



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**DEPARTAMENTO DE POSGRADOS**

**MAESTRÍA EN HIDROSANITARIA**

**SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA RED DE  
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DEL SECTOR CRUZ  
VERDE 4B1 SUR, A TRAVÉS DE UN MODELO HIDRÁULICO  
PARA EL ANÁLISIS DE VULNERABILIDADES OPERATIVAS  
DEL SISTEMA.**

Autor:

**Ing. Galo Xavier Jaramillo Paredes**

Director:

**Ing. Fabián Eduardo Cazar Almache**

**CUENCA - ECUADOR**

**Año 2022**

**DEDICATORIA**

El presente trabajo está dedicado a toda mi familia quienes han sido mi apoyo a lo largo de la vida y durante este proceso académico, así mismo a todas las personas especiales que me acompañaron durante esta etapa de formación, aportando con sus conocimientos y motivación para alcanzar esta anhelada meta

### **AGRADECIMIENTO**

Al culminar esta etapa quiero dejar plasmado mi más sincero agradecimiento a Dios, por permitirme alcanzar este logro, así mismo a mi querida familia quienes me han apoyado incondicionalmente y al Ing. Fabián Cazar, quien con sus conocimientos y sabiduría ha sabido guiar de manera oportuna este proceso

Además a la Universidad del Azuay, agradecer a las autoridades de posgrados, director de Maestría Ing. Josué Larriva y todos los docentes que compartieron sus conocimientos en esta maestría

## **RESUMEN**

El presente estudio se basa en la creación de un modelo de simulación hidráulica de la red de distribución de agua potable del sector Cruz Verde 4B1 perteneciente al sistema Tomebamba de la Ciudad de Cuenca.

Se realiza a partir de datos e información proporcionada por la ETAPA EP, información tomada en campo, y cálculos generados en base a normativa; con el objeto de calibrar y validar el modelo en un software mediante el ingreso de parámetros de diseño, finalmente, se obtendrá información para análisis y estudio en donde se realiza una descripción de la situación actual del sistema y proyectado hasta su periodo de diseño. Se establecerán algunas alternativas y recomendaciones del sistema de distribución calibrado, para concluir con una opción operativa que busque optimizar la distribución de agua potable a los usuarios.

Palabras claves: análisis hidráulico, red de distribución, modelación digital, calibración, presiones.

## ABSTRACT

This study is based on the creation of a hydraulic simulation model of the drinking water distribution network of the Cruz Verde 4B1 sector, which belongs to the Tomebamba system of Cuenca. The study originates from a cadastral database provided by the company ETAPA EP, information taken in the field, and calculations generated based on regulations to calibrate and validate the model in the WaterGems software by entering design parameters. Finally, information was obtained for the analysis and study of the current situation of the system and project it until its design period is made. Some alternatives and recommendations of the calibrated distribution system were established, to conclude with an operational option that seeks to optimize the distribution of drinking water to users.

Keywords: hydraulic analysis, distribution network, digital modeling, WaterGems

Translated by:



Ing, Galo Xavier Jaramillo Paredes

## ÍNDICE

1. INTRODUCCION.....	10
1.1. Antecedentes.....	10
1.2. Justificación .....	10
1.3. Hipótesis.....	11
1.4. Objetivos.....	11
1.4.1. Objetivo General .....	11
1.4.2. Objetivos Específicos.....	11
1.5. Metodología.....	12
1.6. Desarrollo del estudio.....	12
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....	14
2.1. Hidráulica de tuberías de red de distribución .....	14
2.1.1. Ley de la conservación de energía de fluidos .....	14
2.1.2. Ley de la conservación de la masa .....	15
2.1.3. Pérdida de carga por Hazen Williams .....	16
2.2. Calibración de un modelo hidráulico.....	17
2.3. Validación de un modelo hidráulico .....	20
2.4. Redes de Distribución de Agua Potable .....	21
2.4.1. Tipología de redes de distribución de agua potable .....	21
2.5. Sectorización de una red de agua potable. ....	22
2.6. Esqueletización de una red de agua potable.....	22
2.7. Asignación de demanda.....	22
2.8. Zonas de presión.....	23
2.9. Componentes de una red de distribución .....	23
3. MATERIALES Y METODOS .....	25
3.1. Descripción del sector de análisis.....	25
3.2. Descripción de la red de distribución de la zona de estudio .....	26
3.3. Población de diseño .....	28
3.4. Periodo diseño.....	30
3.5. Dotación de agua potable para el sistema Tomebamba.....	31
3.6. Cálculo de caudales de diseño .....	32
3.7. Pérdidas de carga en las redes .....	34
3.8. Variaciones de presiones en la red.....	35
3.9. Velocidades permitidas en la red.....	36

3.10.	Edad de servicio de la tubería .....	36
3.11.	Pérdidas de agua no contabilizada .....	36
4.	MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA RED DE ANÁLISIS.....	39
4.1.	Descripción general de los elementos para modelación .....	39
4.2.	Digitalización de los elementos a modelar .....	40
4.2.1.	Aplicación CAD .....	40
4.2.2.	Aplicación de Ubicación Geográfica .....	40
4.2.3.	Aplicación Modelación Hidráulica .....	40
4.3.	Criterios generales y fases de modelación.....	41
4.4.	Datos de ingreso al software.....	42
4.4.1.	Base de datos de georreferenciación .....	43
4.4.2.	Topología de las redes .....	43
4.5.	Desarrollo del Modelo Hidráulico .....	44
4.5.1.	Componentes para modelación .....	44
4.5.2.	Depuración preliminar de datos.....	44
4.5.3.	Asignación de elevaciones en nodos .....	45
4.5.4.	Asignación de demandas actuales de la red.....	46
4.5.5.	Asignación de rugosidades.....	48
4.5.6.	Sub sectorización del modelo hidráulico. ....	49
4.6.	Simulación inicial del modelo hidráulico .....	50
4.7.	Calibración del Modelo Hidráulico .....	52
4.7.1.	Diseño de la Muestra .....	53
4.7.2.	Parámetros de calibración .....	55
4.7.2.1.	Presiones en campo.....	55
4.7.2.2.	Ajuste de demandas (Caudales para curva de consumo) .....	56
4.8.	Calibración de red de distribución.....	58
4.9.	Resultados de la calibración .....	59
4.10.	Validación del modelo hidráulico.....	61
5.	EVALUACION DE RESULTADOS LA RED DE DISTRIBUCION .....	63
5.1.	Análisis de la red de distribución en la actualidad.....	63
5.1.1.	Evaluación de velocidades .....	63
5.1.2.	Evaluación por pérdidas de carga .....	64
5.1.3.	Evaluación de presiones.....	65
5.1.4.	Determinación de vulnerabilidades estado actual 2022 .....	65
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	68

6.1.	Conclusiones con respecto a la zona de estudio .....	68
6.2.	Conclusiones referentes a la calibración .....	68
6.3.	Conclusiones referentes a la red de distribución.....	69
6.4.	Recomendaciones.....	69
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	71
8.	ANEXOS .....	72
8.1.	Manual de operación de la subsectorización del sector 4 B1. ....	72

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Representación gráfica de la ecuación de la energía.....	14
Ilustración 2. Flujo en un volumen control.....	15
Ilustración 3. Localización del sector de análisis Cruz Verde 4B1 Sur.....	26
Ilustración 4. Esquema de disposición de red en sector Cruz Verde 4B1.....	27
Ilustración 5. Proyección de Población 2022 .....	28
Ilustración 6. Georreferencia elementos de red distribución Cruz Verde 4B1. ....	43
Ilustración 7. Usuarios residenciales registrados.....	45
Ilustración 8. Asignación de elevaciones de la zona Cruz Verde 4B1. ....	46
Ilustración 9. Número de nudos.....	48
Ilustración 10. Estado de Operación de las válvulas de control .....	49
Ilustración 11. Esquema de 13 subsectores. ....	50
Ilustración 12. Ensamble de Modelo Hidráulico .....	50
Ilustración 13. Resultados de presiones de las simulaciones iniciales .....	51
Ilustración 14. Resultados de zonas de presión para sector Cruz Verde 4B1. ....	54
Ilustración 15. Ubicación de presiones tomadas en campo.....	55
Ilustración 16. Caudalímetro ubicado en la Av. 24 de Mayo.....	57
Ilustración 17. Variación de las presiones de la simulación base.....	59
Ilustración 18. Resultado para calibración de las presiones.....	60
Ilustración 19. Presiones de ETAPA EP.....	62
Ilustración 20. Variación de velocidades al año 2022 .....	64
Ilustración 21. Variación de pérdidas de carga al año 2022 .....	64
Ilustración 22. Variaciones de presiones al año 2022.....	65
Ilustración 23. Tipo de material de las tuberías.....	66
Ilustración 24. Mapa de vulnerabilidades .....	66
Ilustración 25. Variaciones de consumo al año 2052.....	67

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coeficientes de Hazen Williams.....	16
Tabla 2. Criterios de presión para calibrar .....	20
Tabla 3. Información de identificación de zona de análisis .....	26
Tabla 4. Características de red de distribución. ....	27
Tabla 5. Capacidad del Tanque de Reserva .....	28
Tabla 6. Proyección población al 2022 .....	29
Tabla 7. Población de acuerdo a medidores residenciales .....	29
Tabla 8. Vida útil sugerida elementos de sistema de agua potable. ....	31
Tabla 9. Período de diseño. ....	31
Tabla 10. Dotaciones para el sector urbano.....	32
Tabla 11. Dotaciones para el sector urbano.....	32
Tabla 12. Caudales de Diseño .....	34
Tabla 13. Caudales de Diseño del Proyecto .....	34
Tabla 14. Valores del coeficiente C.....	34
Tabla 15. Presiones permitidas en la red de distribución .....	35
Tabla 16. Micromedición desde julio 2021 a junio 2022, Cruz Verde 4B1 .....	46
Tabla 17. Cálculo de caudales obtenidas por micromedición .....	48
Tabla 18. Coeficiente de fricción de acuerdo al material.....	49
Tabla 19. Datos teóricos vs micromedición.....	51
Tabla 20. Resultados de presiones de calibración.....	56
Tabla 21. Ajuste de demandas.....	58
Tabla 22. Resultados de presiones después de la calibración.....	60
Tabla 23. Resultados de rugosidades calibración.....	61
Tabla 24. Resultados de presión - validación.....	62

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCION

### 1.1. Antecedentes

Los modelos hidráulicos son una herramienta cada vez más utilizada para la toma de decisiones por las compañías administradoras de los servicios de tratamiento y distribución agua potable, con el afán de lograr mejoras y mayores beneficios en la gestión. En la Ciudad de Cuenca, bajo la administración de ETAPA EP (Empresa Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y saneamiento de Cuenca), se determina que las redes de transporte y distribución del agua se han convertido paulatinamente en sistemas complejos de gestionar, al tener que adaptarse a los problemas de crecimiento de la población, escasez de recursos, afluencia turística, etc. (ETAPA EP, 2018.)

En la actualidad para modernizar la gestión de los sistemas de abastecimiento de agua se requiere de la utilización e interpretación de herramientas digitales de soporte para mitigar la complejidad que representan las evaluaciones los sistemas, con el fin obtener información certera de la dinámica y funcionamiento actual, consiguiendo así acercarse a uno de los principales objetivos que es lograr una gestión eficiente de los recursos disponibles, para así localizar novedades, disminuir las fugas y durante el suministro lograr un menor consumo de energía tanto para tomar decisiones actuales así como para posibles proyecciones.

Para garantizar estos requisitos es necesario contar con un modelo matemático para operar un sistema hidráulico puesto que constituye además una herramienta de gran valor para reaccionar adecuadamente en situaciones de emergencia. La red de suministro y distribución de agua en la ciudad de Cuenca y en este caso de análisis es la del sector Cruz Verde 4B1 Sur, perteneciente al sistema Tomebamba, no escapa a esta problemática, por su especial extensión y complejidad. La simulación hidráulica brindará la oportunidad de analizar diferentes partes de la red con más detalle. Como resultado, se obtendrá un mejor conocimiento del patrón de flujo, caudal, velocidad y presión.

### 1.2. Justificación

Este estudio propone una valoración de las redes para la detección de vulnerabilidades de una manera real en una red de distribución de agua usando tomas de presión en campo.

En particular, presentamos una relación de dos diferencias de presión una basada en

mediciones y otra mediante los modelos. Se proporciona una justificación teórica para una clase limitada de redes de distribución de agua para el algoritmo propuesto.

También se proporcionan resultados de simulación para demostrar que la metodología propuesta y que se puede aplicar con éxito a una clase más amplia de agua.

La elaboración de este documento se basa en la implementación de un modelo hidráulico para la distribución de agua potable del Sector Cruz Verde 4B1, perteneciente al sistema Tomebamba, dentro de la Ciudad de Cuenca, con este estudio se busca elaborar y calibrar un modelo hidráulico de las redes de distribución en la zona realizando un análisis de la situación real y con los resultados buscar soluciones para optimizar su funcionamiento, considerando los diferentes parámetros que tornan compleja la reproducción de escenarios reales que puedan mejorar el servicio que reciben los usuarios actuales y futuros.

### **1.3. Hipótesis**

El modelo hidráulico calibrado, permite simular el comportamiento de las redes de distribución para diferentes escenarios de operación y ser utilizado para las tareas diarias de toma de decisiones por parte de la empresa ETAPA EP.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General**

Establecer un modelo para simular el comportamiento hidráulico cercano a la realidad de las redes de distribución del Sector Cruz Verde 4B1.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos**

Elaborar un modelo hidráulico con los parámetros inicialmente establecidos por ETAPA EP.

Definir los parámetros que serán considerados para la calibración del modelo.

Calibrar y validar el modelo hidráulico utilizando las mediciones de parámetros en campo.

Determinar la potencialidad del modelo hidráulico como distribución dentro del sistema.

Establecer una metodología para la calibración de un modelo hidráulico en similares condiciones del actual estudio.

## **1.5. Metodología**

Con la información de campo proporcionada y recopilada en coordinación con ETAPA EP que es la institución a cargo del servicio de suministro de agua potable y saneamiento del cantón Cuenca, se procede, a la elaboración del modelo hidráulico el cual permitirá simular las variaciones de presión, de velocidad y de pérdidas de carga, con respecto a la situación real de las redes de distribución. Se considera inicialmente la aplicación de las normas para el estudio y diseño de sistemas de agua potable para poblaciones mayores a mil habitantes, estas normas son utilizadas a nivel nacional para el desarrollo de diseños y evaluaciones hidráulicas.

Para complementar la normativa mencionada, es de vital importancia contemplar los criterios de diseño establecidos en los Planes Maestros de Agua Potable y Saneamiento para la Ciudad de Cuenca, así como la aplicación de las “Dotaciones propuestas en Planes Maestros III”. Con esta información se procedió al desarrollo de los objetivos del presente estudio el cual se centra en el procesamiento de los datos disponibles de ETAPA EP para una posible mejora.

## **1.6. Desarrollo del estudio**

En el Capítulo 1 se precisa una breve explicación de la motivación y fundamentos para la elaboración de esa tesis y lo que se busca conseguir con el análisis y desarrollo de la misma.

En el Capítulo 2 se establecen las bases teóricas y definiciones técnicas del componente general para el desarrollo correcto del estudio de la zona de análisis. Posteriormente, se definirán algunos componentes para realizar la simulación inicial de las redes de distribución, adicionalmente se puntualizarán los parámetros de calibración de los modelos hidráulicos, los cuales se obtienen de la recopilación de la información tanto en campo, así como la facilitada por la entidad administradora.

El Capítulo 3 contiene una descripción más detallada de la zona de estudio y la metodología implementada para la simulación de las redes, también se desarrolla un esquema del procedimiento a seguir, aplicable a otros sectores, se utiliza el programa en el que es didáctico hacer distintas valoraciones. Así como una explicación sencilla de la aplicación de la herramienta computacional que se utilizará para la evaluación hidráulica. Una vez localizadas las incertidumbres se presentará una descripción de las mismas, con respecto a velocidades, pérdidas de carga, material de las tuberías, etc.

En el Capítulo 4, se expone toda la información técnica necesaria para realizar la modelación hidráulica en el programa, además se describe y analiza la información necesaria que será

ingresada para la obtención del modelo de estudio.

Para el Capítulo 5, una vez con los resultados de las evaluaciones y con la certeza de que se cumple la calibración se procede a realizar una valoración y posterior comparación con los datos obtenidos de la toma de presiones en campo para validarlo. Para finalizar, se procede a la evaluación del comportamiento en las redes y determinación de zonas críticas.

En el Capítulo 6 se describen conclusiones y recomendaciones producto del análisis previo obtenido de al área de estudio tanto para presiones, velocidades, pérdidas de carga, material de tuberías, etc.

El presente trabajo busca presentar una metodología de calibración de modelos matemáticos de las redes de distribución de agua para la toma de decisiones diarias. De esta forma, se representarán las demandas, así como la posible incidencia de las fugas existentes en la red de abastecimiento. Para conseguir los objetivos que pretende este estudio, debe disponerse de un modelo fiable de la red que reproduzca con fidelidad su comportamiento en cualquier instante y bajo cualquier circunstancia. Para ello el modelo debe ser un elemento vivo y adaptable a las circunstancias de operación del sistema. Además, debe ser sencillo de utilizar y proporcionar información fácilmente interpretable por los operadores o los gestores del sistema. Ello supone desarrollar y mantener una plataforma informática en torno al modelo, que permita integrar éste con las variables de campo, ejecutarlo en función de los objetivos buscados, y visualizar sus resultados de diversos modos según las necesidades. Cabrera-Béjar, J. A., & Tzatchkov, V. G. (2012).

