes.

Las pérdidas reales son el resultado de la presencia de fugas en las redes de distribución, acometidas y reboses de tanques de almacenamiento. Los daños son ocasionados en gran medida por eventos naturales debidos a la vetustez de la tubería, la corrosión interna y externa de la tubería y por defectos resultantes de una mala instalación. Las pérdidas reales involucran la mayor cantidad de agua perdida.

Las pérdidas aparentes en general se presentan en menor proporción en los abastecimientos y están asociadas a consumos no autorizados e imprecisiones de medida. Se trata de agua consumida por los usuarios, pero debido a que el consumo es fraudulento, no genera ingresos económicos para la empresa gestora.

En Guayaquil se han identificado 3 zonas que cuentan con similares características por su ubicación geográfica. De acuerdo con información proporcionada por el abastecimiento de la ciudad se conoce el caudal entregado y registrado y de esa manera se pudo obtener el rendimiento de las zonas Norte, Centro y Sur. En la **Tabla 1** se observan las características principales y rendimientos de la red de cada una de las 3 zonas de la ciudad de Guayaquil.

**Tabla 1.** Características de las zonas norte, centro y sur del sistema de agua potable de la ciudad de Guayaquil. Datos proporcionados con corte a diciembre 2020.

| No | Zona   | DMA | Na.    | Longitud de red (Km) | Caudal inyectado (l/s) | Caudal registrado (l/s) | Rendimiento % |
|----|--------|-----|--------|----------------------|------------------------|-------------------------|---------------|
| 1  | Norte  | 88  | 326773 | 3753.4               | 8055.9                 | 4123.3                  | 51.2%         |
| 2  | Centro | 19  | 109157 | 1141.4               | 3237.4                 | 1066.3                  | 32.9%         |
| 3  | Sur    | 36  | 111226 | 1097.8               | 2382.4                 | 886.2                   | 37.2%         |

En base a los resultados de rendimiento, las zonas Centro y Sur presentan valores menores al 50% e impulsan a realizar un análisis de pérdidas para mejorar la gestión operacional y comercial.

Es así como, con la finalidad de conocer el nivel de pérdidas de un DMA que representa la zona sur de la Ciudad se plantea este estudio. Mediante la implementación del modelo matemático de la red se pretende identificar las áreas con mayor porcentaje de fugas.

Con los resultados obtenidos se espera plantear estrategias que proporcionen mayor ahorro hídrico. Además, se espera contar con un esquema de trabajo que pueda extenderse a otras zonas de la ciudad.

## 1.4 Estructura del Trabajo de Fin de Máster

El presente documento cuenta con ocho capítulos, en el capítulo 1 se muestran las generalidades del trabajo. A manera de introducción, se describe la situación de la gestión en el país, se definen los objetivos y la justificación del Trabajo de fin de Máster.

En el capítulo 2 se describe el sector en estudio, se detalla su tipología y demás características hidráulicas. De manera paralela, en el capítulo 3 se procede con la auditoria del sistema, balance hídrico y obtención de indicadores y en el capítulo 4 se desarrolla la optimización del nivel económico de pérdidas de agua, determinando el índice de aumento natural de fugas.

En el capítulo 5 se muestra el modelo matemático de la red. En el capítulo 6 se presenta el caso de estudio, donde se determinan los indicadores de pérdidas reales del sector y se analiza su comportamiento con ayuda del modelo matemático. Además, se plantea una medida de reducción en base a la optimización económica de fugas. Finalmente, en el capítulo 7 se establecen las conclusiones del trabajo y en el capítulo 8 las referencias bibliográficas que sirvieron como base para realizar este documento.

## 2 Descripción del Sistema

En el presente estudio se analiza la red de un sector de la zona del Guasmo ubicado al sur de la Ciudad de Guayaquil, de aproximadamente 295000 m<sup>2</sup> de extensión. Se trata de un sector representativo de la zona por sus características de tipo de terreno, características de infraestructura y comportamiento hidráulico que refleja un elevado índice de agua no contabilizada que resume tanto pérdidas reales como pérdidas aparentes.

En la **Figura 1** se muestra la ubicación del sector hidráulico SGU-183<sup>1</sup> dentro de la zona denominada Guasmo situada al sur de la Ciudad de Guayaquil.

---

<sup>1</sup> SGU-183: Codificación establecida por la empresa gestora, representa zona, el acueducto de donde se abastece y el número de sectores que existen.

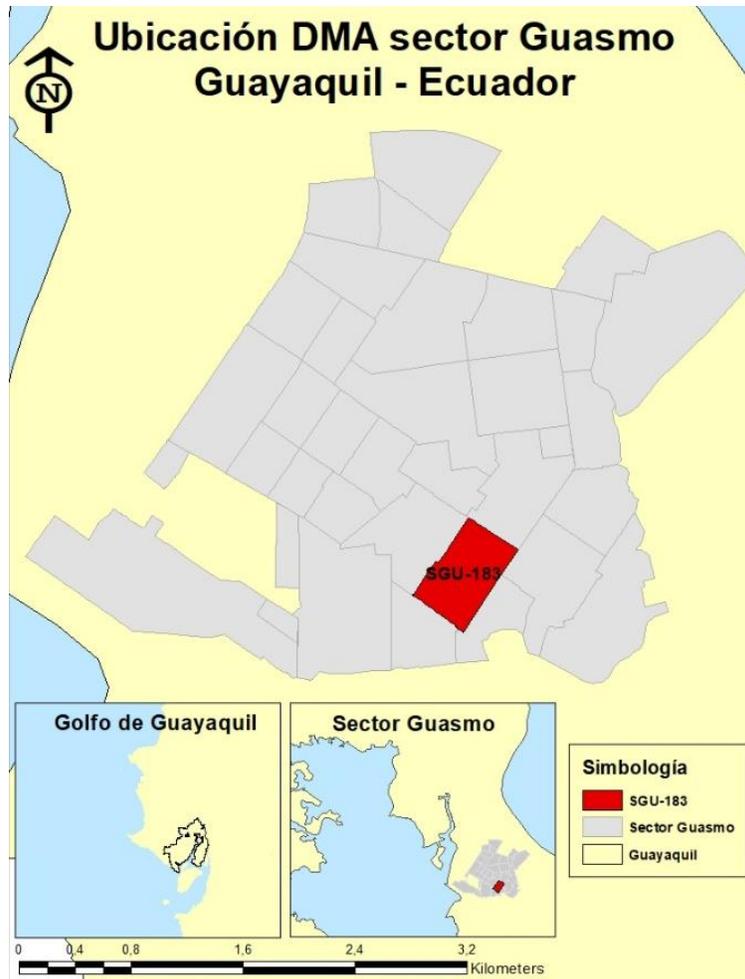
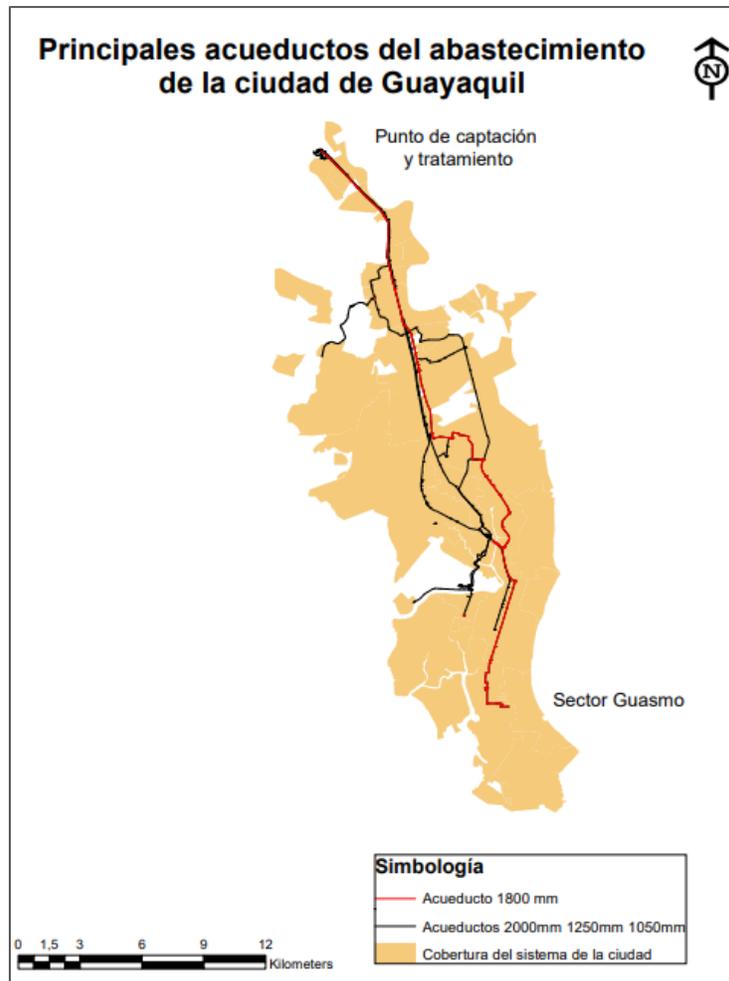


Figura 1. Plano de ubicación del sector en la ciudad de Guayaquil

El abastecimiento del sector SGU-183 es por gravedad. Aprovechando su ubicación y topografía, el agua es captada desde el Río Daule por medio de la estación de Captación, Bombeo y Tratamiento “La Toma” ubicada a 33 km y a una cota de 100 m. Una vez que el agua ha sido tratada, esta es enviada a la ciudad por medio de cuatro acueductos de 2000 mm, 1800 mm, 1250 mm y 1050 mm, respectivamente.



**Figura 2.** Principales acueductos del abastecimiento de la ciudad de Guayaquil.

Por medio del acueducto de 1800 mm el agua es conducida por gravedad hasta la zona del guasmo. Esta zona, por estar ubicada al sur de la ciudad de Guayaquil, presenta una topografía con variaciones no más allá de 2 metros, por lo cual no es necesario un sistema de bombeo para su abastecimiento.

El sector hidráulico es abastecido por gravedad por una única tubería (como se muestra en la **Figura 3**), está conformado de 16.8 km de red que garantiza la dotación agua potable a 5700 habitantes. Cuenta con medición directa y continua de caudal suministrado a la red y medición del consumo de 1431 abonados, facilitando de esta manera la auditoria del sistema.

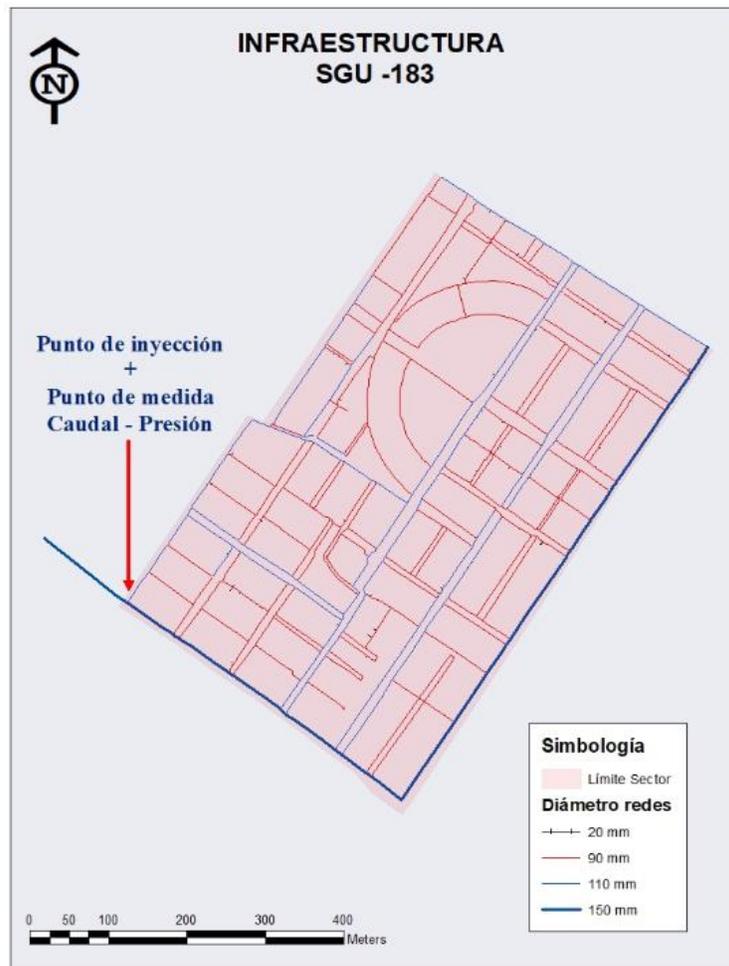


Figura 3. Plano de redes del sector en estudio

La infraestructura del sector está compuesta por tuberías de polietileno de alta densidad marca Rival instaladas en el año 2004, con predominio de diámetro de 90 mm en la red de distribución y 20 mm de diámetro en las acometidas.

Tabla 2. Longitudes según diámetros de las tuberías del sector SGU-183

| Diámetro (mm) | Longitud (km) |
|---------------|---------------|
| 90            | 10.163        |
| 110           | 4.813         |
| 150           | 1.862         |
| <b>Total</b>  | <b>16.838</b> |

### 3 Auditoria del Sistema

Uno de los primeros objetivos a cumplir en la gestión del agua es conocer la cantidad de agua suministrada y la cantidad consumida por los abonados. Esto permite establecer la línea base del sistema y facilitará la aplicación de estrategias de reducción de pérdidas.

Para realizar la auditoria es importante conocer la infraestructura del sector. Es decir, tener debidamente identificados los puntos de inyección y fronteras si fuera el caso. De manera que se garantice que el caudal analizado sea únicamente el que corresponda al sector en estudio.

#### 3.1 Pérdidas reales

En general las perdidas reales representan el mayor porcentaje de agua perdida dentro del sistema. A este tipo de perdidas le corresponden las fugas en redes de distribución y a nivel de conexiones domiciliarias y reboses en reservorios que se encuentren dentro de la infraestructura de redes de agua potable.

Además de afectar directamente a la cantidad de agua en producción, este tipo de pérdidas involucran interrupciones de abastecimiento a los usuarios, bajas presiones y afectaciones en la calidad del agua suministrada (Lee & Schwab, 2005).

#### 3.2 Pérdidas aparentes

De acuerdo con el balance hídrico que propone la IWA las perdidas aparentes o comerciales tienen tres componentes: imprecisiones de medida que corresponden a los errores intrínsecos del equipo de micro medición y que tiende a aumentar con la edad de este, consumos ilegales que pueden ser por conexiones adicionales, bypass, fraudes en equipos de medición para evitar el contaje real y conexiones clandestinas, el último componente de las perdidas aparentes trata sobre los errores cometidos en el tratamiento de datos en este grupo podrían estar los errores al momento de la facturación.