## CAPÍTULO 2

### 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

#### 2.1. Hidráulica de tuberías de red de distribución

##### 2.1.1. Ley de la conservación de energía de fluidos

La ley de conservación de fluidos considera que: los fluidos son incompresibles, es decir, que su densidad es constante e independiente de la presión, además se basa en la hipótesis del medio continuo, es decir, los fluidos se suponen continuos a lo largo del espacio que ocupan, ignorando las discontinuidades asociadas a su estructura molecular. Se supone que el flujo de los fluidos es estacionario, es decir, que la velocidad en un punto es independiente del tiempo. Por otro lado se cumple la conservación de la energía y es, precisamente, el análisis de los términos de energía que pueden presentarse en un sistema fluido el que permitirá obtener las relaciones más importantes de la mecánica de fluidos. (Crane, 1987).

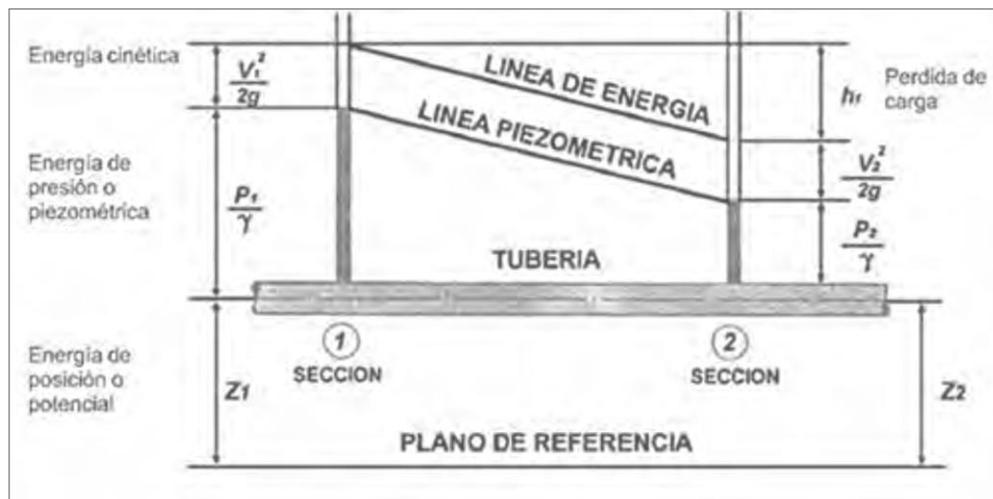


Ilustración 1. Representación gráfica de la ecuación de la energía.

Fuente: Monge, 2017.

Finalmente se obtiene la ecuación general de la conservación de la energía:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (1)$$

En dónde:  $Z$  es la elevación (m),  $P$  es la Presión (kPa),  $\gamma$  corresponde al Peso específico del agua ( $\text{kN/m}^3$ ),  $V$  es la velocidad media (m/s),  $g$  es la gravedad ( $\text{m/s}^2$ ) y  $h_f$  representa la pérdida de carga por rozamiento ( $\text{N}\cdot\text{m/N}$ )

El término  $Z_1 + \frac{P_1}{\gamma}$  es llamada altura piezométrica, la línea superior es la línea de energía total (LE), la inferior es la línea piezométrica o gradiente hidráulico (LGH) y la diferencia entre las dos es la energía cinética o cabezal de velocidad. (Molina, S. X. 2014).

### 2.1.2.Ley de la conservación de la masa

La ley de la conservación de la materia nos dice que la cantidad de masa-energía que manifiesta un determinado espacio-tiempo es constante. La salida de masa es continuo en el balance entre la masa que entra y la que sale más la variación en el interior de este volumen de control en un intervalo de tiempo dado da como resultante una masa nula, ya que esta no puede crearse ni desaparecer (Pérez Farras, 2002).

De esta manera para un movimiento permanente y si la masa en el interior permanece constante, se deduce que la masa que entra debe ser igual a la que sale. Esto es aplicable también al flujo másico y al caudal.

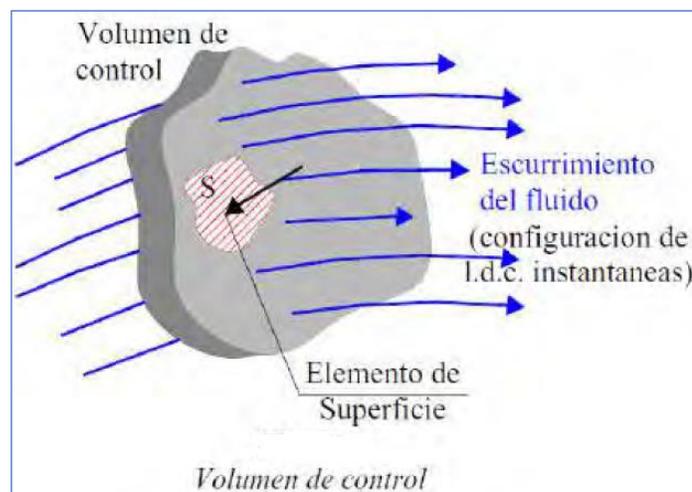


Ilustración 2. Flujo en un volumen control.

Fuente: Pérez Farras, 2002.

El principio de continuidad establece que si un líquido fluye a través de un conducto sin pérdida o ganancia de fluido el caudal se mantendrá constante a lo largo de este. Esto implica que el volumen de entrada debe ser igual al volumen de salida, en un lapso de tiempo. Así analizando dos puntos a lo largo del conducto:

De esta manera la expresión para el caudal (Q) puede formularse también:

$$Q \left( \frac{m^3}{s} \right) = \frac{V(m_3)}{t(s)} = \frac{l(m) * A(m^2)}{t(s)}$$

$$Q \left( \frac{m^3}{s} \right) = v \left( \frac{m}{s} \right) * A(m^2)$$

$$Q = v * A \quad (2)$$

$$Q_1 = Q_2$$

$$v_1 * A_1 = v_2 * A_2 \quad (3)$$

Siendo  $v$  la velocidad del fluido y  $A$  el área que atraviesa el flujo. (Cabrera, E., & Abreu, J. 2005).

### 2.1.3. Pérdida de carga por Hazen Williams

La ecuación de Hazen Williams es una fórmula empírica sencilla, dimensional, siendo su cálculo simple, debido a que su coeficiente de rugosidad  $C$  no depende de la velocidad ni del diámetro de la tubería. Sin embargo, solo es válido para tuberías de fundición y acero, siendo el agua el fluido circulante en flujo turbulento, y temperaturas entre 5 °C y 25 °C. Su uso está limitado al flujo de agua en conductos mayores de dos pulgadas (50,8 mm) y menores de seis pies (1.828,8 mm) de diámetro. Por otro lado, se recomienda utilizarla para valores de velocidades de circulación inferiores a los 10 pies por segundo (3,05 m/s). La aplicación de la fórmula es adecuada solo para la operación de tuberías en regímenes laminar o de transición.

$$j = \frac{10.674 \cdot Q^{1.852}}{C^{1.852} \cdot d^{4.871}} \quad (10)$$

En donde  $j$  es la pérdida de carga unitaria (m/m),  $Q$  es el caudal (m<sup>3</sup>/s),  $C$  es el coeficiente de rugosidad de Hazen - Williams (Fuente: (ETAPA EP, 2004)) y  $d$  corresponde al diámetro interior (m)

Tabla 1. Coeficientes de Hazen Williams

Tipo de tubería	Edad de la tubería		Valor adoptado	Observaciones
	Nueva	Usada		
Hierro dúctil	140	135	130	Conservador
PVC	150	125	130 (*)	Conservador
Acero soldado	120	90	110	Conservador
Acero con revestimiento	140	135	130	

Fuente: (ETAPA EP, 2004)

Por su naturaleza empírica, esta ecuación se basa en condiciones replicadas en un laboratorio. El coeficiente  $Ch$  es una característica del material del tubo, el fluido y el flujo. Por tanto, lo que su rango de aplicación es limitado:

- Diámetro de la tubería:  $2'' < D < 6''$
- Velocidad de flujo:  $v \leq 3.05m/s$
- Temperatura del agua: ambiente

Adicionalmente, al momento de seleccionar el valor para el diseño, es importante tomar en cuenta que, con el tiempo, la superficie de las tuberías y conducciones tiende a ser más rugosa, por lo tanto, el coeficiente de fricción tenderá a ser menor, con la consecuente reducción de la capacidad original de conducción.

## 2.2. Calibración de un modelo hidráulico

La American Water Works Association (AWWA) afirma que la calibración consiste en comparar los resultados del modelo con mediciones obtenidos en campo, realizando ajustes a parámetros del modelo y la revisión de los datos de campo hasta alcanzar la concordancia entre ambos. (Rondán, 2016)

Los parámetros hidráulicos normalmente ajustados para calibrar los modelos son aquellos correspondientes a:

- Rugosidades de tuberías.
- Patrones de demanda.
- Válvulas.

Los modelos hidráulicos se pueden clasificar en estáticos y dinámicos. Los modelos estáticos son los denominados modelos en régimen permanente, simulan el estado de la red en un momento determinado. Es decir, se encuentran los valores de las variables del sistema para una situación específica sin considerar las variaciones de consumo. (Rondán, 2016)

La calibración se basa en obtener las características físicas y operacionales de un sistema existente, que ingresados como datos al modelo computacional permite obtener resultados semejantes a la realidad. (Walski et al., 2007)

Para el desarrollo de este estudio se considera lo siguiente:

- Comparar las presiones con aquellos medidos para unas condiciones de operación conocidas.
- Se ajustan los datos de entrada al modelo de tal forma que exista concordancia entre los valores simulados y observados.

La AWWA indica que la calibración consiste en comparar los resultados del modelo con mediciones obtenidos en campo. Esto se puede complementar con lo escrito en el Comité de Aplicaciones Computacionales de Ingeniería de la AWWA, la cual afirma que la calibración no sólo involucra el ajuste de los coeficientes de rugosidad de tuberías y la demanda en nudos; y extiende esta tarea a cualquier factor que deba ser ajustado hasta alcanzar la concordancia entre los datos medidos y los simulados. (Rondán, 2016)

Este estudio se enfocará en realizar una macro - calibración de toda la red de distribución y específicamente en separar zonas de presión, lo cual consistirá en identificar y corregir las posibles fuentes de error que producen diferencias significativas entre los resultados del modelo y las mediciones de campo.

Posteriormente se realizará una micro – calibración, la cual consiste en estudiar la precisión del modelo en una zona específica. Los parámetros para ajustar en esta fase son los coeficientes de rugosidad de tuberías y las demandas en nudos.

### **Fuentes de error de los modelos hidráulicos**

Es probable que los resultados del modelo y los datos medidos en campo no coincidan exactamente, debido a:

- Simplificaciones de las redes
- Supuestos en los datos de entrada
- No se considera la variación de consumo
- No se usa el diámetro interno de las tuberías,

### **Calibración en estado estacionario**

La comparación entre el modelo hidráulico y el prototipo se hace a partir de medidas de presiones tomadas en la red. Lo ideal sería tener medidas de presión en todos los nodos y medidas de caudal en las tuberías de las redes, pero, debido a los altos costos que esto

implicaría, no es económicamente viable, por lo que la calibración debe hacerse con mediciones en pocos puntos de la red. (Martínez-Solano et al., 2017)

El objetivo de este estudio es analizar, en régimen permanente, el comportamiento de las redes por el principal tipo de suministro que existen hacia ellas por medio de los usuarios.

El régimen permanente está caracterizado por la ausencia de los términos inerciales y elásticos en las ecuaciones fundamentales, de forma que únicamente se obtiene información acerca de la respuesta de la red cuando el flujo está completamente establecido. Para un intervalo de cálculo pequeño, el modelo de simulación muestra la respuesta instantánea para un periodo determinado. (Paluszczyszyn et al., 2015)

Tradicionalmente, las tuberías se dimensionan, en lo que a diámetro o capacidad de transporte se refiere, considerando el estado estacionario del sistema más desfavorable, y, por ello, los modelos estáticos constituyen una herramienta útil en los procesos de dimensionado.

Por tanto, el estudio en régimen permanente realizado es un primer paso previo a un estudio en régimen transitorio de la red, y define las exigencias mínimas de funcionamiento bajo cada una de las tipologías de suministro. En estudios complementarios, será necesario evaluar bajo qué condiciones de funcionamiento la respuesta en régimen permanente queda limitada, como por ejemplo el efecto introducido por el arranque de grupo de bombeo de velocidad fija, y las consideraciones que se deberán tomar en tal caso.

Posteriormente, se mostrarán los resultados obtenidos del estudio en régimen permanente, es importante mencionar que se trata de evaluar la respuesta de los tramos de red expuesto a consumos reales.

### **Criterios para evaluar un modelo hidráulico en estado estacionario**

En 1989 la Water Authorities Association & Water Research Centre del Reino Unido, publicaron el documento "Network Analysis: A Code of Practice" (WAA y WRC, 1989). Este propuso criterios prácticos para la tolerancia de los valores simulados luego de la calibración del modelo en régimen estacionario, descritos en la siguiente tabla.

**Tabla 2. Criterios de presión para calibrar**

<b>Criterios de presión</b>	
<b>1</b>	El 85% de las presiones medidas en pruebas de campo no deben diferir en $\pm 0,5m$ o $\pm 5\%$ de la pérdida de carga registrada.
<b>2</b>	El 95% de las presiones medidas en pruebas de campo no deben diferir en $\pm 0,75m$ o $\pm 7,5\%$ de la pérdida de carga registrada
<b>3</b>	El 100% de las presiones medidas en pruebas de campo no deben diferir en $\pm 2m$ o $\pm 15\%$ de la pérdida de carga registrada

Fuente: Edwards, 2006; Walski et al 2007; Larado, 2012

### **Técnica utilizada para la calibración**

Siendo la simulación hidráulica un cálculo de presiones y caudales en tuberías de la red de distribución a partir de la información del catastro de las redes, diámetros, longitudes y demandas en los nudos; la calibración del modelo consistirá en encontrar los óptimos valores de las variables para simular el comportamiento hidráulico de la red real.

Las técnicas avanzadas de calibración de modelos pueden ser agrupadas en dos categorías: técnicas analíticas y técnicas implícitas (o de optimización). Las técnicas implícitas se dividen a su vez en no evolutivos y evolutivos, según el método de optimización en el cual están basadas (Mays, 2000; Kapelan, 2002; Walski et al 2007; Savic et al, 2009; Christi et al, 2011)

Para este estudio y debido a las condiciones de la información se utilizarán las técnicas analíticas, las cuales corresponden a métodos iterativos. Esta técnica corresponde a las propuestas realizadas por Walski (1983a), Ormsbee & Wood (1986), Bhave (1988), Boulos y Wood (1990), Boulos y Ormsbee (1991).

- Los métodos iterativos están basados en procedimientos de prueba - error que ajustan los parámetros desconocidos en cada iteración utilizando presiones y/o caudales medidos, resolviendo el sistema de ecuaciones básicas de la red para el estado estacionario.

### **2.3. Validación de un modelo hidráulico**

Para verificar la pertinencia de los resultados de un modelo elaborado para otros conjuntos de datos diferentes a los utilizados en la calibración, y cumplir el principal objetivo de este trabajo, se validará el modelo computacional contra datos en otros puntos de la red, distintos a los tomados en la calibración. Esto es importante para observar la validez de dichas condiciones asumidas en la calibración.

## **2.4. Redes de Distribución de Agua Potable**

Dentro de un sector, se denomina al conjunto de instalaciones cuya función es la distribución y abastecimiento de agua potable, este líquido debe ser transportado de la captación pasando por la planta de tratamiento hacia la ubicación del usuario que se localiza en zonas de residencia, espacios públicos, comerciales o industriales, entre otros. El objetivo es entregar este servicio con una presión satisfactoria en una cantidad determinada según la necesidad, considerando que, para determinar el grado de satisfacción de este proceso, intervienen varios componentes, unos medibles y otros no, y entre los que podemos destacar la calidad, el caudal, la presión, la continuidad del suministro y el precio.

### **2.4.1. Tipología de redes de distribución de agua potable**

#### **Abierta o ramificada**

Son aquellas redes de distribución constituidas por ramal principal y una serie de ramales secundarios que pueden constituir unos mallados de menor extensión. Este tipo de ramales es apto para cuando el terreno presenta irregularidades de altura, o donde no es fácil la interconexión. También puede diseñarse en vías principales, en donde el diseño cumpla con las proyecciones de población y de crecimiento de la zona que se abastecerá del servicio. Los gastos medios de consumo en cada tramo pueden determinarse conociendo la zonificación y asignado la dotación correspondiente de acuerdo a las normas sanitarias vigentes. (Arrioché, 1979)

#### **Cerrada o anillada**

Son aquellas redes constituidas por tuberías interconectadas formando mallas. Este tipo de red de distribución es el más conveniente y tratará siempre de interconectarse, esto funcionará para sectorizar, y proveer de agua las zonas aledañas. En el dimensionado de una red mallada se trata de encontrar los gastos de circulación de cada tramo, para lo cual nos apoyamos en algunas hipótesis estimadas de los gastos en los nodos.

Resulta ventajoso hacer división por zonas, tratando de reunir aquellas que presenten características homogéneas o similares, tomando en cuenta la densidad actual y posible incremento futuro. (Arrioché, 1979)

#### **Mixta o combinada**

Esta topología de red que utiliza dos o más tipos de red. Esta contiene una combinación de la

topología de flujo, de malla y de anillo.

La topología determina cómo quedará constituida una red. Contiene el diseño de la configuración de los enlaces y nodos para relacionarse entre sí. Esta configuración resulta indispensable para valorar cómo será el desempeño de la red.

### **2.5. Sectorización de una red de agua potable.**

Las redes malladas están constituidas por la matriz de distribución, de las tuberías principales, tuberías secundarias o de relleno y ramales abiertos. Las tuberías principales construirán las mallas cuyos tramos se definirán por los nodos que lo comprenden. Para la configuración de las mallas mediante las tuberías principales se tomará en cuenta el posible desarrollo de crecimiento de la ciudad o zona a proyectar, así un desarrollo hacia la periferia motivado por la existencia de zonas planas que propiciarían tal extensión, induce a proyectar mallas exteriores previendo el crecimiento urbanístico hacia tales áreas. (Arrioche, 1979)

### **2.6. Esqueletización de una red de agua potable**

La esqueletización de una red es la simplificación al momento de realizar un análisis, puesto que es sumamente complejo disponer y estudiar las propiedades hidráulicas de la red considerando todos los elementos tal y como se disponen en la realidad en campo, por lo cual se depura (tramos de tuberías accesorios, otros) e introduce el modelo en el software de apoyo, siempre trabajando en base a los objetivos buscados en la simulación. Para la presente propuesta se utiliza un programa que tiene incorporada una herramienta integrada para realizar la simulación automática que solventa la simplificación requerida.

### **2.7. Asignación de demanda.**

Las ventajas de la simulación de un modelo hidráulico de una red de distribución en funcionamiento dependen del análisis y los ajustes que se determinen en los parámetros para su comportamiento, por lo que en una simulación los más importantes son: diámetros de las tuberías, rugosidad de tubería y demanda de consumo en los nodos.

Si bien es cierto en muchos sistemas el diámetro y el material de los tramos de red de agua potable son una incertidumbre debido a la antigüedad o a la ausencia de catastro, en este caso se cuenta con la información necesaria proporcionada por ETAPA EP, para el procesamiento de información para la simulación. El parámetro de mayor incidencia en la demanda de consumo en los nodos, información que proveerá también la misma Empresa.

## 2.8. Zonas de presión

Cuando por motivos de topografía las presiones de servicio en el sistema de distribución serán muy altas resulta conveniente dividir la zona en varias redes (por ejemplo: alta, media, baja) las cuales pueden interconectarse mediante válvulas reguladoras o reductoras de presión, mediante tanque rompe presiones, o bien separarlas mediante tanques de almacenamiento independientes.

La ubicación del tanque de almacenamiento es indispensable para el correcto funcionamiento de una red de distribución. En poblaciones con grandes desniveles altimétricos, hay que subdividir la red en varias zonas de presión, de tal manera que en cada una de las zonas se dé cumplimiento a las exigencias de presión mínima y máxima, permitiendo que en los puntos bajos las presiones no sean muy bajas. Conocidas las presiones máximas y mínimas, es posible delimitar las elevaciones de los usuarios que pueden ser servidos por cada zona de presión. (López Cualla, 2003)

## 2.9. Componentes de una red de distribución

Una red de distribución se compone de tuberías, piezas especiales, válvulas de diversos tipos, hidrantes contra incendio y públicos (en pequeñas localidades), tanques de regulación, bombeos y accesorios complementarios que permiten su operación, así como su mantenimiento. A continuación, se hace una descripción de cada uno de los componentes de una red.

**Tubería.** Es un conducto que cumple la función de transportar agua u otros fluidos. Se suele elaborar con materiales muy diversos

**Hidrante.** Es un accesorio utilizado para obtener el caudal de agua a la presión requerida, con el fin de atender un incendio. Cada hidrante lleva una válvula de corte para aislarlo de la red de distribución.

**Válvulas de control.** Estas válvulas limitan el caudal a través de ella a un valor máximo. Debe ser una válvula tipo mariposa. Además de regular el caudal, al limitar el caudal máximo se proviene que la presión agua arriba caiga por debajo de un valor crítico, por lo cual puede emplearse como válvula reguladora de presión aguas arriba.

**Válvulas de operación.** Se deben colocar a lo largo de la red, con el fin de poder aislar sectores en caso de rotura de las tuberías o de incendio, y seguir suministrando el agua al resto de la población. El criterio general para la distribución de válvulas de corte es colocar el menor

número de válvulas, de tal manera que al ser operadas afecten al menor número posible de usuarios.

**Válvulas de aire.** Estas válvulas deben instalarse en todos los puntos altos de la red para permitir la remoción de aire. Pueden ser de acción simple o de doble acción.

**Válvulas de purga.** Se debe colocar válvulas de purga en todos los puntos bajos de la red, descargando al sistema de alcantarillado.

**Estaciones rompe presiones.** Son válvulas que permiten regular la presión aguas debajo de la misma, introduciendo una pérdida controlada e independiente del caudal que pase a través de ella. Se utiliza en los casos en que, de no contarse con ella, se causaría una presión excesiva aguas abajo. La válvula reduce la presión aguas abajo y evita la posible rotura de tuberías por sobrepresión, al igual que la apertura de las válvulas de alivio. Debe colocarse una válvula de control aguas arriba, con el fin de facilitar las labores de mantenimiento de la estación rompe presiones.

## CAPITULO 3

### 3. MATERIALES Y METODOS

El análisis hidráulico y la modelación se apoyarán en los Sistemas de Información Geográfica para la ubicación de tuberías, tanques, accesorios, válvulas, lo cual es útil para calcular los parámetros de demanda domiciliaria, basado en la información proporcionada por la ETAPA EP.

En este estudio, se utilizará un programa computacional que permite reproducir el comportamiento de las redes del sistema para el análisis, modelación y calibración. En este capítulo se procesará la información general y que con la ayuda de un software, se realizará la calibración y validación del modelo hidráulico, el cual se basa en procesos de ajuste de los parámetros escogidos, para poder reflejar con la mayor precisión posible el funcionamiento real de la red de distribución.

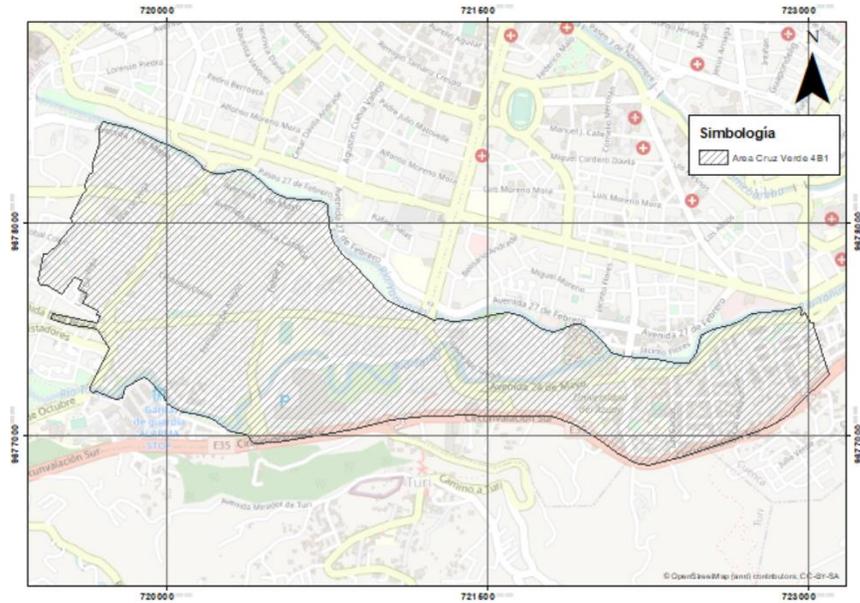
#### 3.1. Descripción del sector de análisis

El sistema de distribución de la ciudad está compuesto por 24 zonas de presión, cada una con un centro de reserva con la posibilidad de interconexión en casos de emergencia.

El sistema Tomebamba al cual pertenece nuestro estudio, es diseñado completamente a gravedad, dependiendo del caudal que produce la planta (El Cebollar). El sector seleccionado para análisis se denomina Sector Cruz Verde 4B1 se indica de esa forma en la ilustración 3, se encuentra ubicado al:

- Norte: Rio Yanuncay a lo largo de la Av. 1ro de mayo
- Sur: Autopista Circunvalación Sur o Troncal Sierra E35
- Este: Av. Gapal, sector Quinta Bolívar
- Oeste: Av. 12 de octubre, Francisco de Orellana

El sector 4B1 perteneciente al Sistema Tomebamba, posee un área de 255 ha y un perímetro de 10279.655m. El sector está ubicado en la parte sur de la ciudad; la red de distribución de este sector es alimentada del centro de reserva de Cruz Verde 4B1 que posee una capacidad de almacenamiento de 3.000 m<sup>3</sup>, la cual es abastecida por la planta potabilizadora de El Cebollar, la misma tiene una capacidad instalada de 1.000 l/s que también abastece a otros sectores. (ETAPA EP., 2018)



**Ilustración 3. Localización del sector de análisis Cruz Verde 4B1 Sur.**

Fuente: (Autor, 2022)

### 3.2. Descripción de la red de distribución de la zona de estudio

El sector de distribución de agua potable Cruz Verde 4B1, pertenece al sistema Tomebamba o conocido también como planta del Cebollar. El sistema tiene como fuente de abastecimiento, al río Tomebamba y al río Culebrillas, cubiertas las demandas hasta el 2050. La zona de servicio de la planta del cebollar abastece principalmente 12 sectores, es decir la parte más consolidada de la ciudad. (ETAPA EP.)

**Tabla 3. Información de identificación de zona de análisis**

<b>Nombre Sector</b>	CRUZ VERDE 4B1
<b>Área (Ha)</b>	255.15
<b>Conexiones</b>	5868
<b>Consumo (m3/mes)</b>	103924
<b>Alimentación Tanque</b>	CRUZ VERDE 4B1

Fuente: (Autor, 2023)

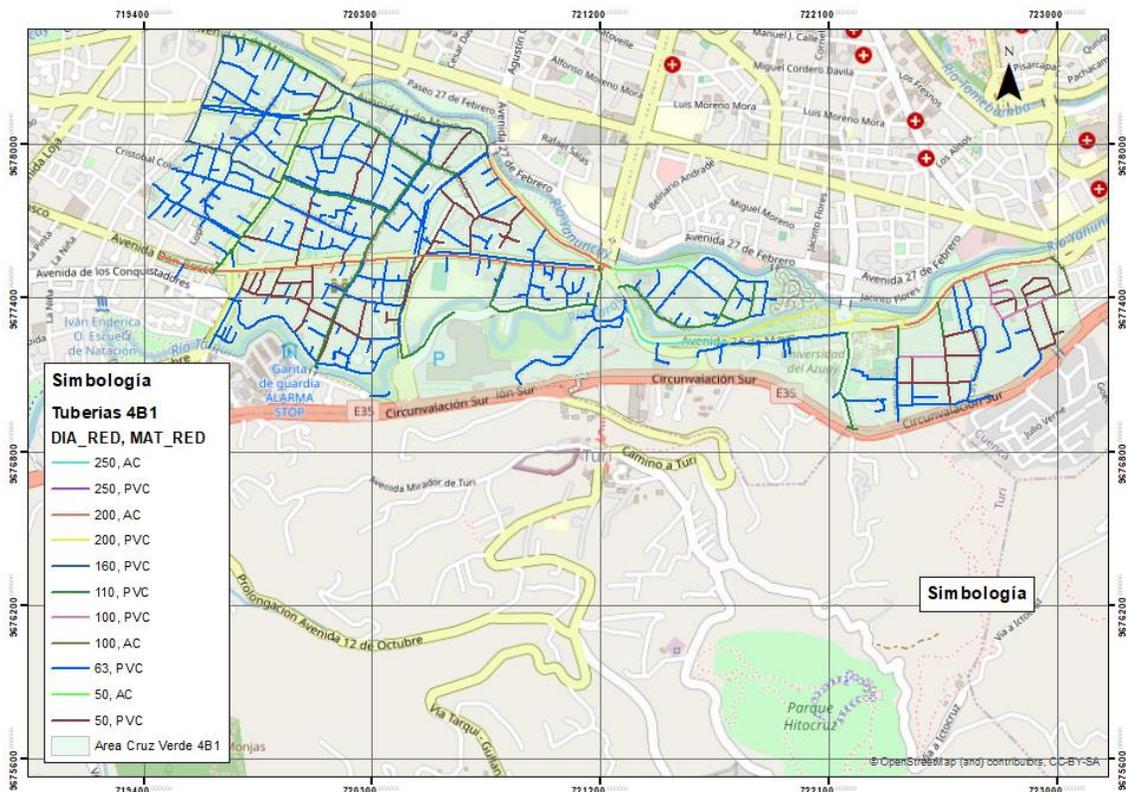
La red de distribución consta de 44.64 km de tuberías, los diámetros de la red de distribución oscilan entre los valores 50 mm y 200 mm. El material predominante para las tuberías es el PVC, con un 90.23%, seguido del asbesto con un 9.77%.

En la Tabla 3 e Ilustración 4 se muestra el detalle de la conformación de la red de distribución:

**Tabla 4. Características de red de distribución.**

DIAMETRO (mm)	MATERIAL		Longitud Total (m)
	AC	PVC	
Longitud (m)			
50	319.11	6808.36	7127.47
63		23799.17	23799.17
110		5984.19	5984.19
160		2466.43	2466.43
200	3539.20	1156.28	4695.48
250	504743.54	62.45	567.19
<b>TOTAL (m)</b>	<b>4363.05</b>	<b>40276.89</b>	<b>44639.93</b>

Fuente: (Autor, 2023)



**Ilustración 4. Esquema de disposición de red en sector Cruz Verde 4B1.**

Fuente: ETAPA EP

Para su abastecimiento el sector Cruz Verde 4B1 se abastece de un tanque de reserva ubicado la planta del cebollar, en la que cuenta con las siguientes características.

**Tabla 5. Capacidad del Tanque de Reserva**

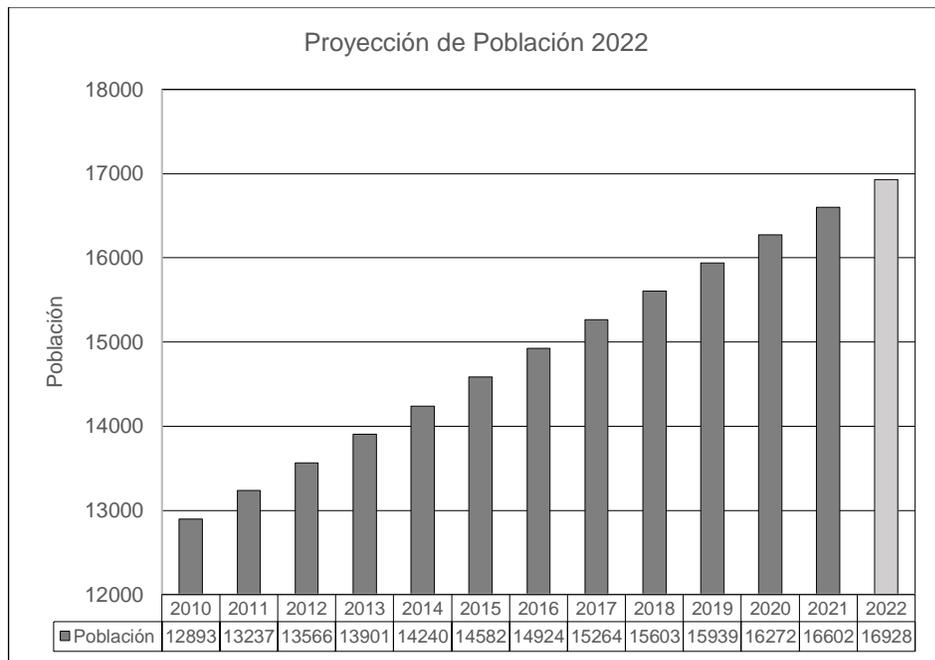
Nombre Del sector	Nombre Tanque	Volumen (m <sup>3</sup> )	Cota (m)	Sector de Abastecimiento
CRUZ VERDE	RT4B1	3000	2590	CRUZ VERDE 1

Fuente: (Autor, 2023)

**3.3. Población de diseño**

Es el número de habitantes que se servían del proyecto para el final del período determinado de diseño, el cual debe ser establecido con base en la población inicial.

La población actual al año 2022 para el área de servicio del sector Cruz Verde 4B1, se obtuvo mediante el procesamiento de los shapes proporcionados por el área de influencia del proyecto de los planes maestros de ETAPA EP. Se obtiene la población actual del área de estudio mediante un software de uso de información geográfica, en donde se carga la información antes mencionada y se interseca el área de influencia del proyecto, con la información del estudio demográfico y posteriormente se obtiene la proyección de la población para el año del presente estudio 2022.



**Ilustración 5. Proyección de Población 2022**

Fuente: (Autor, 2023)

Tabla 6. Proyección población al 2022

ÁREA DE SERVICIO	Área (Ha)	Población Censal 2010 (hab)	Población Actual 2022 (hab)
Cruz Verde 4B1	255.15	12893	16928

Fuente: (Autor, 2023)

Por otro lado, también se determinó la población actual en base a los medidores residenciales, no se tomarán en cuenta los medidores con las siguientes condiciones:

- Uso comercial,
- Uso para construcción,
- Consumo especial,
- Consumo industrial,
- Medidores que no registran consumo

Considerando que para el Sistema Tomebamba se tomará el valor de 3.61 habitantes por medidor, información proporcionada por ETAPA EP.

Tabla 7. Población de acuerdo a medidores residenciales

ÁREA DE SERVICIO	Área (Ha)	Núm. de medidores residenciales (u)	Población Actual 2022
Cruz Verde 4B1	255.15	4992	18022

Fuente: (Autor, 2023)

Como se puede determinar, existe una diferencia de 1094 habitantes entre la proyección de población de *Planes Maestros* y la población obtenida mediante el número de *Medidores Residenciales* instalados al año 2022.

Por lo tanto, es del criterio de este estudio tomar la población obtenida de los medidores residenciales de la zona Cruz Verde 4B1, como la población más cercana a la existente, porque es información calculada en base a datos reales y que no es tan alejada de la calculada mediante las proyecciones, es decir se trabajará con **18022 habitantes** beneficiarios de este sector.

### **3.4. Periodo diseño**

Un sistema de abastecimiento de agua potable se proyecta de modo de atender las necesidades de un sector durante un determinado periodo, para lo cual se considera funcional el sistema, en donde intervienen variables que deben ser valoradas evaluadas para consolidar un proyecto económicamente viable. Por lo tanto, el periodo de diseño se define como el tiempo para el cual el sistema es eficiente ya sea por su capacidad o por la resistencia física de sus materiales.

#### **Vida útil de las instalaciones**

Depende de la resistencia física del material a factores por desgaste u obsolescencia. Debido a que se deteriora con el uso y el tiempo, afectado por la corrosión, erosión y fragilidad. Factores que serán determinantes en su durabilidad.