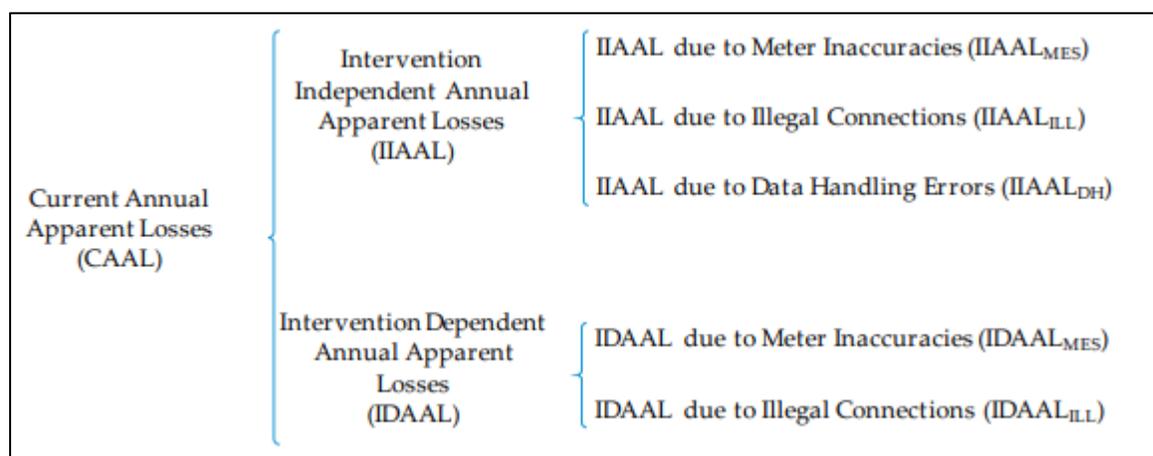
En un estudio donde se propone el cálculo del nivel económico de pérdidas aparentes en los sistemas de agua potable, (Arregui et al., 2018) se definen dos categorías dentro de las pérdidas

aparentes en función de la influencia de las intervenciones que se lleven a cabo por parte del abastecimiento.

Pérdidas aparentes independientes de la gestión: es un volumen anual y relativo al nivel inevitable de pérdidas, en esta categoría el volumen comprometido no se vería afectado.

Pérdidas aparentes dependientes de la gestión: esta categoría contempla los volúmenes de pérdida que son inversamente proporcionales a las campañas de reducción que ejecuta el abastecimiento. (Arregui et al., 2018). Un detalle de esta clasificación se muestra en la siguiente Tabla.

**Tabla 3.** Componentes de las pérdidas aparentes anuales. (Arregui et al., 2018)



### 3.3 Balance hídrico

Gracias a la medición continua y directa del caudal suministrado a la red y con información de contadores individuales de cada abonado, se puede obtener un desglose detallado de los consumos. Como se muestra en la siguiente tabla, se trata del balance hídrico que va alineado a lo que especifica la IWA.

**Tabla 4.** Desglose consumos especificado por la IWA.

|                                |                    |                                 |                                 |                   |
|--------------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|
| Volumen que ingresa al sistema | Consumo autorizado | Consumo autorizado facturado    | Consumo facturado medido        | Agua facturada    |
|                                |                    |                                 | Consumo facturado no medido     |                   |
|                                |                    | Consumo autorizado no facturado | Consumo no facturado medido     | Agua no facturada |
|                                |                    |                                 | Consumo no facturado no medido  |                   |
|                                | Pérdidas de agua   | Pérdidas Aparentes              | Consumo no autorizado           |                   |
|                                |                    |                                 | Error de medición               |                   |
|                                |                    | Pérdidas Reales                 | Fugas en redes de distribución  |                   |
|                                |                    |                                 | Reboses en almacenamientos      |                   |
|                                |                    |                                 | Fugas en conexiones y medidores |                   |

A continuación, se detalla brevemente el volumen correspondiente a cada componente del balance hídrico

- ❖ El volumen de agua que se inyecta al sistema es medido en la entrada del distrito de medición con un caudalímetro.
- ❖ El consumo autorizado corresponde al volumen de agua legalmente utilizado, este consumo representa las siguientes componentes:
  - Consumo facturado medido el cual corresponde al volumen registrado por los contadores y que, además, genera un ingreso económico para el abastecimiento.
  - Consumo facturado no medido corresponde a un consumo que, aunque no se ha registrado mediante contador, sí se ha facturado (y ha generado un ingreso) por otros medios, como puede ser una estimación de promedio histórico.
  - Consumo no facturado medido es el volumen que, aunque sí se mida por contador, no se factura posteriormente. Este consumo suele ser el correspondiente a instalaciones públicas o también es por incremento extraordinario de consumo (IEC)

- Consumo no facturado no medido es el volumen utilizado en la extinción de incendios, lavado de red y reservorios, desagües y pruebas operativas.
- ❖ Las pérdidas totales son el resultado de la suma de las pérdidas aparentes y las pérdidas reales
  - Las pérdidas aparentes son el resultando del volumen por consumo no autorizado, más el volumen no registrado por errores de medición. El consumo no autorizado corresponde al volumen de agua que no se factura y no se mide como consecuencia de los fraudes por parte de los usuarios, dentro de esta componente se desagregan varios tipos de fraude para usuarios registrados y para usuarios no registrados:

Usuarios registrados: son fraudes efectuados por clientes, donde buscan que el volumen registrado sea menor al real consumido, logrando una notable disminución en su factura mensual, en los casos donde el fraude es el retiro del contador, logran evadir el pago de la factura.

- By pass en punto de medición
- Acometida adicional no registrada
- Contador manipulado
- Retiro no autorizado de contador
- Reconexión ilegal

Usuarios no registrados: son fraudes ejecutados por personas que no constan en la base de clientes de la empresa gestora; en zonas donde existe redes de agua potable las conexiones arbitrarias son denominas clandestinas. Por otra parte, los lunares comerciales se forman en zonas

que carecen de redes de agua potable, para obtener el líquido vital perforan la red más cercana.

- Consumo no autorizado de usuarios a través de guías clandestinas.
- Lunares comerciales
- o Las pérdidas reales corresponden a fugas en redes de distribución, fugas en conexiones y medidores y reboses en almacenamientos.

El método de cálculo empleado en este balance es de tipo TOP-DOWN (es decir que se analizan primeramente las variables más globales y a partir de estas se definen las más locales). A partir de registros de caudales inyectados a todo el sistema y el volumen correspondiente a consumos autorizados, se estima el caudal de pérdidas totales. Más allá de los cálculos y métodos que se apliquen para obtener el balance, es importante conocer la calidad de los datos, su fiabilidad y exactitud para así garantizar óptimos resultados.

### 3.4 Exponente N1

El método FAVAD, permite conocer el caudal de pérdidas reales mediante la relación de caudal y presión para dos escenarios de análisis, mediante la Ec. 1

$$\frac{Q_{ppromedio}}{Q_{pnocturnas}} = \left( \frac{p_{prom}}{p_{noc}} \right)^{N1} \quad \text{Ec. 1}$$

Despejando y reemplazando la ecuación Ec. 1 :

$$Q_{ppromedio} = Q_{pnocturnas} * \left( \frac{p_{prom}}{p_{noc}} \right)^{N1} \quad \text{Ec. 2}$$

En este proceso es necesario conocer, por un lado, los parámetros como el caudal y presión de los dos escenarios que corresponden a datos promedio y nocturno de pérdidas y además se debe contar el valor del coeficiente N1.

El exponente N1 es el correspondiente al emisor como elemento representativo de las fugas, y se obtiene mediante la ecuación general de la velocidad con la que sale el agua por un orificio que descarga a la atmósfera. Un estudio basado en la relación de la presión y el caudal de fugas determina mediante ensayos que el valor del exponente N1 puede variar de 0.5 a 2.5 dependiendo del tipo de fuga que podría producirse en un material de tubería determinado. (A. Lambert, 2001). En casos donde no se conoce el material de tubería podría suponerse un coeficiente N1 igual a 1.

Además, existe una prueba que se efectúa en campo y que permite calcular, a partir de varios escenarios de caudal y presión en tiempos específicos, el coeficiente N1 de un DMA mediante la Ec. 3

$$N1 = \frac{\ln\left(\frac{Q_1}{Q_0}\right)}{\ln\left(\frac{p_1}{p_0}\right)} \quad \text{Ec. 3}$$

De esta manera se puede comparar el valor teórico versus el valor obtenido en la prueba.

La prueba que permite conocer el coeficiente N1 es denominada Prueba de Presión paso a paso (step test por sus siglas en inglés) y consiste en realizar cierres progresivos de la válvula de abastecimiento, de manera que se logren escalones de presión y caudal que son los escenarios que permitan obtener el exponente (Fanner et al., 2007).

### 3.5 Indicadores de pérdida

De acuerdo con (A. O. Lambert et al., 1999), los indicadores que mejor representan el comportamiento de la red son aquellos que involucran los factores más relevantes del sistema. De manera general podría considerarse el porcentaje de agua perdida, el flujo de agua perdida por longitud y el índice de fugas estructurales como los indicadores representativos de los sistemas de agua potable (A. O. Lambert et al., 1999). En cada cálculo se considera la fiabilidad y exactitud de la información disponible.

Los indicadores permiten comparar la situación de cada sector con respecto de otro. Además, son una guía en la toma de decisiones.

A continuación, se detallan los indicadores a considerarse en este estudio.

### 3.5.1 Indicadores volumétricos

Los indicadores volumétricos ayudan con indicios sobre el rendimiento del sistema. Su aplicación es muy fácil siempre se cuente con medición a nivel macro en el punto de inyección y con medidores para cada uno de los usuarios.

$$\eta_g = \frac{\bar{Q}_r}{\bar{Q}} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

$\bar{Q}_r$ : Caudal registrado por los contadores

$\bar{Q}$ : Caudal inyectado al sistema

### 3.5.2 Indicadores Relativos

Los indicadores relativos involucran datos específicos como longitud de red y número de conexiones de manera que permitirán comparar con sectores que presenten similares características y calificar la condición de cada uno de ellos.

Fugas por unidad de longitud de red y tiempo

$$FLT = \frac{Q_{fugas}}{L_{red}} \quad \text{Ec. 5}$$

Fugas por acometida y unidad de tiempo

$$FN_aT = \frac{Q_{fugas}}{N_a} \quad \text{Ec. 6}$$

### 3.5.3 Indicador de Fugas estructurales IFE

El indicador de fugas estructuras IFE, es uno de los indicadores ampliamente utilizados por muchas empresas ya que refleja resultados sobre la gestión del agua en los abastecimientos.

Los pasos previos para obtener el IFE, es conocer el volumen incontrolado fugado y el umbral mínimo de fugas mediante la Ec. 7.

$$IFE = \frac{VIF}{UMF} \quad \text{Ec. 7}$$

Volumen incontrolado fugado VIF:

Corresponde al caudal de pérdidas reales del sistema actual y está relacionado al número de conexiones.

$$VIF = \frac{Q_{fugas}}{dia * N_a} \quad \text{Ec. 8}$$

Umbral mínimo de fugas UMF:

Aun cuando se trate de un sistema de redes nuevo, es necesario considerar que las redes sufrirán deterioro a lo largo del tiempo, por ende, surgirán pérdidas las cuales pueden incrementarse o ser estables dependiendo de la gestión que se ejecute.

**Tabla 5.** Parámetros requeridos para el cálculo del umbral mínimo de fugas.

| Infraestructura | Fugas de fondo                               | Daños reportados   | Daños no reportados  |
|-----------------|--|--|--|
| Redes           | Longitud<br>Presión<br>Pérdidas menores / km | Número/año<br>presión<br>Tasa de flujo promedio<br>Duración media                | Número/año<br>presión<br>Tasa de flujo promedio<br>Duración media                |
| Conexiones      | Número<br>Presión<br>Pérdidas menores / km   | Número/año<br>Tasa de flujo promedio<br>Tasa de flujo promedio<br>Duración media | Número/año<br>Tasa de flujo promedio<br>Tasa de flujo promedio<br>Duración media |
| Acometidas      | Longitud<br>Presión<br>Pérdidas menores / km | Número/año<br>Tasa de flujo promedio<br>Tasa de flujo promedio<br>Duración media | Número/año<br>Tasa de flujo promedio<br>Tasa de flujo promedio<br>Duración media |

La Tabla 6 muestra los coeficientes a utilizar para calcular el UMF. Estos pueden ser usados para diversos sistemas de distribución teniendo continuidad del servicio, la presión promedio, número de conexiones, longitud de red y longitud de acometidas. (A. O. Lambert et al., 1999).

**Tabla 6.** Coeficientes para el cálculo del Umbral Mínimo de Fugas.

| Infraestructura | Fugas de fondo | Daños reportados | Daños no reportados | UMF Total | Unidades             |
|-----------------|----------------|------------------|---------------------|-----------|----------------------|
| Redes           | 9.6            | 5.8              | 2.6                 | 18        | litros/km/día/bar    |
| Conexiones      | 0.6            | 0.04             | 0.16                | 0.8       | litros/conex/día/bar |
| Acometidas      | 16             | 1.9              | 7.1                 | 25        | litros/km/día/bar    |

$$UMF = \frac{p(A * L_{red} + B + N_a + C * L_{acom})}{N_a} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

$p$ = presión media de la red, en m.c.a.

$L_{red}$ = Longitud total de las tuberías, en km.

$N_a$ = Número total de acometidas existentes.

$L_{acom}$ = Longitud total de las acometidas, en km.

Coefficientes:

$A= 18$

$B= 0.8$

$C= 25$

### 3.6 Fiabilidad de los datos

La fiabilidad describe la fuente de donde proceden los datos, origen y cantidad de registros.

**Tabla 7.** Banda de fiabilidad de datos

| Banda de Fiabilidad | Definición   |
|---------------------|--|
| ***                 | Fuente de datos altamente fiable: datos basados en registros sólidos |
| **                  | Fuente de datos moderadamente fiable                                 |
| *                   | Fuente de datos poco fiable: basados en inferencias                  |

La exactitud involucra la incertidumbre asociada a los equipos de medición a nivel macro y contadores individuales, sensores de nivel, cálculos y estimaciones.

**Tabla 8.** Banda de exactitud de datos

| Banda de Exactitud | Incertidumbre asociada                            |
|--------------------|---|
| 0-5%               | Mejor o igual a +/- 5%                            |
| 5-20%              | Peor que +/- 5% pero mejor que o igual a +/- 20%  |
| 20-50%             | Peor que +/- 20% pero mejor que o igual a +/- 50% |
| >50                | Peor que +/- 50%                                  |

Los caudalímetros que registran el volumen que ingresa al sistema se encuentran en la primera banda de exactitud por tener un error de +/- 4%, los contadores de los abonados cuentan con un error ponderado del 10% por tanto están en la segunda banda de exactitud. Los datos por provenir de un equipo que durante su instalación fue calibrado y cuenta con un sistema de monitoreo en línea se califica como una fuente de datos altamente fiable.

#### 4 Optimización económica de la reducción de pérdidas de agua

La optimización económica de fugas relaciona el volumen de agua perdida con los costes de producción del agua y gastos de mantenimiento y reparaciones de la red. El volumen de agua perdida corresponde al tipo de política del abastecimiento, con una política pasiva se alcanzan máximos niveles de pérdidas. Una política activa de control de fugas permite contar con un nivel aceptable de pérdidas reales, a partir de la inspecciones periódicas e intervenciones oportunas.

##### 4.1 Índice de aumento natural de fugas

El índice de aumento natural de fugas se determina a partir del Incremento de caudal durante la práctica de una política pasiva de fugas.

Como se observa en la Figura 4, la pendiente de una curva de caudal – tiempo, representa al aumento natural de pérdidas.

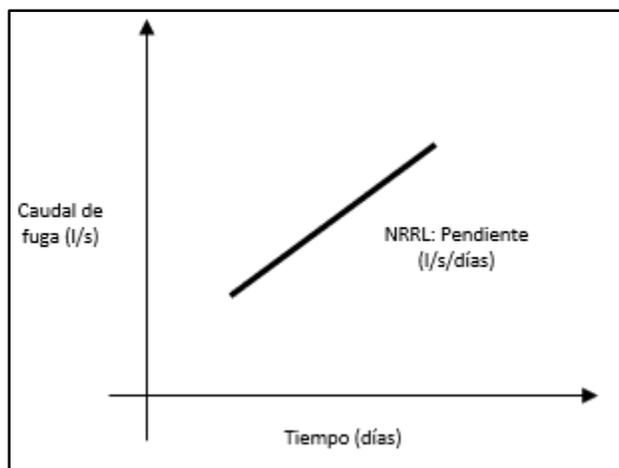


Figura 4. Aumento natural de fugas. R. Cobacho 2020.