#### **Facilidades de construcción y posibilidades de ampliaciones**

La fijación de un periodo de diseño está ligado a factores económicos. Por ello, al analizar uno cualquiera de los componentes de un sistema de abastecimiento de agua, la asignación del periodo de diseño ajustado a criterios económicos estará regido por la dificultad o facilidad de su construcción (costos).

#### **Tendencias de crecimiento de la población**

El crecimiento población de factores económicos, sociales y de desarrollo industrial. Un sistema de abastecimiento de agua debe ser capaz de propiciar y estimular ese desarrollo, no de frenarlo. Por tal razón las redes de distribución deben ser retribuidos por los beneficiarios, pidieron representar en costos muy altos si se toman periodos muy largos para ciudades con desarrollos de crecimiento rápido, por lo tanto es importante considerar periodos de diseño más largos para crecimientos lentos y viceversa.

#### **Posibilidades de financiamiento**

Las razones de durabilidad y resistencia al desgaste físico es indudable que representa un factor importante para el mejor diseño, pero al mismo tiempo hay que hacer valoraciones de interés y costo capitalizado para que pueda aprovecharse la inversión realizada. Para ello es necesario conocer el crecimiento de la población y la fijación de una capacidad de servicio, en donde se define el periodo de diseño óptimo de obsolescencia, al final de la cual se requeriría una nueva inversión o una ampliación del sistema actual.

**Tabla 8. Vida útil sugerida elementos de sistema de agua potable.**

<b>Componente</b>	<b>Vida Útil (años)</b>
Diques grandes y túneles	50 a 100
Obras de captación	25 a 50
Pozos	10 a 25
Conducciones de HD	40 a 50
Conducciones de AC o PVC	20 a 30
Planta de tratamiento	30 a 40
Tanques de almacenamiento	30 a 40
Tuberías principales y secundarias de la red:	
·De Hierro Dúctil	40 a 50
·De AC o PVC	20 a 25
Otros materiales	Variable

**Fuente: Norma CO 10.07 – 601 Código Ecuatoriano de la Construcción**

Para definir el periodo de diseño para el análisis del comportamiento de la red de distribución 4B1, se realiza un contraste con los criterios y Parámetros de Diseño para Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado de los Estudios y Diseños Finales de los Planes Maestros de Agua Potable y Saneamiento para la ciudad de Cuenca II ETAPA (TYP SA – ETAPA EP), utilizando esta sección se establece con 25 años para el periodo de diseño de la red para la evaluación del modelo hidráulico del sector Cruz Verde 4B1 como se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 9. Período de diseño.**

<b>Componente</b>	<b>Período de Diseño</b>
Captaciones	30 años
Conducciones de Agua Tratada	30 años
Plantas de Tratamiento AP	30 años
Reservas	30 años
Redes de Distribución PVC	25 años
Equipo Electromecánico y Bombeo	10 años
Plantas de Depuración de AR	20 años

**Fuente: Criterios y Parámetros de los Planes Maestros II Cuenca**

### **3.5. Dotación de agua potable para el sistema Tomebamba**

En los Estudios Definitivos de los Planes Maestros – II Etapa, se establecieron las dotaciones per cápita indicadas en la Tabla 9., para los distintos sectores urbanos del cantón Cuenca, por lo que debido a la investigación previa por parte de ETAPA EP, se considera oportuno adoptar estos parámetros recomendados para unos mejores resultados.

Tabla 10. Dotaciones para el sector urbano

Zona de Servicio	Dotación Neta (l/hab/día)	Pérdidas (%)	Dotación Bruta (l/hab/día)
Rural	112.5	25	150
Centro Parroquial	150	25	200
Urbano Consolidado y Zonas Especiales	247.5	25	330

Fuente: Estudios Definitivos de los Planes Maestros de la ciudad de Cuenca – II Etapa.

Sin embargo, también se debe considerar las dotaciones propuestas por Planes Maestros III de ETAPA EP.

Tabla 11. Dotaciones para el sector urbano

Año	Residencial (l/hab-d)	Comercial (l/hab-d)	Industrial (l/hab-d)	Especial (l/hab-d)	Total Tasa Consumo (l/hab-d)	Pérdida (%)	Dotación (l/hab-d)
2020	178	17	4	12	210	30%	300
2025	173	16	4	11	205	28%	285
2030	169	16	4	11	199	26%	269
2035	165	15	4	11	195	24%	257
2040	161	15	4	11	190	22%	244
2045	157	15	3	10	185	20%	231
2050	153	14	3	10	180	20%	225

Fuente: Estudios Definitivos de los Planes Maestros de la ciudad de Cuenca – III Etapa.

Por lo tanto, la zona de análisis se localiza dentro de la zona de servicio establecida como Residencial, para el año 2025 por lo que se asume la dotación bruta de 285 l/hab/día, valor que es considerado de acuerdo a los criterios de Planes Maestros III.

### 3.6. Cálculo de caudales de diseño

#### Caudal medio diario

Caudal medio diario o  $q_{md}$ , es el consumo diario de una población, que se registra en un año de consumos diarios. Se calcula en base a la población obtenida al final del periodo de diseño así como la dotación, se puede observar en la siguiente ecuación (11):

$$q_{md} = \frac{P_d \cdot D}{86400} \quad (11)$$

Donde  $q_{md}$  es el caudal medio diario en l/s,  $P_d$  es la población de diseño (futura) en hab y  $D$  es la dotación bruta, considerando pérdidas del 28% expresado en l/hab/día según criterios de Planes Maestros III.

### **Caudal máximo diario**

Consumo máximo registrado durante 24 horas a lo largo de un periodo de un año, mayorado por un coeficiente de consumo máximo diario (que varía según las características de la población), de acuerdo a la siguiente ecuación (12):

$$QMD = K_1 \cdot q_{md} \quad (12)$$

Donde QMD es el caudal máximo diario en l/s,  $K_1$  coeficiente de caudal máximo diario  $K_1=1.3$  según criterio de Planes Maestros y  $K_1=1.25$  en base a la Norma CO 10.07-602 y  $q_{md}$  es el caudal medio diario en l/s, para este caso se definirá para  $K_1=1.3$ .

### **Caudal máximo horario**

Consumo máximo registrado durante una hora en un periodo de un año sin tener en cuenta el caudal de incendio, mayorado por un coeficiente de consumo máximo horario ( $k_2$ ), se puede verificar en la siguiente ecuación:

$$QMH = K_2 \cdot q_{md} \quad (13)$$

Donde QMH es el caudal máximo horario en l/s,  $K_2$  Coeficiente de caudal máximo horario  $K_2=1.82$  en base a Planes Maestros y  $q_{md}$  es el caudal medio diario en l/s. En la tabla 11., se presentan los componentes y caudales de diseño de los diferentes componentes de un sistema de agua potable, de acuerdo a los Criterios y Parámetros de Diseño para Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado de los Estudios y Diseños Finales de los Planes Maestros de Agua Potable y Saneamiento para la ciudad de Cuenca II ETAPA (TYPASA – ETAPA EP).

Tabla 12. Caudales de Diseño

Componente	Caudal de Diseño
Conducción Agua No Tratada	QMD + 10%*
Conducción Agua Tratada Gravedad	QMD
Conducción Agua Tratada Bombeo	QMH
Red de Distribución	QMH
Planta Tratamiento de Agua	QMH

Fuente: Estudios Definitivos de los Planes Maestros II.

Para el presente estudio se calcularon los caudales de diseño según lo descrito anteriormente, los cuáles se describen en la Tabla 12. Para el caso del coeficiente  $K_2$ , se considera el del sistema urbano.

Tabla 13. Caudales de Diseño del Proyecto

Área de estudio	Población (hab)	Dotación (l/s)	% Pérdidas	qmd (l/hab/día)	QMD (K1=1.3) (l/hab/día)	QMH (K2=1,82) (l/hab/día)
255,15	18022	285	28%	76,09	98,92	138,49

Fuente: (Autor, 2023)

### 3.7. Pérdidas de carga en las redes

Las pérdidas de carga calculadas para la verificación de las presiones en las líneas se conceptualizaron de dos maneras, la primera es la pérdida por fricción y la segunda es la pérdida por accesorios.

De acuerdo a los Criterios y Parámetros de Diseño de los Planes Maestros de Agua Potable y Saneamiento para la ciudad de Cuenca II ETAPA, los valores del coeficiente C de Hazen-William para los diferentes tipos de tubería son los que se indican en la Tabla 13.

Tabla 14. Valores del coeficiente C

Tipo de Tubería	Edad de la Tubería		Valor adoptado	Observaciones
	Nueva	Usada		
Hierro Dúctil	140	15	130	Criterio Conservador
PVC	150	125	130*	Criterio Conservador
Acero Soldado	120	90	110	Criterio Conservador
Acero con Revestimiento	140	135	130	

\*Para redes de Distribución se recomienda tomar un valor  $C=120$

Fuente: Estudios Definitivos de los planes maestros.

**3.8. Variaciones de presiones en la red**

Con respecto a las presiones dinámicas mínimas en conducciones de agua, se considera que éstas no deban ser inferiores a 5 m.c.a., misma que corresponde a la presión mínima para que funcionen accesorios como válvulas. (Norma CO 10.07-602, Capítulo 6, Sistemas de agua potable, numeral 5.3.2.2).

La línea piezométrica de las conducciones a presión, se calculará para las peores condiciones de flujo, y estará por lo menos 2 m más arriba de la clave del conducto, y por lo menos 1m más arriba de la superficie del terreno. Esta condición no será obligatoria para tramos iniciales y finales de conducciones a presión acopladas a reservorios o estanques al aire libre como indica la Norma CO 10.07-601, Capítulo 5, Captación y conducción para proyectos de abastecimiento de agua potable, numeral 5.2.4.36.

Según la norma ecuatoriana para determinar las presiones en la red se considera la siguiente Tabla 14:

**Tabla 15. Presiones permitidas en la red de distribución**

<b>Presión (m.c.a)</b>	<b>Norma CO.10.01-601</b>	<b>Norma CO.10.01-602</b>
Estática Máxima	70	40
Dinámica Máxima	50	30
Dinámica Mínima	10	7

**Fuente: Normativa Ecuatoriana.**

Según la norma CO 10.01-601, Parte Séptima, Numeral 4.2.3 – Caudal de diseño y presiones:

- Se establece un mínimo de 10 m.c.a. Para el caso de proyectos en los que el abastecimiento se realiza a través de grifos públicos, esta presión podrá ser reducida a 5 m.c.a.
- La presión estática máxima, no deberá, en lo posible, ser mayor a 70 m.c.a y presión máxima dinámica, 50 m.c.a.
- En la norma CO 10.01-602, Parte Sexta, Numeral 5.6 – Distribución de agua potable:
- De acuerdo a la Norma Brasileña P-NB-594/77 numeral 5.3, para la delimitación de las zonas de servicio, se pueden tener las siguientes consideraciones:
- Las redes de distribución podrán ser divididas en tantas zonas de presión como fuesen necesarias para atender las condiciones de presión impuesta por la Norma P-NB-594/77.

- La presión estática máxima permitida en redes de distribución será de 50 m.c.a. y presiones dinámicas mínimas de 15 m.c.a.
- Partes de una misma zona de presión pueden presentar presiones estáticas superiores a la máxima y dinámicas inferiores a la mínima establecidas anteriormente bajo las siguientes condiciones:

El área con presiones superiores a 50 m.c.a podrá corresponder hasta un 10% del área de la zona de presión, sin que sobrepase de 60 m.c.a, y hasta un 5% de la zona de presión no debe sobrepasar los 70 m.c.a.

El área abastecida con presión dinámica inferior a 15 m.c.a podrá corresponder hasta un 10% del área de la zona de presión, con una presión mínima superior a 10 m.c.a y hasta un 5% del área de zona de presión con una presión mínima del 8 m.c.a, además las áreas sujetas a presiones menores a 15 m.c.a deberán tener una presión estática máxima menor 1.5 la presión dinámica mínima.

### **3.9. Velocidades permitidas en la red**

La velocidad mínima en la red de distribución en ningún caso debe ser menor a 0.30 m/s, para garantizar la auto-limpieza del sistema. Para poblaciones pequeñas, se aceptarán velocidades menores, solamente en ramales secundarios. La velocidad máxima en la red de distribución no debe ser mayor a 2.00 m/s. La velocidad en las tuberías debe mantenerse alrededor de 1.5 m/s, en base a la recomendación de la norma CO.10.01-601, numeral 4.2.5.5, Parte Séptima.

### **3.10. Edad de servicio de la tubería**

Las tuberías tienen una vida de 15 o 20 años y transcurrido ese tiempo es frecuente la aparición de fugas y de agua turbia de color marrón, puesto que el uso y debido a su composición afecta negativamente durante todo el tiempo de servicio de las mismas, sin embargo, en las paredes de PVC y de polietileno, son relativamente pequeñas las constantes de descomposición. (ETAPA EP., 2021)

### **3.11. Pérdidas de agua no contabilizada**

Para empresas prestadoras y administradoras del servicio de agua potable uno de sus objetivos principales es determinar el IANC (índice de agua no contabilizada). Sin embargo, se toma como reto y necesidad, conocer, determinar y gestionar de manera más precisa el ANC (agua no contabilizada), en debe considerarse para su determinación factores tales como:

- Catastros de las redes.
- Número de usuarios.
- Volúmenes de ingreso al sistema y de facturación.
- Micromedición.
- Longitud de conducciones, redes de distribución y datos de las domiciliarias.
- Consumos no autorizados.
- Presión promedio por sectores.
- Estimado de conexiones clandestinas o no autorizadas.
- Presión promedio por sectores.
- Registro histórico de rotura de matrices y domiciliarias.
- Nivel de servicio (24 horas, intermitencia, etc.)

### **Agua no contabilizada**

El agua no contabilizada no solo supone el desperdicio de un valioso recurso natural, sino que también causa daños económicos, ecológicos y humanitarios. Este problema global deteriora el medioambiente a causa de la pérdida de agua potable, genera costes de servicios adicionales (producción, mantenimiento, pérdidas de ingresos) y puede tener consecuencias en los niveles de servicio y en la calidad del agua. A nivel local, las publicaciones y políticas gubernamentales más recientes advierten de la necesidad urgente de luchar contra el fenómeno. En todo el mundo, se han identificado ya algunos problemas: envejecimiento de las redes, reducción del consumo, control de los precios (ETAPA EP., 2021)

### **Índice de Agua No Contabilizada**

Los niveles de agua no contabilizada (ANC) corresponden a la diferencia entre la cantidad de agua ingresada a la red de distribución y la cantidad de agua realmente facturada a los clientes, debido a fugas (pérdidas reales o físicas), agua no facturada, agua consumida ilegalmente o no medida con la precisión del caso (pérdidas aparentes o comerciales) y se define en la ecuación (14) como:

$$I_{ANC} = \frac{VAD - VTF}{VAD} \cdot 100 \quad (14)$$

En donde  $I_{ANC}$  es el índice de agua no contabilizada (%),  $VAD$  es el volumen de agua distribuida a la red,  $VTF$  corresponde al volumen total facturado, con un valor de referencia de 50%. (ETAPA EP., 2021)

### **Pérdidas comerciales**

Estas se refieren al agua que es consumida pero que no es registrada y por lo tanto no es facturada, o sea, el agua no contabilizada más el agua utilizada en el proceso de potabilización. (ETAPA EP., 2021)

### **Pérdidas físicas**

El agua no contabilizada se compone de pérdidas físicas producidas por fugas en los sistemas y de pérdidas aparentes originadas en consumos no facturados debido a fraudes y mediciones no exactas, como se puede dar en las conducciones, ramales de las redes de distribución, o reboses en los tanques de almacenamiento. (Universidad del Azuay, 2021):

## CAPÍTULO 4

### 4. MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA RED DE ANÁLISIS

La modelación de un SAP (sistema de agua potable, es la digitalización de la red, esta acción permite simular o reproducir el comportamiento de la misma, facilitando así el estudio considerando varios escenarios con el objetivo de buscar la optimización y la correcta administración y planificación de la red para mejorar el servicio. Los resultados de la modelación buscan ser cuantificables y aplicables e implica simular un fenómeno real, conceptualizándolo y simplificándolo.

#### 4.1. Descripción general de los elementos para modelación

El programa comercial utilizado en este estudio, simula el comportamiento de un sistema y a la vez que localiza los problemas en el funcionamiento, posteriormente se proceder a la mitigación, con la información resultante es posible una proyección estratégica del sistema para establecer obras y maniobras antes de su ejecución.

Para obtener los resultados esperados, es necesario que una serie de campos de la base de datos estén completos adecuadamente. El análisis que se ha realizado de datos ha sido enfocado en este sentido, detectando y señalando campos necesarios para modelar, a continuación, se describen las principales características de estos elementos.

- a) Las tuberías y diámetros deben llevar datos de ubicación georeferenciados en base al catastro dispuesto, los diámetros de las tuberías de la red de la zona de análisis van desde 50 mm a 250 mm.
- b) El tipo de material casi en la totalidad de la red existe información en las características físicas de las tuberías, sin embargo, en casos de que no exista información se coordinó con el departamento de catastros de ETAPA EP, para llenar la respectiva información.
- c) El campo longitud debe estar correctamente actualizado y se obtiene de manera geométrica a partir de los nudos de la red.
- d) Las válvulas están disponible información SIG en un archivo SHAPEFILE que indica la posición espacial de estos elementos, así como la clasificación según su tipo.
- e) El tanque de abastecimiento contiene cota de fondo y altura.

## **4.2. Digitalización de los elementos a modelar**

### **4.2.1. Aplicación CAD**

Es un software de dibujo que trabaja en dos y tres dimensiones que da soporte en lo referente a la precisión en los dibujos, con este programa se administran las bases de coordenadas, ubicaciones, áreas etc. de elementos del catastro dentro de la ETAPA EP en este caso específico de los componentes de la red de distribución de la zona para posteriormente ser exportadas a los diferentes interfaces y obtener los planos en planta y perfiles así como diámetros, materiales, características de cada sector que consten en el catastro.