Con el monitoreo continuo del sistema se tienen registros de caudal inyectado de manera que se puede analizar su comportamiento en el tiempo. Para determinar el aumento natural de fugas, se debe establecer un período en el cual se haya llevado a cabo una política pasiva de fugas. La política pasiva da paso al incremento progresivo de caudal de pérdidas que se espera determinar.

#### 4.2 Cálculo de parámetros optimizados

La cantidad de agua que demandan las fugas existentes en el sistema de análisis se calcula en función del índice de aumento natural de fugas.

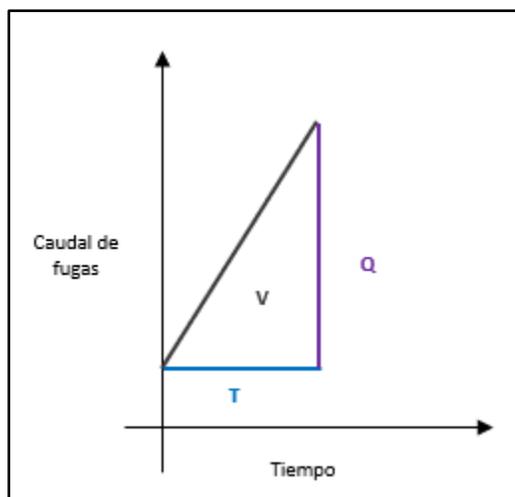


Figura 5. Relación caudal – tiempo para obtener el volumen de fugas. R. Cobacho 2020.

De acuerdo como indica la Figura 5, el volumen perdido por fugas se produce en un tiempo T, que es el mismo que permitió obtener el índice de aumento natural de fugas, lo cual se refleja mediante siguientes expresiones:

Caudal de fugas:

$$Q = INAF * T \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

$INAF$  = Índice de aumento natural de fugas

$T$  = Tiempo en el cual se logró el máximo nivel de fugas considerado como aceptable.

**Volumen de fugas V:**

$$V = 0.5 * Q * T \quad \text{Ec. 11}$$

**Período óptimo entre inspecciones mediante la siguiente expresión OIP:**

$$OIP = \sqrt{\frac{CI}{Cw * INAF * 0.5}} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

$CI$  = Coste de inspección de la red

$Cw$  = Coste marginal del agua

**% de red inspeccionada al año %RI:**

$$\%RI = \left( \frac{365}{OIP} \right) * 100 \quad \text{Ec. 13}$$

**Coste anual de inspecciones ACI:**

$$ACI \left( \frac{\$}{\text{año}} \right) = \%RI * CI \quad \text{Ec. 14}$$

**Volumen anual de agua perdida AVLW:**

$$AVLW \left( \frac{m^3}{\text{año}} \right) = ACI / CW \quad \text{Ec. 15}$$

En base al análisis económico del nivel de fugas, se establecen las estrategias de reducción de pérdidas. Es decir, si es suficiente con comprometer montos en reparación de fugas o quizás sea necesaria una inversión que involucre la rehabilitación total de las redes. Se debe tener en cuenta que en la segunda opción además se eliminan pérdidas aparentes por consumos ilegales.

## 5 Modelo matemático de la red en EPANET

Implementar el modelo de matemático de un sistema resulta de mucha utilidad para conocer su comportamiento mediante la representación matemática del sistema real de distribución de agua potable, además se obtiene una herramienta para mejorar la eficiencia y gestión de las redes de agua potable.

Los beneficios que ofrece el modelo van en línea con las estrategias de reducción ya que se puede simular varios escenarios de gestión, a continuación se detallan las principales medidas establecidas en la “Guía para la reducción de las pérdidas de agua” (Baader & Oertlé, 2011) :

- Análisis de caudales y presiones para verificar la capacidad del sistema.
- Delimitación de un distrito de medición y establecimiento de su punto de presión promedio.
- Implementación de sistemas de reducción de presión.
- Simulación de daños en tuberías para analizar la vulnerabilidad del sistema.

## 6 Caso de estudio

La operación del sistema de la ciudad de Guayaquil ha significado un verdadero reto. La empresa gestora inició la concesión con una infraestructura deficiente en cuanto a equipos de monitoreo de la red. Esto sin duda dificultó la medición y el control del caudal entregado a nivel macro. Así como también representó dificultades en el registro del suministro a nivel de usuarios.

Es por ello por lo que, el primer paso en su plan de trabajo fue establecer sectores con medición fija y continua de manera que se controlase el caudal inyectado. Además, se proyectó que todos los abonados contasen con micro medición para evitar suponer volúmenes contabilizados.

Con ese antecedente y para conseguir una auditoria lo más real posible del sistema, se cuenta con varios distritos de medición conformados por un solo sector hidráulico y con monitoreo continuo.

El análisis integral del volumen se realiza mediante el balance hídrico. Como se ha indicado ya, para ello se sigue un procedimiento Top Down a partir de datos de caudal entregado, volumen autorizado y pérdidas aparentes. En paralelo, otros procedimientos permitirán, posteriormente, conocer el volumen de pérdidas físicas mediante técnicas alternativas.

Por parte del área comercial se cuentan con datos de consumos autorizados y datos de pérdidas aparentes.

El volumen de pérdidas aparentes se ha estimado a partir de un modelo predictivo de consumos ilegales basado en analítica de datos que enlaza información disponible de órdenes de trabajo, consumos históricos, cartera de clientes registrados e información de reportes receptados por los distintos canales de atención.

La Tabla 9 refleja información detallada, por componente, del balance hídrico que se ha obtenido a partir de datos del mes de febrero del año 2019. Es importante recalcar que no existe diferencias significativas entre los volúmenes entregados de cualquiera de los 12 meses del año 2019, sin embargo, se considera ese período por contar con la mayor cantidad de datos registrados.

**Tabla 9.** Balance hídrico obtenido por el método Botton up.

|                                    |   |                                 |  |  |   |  |
|------------------------------------|---|---------------------------------|--|--|---|--|
| <b>Caudal inyectado al sistema</b> | <b>Consumo autorizado</b><br>26935 m3/mes<br>48.3%  | Consumo autorizado facturado    | Consumo facturado medido                             | 24455 m3/mes   | Agua Facturada<br>25457 m3/mes<br>45.6% |  |
|                                    |   | 25457 m3/mes                    | Consumo facturado no medido                          | 1002 m3/mes  |   |  |
|                                    |   | 45.6%                           | Consumo no facturado medido                          | 551 m3/mes   |   |  |
|                                    |   | Consumo autorizado no facturado | Consumo no facturado no medido                       | 927 m3/mes   |   |  |
|                                    | <b>Pérdidas de Totales</b><br>28869 m3/mes<br>51.7% | Caudal de Pérdidas aparentes    | Clientes Registrados Consumo no autorizado           | Cientees Registrados Consumo no autorizado           | 2573 m3/mes                             | Agua no Facturada<br>30347 m3/mes<br>54.4% |
|                                    |   |                                 | 4069 m3/mes  | Cientees no Registrados Guías clandestinas           | 860 m3/mes                              |  |
|                                    |   |                                 | 7.3%   | Errores de medición                                  | 636 m3/mes                              |  |
|                                    |   | Caudal de pérdidas reales       | Fugas en transporte y/o conducciones de distribución | Fugas en transporte y/o conducciones de distribución | 22816 m3/mes                            |  |
|                                    |   |                                 | 24800 m3/mes   | Fugas en acometida (hasta el punto de medida)        | 1984 m3/mes                             |  |
|                                    |   |                                 | 44.4%  |  | 3.6%                                    |  |

En este balance se cuenta con información al máximo nivel de detalle debido a que los consumos han sido desagregados y analizados por cada componente. De esta manera se observa que el agua no contabilizada corresponde al 55.2% del volumen total entregado, un resultado nada favorable puesto que indica que las pérdidas son mayores que el consumo autorizado del sector.

El nivel de pérdidas del sector analizado guarda relación con las pérdidas de la ciudad, gracias a la información proporcionada por la empresa gestora (año 2019) se conoce que 56.6% corresponde al agua no contabilizada.

Se inicia con datos disponibles, obtenidos a partir de una medición de origen fiable, es decir datos de caudal entregado, caudal contabilizado y datos presión.

**Tabla 10.** Información de caudal registrado.

| Información registrada     | Valor en l/s |
|----------------------------|--------------|
| Caudal entregado (24h)     | 23.1         |
| Caudal contabilizado (24h) | 11.1         |

**Tabla 11.** Información de presión.

| Información registrada     | Valor en mca. |
|----------------------------|---------------|
| Presión promedio (24h)     | 16            |
| Presión nocturna (2am-4am) | 24            |

El monitoreo continuo del caudal inyectado a un sector permite conocer el comportamiento de los consumos a distintas horas del día y, en este caso ayudará a determinar el caudal mínimo nocturno para obtener posteriormente los caudales de pérdidas.

El caudal mínimo nocturno es el correspondiente al registro entre las horas desde las 02:00 am hasta las 04:00 am ya que se supone “consumo cero” en este intervalo de tiempo, dando lugar al registro únicamente del caudal de pérdidas.

Por otra parte, y dependiendo del sector donde se realice el análisis existen coeficiente de uso nocturno que permiten estimar la parte de caudal nocturno que es consumida por los usuarios.

Para este sector en específico el coeficiente K obtenido es de 0.39 (valor adimensional), e indica que el 39% del caudal contabilizado puede ser considerado como consumo nocturno.

El coeficiente K, lo proporciona el área comercial y ha sido obtenido mediante el análisis de consumos nocturnos realizados para determinadas zonas ciudad considerando ciertas características como: tipos de consumo, ubicación geográfica y nivel socioeconómico.

Tabla 12. Información de caudal nocturno.

| Información obtenida                | Valor en l/s |
|-------------------------------------|--------------|
| Caudal contabilizado nocturno       | 4.3          |
| Caudal mínimo nocturno              | 19.2         |
| Caudal de pérdidas reales nocturnas | 15.9         |

Como se describió en el capítulo 3, el coeficiente N1 es clave en la determinación de caudal de pérdidas. Este coeficiente puede tener un valor teórico dependiendo del tipo de material de la red. Así como también puede calcularse a partir de la prueba PST, que se realiza en campo.

Para este caso en particular se tiene únicamente tubería de polietileno de alta densidad PEAD. En base a literatura consultada, le correspondería un exponente N1 teórico de 1.5 por tratarse de material plástico donde al ocurrir una fuga la rotura sería un orificio variable.

El coeficiente N1 para el sector en estudio, se ha determinado con la prueba PST, como se observa en la Figura 6. Durante el tiempo de prueba se produjeron cuatro escalones de presión mediante el cierre de la válvula de abastecimiento.

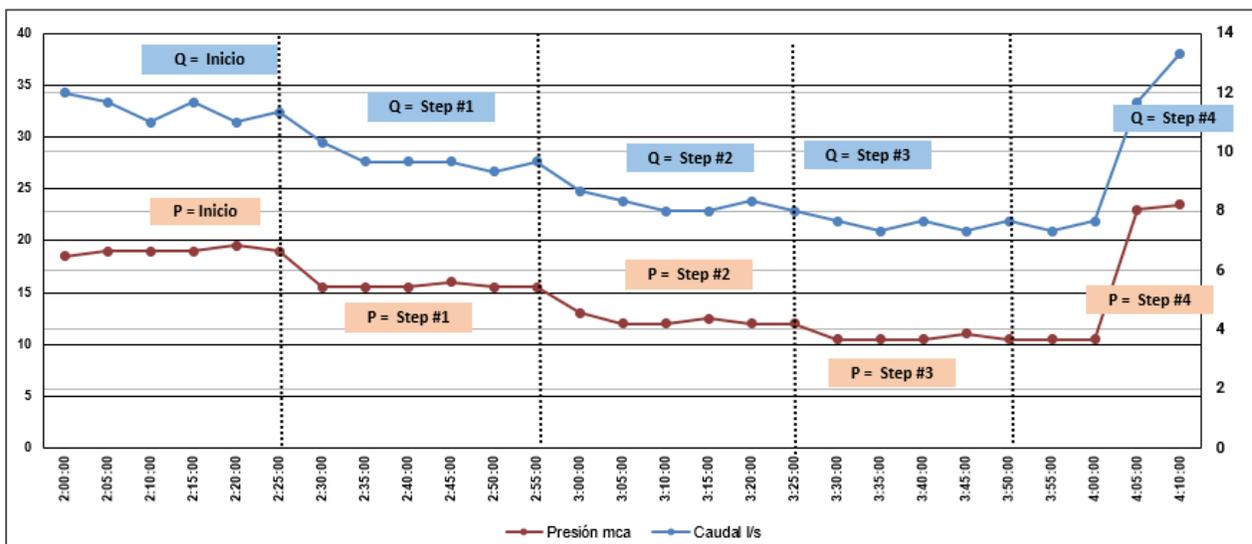


Figura 6. Caudal y Presión registradas durante la prueba.

En cada escalón se registran datos suficientes y uniformes que permiten identificar la tendencia de disminución de caudal e incremento de presión. El horario óptimo para esta actividad es de 02:00 a 04:00 ya que es denominado el horario de mínimo consumo o consumo nulo. Este intervalo de tiempo facilita la obtención del caudal de pérdidas.

Los datos de la prueba se reflejan en la Tabla 13. El primer escenario inicio a las 02:00 donde la presión y caudal disminuyeron a 19.13 mca y 11.34 l/s respectivamente. En la misma tabla se detallan los valores para los intervalos de tiempo desde las 02:30 hasta las 04:00. Con cada uno de los datos se aplica la Ec. 1, de manera que se tienen los coeficientes N1 para cada etapa.

**Tabla 13.** Caudal y Presión registradas durante la prueba.

| Hora de inicio       | Hora de fin | Presión (AZNP) (mca) | Caudal (l/s) | Consumo nocturno (l/s) | Pérdidas físicas (l/s) | Valores calculados de N1 para pérdidas físicas |          |          |          |             |
|----------------------|-------------|----------------------|--------------|------------------------|------------------------|--|----------|----------|----------|-------------|
|                      |             |                      |              |                        |                        | Etapas 1                                       | Etapas 2 | Etapas 3 | Etapas 4 | Etapas 5    |
|                      | 2:00        | 20.00                | 13.17        | 3.2                    | 10.0                   |  |          |          |          |             |
| 2:00                 | 2:30        | 19.13                | 11.34        | 3.2                    | 8.1                    | 1.25   |          |          |          |             |
| 2:30                 | 3:00        | 15.63                | 9.59         | 3.2                    | 6.4                    | 1.22   | 1.20     |          |          |             |
| 3:00                 | 3:30        | 12.38                | 8.25         | 3.2                    | 5.1                    | 1.14   | 1.09     | 1.00     |          |             |
| 3:30                 | 4:00        | 10.63                | 7.50         | 3.2                    | 4.3                    | 1.12   | 1.08     | 1.02     | 1.05     |             |
| <b>N1 Promedio =</b> |             |                      |              |                        |                        |  |          |          |          | <b>1.12</b> |

El N1 resultante para el todo el sector es igual al promedio del obtenido en cada etapa, para este caso es igual a N1= 1.12.

Reemplazando en la Ec. 2.

$$Q_{ppromedio} = 15.9 * \left(\frac{16}{24}\right)^{1.12} = 10.1 \text{ l/s}$$

**Tabla 14.** Caudal de pérdidas estimado con FAVAD.

| Información obtenida         | Valor en l/s |
|------------------------------|--------------|
| Caudal de pérdidas totales   | 11.9         |
| Caudal de pérdidas reales    | 10.1         |
| Caudal de pérdidas aparentes | 1.8          |

De esta manera se ha logrado conocer el volumen de pérdidas reales que engloban los componentes de fugas en red, acometida y contadores y por diferencia el volumen de pérdidas aparentes.

**Tabla 15.** Balance hídrico obtenido por el método Botton up.

|   |  |   |
|---|--|---|
| <b>Volumen Inyectado al Sistema</b><br>55804 m3/mes<br>100.0% | <b>Consumo autorizado</b><br>26935 m3/mes<br>48.3% |   |
|   | <b>Pérdidas Totales</b><br>28869 m3/mes<br>51.7%   | Pérdidas Aparentes<br>4435 m3/mes<br>7.9% |
|   |  | Pérdidas Reales<br>24434 m3/mes<br>43.8%  |

El nivel de detalle de este balance es mucho menor ya que las componentes de las pérdidas reales únicamente engloban fugas en redes de distribución, acometidas y medidor. De acuerdo con datos históricos se asume que el volumen de fugas en redes de distribución son el 90% de las pérdidas totales y el 10% restante corresponde a las fugas en acometida.

De manera general y como era de esperarse con ambos métodos, el balance indica que el porcentaje de agua que se pierde ya sea por consumos fraudulentos o por fugas es mayor que el porcentaje de agua no contabilizada.

Esto es un indicativo de que en el sector deben aplicarse de manera integral estrategias de reducción de pérdidas, hasta alcanzar un nivel mínimo aceptable de pérdidas y posteriormente monitorear el sector para evitar incontrolable deterioro.

### 6.1 Indicadores de Pérdidas

Una vez conocida la desagregación de los consumos, es necesario determinar indicadores que permitan conocer el estado del sistema considerando la infraestructura que lo compone y datos de caudal y presión de servicio que permitan comparar el sistema con otros de iguales

características de tal manera que ayuden en la toma de decisiones a la hora de aplicar una u otra estrategia de reducción de pérdidas.

#### 6.1.1 Indicadores volumétricos

Los datos considerados en para obtener los indicadores volumétricos son los correspondientes a un mes al año 2019.

Reemplazando en Ec. 4

$$\eta_g = \frac{26935.2 m^3 / mes}{55804.2 m^3 / mes} = 48\%$$

El resultado de este indicador refleja la eficiencia del sistema, es decir que, del caudal total inyectado al sistema, únicamente el 48% es registrado. La diferencia podría tratarse de fugas, reboses de almacenamientos, caudal consumido de manera clandestina por medio de fraudes y errores de medida.

Si bien el rendimiento del sistema da indicios globales del sistema, no es un indicador que permita comparar su estado con el de otros sistemas y gestionarlo de manera óptima.

#### 6.1.2 Indicadores Relativos

Fugas por unidad de longitud de red y tiempo, a partir de Ec. 5

$$FLT = \frac{Q_{fugas}}{L_{red}} = \frac{886 m^3 / dia}{16.84 km} = 52.61 m^3 / dia / km$$

$$FLT = 2192 l/h/km$$

Fugas por acometida y unidad de tiempo. Reemplazando en Ec. 6

$$FN_a T = \frac{Q_{fugas}}{N_a} = \frac{886 m^3 / dia}{1431} = 0.62 m^3 / dia / acometida$$

$$FN_a T = 619 l/dia / acometida$$

### 6.1.3 Indicador de Fugas estructurales IFE

#### **Volumen incontrolado fugado**

Reemplazando en Ec. 8

$$VIF = \frac{Q_{fugas}}{dia * N_a} = \frac{885714 \text{ l/dia}}{1431} = 618.95 \text{ l/dia/acom}$$

#### **Umbral mínimo de fugas**

Reemplazando en Ec. 9

$$UMF = \frac{30(18 * 16.84 + 0.8 * 1431 + 25 * 4.3)}{1431} = 32.6 \text{ l/dia/acom}$$

#### **Indicador de fugas estructurales**

De acuerdo con la ecuación Ec. 7

$$IFE = \frac{618.95 \text{ l/dia/acom}}{32.6 \text{ l/dia/acom}} = 18.98$$

El indicador de fugas estructurales indica que el sistema presenta una cantidad de fugas catorce veces mayor al umbral mínimo que debe tener el sistema, es decir que la gestión debe tener mayor fuerza en la eliminación de fugas.

## 6.2 Optimización económica de la reducción de pérdidas de agua

### 6.2.1 Índice de aumento natural de fugas

El caso de estudio es un sector hidráulico bien definido que se ha constituido como un distrito de medición desde el año 2019 con la finalidad monitorear el caudal entregado. La medición se la

realiza por medio de un caudalímetro electromagnético, el cual registra caudal cada quince minutos.

En la siguiente gráfica se muestra el comportamiento del caudal inyectado al sistema, los datos corresponden a un registro desde la fecha de instalación en el año 2019 hasta inicios del 2021.

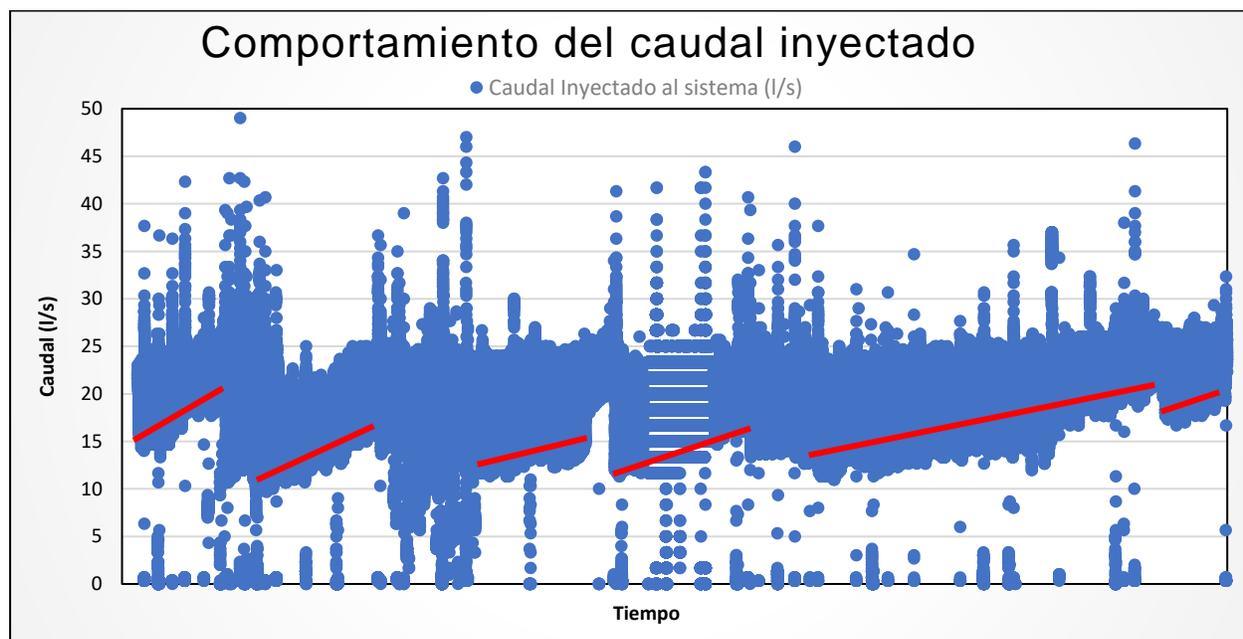


Figura 7. Tendencia de caudal registrado en el sistema.

Se consideran todos los datos que registrados por el equipo para conocer su comportamiento. Se observa tendencia de mínimo y máximo consumo, así como también datos aberrantes y valores nulos producto de fallas de equipo y/o interrupciones de servicio programadas o emergentes.

A partir del gráfico general, se enfatiza el análisis en el caudal mínimo nocturno de manera que se pueda observar la tendencia de aumento natural de fugas y así obtener el correspondiente índice que será de mucha ayuda en la optimización económica de reducción de pérdidas de agua.

La gráfica presenta una tendencia variable y específica para varios rangos de fecha. Como se detalló anteriormente, el sector se cuenta con medición directa y continua desde finales del año 2019 de manera que el historial de datos es limitado, sin embargo, es de mucha utilidad para la obtención del INAF.

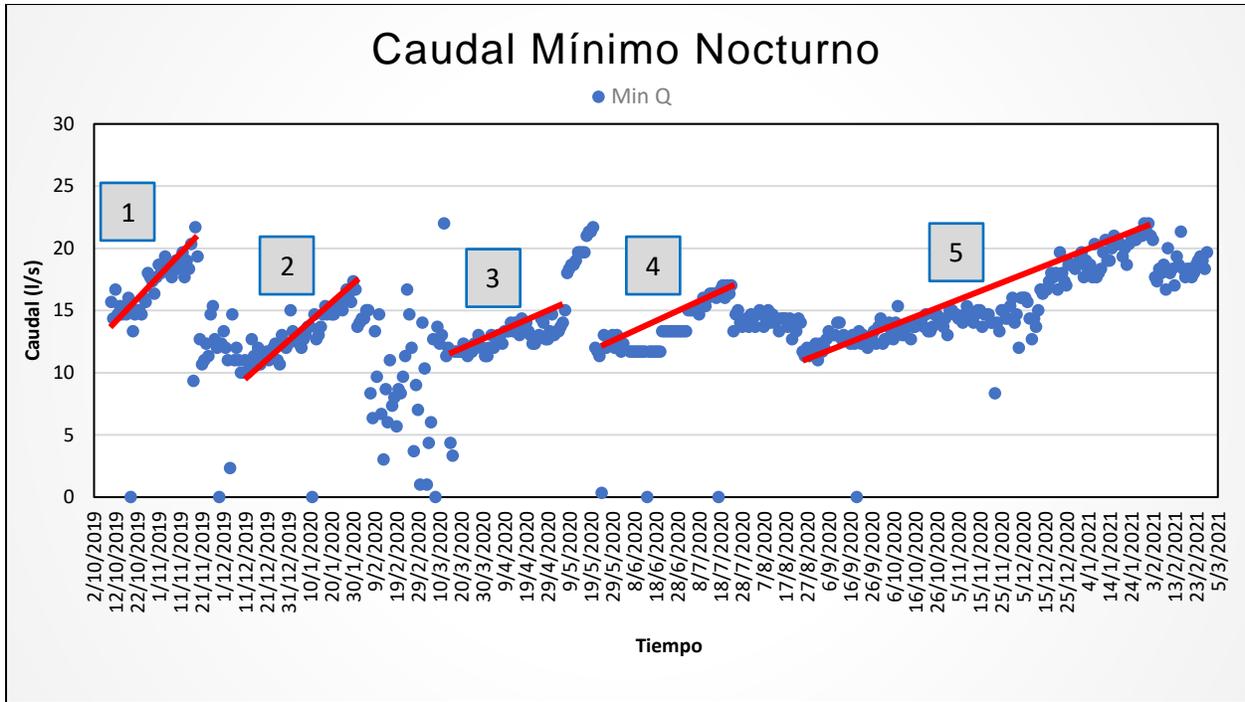


Figura 8. Tendencia de caudal mínimo nocturno.

De acuerdo con el gráfico se puede llevar a cabo el análisis de pendientes de comportamiento del caudal mínimo nocturno, con el fin de identificar el aumento natural de pérdidas. El procedimiento de cálculo empleado para obtener el INAF consiste en obtener la pendiente de la recta que se forma en cada uno de los tramos de la gráfica de caudal mínimo nocturno. En la **Figura 9** se muestra el tramo 5 con la tendencia de crecimiento en un tiempo de 145 días.

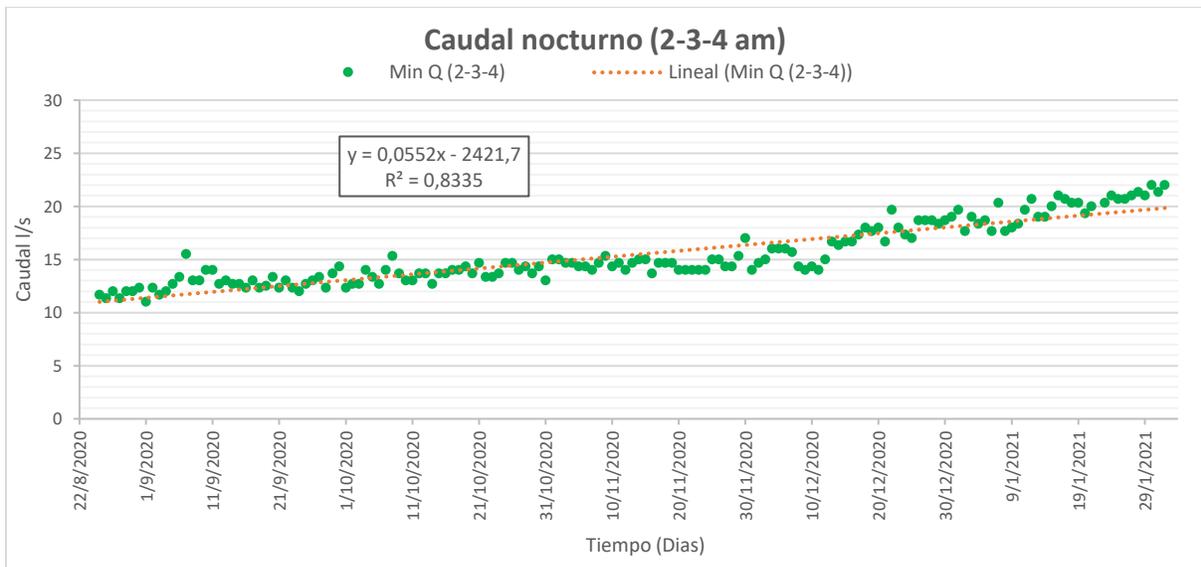


Figura 9. Tendencia de caudal mínimo nocturno del tramo 5.

A continuación, se presenta el valor de INAF obtenido para cada tramo establecido en la tendencia de caudal mínimo nocturno.

- La primera pendiente corresponde a un grupo de datos entre las fechas del 10 de octubre del 2019 al 19 de noviembre del 2019.

| Análisis del incremento de caudal mínimo nocturno en el intervalo 1 |               |           |
|---|---------------|-----------|
| Tiempo  | 40 días       | 0.11 años |
| Aumento de caudal   | 5 l/s         |           |
| INAF  | 0.125 l/s/día |           |

- La segunda pendiente corresponde a un grupo de datos entre las fechas del 12 de diciembre del 2019 al 31 de enero del 2020

| Análisis del incremento de caudal mínimo nocturno en el intervalo 2 |              |           |
|---|--------------|-----------|
| Tiempo  | 50 días      | 0.14 años |
| Aumento de caudal   | 3 l/s        |           |
| INAF  | 0.06 l/s/día |           |

- La tercera pendiente corresponde a un grupo de datos entre las fechas del 18 de marzo del 2020 al 07 de mayo del 2020

| Análisis del incremento de caudal mínimo nocturno en el intervalo 3 |               |           |
|---|---------------|-----------|
| Tiempo  | 55 días       | 0.15 años |
| Aumento de caudal   | 7 l/s         |           |
| INAF  | 0.127 l/s/día |           |

- La cuarta pendiente corresponde a un grupo de datos entre las fechas del 23 de mayo del 2020 al 23 de julio del 2020

| Análisis del incremento de caudal mínimo nocturno en el intervalo <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">4</span> |               |           |
|---|---------------|-----------|
| Tiempo  | 61 días       | 0.17 años |
| Aumento de caudal   | 3 l/s         |           |
| INAF  | 0.049 l/s/día |           |

- La quinta pendiente corresponde a un grupo de datos entre las fechas del 28 de agosto del 2020 al 20 de enero del 2021

| Análisis del incremento de caudal mínimo nocturno en el intervalo <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">5</span> |               |           |
|---|---------------|-----------|
| Tiempo  | 145 días      | 0.40 años |
| Aumento de caudal   | 8 l/s         |           |
| INAF  | 0.055 l/s/día |           |

En la **Tabla 16** se resumen los índices de aumento natural de fugas obtenidos en cada tramo. A partir de los resultados se observa una diferencia marcada entre los tramos 1 con el máximo índice (0.125 s/s/día) y el tramo 4 como el mínimo valor (0.049 l/s/día).