### **4.2.2. Aplicación de Ubicación Geográfica**

Su principal función es la revitalización de datos y la edición de los mismos además de la generación de nuevas capas con sus respectivas propiedades las cuales son necesarias para generar información de las demandas de la distribución. Dentro de esta herramienta es posible administrar los datos que han sido cargados.

### **4.2.3. Aplicación Modelación Hidráulica**

Es un software usado como herramienta para diseñar y simular el comportamiento de redes de distribución de agua tanto en solución dinámica y estática. Este software brinda varias capacidades como analizar la calibración del modelo hidrológico, costos energéticos y calidad del agua.

Esta aplicación usa algoritmo de análisis hidráulico basado en el método del gradiente conjugado, el cual permite resolver las ecuaciones lineales mediante matrices simétricas de una manera eficiente, ya que reduce el manejo de datos, memoria del equipo y optimiza el número de iteraciones (Villegas, 2017).

Las ventajas del uso de esta herramienta son las siguientes:

- Simulación de redes.
- Análisis de comportamientos críticos de tuberías.
- Evaluación de la capacidad del caudal que recorre la red para consumo y posibles mitigaciones de incendios.
- Diseño de nuevas y ampliaciones de redes.
- Localización de pérdidas de agua.

- Crear, planificar y administrar modelos.
- Planificación y administración de renovación y lavado de tuberías.
- Gestión de consumo energético.

#### **4.3. Criterios generales y fases de modelación**

El procesamiento de información para la modelación de las redes es de suma importancia, así como la organización de los componentes y elementos, los cuales se basan en los catastros, en este caso brindados por la empresa ETAPA EP., puesto que la confiabilidad de esta información brindará unos resultados más apegados a la realidad.

De igual manera para el procesamiento de información para la modelación hidrodinámica es importante ingresar datos lo más precisos posible para garantizar la efectividad de los resultados. Los datos relevantes que intervienen en este proceso son: la topología de la red que se dispone en un archivo tipo CAD y SHAPEFILE, información poblacional, en este caso se utiliza datos del mes de junio de 2022 y finalmente modelos hidráulicos producidos en el software.

En este apartado se realiza una descripción general del proceso que se ha realizado para realizar la modelación de las redes, desde la asignación de datos iniciales, el procesamiento para la definición y análisis de escenarios, hasta la evaluación de resultados. Los datos ingresados inicialmente corresponden a la información de los elementos que intervienen en la red tales como: tuberías, nudos, válvulas y tanque de reserva. De modo que, durante la ejecución del modelo, esto permite resolver las ecuaciones de las variables hidrodinámicas, lo cual da paso a la determinación del flujo del agua en cada tubería y la presión en cada nodo.

Si bien es cierto como se ha indicado anteriormente, con el software es posible obtener parámetros de calidad del agua, pero en este caso no será tema de estudio por lo que únicamente se procederá con la modelación de las redes de distribución del sector.

El procedimiento general para conformar una modelación hidráulica contiene la Figura 2, en donde se consideran cinco etapas a seguir, dentro del modelo numérico que sigue el software de modelación.

**Figura 1. Diagrama de flujo de los pasos principales para construir un modelo**

MODELO FÍSICO	MODELO NUMÉRICO
1. Procesamiento de la información disponible	
Criterios de similitud	Sistema de ecuaciones
2. Definición de parámetros de contorno	
Elaboración del Modelo	Solución numérica
3. Calibración del modelo	
Consumos, rugosidades, presiones	
Mediciones	Cálculos
4. Optimización de resultados	
Variantes del Modelo	Variantes iniciales
5. Validación del Modelo (comprobación)	

Fuente: (Autor, 2022).

La primera es el procesamiento que engloba la consolidación de bases de datos en varios formatos digitales con características especiales, se establecen los criterios de similitud entre el modelo físico y el teórico, en este caso la similitud será la geometría, distribución de las redes y la ubicación de elementos hidráulicos (válvulas, tapones, tanques), se define la formulación de Hazen Williams para el desarrollo y cálculo interno del comportamiento del sector.

En la segunda fase se determinan los parámetros de contorno, es decir; se añaden los factores principales para el modelo, como el consumo cargado a cada nodo, elevaciones, funcionamiento de válvulas y se procede a la primera solución numérica.

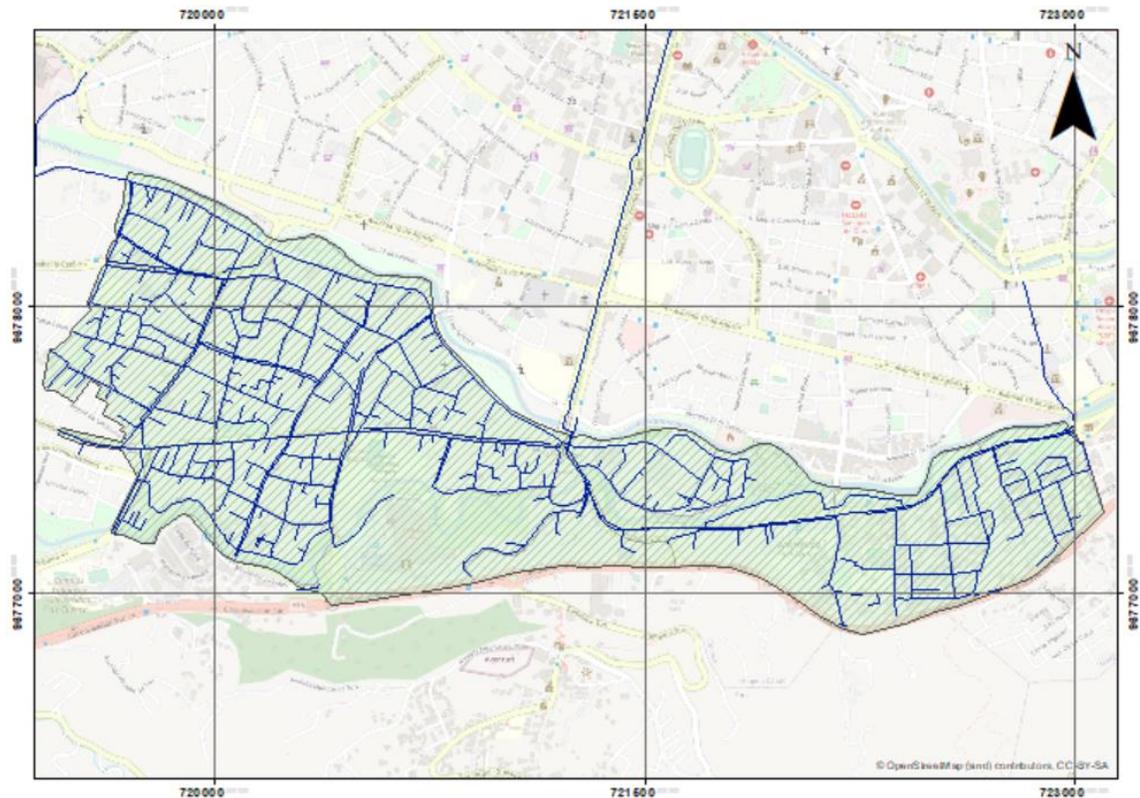
La tercera fase corresponde a la calibración del modelo hidráulico, basado en medidas tomadas en campo (presiones) y los cálculos obtenidos a partir de ésta información, lo que da paso a la cuarta fase que es la optimización de resultados, en donde mediante el software se ajustarán los valores que sean posibles cambiar para lograr el resultado esperado, que vendrían a ser las rugosidades de los materiales.

Finalmente, para que el modelo sea confiable se validará, mediante nuevas mediciones realizadas en campo y se comprobarán los resultados y el margen de error.

#### 4.4. Datos de ingreso al software

#### 4.4.1. Base de datos de georreferenciación

Es una base de datos que se trabaja en un sistema de información geográfico (SIG), en donde se disponen los datos geográficos organizados de forma que permite la gestión y análisis del territorio, para este proyecto se utiliza información de tipo SHAPEFILE que se convierte desde un archivo DWG, con la finalidad de obtener características espaciales principalmente de elementos como tuberías, uniones, válvulas y tanques de reserva.



**Ilustración 6. Georreferencia elementos de red distribución Cruz Verde 4B1.**

**Fuente: (Autor, 2022)**

#### 4.4.2. Topología de las redes

El análisis topológico es el que analiza la ubicación y relación entre los diferentes elementos de la red, se estudia las conexiones entre elementos y la conectividad de la red a otros. Una red de distribución se establece de la siguiente manera:

- Los tramos de tubería deberán ir delimitados por una coordenada (x,y) de sistema UTM WGS 84 17S.
- Los tramos de tubería no pueden solaparse.

- No se consideran tees o codos como elementos hidráulicos dentro del catastro y tampoco dentro de la modelación.
- Se considera un solo tanque de reserva para el abastecimiento del sector y que siempre tendrá el recurso suficiente, no es competencia de este estudio analizar los niveles del tanque de reserva mediante una curva de consumo,

#### **4.5. Desarrollo del Modelo Hidráulico**

El objetivo del siguiente estudio es elaborar un modelo hidráulico en régimen permanente, debido a que simulará una respuesta similar a la real, que podría darse en un tramo determinado de la red del sector.

Normalmente, las redes se diseñan en estado estacionario (diámetros, volúmenes), considerando las proyecciones más desfavorables en cuanto a consumos, población y pérdidas. Por lo tanto, se considera suficiente para este estudio realizar las evaluaciones del sector en régimen permanente.

##### **4.5.1. Componentes para modelación**

Para la obtención de las características físicas de la red de distribución de agua potable, previamente es importante consolidar la información que se ha generado anteriormente, siendo lo siguiente:

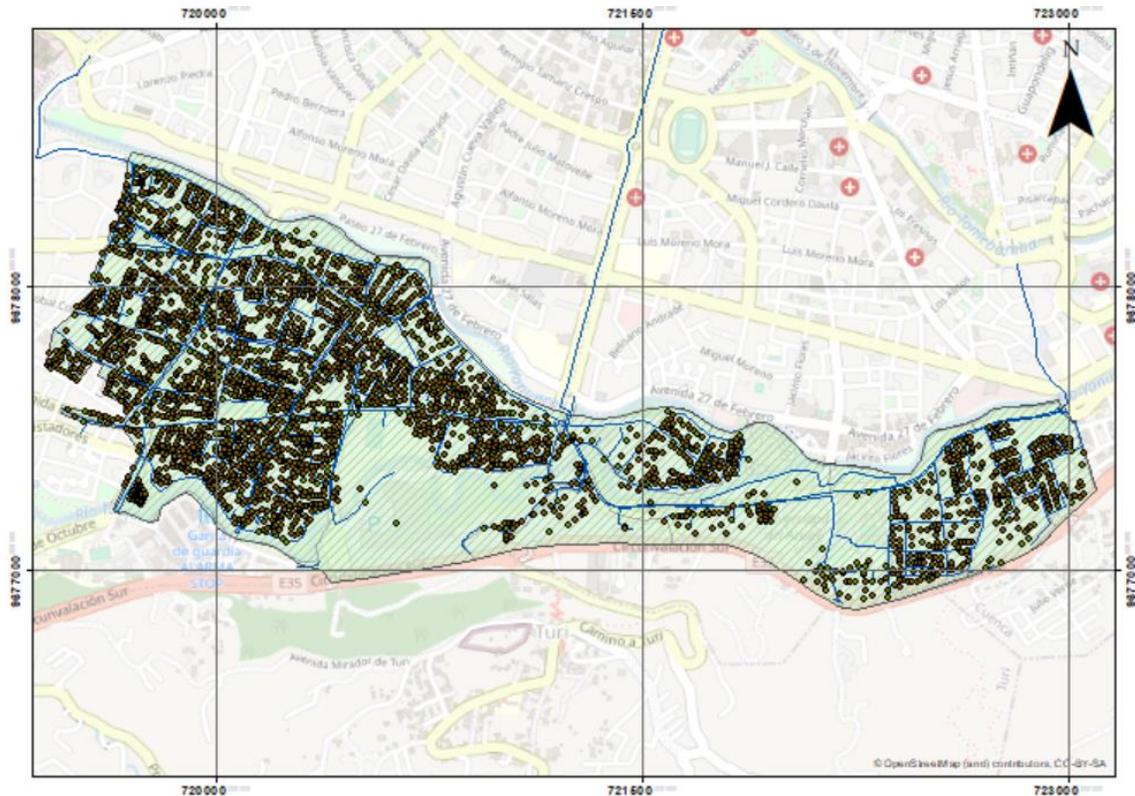
- Archivo formato SHP con la cartografía de la red de distribución, incluyendo tuberías, tanques, válvulas, hidrantes, nodos y otros elementos
- Archivo SHP de los datos de consumos promedio con su ubicación.
- Parámetros de diseño establecidos en sus respectivas unidades en base al cálculo generado y a la normativa establecida para el análisis.
- Levantamiento de Información en campo, se adjunta en los anexos.

El modelo en el software de la red de distribución de agua potable, sobre el que se ha realizado el presente estudio, consta de 596 tramos de tuberías y unen 583 nudos.

##### **4.5.2. Depuración preliminar de datos**

Después de cargar toda la información, como las propiedades de las tuberías, es necesario realizar una validación de la misma, en donde se debe considerar lo siguiente:

- Revisar si existen tuberías que no están conectadas y que no están alimentadas por la reserva propuesta.
- Verificar que la información entregada por la ETAPA EP con respecto a los diámetros de las tuberías están completas.
- Se considera que cada usuario registrado, es una domiciliaria que se alimentara de la tubería más cercana.

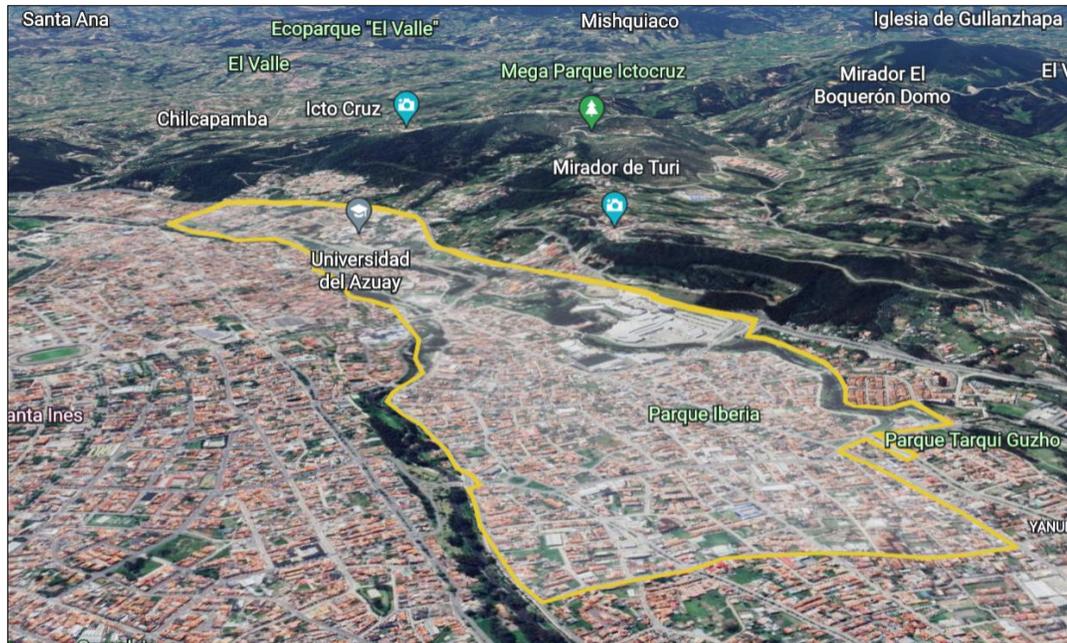


**Ilustración 7. Usuarios residenciales registrados**

**Fuente: (Autor, 2022)**

#### **4.5.3. Asignación de elevaciones en nodos**

Previo al inicio del análisis hidráulico se dispuso en la información de tipo CAD que proporciona la ETAPA EP, que contiene curvas de nivel cada dos metros y se interpoló para cada uno de los nodos de la red de distribución. Se observa en la siguiente imagen que no existe mayor diferencia entre las cotas, debido a que las mismas varían entre 2550 m.s.n.m y 2580 m.s.n.m.



**Ilustración 8. Asignación de elevaciones de la zona Cruz Verde 4B1.**

Fuente: (Autor, 2022)

**4.5.4. Asignación de demandas actuales de la red**

Para el modelo se requiere el número total de medidores instalados en el último periodo de un año (junio 21 a julio 22) para el sector Cruz Verde 4B1, para visualizar o consultar esta información es necesario conocer sus propiedades, aquí existe información del consumo registrado al término de un mes por cada medidor, es decir la micromedición para la zona de estudio, lo cual corresponde al caudal medio para esta zona.