**Tabla 16.** Valores de INAF determinado en cada tramo.

| Tramo             | 1     | 2     | 3      | 4     | 5     |
|-------------------|-------|-------|--------|-------|-------|
| INAF (l/s/día)    | 0.125 | 0.06  | 0.127  | 0.049 | 0.055 |
| INAF (m3/día/día) | 10.8  | 5.184 | 10.973 | 4.234 | 4.752 |

Partiendo del concepto de aumento natural de fugas que ocurre durante un tiempo donde no se interviene en reparaciones, se considera el resultado del análisis de la pendiente del tramo 4 el cual ocurrió durante un mayor período de tiempo, 145 días.

### 6.2.2 Cálculo de parámetros optimizados

Los parámetros necesarios para el cálculo del nivel económico de fugas se determinan a partir del mínimo INAF ya que se obtuvo del tramo con el mayor período de tiempo. INAF = 0.049 l/s/día o 4.752 m<sup>3</sup>/día/día.

#### **Cálculo del caudal de fugas.**

Reemplazando en la Ec. 10.

$$Q = 4.752 \frac{m^3}{dias^2} * 145 \text{ dias} = 689.04 \text{ m}^3 / \text{dia}$$

#### **Obtención del volumen de fugas**

Reemplazando en la Ec. 11.

$$V = 0.5 * 689.04 \frac{m^3}{dia} * 145 \text{ dias} = 49955.4 \text{ m}^3$$

Por otra parte, y a manera de comprobar, el volumen de fugas que se refleja en el balance hídrico obtenido en el capítulo 3 refleja un valor de 24800 m<sup>3</sup> para el mes de febrero, es decir que se guarda relación de incremento de caudal de fugas conforme avance el tiempo.

Con una política pasiva de control de fugas, el volumen de agua desperdiciada es de 49955.4 m<sup>3</sup> cada 145 días. En base a la información recabada del abastecimiento, el coste del agua considerando gastos de producción y distribución alcanzan el valor de 0.05 USD/m<sup>3</sup>, dando como resultado un coste de agua fugada en el período de análisis de 2497.77 USD.

Es necesario también conocer el coste que incurre una inspección de la red, ya que se busca el equilibrio entre la inversión y la ganancia que implica aplicar esta estrategia de reducción de pérdidas de agua.

El costo por metro lineal de inspección con equipos de pre-localización de fugas es de 0.25 USD/m, la campaña de fugas es realizada a la totalidad de la red, implicando un coste total de US\$4210.00.

**Período óptimo entre inspecciones**, de la Ec. 12.

$$OIP = \sqrt{\frac{\$4210}{0.05 \frac{\$}{m^3} * 4752 \frac{m^3}{días^2} * 0.5}} = 188 \text{ días} \approx 0.5 \text{ años}$$

**% de red inspeccionada al año**, de la Ec. 13

$$\%RI = \left(\frac{365}{OIP}\right) * 100 = \frac{365}{188} * 100 = 194\%$$

**Coste anual de inspecciones**, de la Ec. 14

$$ACI \left(\frac{\$}{año}\right) = \%RI * CI = 194\% * \$4210 = \$8167/año$$

**Volumen anual de agua perdida**, de la Ec. 15.

$$AVLW \left(\frac{m^3}{año}\right) = \frac{8167.4}{0.05} = 163348 \frac{m^3}{año}$$

De los cálculos de la optimización económica de fugas, se obtiene que el caudal de fugas a recuperar desde el punto de vista económico es de 163348 m<sup>3</sup>/año. Es decir que el coste que implica la reparación de fugas está en concordancia con el coste del agua.

#### 6.2.2.1 Parámetros optimizados para diferentes valores de INAF

En el apartado anterior se presentó el detalle del cálculo de los parámetros optimizados para un índice de aumento natural de fugas específico.

Como era de suponerse los resultados confirman que, a mayor tasa de aumento de fugas, se pierde mayor volumen y se requiere menor tiempo entre inspecciones. Específicamente los parámetros resultantes de considerar el INAF del tramo 1, representan el mayor volumen de agua perdida, sin embargo, no fue considerado como un dato en los siguientes cálculos debido al poco tiempo del intervalo.

Ahora se presenta en la **Tabla 17** los parámetros correspondientes a los diferentes índices.

**Tabla 17.** Parámetros optimizados para los diferentes INAF obtenidos.

| INAF                              | Unidades                | Tramo 1 | Tramo 2 | Tramo 3  | Tramo 4 |
|-----------------------------------|-------------------------|---------|---------|----------|---------|
| INAF                              | l/s/día                 | 0.125   | 0.06    | 0.127    | 0.049   |
|                                   | m <sup>3</sup> /día/día | 10.80   | 5.18    | 10.97    | 4.23    |
| Tiempo                            | días                    | 40      | 50      | 55       | 61      |
| Caudal de fugas                   | m <sup>3</sup> /día     | 432.00  | 259.20  | 603.50   | 258.25  |
| Volumen de fugas                  | m <sup>3</sup>          | 8640.00 | 6480.00 | 16596.36 | 7876.61 |
| Período óptimo entre inspecciones | días                    | 125     | 180     | 124      | 199     |
|                                   | años                    | 0.3     | 0.5     | 0.3      | 0.5     |
| Red inspeccionada                 | %                       | 292%    | 203%    | 295%     | 183%    |
| Costo anual de inspecciones       | \$/año                  | \$12293 | \$8546  | \$12420  | \$7704  |
| Volumen anual de agua perdida     | m <sup>3</sup> /año     | 245864  | 170926  | 248390   | 154086  |

### 6.3 Modelo hidráulico del sector SGU-183

La implantación del modelo hidráulico del sector conllevó a recopilar información actualizada y georreferenciada de la red y conocer todos sus parámetros físicos como material, longitud y diámetro de las tuberías de distribución. También fue necesario recopilar la información general de acometidas, puntos de inyección, estado de válvulas, información topográfica y datos de caudal inyectado.

La **Tabla 18** resume los datos relevantes del sector, así como también se muestra la relación entre usuarios y longitud de red instalada, es decir que por cada km de red se tienen 85 abonados y considerando que en promedio en cada vivienda existen 5 personas se obtiene que por cada km de red instalada se abastecen a 425 habitantes.

La cantidad de abonados asignados a un nudo de consumo es de aproximadamente 7 por cada km de red, en un total de 194 nudos considerados en el modelo.

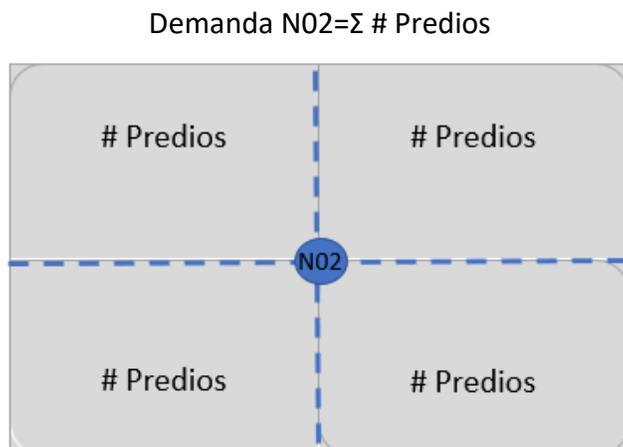
Aproximadamente la dotación máxima por cada habitante está alrededor de 170 l/hab/día en climas cálidos (INEN, 1992), este es un valor considerado en el diseño de sistemas de redes nuevos, sin embargo, para este ejercicio donde se trata de un sistema en uso, se determinó que

la dotación es igual a 1104 l/hab/día, se trata de un valor importante y que evidentemente necesario para cubrir la demanda del caudal de pérdidas.

**Tabla 18.** Relación entre habitantes, abonados, longitud de red y nudos.

| Datos                       | Valor        | Unidad              |
|-----------------------------|--------------|---------------------|
| Total abonados              | 1431         | Abonados            |
| Q consumido                 | 91.43        | m <sup>3</sup> /mes |
| <b>Dotación por abonado</b> |              | <b>l/s</b>          |
| Longitud de red (km)        | 16.84        | km                  |
| <b>Abonados/km</b>          | <b>85</b>    | <b>Abonados/km</b>  |
| Habitantes                  | 7155         | Hab.                |
| <b>Habitantes/km</b>        | <b>425</b>   | <b>Hab/km</b>       |
| Nudos/red                   | 194          | Nudos/km            |
| Abonados/Nudos/red          | 7.38         | Abonados/Nudos/km   |
| <b>Habitantes/Nudos/red</b> | <b>36.88</b> | <b>Hab/Nudos/km</b> |

Para representar el caudal de la red, se ingresaron datos registrados y el método de asignación de demandas elegido fue el de asignar el consumo al nudo más cercano. Como se observa en la **Figura 10** el Nudo N02 representará el consumo de la sumatorio de las cuentas de cercanas, este procedimiento se repitió para los 194 nudos establecidos.



**Figura 10.** Esquema de asignación de demandas

Una vez ingresada toda información se construyó el modelo en EPANET. Debido a que el abastecimiento es por gravedad y el agua es extraída desde un río, en el modelo se consideró un embalse en el punto de ingreso. El medidor de caudal instalado en el punto de inyección del sector

proporciona información a partir de la caudal se determinan los patrones de demanda de los nudos de consumo.

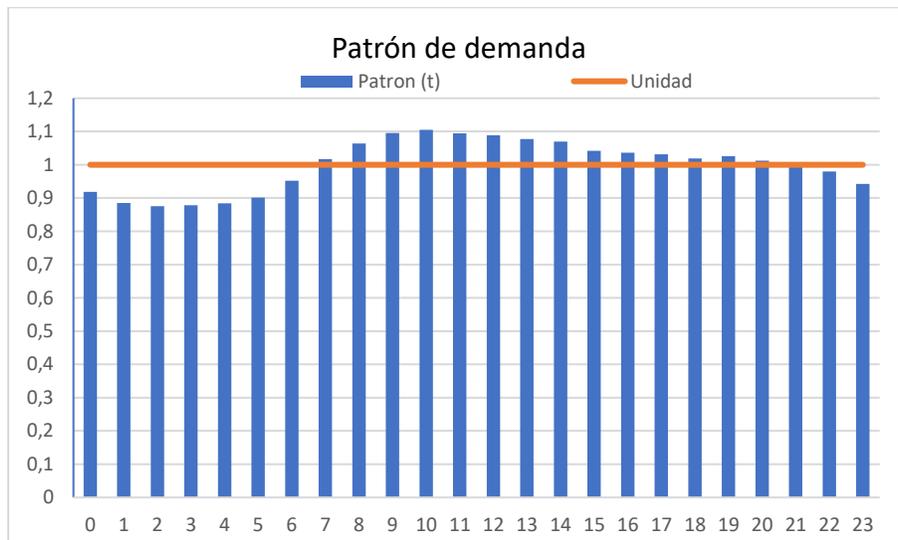


Figura 11. Esquema de asignación de demandas

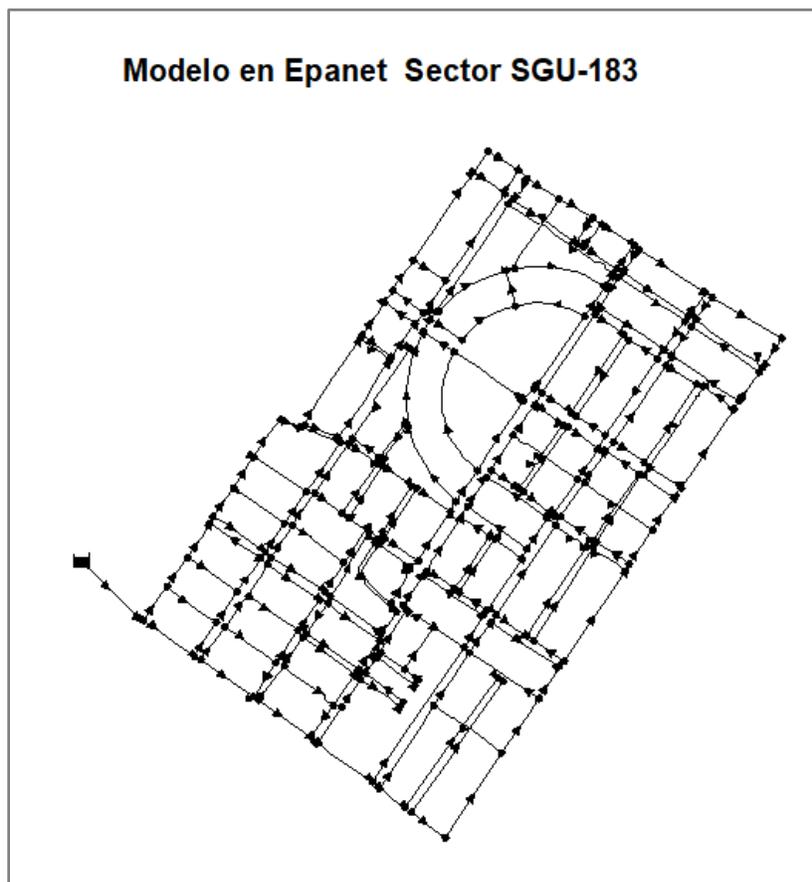


Figura 12. Esquema de la red representada en Epanet.

### 6.3.1 Calibración del modelo

En general, dentro de un sistema de agua potable se deben considerar todos los consumos, es decir los consumos de usuarios que dependen del tiempo y van asociados a patrones de demanda y los consumos consecuentes de fugas presentes en la red que dependen de la presión del sistema.

En Epanet es posible la simulación de fugas mediante la representación de emisores como consumos dependientes de la presión de la red en un sistema presurizado.

En este estudio se realizó la interpretación de fugas con ayuda del software UALEAKS (Pardo & Riquelme, 2019), el cual permite, mediante la calibración de emisores, simular fugas distribuidas de manera homogénea en toda la red.

Para poder ejecutar la herramienta se deberá tener previamente introducida la red con todas sus características hidráulicas en Epanet y comprobar que su ejecución no presente problemas.

El dato necesario y obligatorios para UALEAKS es la eficiencia del sistema, que ya fue obtenida previamente, también se debe establecer el número máximo de iteraciones y la exactitud del cálculo.

De manera adicional proporciona la auditoria hidráulica y energética para un período de 24 horas. Para el sistema en estudio, el volumen de pérdida por fugas resulta 812 m<sup>3</sup> en un día, UALEAKS resuelve que la energía necesaria para inyectar dicho volumen es de 53.84 kW/h.

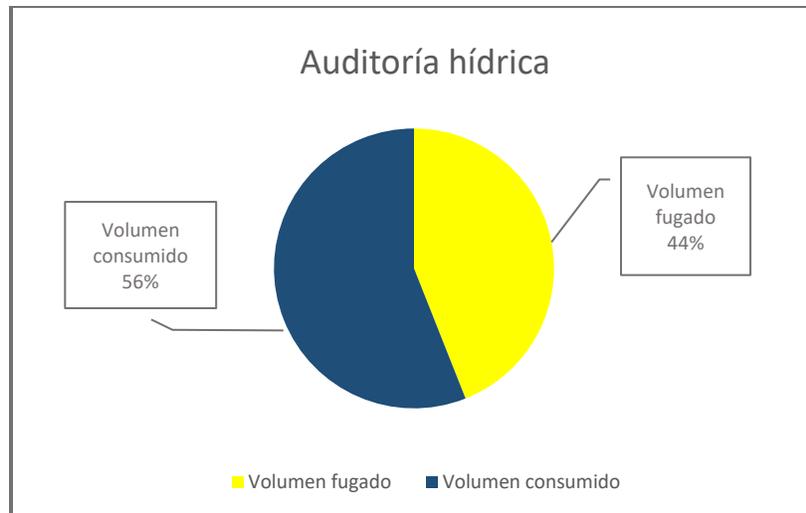


Figura 13. Auditoría hídrica SGU-183 obtenida con UALEAKS.

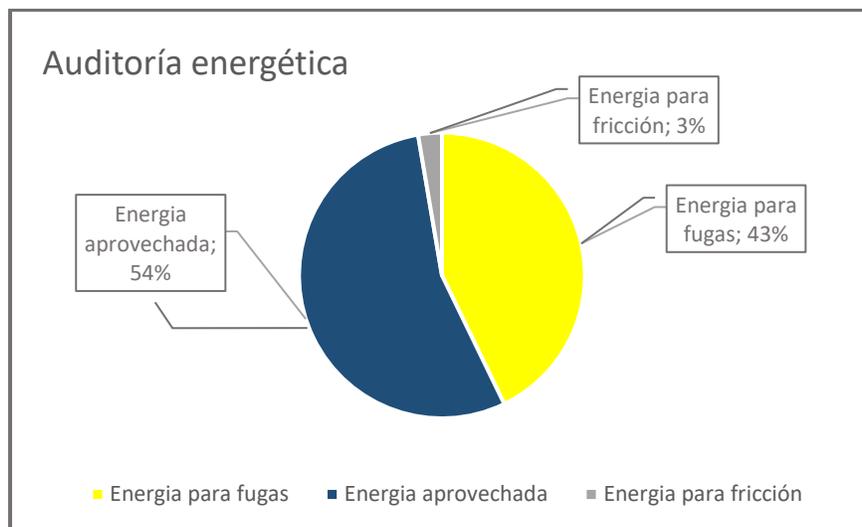


Figura 14. Auditoría energética SGU-183 obtenida con UALEAKS.

En la **Figura 15** se observan los resultados de las auditorías hídrica y energética obtenidas con UALEAKS.

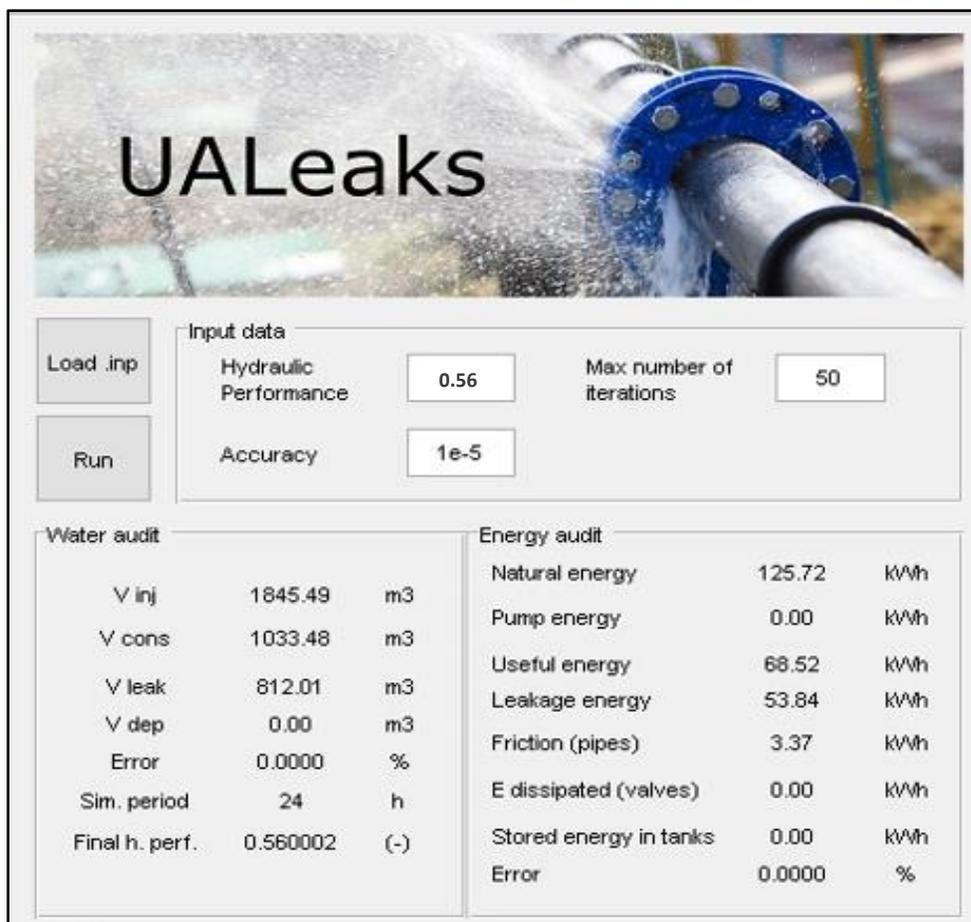


Figura 15. Resultados de Auditoría SGU-183 obtenida con UALEASES.

A partir de la información del modelo hidráulico de Epanet, la herramienta representa los coeficientes emisores de una manera rápida sin importar la cantidad de nudos con los que cuenta la red. En la **Tabla 19** se detallan los coeficientes de cada uno de los nudos de consumo.

Tabla 19. Coeficientes emisores obtenidos con UALEASES, valores para los 213 nudos de consumo.

| No | Nudos de consumo | Coficiente emisor | No | Nudos de consumo | Coficiente emisor | No | Nudos de consumo | Coficiente emisor |
|----|------------------|-------------------|----|------------------|-------------------|----|------------------|-------------------|
| 1  | N5               | 0.000074          | 34 | N138             | 0.009828          | 67 | N237             | 0.004796          |
| 2  | N7               | 0.006954          | 35 | N140             | 0.008102          | 68 | N238             | 0.000327          |
| 3  | N16              | 0.010602          | 36 | N141             | 0.007686          | 69 | N239             | 0.006816          |
| 4  | N20              | 0.010224          | 37 | N143             | 0.008140          | 70 | N240             | 0.003064          |
| 5  | N22              | 0.007622          | 38 | N145             | 0.011011          | 71 | N242             | 0.008057          |
| 6  | N27              | 0.009291          | 39 | N146             | 0.010412          | 72 | N246             | 0.010103          |
| 7  | N29              | 0.008114          | 40 | N148             | 0.009673          | 73 | N248             | 0.009457          |
| 8  | N33              | 0.007942          | 41 | N149             | 0.008361          | 74 | N249             | 0.006023          |
| 9  | N36              | 0.010295          | 42 | N150             | 0.005800          | 75 | N250             | 0.007130          |

| No  | Nudos de consumo | Coficiente emisor | No  | Nudos de consumo | Coficiente emisor | No  | Nudos de consumo | Coficiente emisor |
|-----|------------------|-------------------|-----|------------------|-------------------|-----|------------------|-------------------|
| 10  | N39              | 0.010749          | 43  | N151             | 0.007673          | 76  | N251             | 0.010013          |
| 11  | N40              | 0.010029          | 44  | N152             | 0.010199          | 77  | N254             | 0.004156          |
| 12  | N43              | 0.010282          | 45  | N161             | 0.007788          | 78  | N257             | 0.004156          |
| 13  | N44              | 0.010103          | 46  | N163             | 0.006759          | 79  | N258             | 0.003453          |
| 14  | N46              | 0.010790          | 47  | N172             | 0.010678          | 80  | N260             | 0.007527          |
| 15  | N47              | 0.009029          | 48  | N178             | 0.007814          | 81  | N263             | 0.015474          |
| 16  | N61              | 0.008933          | 49  | N182             | 0.007871          | 82  | N266             | 0.006830          |
| 17  | N65              | 0.008300          | 50  | N184             | 0.010832          | 83  | N273             | 0.008901          |
| 18  | N76              | 0.008089          | 51  | N185             | 0.006586          | 84  | N275             | 0.010039          |
| 19  | N83              | 0.008031          | 52  | N186             | 0.006004          | 85  | N276             | 0.006791          |
| 20  | N85              | 0.008166          | 53  | N188             | 0.005531          | 86  | N278             | 0.008888          |
| 21  | N88              | 0.010678          | 54  | N193             | 0.004828          | 87  | N282             | 0.016098          |
| 22  | N91              | 0.005154          | 55  | N198             | 0.006727          | 88  | N284             | 0.007155          |
| 23  | N92              | 0.010589          | 56  | N201             | 0.017822          | 89  | N288             | 0.014027          |
| 24  | N93              | 0.010055          | 57  | N211             | 0.005678          | 90  | N292             | 0.007718          |
| 25  | N99              | 0.010442          | 58  | N212             | 0.007501          | 91  | N293             | 0.004348          |
| 26  | N105             | 0.010129          | 59  | N213             | 0.008517          | 92  | N294             | 0.006842          |
| 27  | N112             | 0.005424          | 60  | N217             | 0.009259          | 93  | N296             | 0.007820          |
| 28  | N115             | 0.007769          | 61  | N218             | 0.007903          | 94  | N298             | 0.008082          |
| 29  | N117             | 0.010800          | 62  | N219             | 0.010678          | 95  | N300             | 0.002046          |
| 30  | N122             | 0.007839          | 63  | N221             | 0.006452          | 96  | N301             | 0.008831          |
| 31  | N123             | 0.011906          | 64  | N227             | 0.006023          | 97  | N302             | 0.007098          |
| 32  | N129             | 0.009510          | 65  | N228             | 0.007296          | 98  | N303             | 0.005231          |
| 33  | N135             | 0.009930          | 66  | N234             | 0.007648          | 99  | N305             | 0.007715          |
| 100 | N307             | 0.004719          | 138 | N384             | 0.002686          | 176 | N485             | 0.010966          |
| 101 | N310             | 0.009088          | 139 | N385             | 0.008588          | 177 | N486             | 0.010544          |
| 102 | N311             | 0.018288          | 140 | N387             | 0.008012          | 178 | N487             | 0.006695          |
| 103 | N312             | 0.010774          | 141 | N388             | 0.013639          | 179 | N490             | 0.011222          |
| 104 | N314             | 0.006490          | 142 | N389             | 0.009067          | 180 | N491             | 0.010519          |
| 105 | N320             | 0.010915          | 143 | N392             | 0.011452          | 181 | N492             | 0.005611          |
| 106 | N321             | 0.013716          | 144 | N394             | 0.009259          | 182 | N493             | 0.008868          |
| 107 | N326             | 0.008632          | 145 | N396             | 0.005435          | 183 | N495             | 0.008429          |
| 108 | N329             | 0.018767          | 146 | N406             | 0.007667          | 184 | N497             | 0.010149          |
| 109 | N330             | 0.007616          | 147 | N407             | 0.011401          | 185 | N498             | 0.011060          |
| 110 | N332             | 0.010627          | 148 | N411             | 0.006656          | 186 | N509             | 0.009860          |
| 111 | N334             | 0.007622          | 149 | N418             | 0.015013          | 187 | N510             | 0.006341          |
| 112 | N335             | 0.008175          | 150 | N423             | 0.010695          | 188 | N513             | 0.006387          |
| 113 | N336             | 0.007628          | 151 | N429             | 0.009208          | 189 | N516             | 0.009093          |
| 114 | N337             | 0.017592          | 152 | N431             | 0.006740          | 190 | N518             | 0.009036          |

| No  | Nudos de consumo | Coefficiente emisor | No  | Nudos de consumo | Coefficiente emisor | No  | Nudos de consumo | Coefficiente emisor |
|-----|------------------|---------------------|-----|------------------|---------------------|-----|------------------|---------------------|
| 115 | N340             | 0.009093            | 153 | N436             | 0.011977            | 191 | N520             | 0.009336            |
| 116 | N343             | 0.013748            | 154 | N440             | 0.009527            | 192 | N522             | 0.010097            |
| 117 | N344             | 0.012716            | 155 | N441             | 0.009687            | 193 | N523             | 0.010608            |
| 118 | N347             | 0.018876            | 156 | N442             | 0.006804            | 194 | N525             | 0.013083            |
| 119 | N352             | 0.008620            | 157 | N446             | 0.008715            | 195 | N529             | 0.010301            |
| 120 | N354             | 0.007635            | 158 | N449             | 0.011350            | 196 | N535             | 0.009157            |
| 121 | N355             | 0.008687            | 159 | N451             | 0.009093            | 197 | N537             | 0.010391            |
| 122 | N356             | 0.002110            | 160 | N452             | 0.010052            | 198 | N542             | 0.009553            |
| 123 | N359             | 0.007641            | 161 | N457             | 0.008460            | 199 | N545             | 0.008012            |
| 124 | N361             | 0.009374            | 162 | N458             | 0.009930            | 200 | N551             | 0.012008            |
| 125 | N363             | 0.006186            | 163 | N459             | 0.012072            | 201 | N555             | 0.008838            |
| 126 | N365             | 0.007673            | 164 | N461             | 0.005787            | 202 | N556             | 0.008540            |
| 127 | N366             | 0.011695            | 165 | N462             | 0.012424            | 203 | N557             | 0.009655            |
| 128 | N367             | 0.012501            | 166 | N463             | 0.014622            | 204 | N558             | 0.008588            |
| 129 | N370             | 0.019342            | 167 | N464             | 0.011446            | 205 | N561             | 0.010148            |
| 130 | N372             | 0.012581            | 168 | N467             | 0.003024            | 206 | N566             | 0.010736            |
| 131 | N373             | 0.012405            | 169 | N468             | 0.009195            | 207 | N567             | 0.008869            |
| 132 | N374             | 0.009508            | 170 | N470             | 0.011433            | 208 | N568             | 0.008600            |
| 133 | N375             | 0.019707            | 171 | N471             | 0.010435            | 209 | N572             | 0.011593            |
| 134 | N377             | 0.012072            | 172 | N474             | 0.009099            | 210 | N577             | 0.009975            |
| 135 | N378             | 0.008134            | 173 | N477             | 0.006688            | 211 | N582             | 0.010218            |
| 136 | N379             | 0.014307            | 174 | N482             | 0.008999            | 212 | N586             | 0.009476            |
| 137 | N381             | 0.012855            | 175 | N483             | 0.006202            | 213 | N587             | 0.008664            |

### 6.3.2 Comportamiento del sector representado en EPANET

De acuerdo con el modelo hidráulico del sector denominado por la empresa gestora como SGU-183, el mayor caudal de consumo ocurre durante el horario de 07:00 a 19:00 en concordancia con el patrón de demandas. El comportamiento del caudal se observa en la **Figura 16**.