**Tabla 16. Micromedición desde julio 2021 a junio 2022, Cruz Verde 4B1**

Año	Mes	Total conexiones	Consumo	Consumo
			(m³/mes)	Qmd(l/s)
2021	Julio	5723	96931	37.40
2021	Agosto	5732	97001	37.42
2021	Septiembre	5754	97050	37.44
2021	Octubre	5773	97056	37.44
2021	Noviembre	5780	97257	37.52
2021	Diciembre	5798	97364	37.56
2022	Enero	5826	98766	38.10
2022	Febrero	5836	101003	38.97

2022	Marzo	5846	101102	39.01
2022	Abril	5854	102679	39.61
2022	Mayo	5859	102820	39.67
2022	Junio	5868	103924	40.09

Fuente: (Autor, 2022)

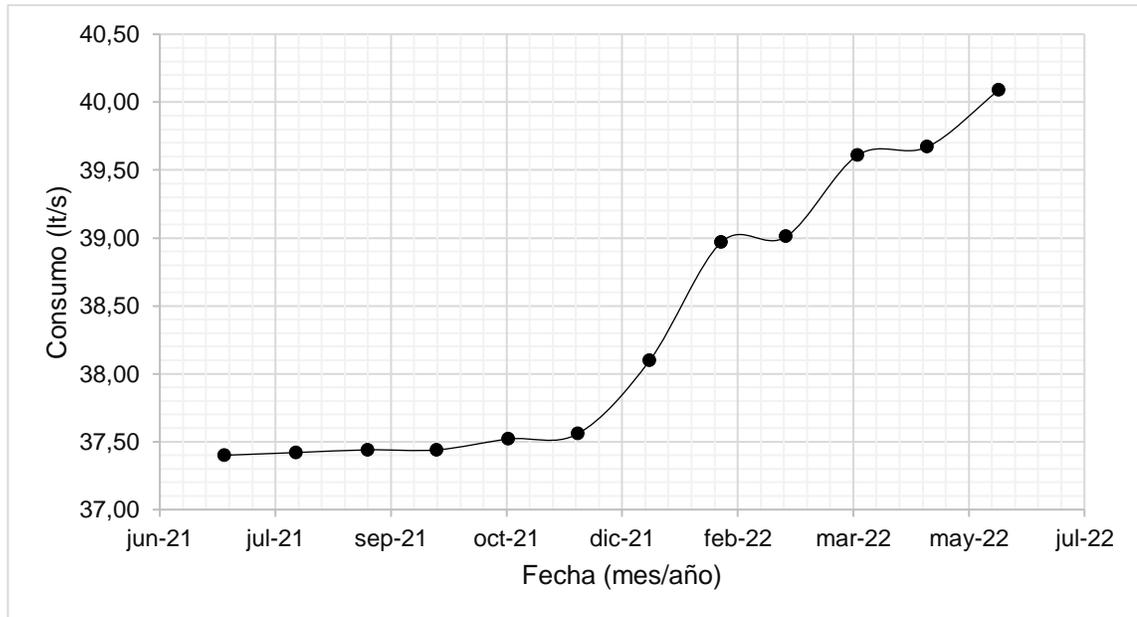


Figura 2. Micromedición desde julio 2021 a junio 2022, Cruz Verde 4B1

Para el modelo inicial es indispensable determinar los caudales, para lo cual se procede con el cálculo, se considera como caudal de consumo actual  $Q_c$ , al consumo de mes de junio de 2022 y se utiliza la ecuación 15, así como la información del último mes porque es el que refleja la mayor cantidad de usuarios y por tanto de mayor consumo.

$$q_{md} = Q_c \cdot f \tag{15}$$

Donde  $q_{md}$  es el caudal medio diario en l/s,  $f$  es el factor de fugas y  $Q_c$  corresponde al consumo actual. A partir del caudal máximo diario (QMD) y caudal máximo horario (QMH) calculados previamente en el apartado 3.6 Determinación de caudales de diseño, se obtienen los siguientes resultados con respecto al caudal medio ( $Q_m$ ).

Tabla 17. Cálculo de caudales obtenidas por micromedición

Qm	Factor Fugas	Qmd	K1	QMD	K2	QMH
(l/s)	(%)	(l/s)				
40,09	1,28	51,32	1,3	66,71	1,82	93,39

Fuente: (Autor, 2022)

Estos valores son ingresados en el programa de información geográfica y se precede con el cálculo del consumo de cada “medidor” independiente. Posteriormente, estos consumos de los medidores son cargados en el programa de modelación, el cual será repartido a la tubería más cercana que finalmente se verá acumulado y registrado en cada nudo de la red de distribución.

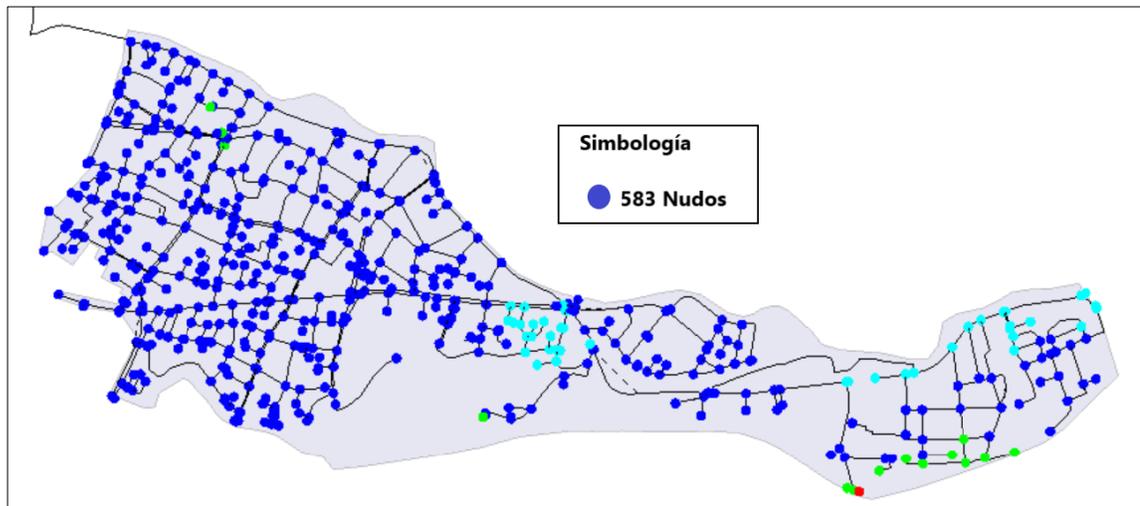


Ilustración 9. Número de nudos.

Fuente: (Autor, 2022)

#### 4.5.5. Asignación de rugosidades

Los coeficientes de rugosidad que se aplicarán para el cálculo de pérdidas dependerán del tipo de material y se sugiere tomar en cuenta que las tuberías que ya tienen algún tiempo en uso y son los recomendados en el numeral 2.1.4.

Las rugosidades se irán actualizado en función de la edad y el material de las conducciones. A medida que aumenta la antigüedad de la red, la rugosidad aumenta debido a la aparición de incrustaciones en el interior de los tubos y, de acuerdo con la ecuación anterior, los coeficientes de rugosidad aumentan.

Para el desarrollo de este estudio y para las simulaciones se ha escogido la ecuación de Hazen Williams, donde el usuario puede cargar la rugosidad C.

**Tabla 18. Coeficiente de fricción de acuerdo al material**

Material	Coeficiente Hazen Williams
Hierro Dúctil	130
Asbesto cemento	140
PVC	130

Fuente: (ETAPA EP, 2004)

**4.5.6.Sub sectorización del modelo hidráulico.**

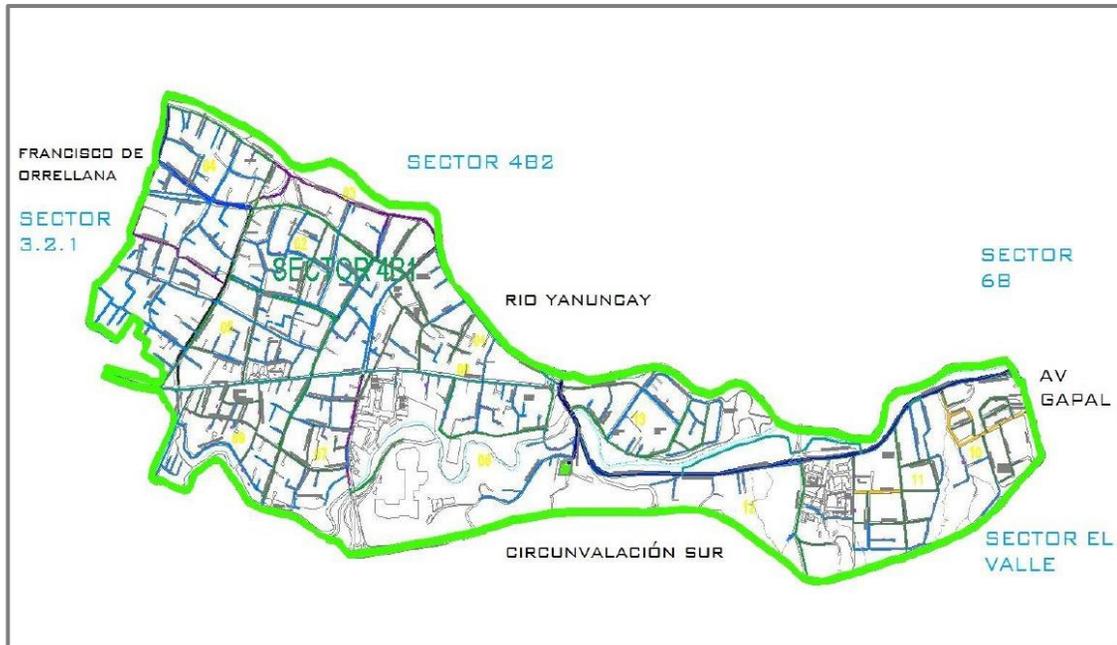
Con el modelo inicial cargado en el programa, se procede a utilizar la información facilitada por el DAIAS (Departamento de aseguramiento interno de agua y saneamiento de ETAPA EP.).

Esto es el Manual de Operaciones del sector Cruz Verde 4B1, en donde se describe el estado de las válvulas de control, las cuáles pueden estar cerradas o abiertas, con la finalidad de aislar por subsector y obtener un resultado del modelo hidráulico cercano al funcionamiento real como se muestra en la Ilustración 9, de igual manera con las estaciones reductoras de presión, las cuales sirven para determinar la presión de entrada o salida en la red. Esto es importante para simular el sentido del flujo de acuerdo al real. El subsector 4B1 se divide en 13 subsectores que se muestran en la Ilustración 10 con las válvulas para operarlas, de modo que se facilite su análisis, planificación y mantenimiento.

D	Label	Is Operable?	Diameter (valve) (mm)	Elevation (m)	Referenced Pipe	Flow (L/s)	Hydraulic Grade (m)	Pressure (m H2O)	Velocity (m/s)	Status (Initial)
32	4B1_VC_1001	☑	63.0	2,546.47	4B1_T_1165	0.24	2,582.49	36.0	0.0769	Open
33	4B1_VC_1002	☑	63.0	2,545.03	4B1_T_1348	0.04	2,582.49	37.4	0.0115	Open
34	4B1_VC_1003	☑	63.0	2,549.94	4B1_T_1669	0.06	2,583.00	33.0	0.0196	Open
35	4B1_VC_1004	☑	50.0	2,548.92	4B1_T_1453	0.85	2,582.91	33.9	0.4328	Open
36	4B1_VC_1005	☑	50.0	2,548.29	4B1_T_1376	0.70	2,582.79	34.4	0.3569	Open
37	4B1_VC_1006	☑	110.0	2,551.22	4B1_T_1056	0.00	2,583.00	31.7	0.0001	Open
38	4B1_VC_1007	☑	63.0	2,550.94	4B1_T_1221	0.04	2,588.16	37.1	0.0117	Open
39	4B1_VC_1008	☑	63.0	2,545.84	4B1_T_1281	0.04	2,576.56	30.7	0.0116	Open
40	4B1_VC_1009	☑	63.0	2,555.18	4B1_T_1268	0.03	2,588.34	33.1	0.0085	Open
41	4B1_VC_1010	☑	500.0	2,565.00	4B1_T_1668	34.86	2,588.73	23.7	0.1775	Open
42	4B1_VC_1011	☑	110.0	2,545.72	4B1_T_1687	4.04	2,574.50	28.7	0.4247	Open
43	4B1_VC_1012	☑	110.0	2,548.26	4B1_T_1308	6.56	2,581.76	33.4	0.6908	Open
44	4B1_VC_1013	☑	160.0	2,538.26	4B1_T_1639	0.00	(N/A)	(N/A)	0.0000	Closed
45	4B1_VC_1014	☑	63.0	2,538.29	4B1_T_1519	0.00	(N/A)	(N/A)	0.0000	Closed
46	4B1_VC_1015	☑	50.0	2,542.00	4B1_T_1619	0.00	(N/A)	(N/A)	0.0000	Closed
47	4B1_VC_1016	☑	63.0	2,546.83	4B1_T_1394	6.44	2,580.71	33.8	2.0658	Open
48	4B1_VC_1017	☑	63.0	2,540.76	4B1_T_1583	0.00	(N/A)	(N/A)	0.0000	Closed
49	4B1_VC_1018	☑	63.0	2,548.08	4B1_T_1225	0.03	2,582.06	33.9	0.0105	Open
50	4B1_VC_1019	☑	63.0	2,539.00	4B1_T_1462	0.00	(N/A)	(N/A)	0.0000	Closed

**Ilustración 10. Estado de Operación de las válvulas de control**

Fuente: (Autor, 2022)



**Ilustración 11. Esquema de 13 subsectores.**

**Fuente: (Autor, 2022)**

#### **4.6. Simulación inicial del modelo hidráulico**

Posterior a ingresar toda la información y parámetros de diseño para la simulación inicial se debe conocer que la simulación que se realiza en el software trabaja considerando la continuidad del flujo de agua, aunque el tanque que abastece se presente vacío (nivel mínimo de operación). Se obtendrá una respuesta hidráulica para cada tramo, que consiste en el cálculo de pérdidas de presión que se originan en cada tramo y que posteriormente es almacenada para poder



**Ilustración 12. Ensamble de Modelo Hidráulico**

**Fuente: (Autor, 2022)**

A continuación, se detalla un resumen de los datos iniciales cargados al programa, los cuales

fueron calculados en las secciones anteriores, el valor del caudal medio *qm* corresponde al año 2022 obtenido mediante:

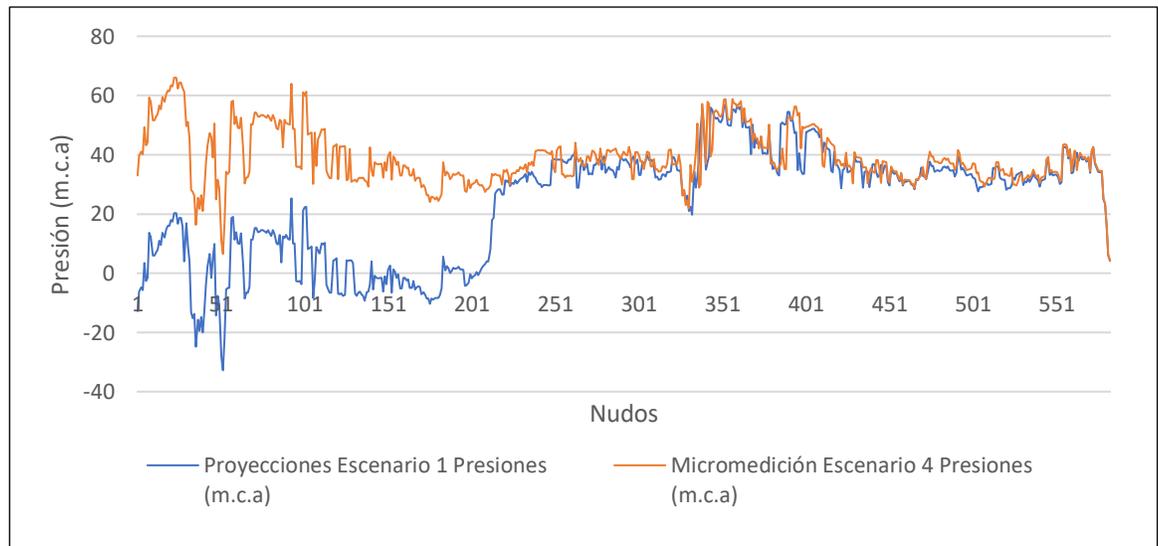
- Proyección de población (datos teóricos) y que aplicaría en el caso de que no se disponga de información de usuarios o medidores
- Micromedición que dispone el sector y que cuenta con lecturas de consumo de los medidores.

**Tabla 19. Datos teóricos vs micromedición**

DATOS TEÓRICOS				
Escenario 1	Geometría		Escenario 2	Escenario 3
Qmd (l/s)	#Nudos	#Tuberías	QMD (l/s)	QMH (l/s)
76,09	583	695	98,92	138,49
DATOS DE MICROMEDICIÓN				
Escenario 4	Geometría		Escenario 5	Escenario 6
Qmd (l/s)	#Nudos	#Tuberías	QMD (l/s)	QMH (l/s)
40,09	583	695	66,71	93,39

Fuente: (Autor, 2022)

De las simulaciones iniciales se puede decir que un primer acercamiento real es hacer un modelo en base a las micromediciones, de los cuales se obtienen los primeros resultados entre los escenarios 1 y 4.



**Ilustración 13. Resultados de presiones de las simulaciones iniciales**

Fuente: (Autor, 2022)

De las simulaciones iniciales se puede decir que se tienen mejores resultados en cuanto a presiones con el Escenario 4 (micromedición), pues no se reflejan presiones negativas como da el Escenario 1.

#### **4.7. Calibración del Modelo Hidráulico**

Como se mencionó anteriormente, el proceso de calibración representa un conjunto de procedimientos de análisis de red, el software permite con sus herramientas de calibración una vez que se cuenta con presiones y demandas. Luego de ingresar un modelo de simulación hidráulica, la calibración producirá mejores valores para los parámetros desconocidos y encontrará una similitud a la realidad del comportamiento de las redes.