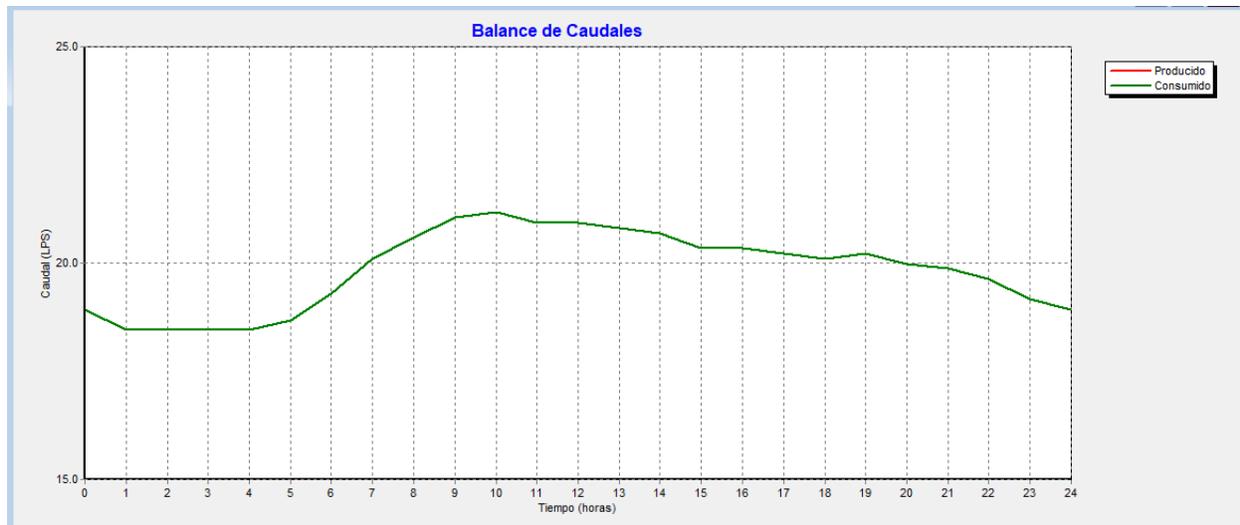


Figura 16. Tendencia del caudal entregado.

En cuanto a la velocidad del flujo de la red oscilan en la **Figura 17** se observa que el 50% de las tuberías manejan velocidades inferiores a 0.06 l/s en horas de mínimo consumo y en ese mismo período de tiempo, en ciertos tramos el agua circula a velocidades de hasta 0.7 l/s.

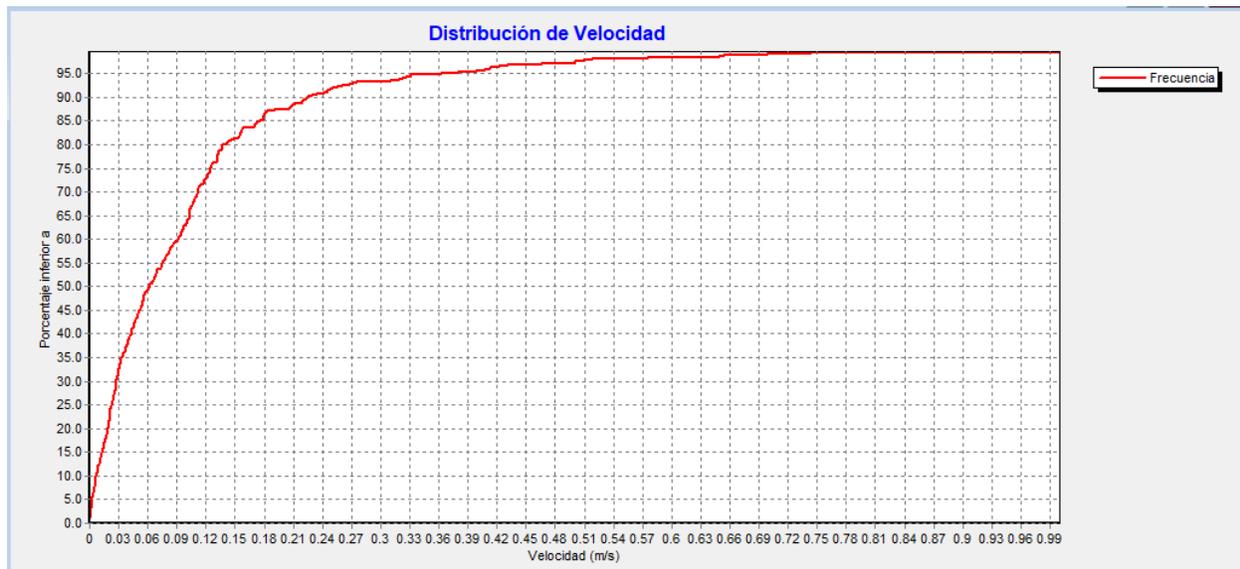


Figura 17. Distribución de velocidad en la red en hora de mínimo consumo.

En la **Figura 18** se muestra el caudal que circula por cada uno de los tramos, el valor máximo de caudal corresponde a la tubería de ingreso por la cual circulan máximo 20 l/s. Aunque en este estudio no se implementó el modelo de calidad del sistema, no es errado suponer que en la cola

del sector existirían inconvenientes con los tiempos de permanencia del agua debido a las velocidades bajas.

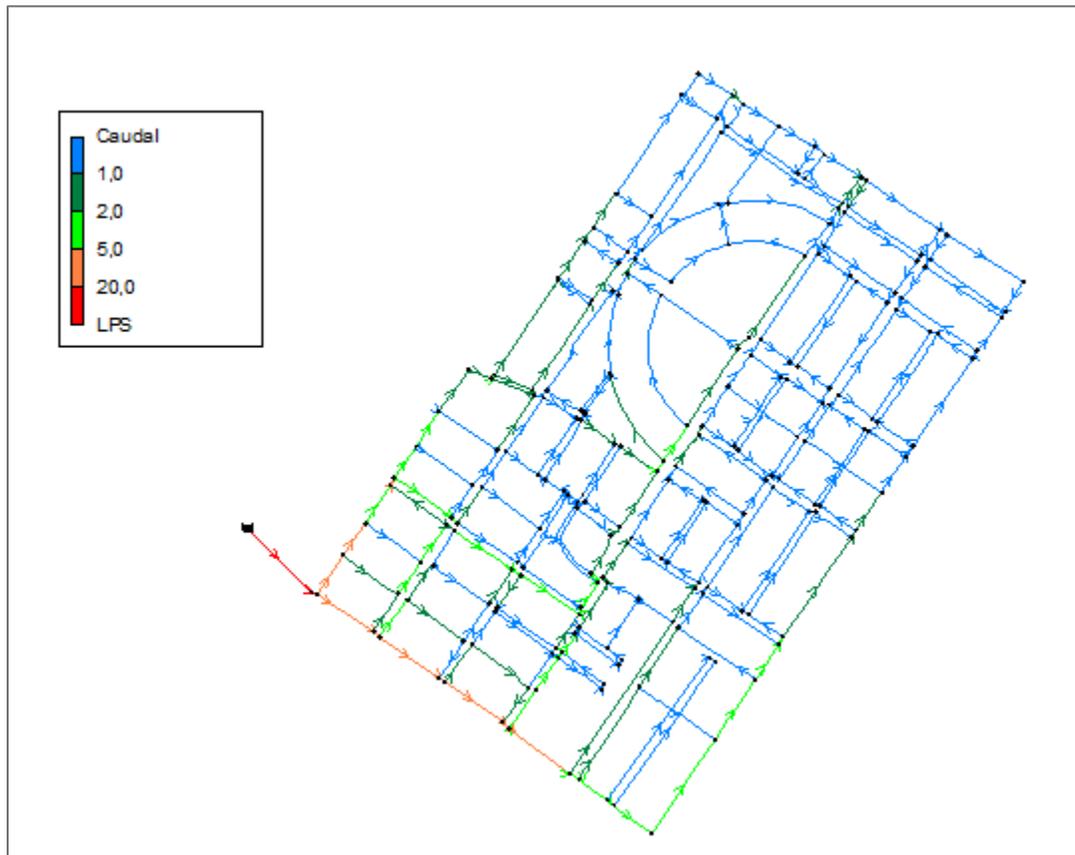


Figura 18. Comportamiento del caudal del sector.

De manera general, el sector refleja variaciones de presión en los nudos de consumo. A primera vista, se evidencia que se deberían a la configuración de la red, es decir que el agua para llegar a un punto realiza un recorrido extenso donde va perdiendo carga debido a la fricción del propio tubo y por accesorios que estén a su paso.

En la **Figura 19**, se observan dos zonas muy diferenciadas de presión, la zona naranja ubicada a la entrada del sector con presión de entre 11.0 y 11.5 m.c.a. que corresponde al 10% de los nudos de consumo, en mayor proporción la zona verde con presiones entre 10.8 a 11.0, esta zona representa el 80% de los nudos de consumo y la zona azul ubicada en la cola y en cuadras que

hacen fronteras con otros sectores con presión menor a 10.8 m.c.a. y corresponden a 10% restante de los nudos. Este análisis se realiza para el escenario de mínima presión dentro del tiempo simulado.

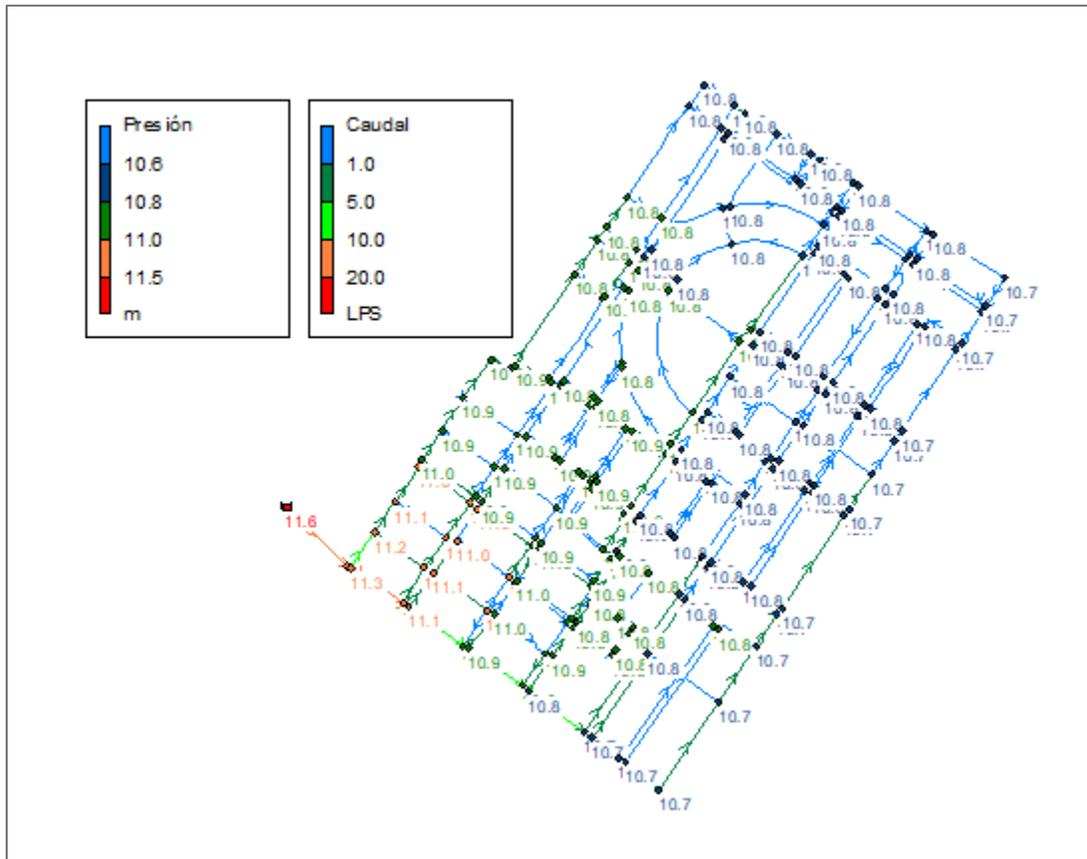


Figura 19. Comportamiento del caudal y presión mínima del sector.

Por otro lado, como se mencionó en la descripción del sistema, la ventaja de esta zona es que su topografía es uniforme, por lo tanto, no caben diferencias variables entre la presión y las alturas piezométricas debidas a cambio de cota en cada uno de los nodos.

En zonas con considerables diferencias de cotas suelen ocurrir confusiones cuando se analizan problemas de baja presión ya que no se considera la ubicación del predio al cual quizás por cota habrá que implementar un sistema adicional de bombeo.

En la **Figura 20** se muestra el mapa de contorno de presión en hora de máximo consumo de acuerdo con el patrón de consumo. Lo valores de presión oscilan entre 10.75 mca a 11.00 mca a las 12:0.0.

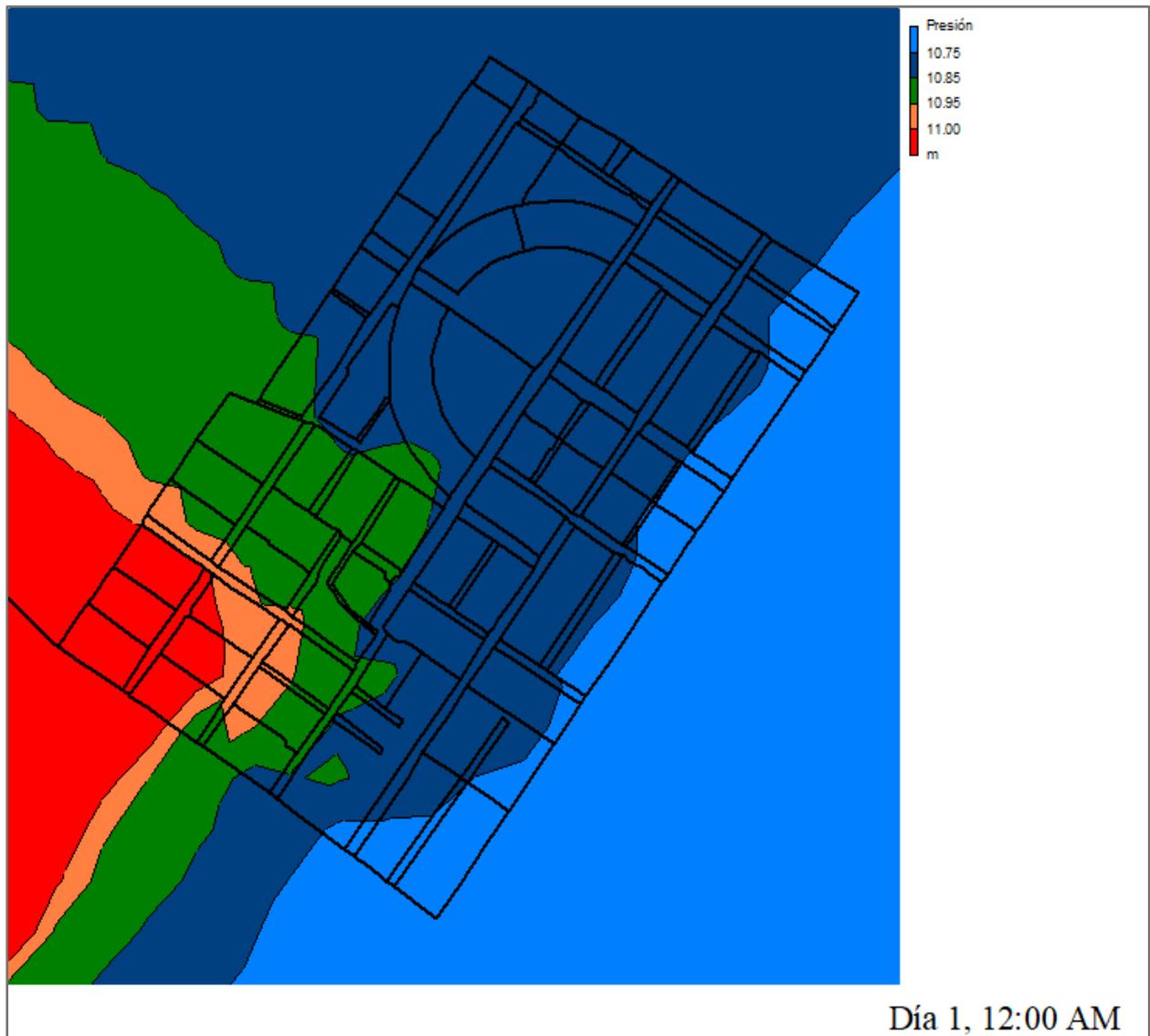


Figura 20. Mapa de contorno de presión en hora de máximo consumo.

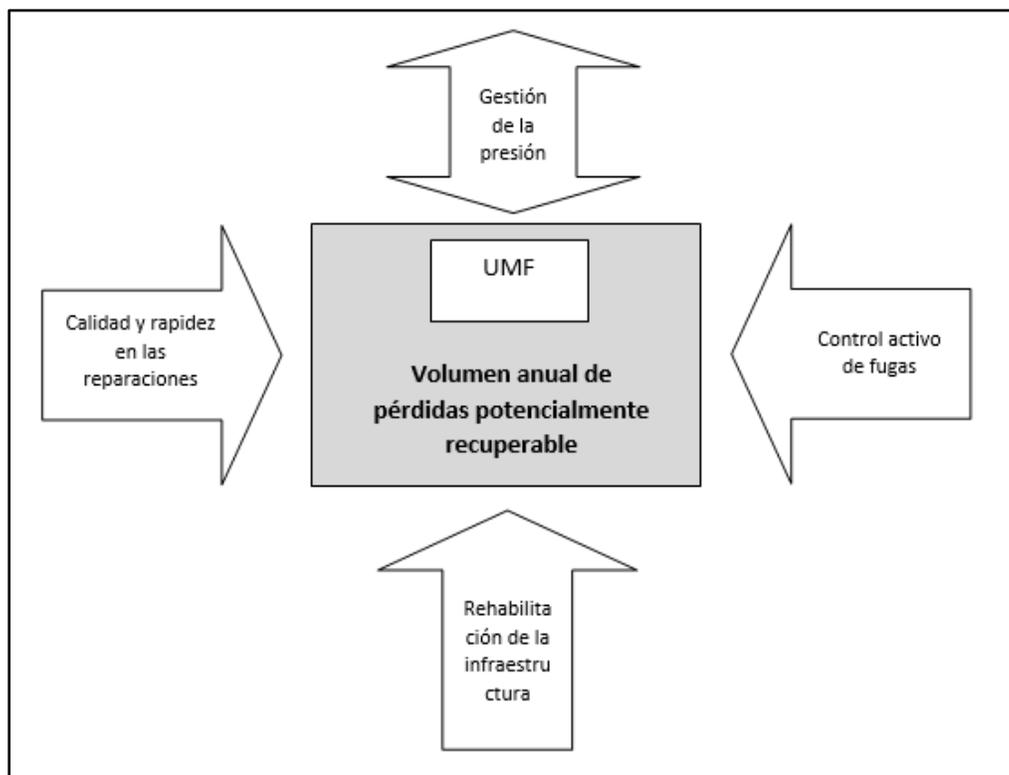
#### 6.4 Diagnóstico del sector analizado

Con los resultados obtenidos del balance hídrico, se conoce que las pérdidas del sector son el 53.4% del volumen total inyectado al sistema de las cuales 45.1% son pérdidas reales y el 8.3%

perdidas aparentes o comerciales, en el apartado de indicadores se obtuvo el indicador de fugas estructurales IFE de 14.4, este último es clave y refleja la actuación sobre las pérdidas reales del sistema las cuales son mayoría.

Con todas las premisas se pueden establecer actuaciones para llevar la eficiencia del sector a un nivel óptimo minimizando las pérdidas tanto reales como aparentes.

De acuerdo con varias publicaciones sobre la adecuada gestión de los sistemas de agua potable, la eficiencia se puede conseguir enfocando las actuaciones en la gestión de la presión. En la Figura 10 se observan las cuatro actividades básicas de gestión de fugas que limitan las pérdidas reales anuales.(A. Lambert, 2001).



**Figura 21.** Actividades básicas de gestión de fugas que limitan las pérdidas reales anuales.

## 6.5 Resultados esperados

De manera independiente de las estrategias que se apliquen se conseguirá mejorar la calidad del servicio a los usuarios, así como también un considerable ahorro que dependerá de los costos que maneje el abastecimiento.

Los beneficios del enfoque de reducción son: Incremento en la presión de servicio, Disminuir la frecuencia de interrupciones de servicio a los usuarios, Disminución de caudales de pérdida, Disminución del caudal entregado, Incremento de la eficiencia del sistema.

El incremento de la presión de servicio se espera con la presurización de red una vez ejecutado el control activo de fugas como un componente del mantenimiento de la red.

Mejorar la calidad del servicio minimizando la frecuencia de interrupciones que se derivan de las fugas que ocurren en la red.

Disminución de caudales de pérdidas tanto reales como aparentes resultantes del control activo de fugas y gestión de presiones.

Disminución del caudal entregado, consecuentemente se requerirá menos caudal ya que se espera no abastecer fugas.

Incremento de la eficiencia de la red, la efectividad en la gestión del sistema permitirá incrementar el caudal registrado y disminuir el caudal entregado a la cantidad necesaria lo cual implica una mejor eficiencia del DMA.

A continuación, se analizarán varias alternativas sobre posibles soluciones aplicables en el sector en estudio.

### 6.5.1 Análisis del modelo hidráulico considerando el nivel económico de fugas

El volumen de agua que se pierde por fugas en un mes es de 24.800 m<sup>3</sup>/mes, con el análisis económico de fugas se determinó que, si se aplica el control activo de fugas se recuperarían

13.612 m<sup>3</sup>/mes, por lo tanto, el volumen de pérdidas disminuiría hasta 11.188 m<sup>3</sup>/mes, alcanzando una eficiencia global del sistema del 70%.

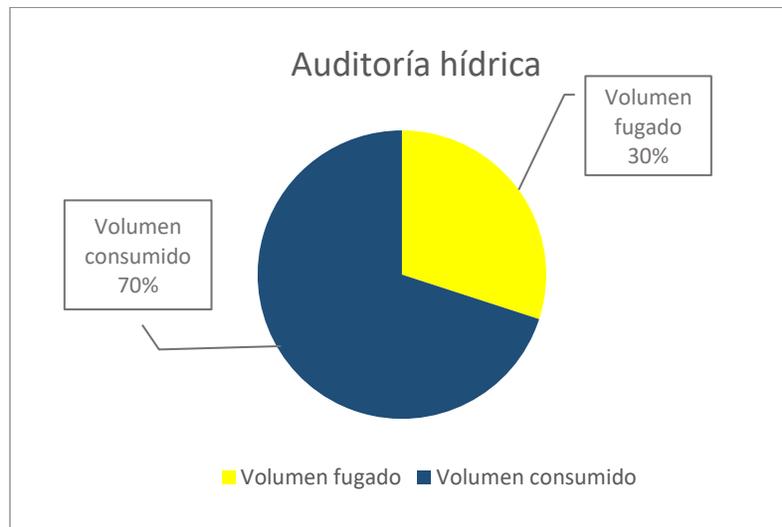


Figura 22. Auditoría hídrica SGU-183 obtenida con UALEAKS.

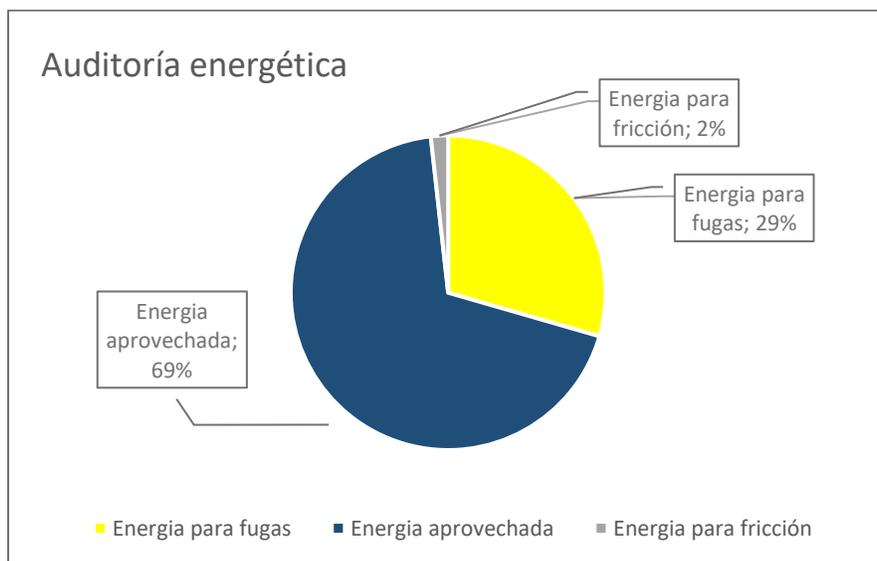


Figura 23. Auditoría energética SGU-183 obtenida con UALEAKS.

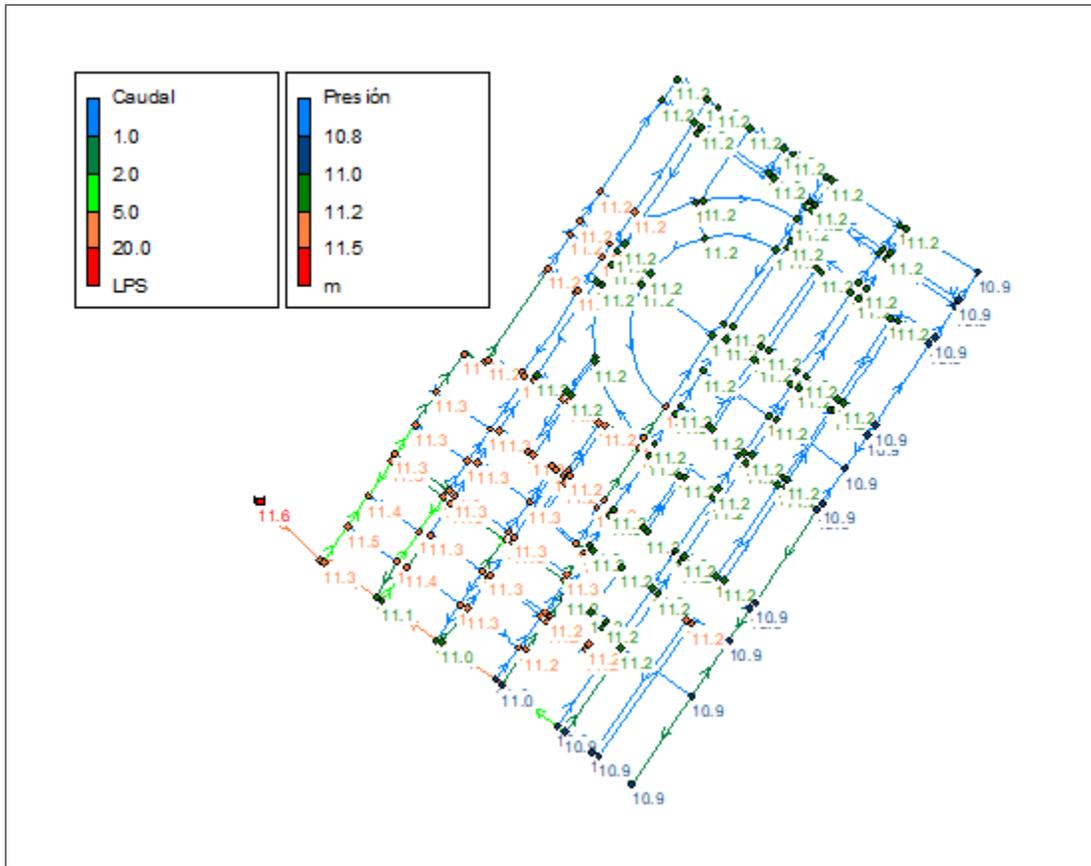


Figura 24. Simulación del comportamiento del sector SGU-183, después de aplicar Control activo de fugas.

En principio la reducción del volumen inyectado es igual al volumen disminuido por control de fugas y en correspondencia a contar con un sistema con menos fugas se obtiene una red presurizada, en este caso se registra un incremento de 0.2 m.c.a. en el punto más alejado del abastecimiento.

## 7 Conclusiones

En cualquier sistema independientemente del tipo de gestión que se lleve, se debe contar con la línea base donde se establezcan sectores con un límite máximo de longitud de red y número de conexiones, de tal manera que se pueda realizar una auditoría y conocer el estado del sector.

De preferencia contar con medición continua además de hacer un seguimiento al caudal entregado y caudal perdido, permite analizar la tasa de incremento natural de red.

La evaluación del índice de fugas estructurales proporciona información relevante de la gestión del abastecimiento sobre las pérdidas reales las cuales en porcentaje con las de mayor valor. Para este estudio el IFE resultó 14.4 e indica la necesidad de aplicación de estrategias de reducción de pérdidas.

Se destaca la utilidad de la prueba PST en la obtención del coeficiente N1 que ayuda a estimar caudales de pérdidas e inclusive permitirá estimar caudales de recuperación cuando se aplique gestión de presiones.

El análisis del DMA de manera integral ayudará a definir el tipo de estrategia a aplicar considerando a demás componentes financieros.

La implantación de un modelo hidráulico de la red ayuda en el análisis e identificación de los posibles problemas que presente el sistema y probar posibles escenarios mediante la simulación.

## 8 Bibliografía

- Arregui, F., Cobacho, R., Soriano, J., & Jimenez-Redal, R. (2018). Calculation Proposal for the Economic Level of Apparent Losses (ELAL) in a Water Supply System. *Water*, 10(12), 1809.  
<https://doi.org/10.3390/w10121809>
- Baader, J., & Oertlé, E. (2011). *Guía para la reducción de las pérdidas de agua. Un enfoque en la gestión de la presión.*
- Fanner, P. V., Sturm, R., Thornton, J., Liemberger, R., Davis, S. E., & Hoogerwerf, T. (2007). *Leakage Management Technologies*. 380.
- INEN. (1992). *CPE INEN 5 Parte 9-1:1992 Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes.*
- Lambert, A. (2001). *WHAT DO WE KNOW ABOUT PRESSURE:LEAKAGE RELATIONSHIPS IN DISTRIBUTION SYSTEMS?* 8.
- Lambert, A. O., Brown, T. G., Takizawa, M., & Weimer, D. (1999). A review of performance indicators for real losses from water supply systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 48(6), 227-237. <https://doi.org/10.2166/aqua.1999.0025>
- Lee, E. J., & Schwab, K. J. (2005). Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries. *Journal of Water and Health*, 3(2), 109-127. <https://doi.org/10.2166/wh.2005.0012>
- Pardo, M., & Riquelme, A. (2019). A software for considering leakage in water pressurized networks. *Computer Applications in Engineering Education*, 27(3), 708-720.  
<https://doi.org/10.1002/cae.22110>