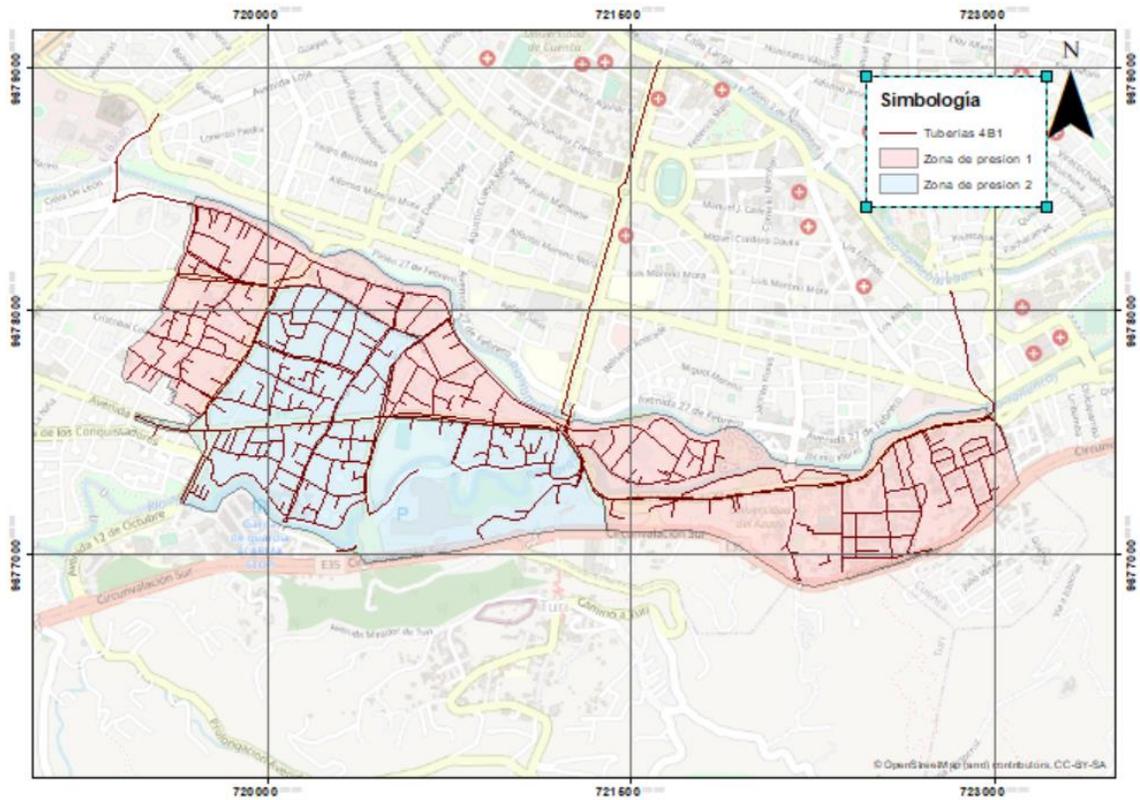
Conseguir que el modelo represente realmente el sistema físico es uno de los retos más importantes en el uso de simuladores matemáticos, por lo cual, para ser usado de manera confiable para cualquier propósito, el modelo de red debe calibrarse con eficiencia.

Es muy común que los resultados no se parezcan en absoluto a los observados en la realidad en campo al momento de poner en funcionamiento y correr el modelo por primera vez, al principio se visualizan muchos errores que hacen que los resultados no coincidan. Por lo que al proceso de detectar esos errores y mitigarlos se establecerá como calibración y previo a realizarla se podrían establecer los siguientes pasos:

- Análisis de los resultados del modelo y detección de valores no lógicos en las presiones, nodos, dirección correcta del flujo en las tuberías.
- Detectar el error en los puntos del modelo donde los valores no son acordes o semejantes a la realidad.
- Corregir los errores de la modelación de nodos o depósitos complejos, errores en la simplificación, errores en la elección del día tipo, etc.

Una vez tomadas en cuenta todas estas consideraciones y que los valores de presiones y caudales se acercan a los observados.

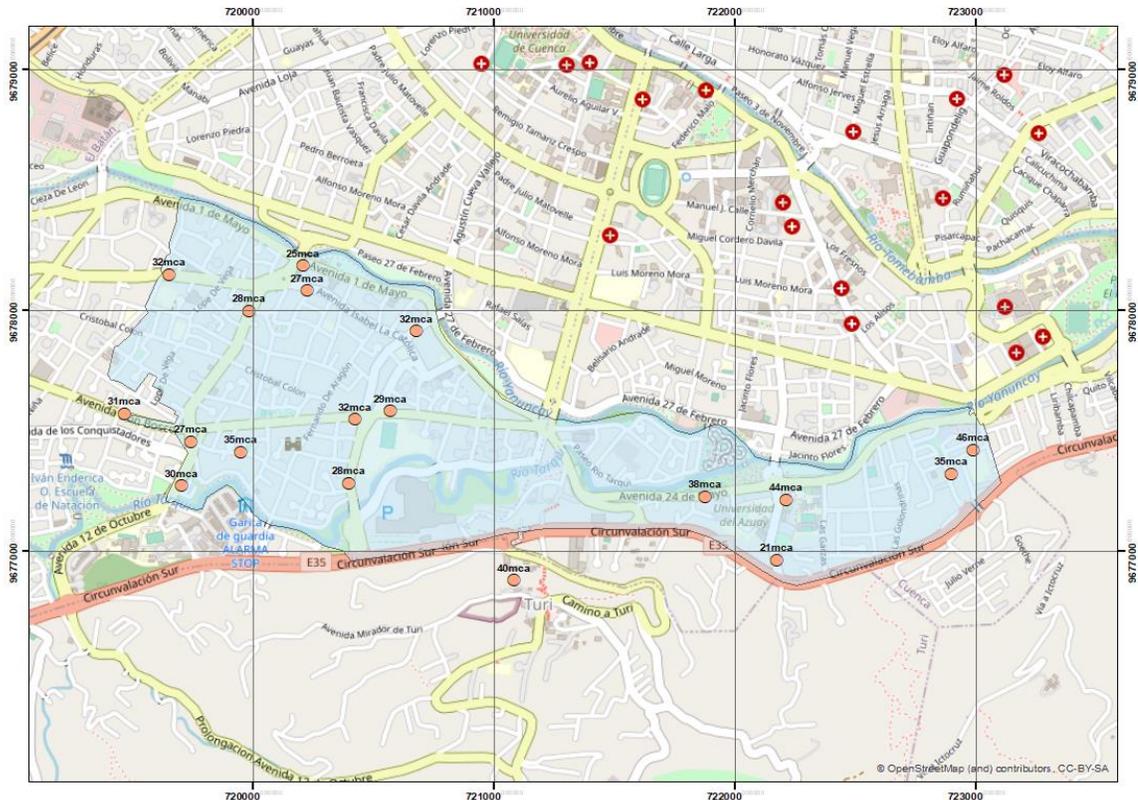




**Ilustración 14. Resultados de zonas de presión para sector Cruz Verde 4B1.**

**Fuente: (Autor, 2022)**

Dentro de este criterio, se decide tomar 9 puntos por cada zona de presión. La capacidad operativa para la toma de presiones en campo es limitada por lo que se establecen 18 puntos de toma de presiones en sitio, los cuáles se pueden identificar en la ilustración 15.



**Ilustración 15. Ubicación de presiones tomadas en campo.**

**Fuente: (Autor, 2022)**

#### 4.7.2. Parámetros de calibración

##### 4.7.2.1. Presiones en campo

La toma de presiones en la red de distribución se realizó directamente en campo con un manómetro (toma de presión dinámica) en diferentes localizaciones de la red, se obtuvieron dos medidas en cada punto a distintas horas, con la intención de considerar en la curva de consumo la influencia de las horas de consumo alto y consumo normal, pero no existe una tendencia remarcada entre las presiones del mismo punto. Con excepción de las presiones tomadas en los puntos 2 y 8.

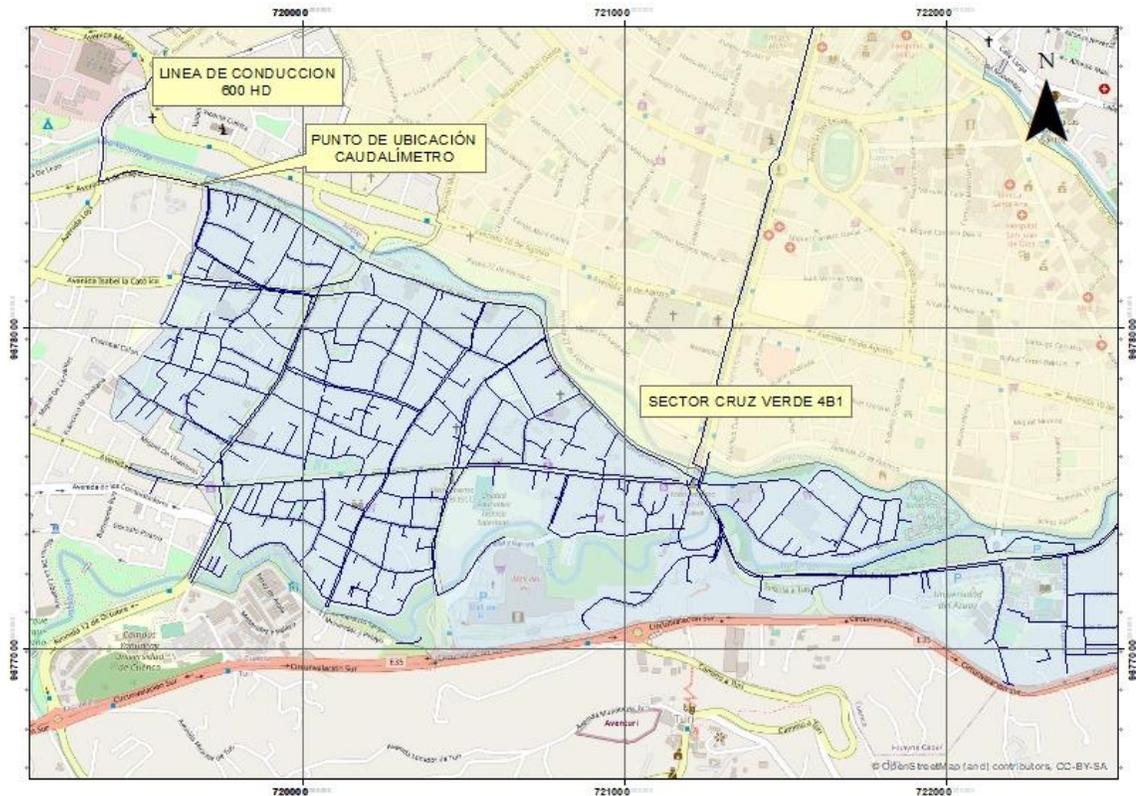
Tabla 20. Resultados de presiones de calibración.

Número	Hora consumo normal	Presiones (m H <sub>2</sub> O)	Hora consumo alto	Presiones (m H <sub>2</sub> O)	Diferencia de Presiones (m H <sub>2</sub> O)
1	16:11	21	12:15	15	6
2	16:16	38	12:17	28	10
3	16:30	46	12:00	40	6
4	16:45	35	12:10	27	8
5	16:50	44	12:15	37	7
6	17:00	49	12:20	49	0
7	17:23	40	12:25	39	1
8	17:30	30	12:30	15	15
9	17:42	33	12:40	28	5
10	10:50	32	12:35	30	2
11	11:00	27	12:37	27	0
12	11:10	30	12:23	32	2
13	11:30	30	12:25	31	1
14	11:35	35	12:40	35	0
15	11:42	21	12.43	21	0
16	11:48	28	12:45	28	0
17	11.58	35	12:00	35	0
18	11:00	35	12:50	35	0

Fuente: (Autor, 2022)

#### 4.7.2.2. Ajuste de demandas (Caudales para curva de consumo)

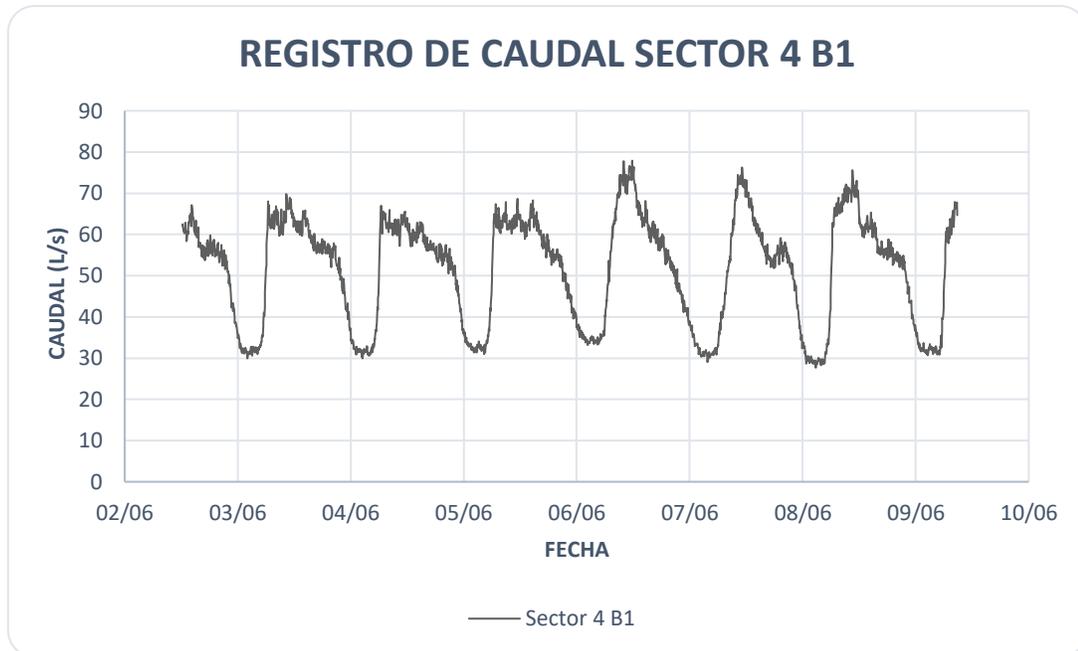
A partir del shape de medidores, el cual consta de información de datos mensuales de consumo, sin embargo, considera valores de mediciones de consumo comercial, de construcción, especial. Para tener una certeza acerca del consumo real, se depuró este shape, únicamente se consideran los medidores que registren un consumo diferente o mayor que cero, lo cual nos da una proximidad a una micromedición. Posteriormente la resta entre el valor de Macromedición y esta Micromedición obtenida, nos permite obtener un valor de pérdidas que es posible traducir en porcentaje.



**Ilustración 16. Caudalímetro ubicado en la Av. 24 de Mayo.**

**Fuente: (Autor, 2022)**

Con la ayuda de un medidor portátil, se registraron caudales durante un periodo de ocho días consecutivos, cada cinco minutos con lo que se elaboró la curva de consumo, estos datos fueron tomados en la Av. Primero de Mayo como se muestra en la Ilustración 18. La tabla generada de este levantamiento de información se observa en el anexo correspondiente., en donde están dispuestos todos los elementos de la curva generada, en esta se puede apreciar los datos de la gráfica de la curva de consumo por lo que es posible determinar que existe mayor consumo en las horas comunes de alta demanda u “horas pico”, esta información recolectada en campo fueron datos proporcionados por ETAPA EP.



**Figura 3. Curva de Consumo junio 2019 Cruz Verde 4B1.**

**Fuente: (Autor, 2022)**

En la Tabla 20, se visualiza el caudal excedente en los nudos con el factor de ajuste, pero que no es registrado, por lo tanto, se procede a distribuir de manera proporcional en el programa.

**Tabla 21. Ajuste de demandas**

<b>Micromedición</b>	<b>Macromedición</b>	<b>Ajuste Demanda</b>
<b>Qm (l/s)</b>	<b>Qm (l/s)</b>	<b>Factor Fugas (%)</b>
<b>40.09</b>	51.58	22.3%

**Fuente: (Autor, 2022)**

A través de la modelación de las redes de distribución se ingresará la curva de variación de la demanda estimada la cual se utilizará para la calibración del sector ubicado en la zona urbana

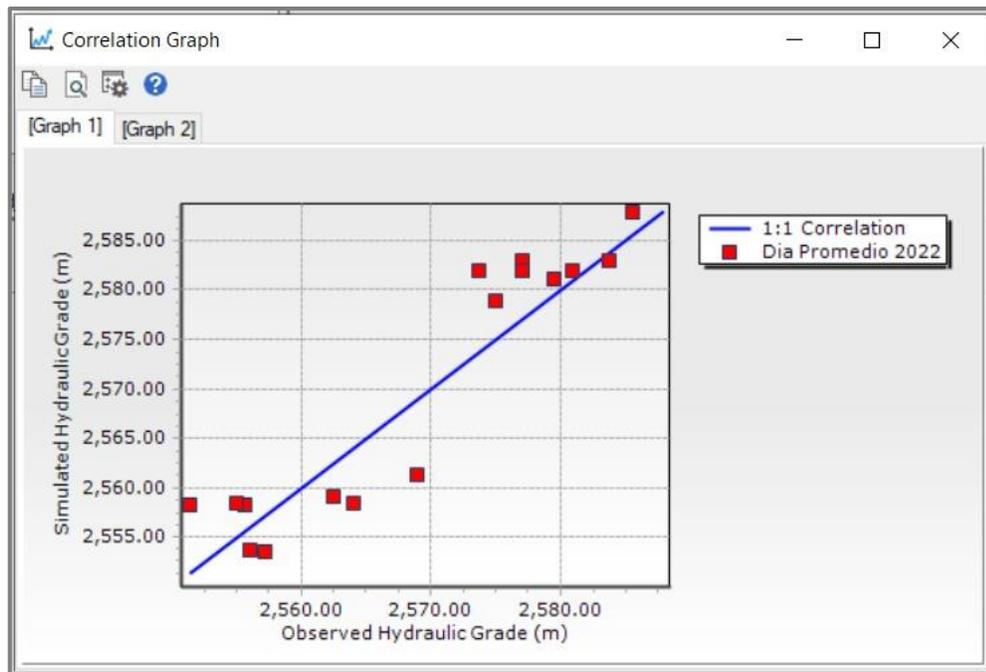
#### **4.8. Calibración de red de distribución**

Al momento de ejecutar la calibración se presentaron algunas inconsistencias comunes puesto que es un proceso que agrupa grandes cantidades de información generada por personas, pero se dejan sentadas y mencionadas estas novedades para que posteriormente puedan ser mitigadas de forma planificada por parte de ETAPA para optimizar el mantenimiento futuro de la modelación hidráulica.

La primera observación es referente a la digitalización de tuberías ya que algunos diámetros de ciertas tuberías, poseen tramos de diámetros muy pequeños donde se producían grandes velocidades y por lo tanto grandes pérdidas de carga. Si bien es cierto la precisión de la georreferenciación de la zona con la que se contaba es bastante aproximada, se han encontrado algunas inconsistencias relacionadas con las cotas de terreno, por lo que sería la tercera consideración de importancia a tomar en cuenta.

#### 4.9. Resultados de la calibración

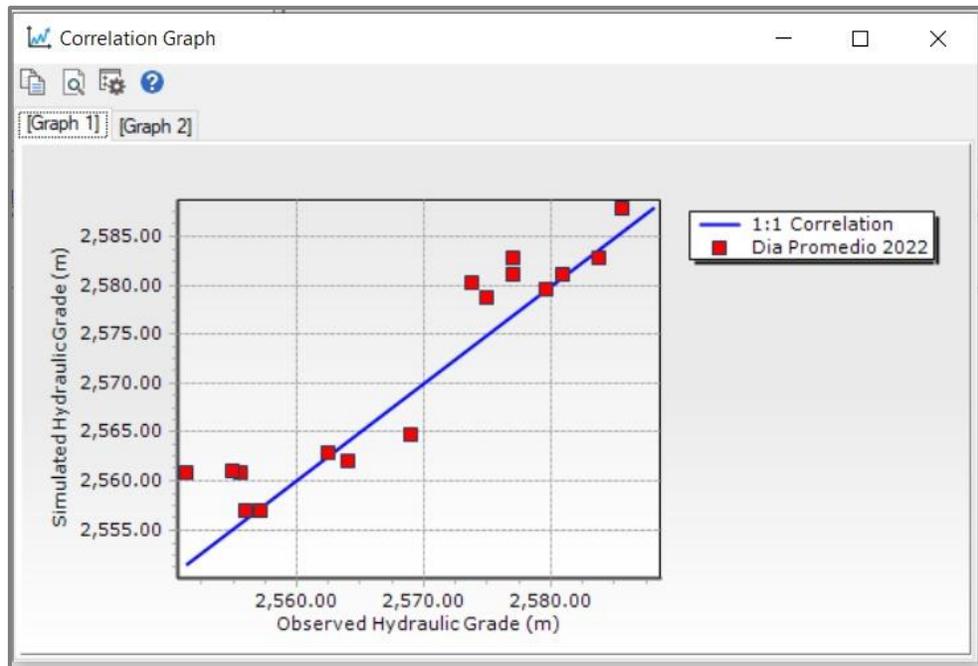
El programa cuenta con una herramienta que facilita la calibración del modelo, para el cual fueron necesarias varias corridas para lograr unos buenos resultados. Es un procedimiento lento de ajustes progresivos para terminar y se acepta cuando se alcanza una tolerancia esperada. Para esta calibración es necesario asumir la contemporaneidad de los datos, es decir que se asume que las mediciones fueron hechas en el mismo tiempo y que la demanda media utilizada se origina basándose en los consumos facturados. La siguiente ilustración indica la dispersión inicial obtenidas para el sector Cruz Verde 4B1.



**Ilustración 17. Variación de las presiones de la simulación base.**

**Fuente: (Autor, 2022)**

Posterior a las revisiones iniciales existe la posibilidad de realizar múltiples iteraciones haciendo variar el coeficiente de rugosidad de cada material por un factor hasta encontrar la solución más ajustada.



**Ilustración 18. Resultado para calibración de las presiones.**

**Fuente: (Autor, 2022)**

**Resultados de presiones**

De acuerdo con lo establecido en el numeral 2.2, se puede decir que se ha logrado un nivel aceptable de resultados en cuanto a presiones, es importante mencionar que la calibración se hizo con los 16 puntos de presión en la hora de consumo máximo, es decir la más desfavorable, no se tomaron las presiones indicadas en el numeral 4.7.2.1, debido a las inconsistencias relacionadas a la diferencia de presiones tomadas en campo, obteniendo lo siguiente:

**Tabla 22. Resultados de presiones después de la calibración.**

	<b>Nudo</b>	<b>Grado Hidráulico observado (m)</b>	<b>Grado Hidráulico simulado (m)</b>	<b>Diferencia (m)</b>
Punto 1	4B1_N_1240	2582.95	2586.07	3.12
Punto 2	4B1_N_1103	2554.39	2559.12	4.73
Punto 3	4B1_N_1389	2555.98	2556.92	0.94
Punto 4	4B1_N_1494	2557.17	2556.88	-0.29
Punto 5	4B1_N_1465	2555.04	2558.98	3.94
Punto 6	4B1_N_1436	2579.49	2579.72	0.23
Punto 7	4B1_N_1091	2564.07	2562.00	-2.07
Punto 8	4B1_N_1220	2562.47	2562.83	0.36

Punto 9	4B1_N_1274	2585.53	2587.94	2.41
Punto 10	4B1_N_1149	2577.03	2580.85	3.82
Punto 11	4B1_N_1271	2576.98	2581.15	4.17
Punto 12	4B1_N_1541	2568.95	2564.74	-4.21
Punto 13	4B1_N_1486	2574.93	2578.83	3.90
Punto 14	4B1_N_1547	2573.68	2577.32	3.64
Punto 15	4B1_N_1231	2580.86	2581.14	0.28
Punto 16	4B1_N_1130	2583.68	2582.84	-0.84

**Fuente: (Autor, 2023)**

Al tener en consideración los criterios mencionados anteriormente y según los resultados obtenidos en la tabla anterior, podemos indicar que las diferencias entre las cargas piezométricas calculadas y las simuladas son menores que 4.5 m.c.a.

### Resultados de las rugosidades

Para obtener la calibración esperada se modificaron o ajustaron las rugosidades por material de las tuberías de PVC, y AC; obteniéndose lo siguiente:

**Tabla 23. Resultados de rugosidades calibración**

<b>Tipo de Material</b>	<b>Coefficiente Inicial</b>	<b>Coefficiente Final</b>
PVC (Policloruro de vinilo)	150	98
AC (Asbesto cemento)	130	75

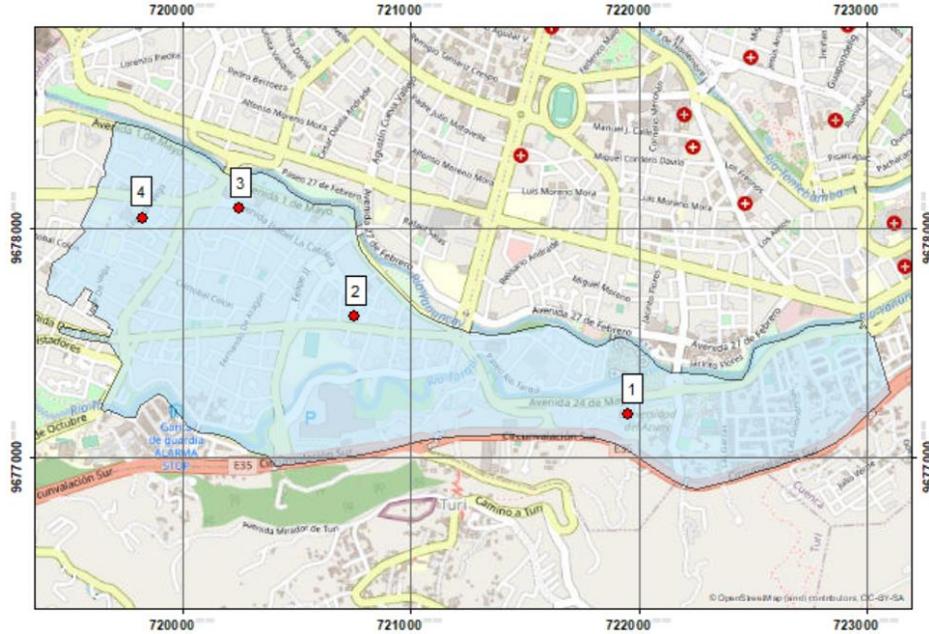
**Fuente: (Autor, 2023)**

En la tabla anterior se muestran las rugosidades que inicialmente se propusieron en el modelo y las que finalmente se obtuvieron del proceso de calibración. Se puede observar que las rugosidades ajustadas son menores que las iniciales, esto se debe a que los valores iniciales son los recomendados en el numeral 2.1.3 y que significarían tuberías con pocos años de servicio y después de la calibración se ajustarían a valores cercanos a la realidad, para verificar esto, se deberían hacer pruebas experimentales de las tuberías. Sin embargo, de acuerdo al catastro, las redes tienen una edad mayor a los 20 años, por lo que estos valores podrían ser los certeros.

#### 4.10. Validación del modelo hidráulico.

ETAPA EP., dentro del Departamento de Catastros e Información Geográfica, dispone de un archivo con presiones tomadas en campo diariamente, estas presiones son obtenidas mediante

un manómetro similar al usado para el desarrollo de este estudio. ETAPA EP., registra la hora y la presiones en psi. Lo que quiere decir que podríamos usar esta información para poder validar nuestro modelo hidráulico, se tomaron los valores que fueron medidos entre las 11:00 y 14:00 para considerar el periodo más desfavorable y que tendría concordancia con el modelo elaborado calibrado.



**Ilustración 19. Presiones de ETAPA EP.**

**Fuente: (Autor, 2023)**

Una vez comprobados los valores de presión tomados en ETAPA EP., y comparados con los de nuestro modelo se tiene lo siguientes resultados. En donde la diferencia de presiones no varía en mas de 3 m.c.a. Por lo que se puede decir que el modelo esta validado y puede ser utilizado para realizar evaluaciones o brindar información con respecto a presiones.

**Tabla 24. Resultados de presión - validación**

	<b>Presiones ETAPA. EP</b>	<b>Presiones Modelo Calibrado</b>	<b>Diferencia</b>
	<b>m.c.a</b>	<b>m.c.a</b>	<b>m.c.a</b>
1	36,70	38,85	2,15
2	32,50	31,33	-1,17
3	30,50	30,98	0,48
4	31,90	29,05	-2,85

**Fuente: (Autor, 2023)**

## CAPÍTULO 5

### 5. EVALUACION DE RESULTADOS LA RED DE DISTRIBUCION

En este capítulo se describen los resultados de la modelación, calibración y el funcionamiento de la red según establece el software de evaluación, tanto en la actualidad, así como con los parámetros de proyección para un análisis a futuro. Los resultados que brinda el programa son varios tales como, caudales de entrada y salida, presiones a los nodos, perfiles de tuberías, cantidades y características de elementos etc., pero los que se van a considerar para describir el funcionamiento de la red, la velocidad y la presión el agua y pérdidas de carga.

Para evaluar los datos de salida (output) de las corridas se tendrán presentes las siguientes consideraciones técnicas:

- Las velocidades deben estar entre el rango de 0.30 y 2.00 m/s.
- Para las presiones se establece un mínimo de 10 m.c.a y en lo posible no ser mayor a 70 m.c.a.

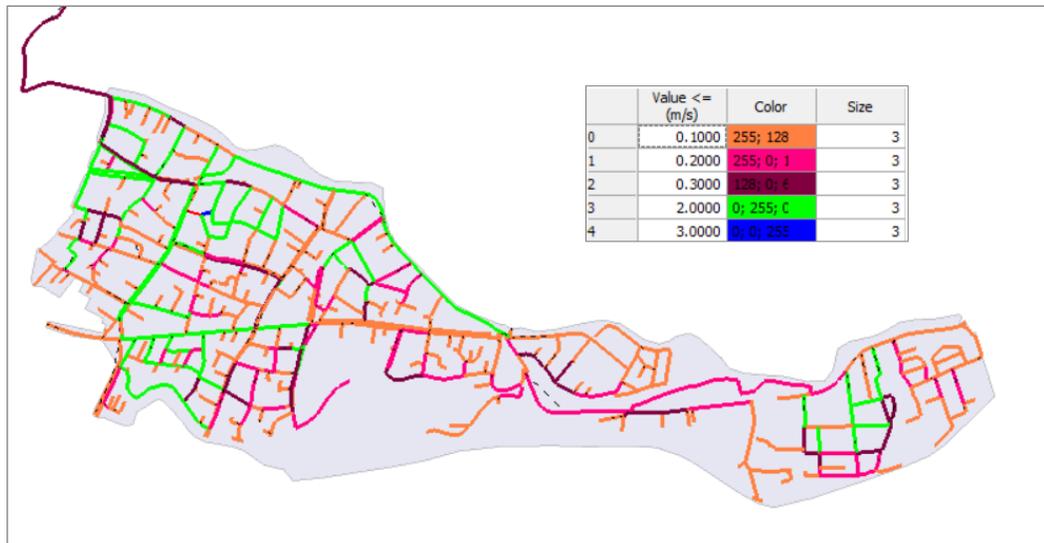
En programa brinda la herramienta “Color Coding” para codificar y establecen los elementos dentro de un rango en base a un color, de esta manera se facilita visualizar el comportamiento de la red en las condiciones dadas

#### 5.1. Análisis de la red de distribución en la actualidad

En este caso se indican los resultados del funcionamiento de la red con las condicionantes de demanda establecidas al año 2022.

##### 5.1.1.Evaluación de velocidades

Como se observa en la ilustración, las velocidades se encuentran fuera del rango especificado como aceptable, por lo cual el funcionamiento del 77.31% de las redes no cumpliría con las condiciones mínimas según especifica la normativa, debido a que se encuentran bajo el valor de 0.3m/s. Sin embargo, el 52% del 77.31% está bastante cercano al límite inferior del rango de velocidades, se considera necesario continuar con la valoración de los parámetros siguientes.

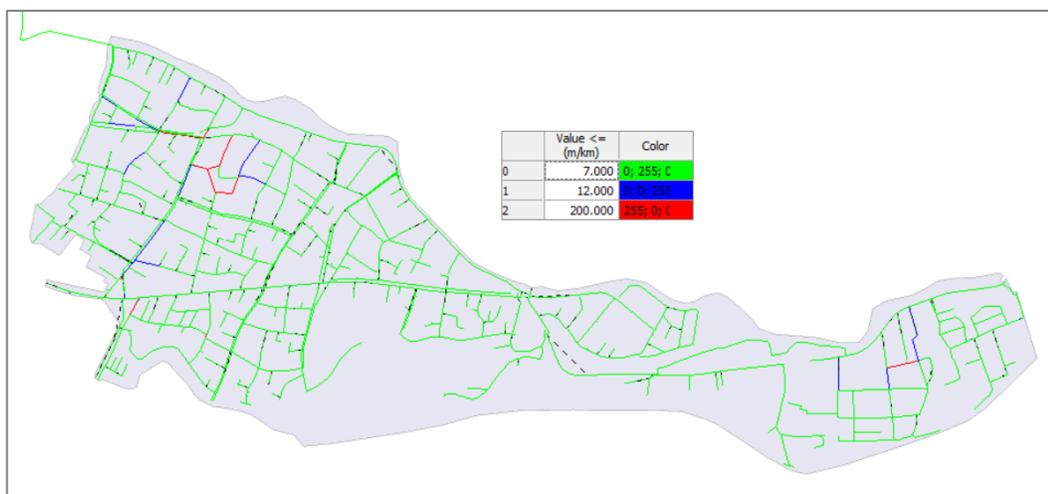


**Ilustración 20. Variación de velocidades al año 2022**

Fuente: (Autor, 2022)

### 5.1.2. Evaluación por pérdidas de carga

El criterio de pérdida de carga unitaria en las tuberías, si bien es cierto no constituye un criterio general durante la evaluación ya que no se garantiza que el resultado sea óptimo, puede ser y necesario cuando se defina un rango para estudiar el diámetro adecuado para un caudal determinado. En el análisis actual se establece un rango adecuado de pérdidas de carga unitaria, entre los valores de 7,5 m/Km a 12,5 m/Km, según las simulaciones.



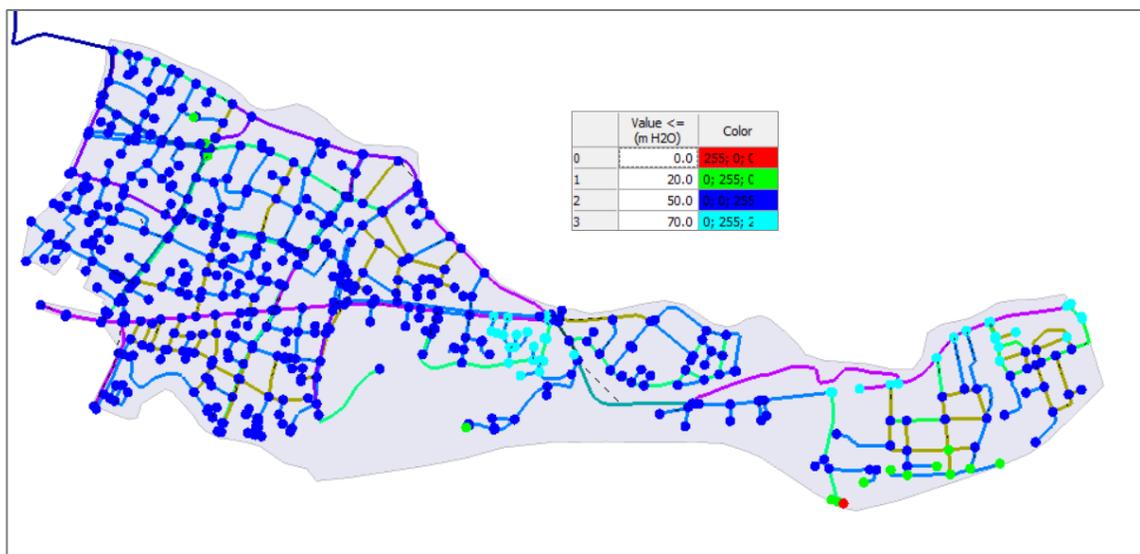
**Ilustración 21. Variación de pérdidas de carga al año 2022**

Fuente: (Autor, 2022)

### 5.1.3. Evaluación de presiones

Las presiones de la red se encuentran dentro de los parámetros aceptables, como se puede observar predomina en la red valores entre 20 y 50m.c.a. en casi la totalidad de la superficie de la zona de análisis

Adicionalmente, se identificó un caso puntual con presión menor a 10 m.c.a en los nudos del sector, por lo que podría considerarse para revisión en campo puesto que la tendencia de presiones en toda la red es totalmente aceptable. Al no localizarse presiones negativas nos indica que no existen problemas por falta de presión.



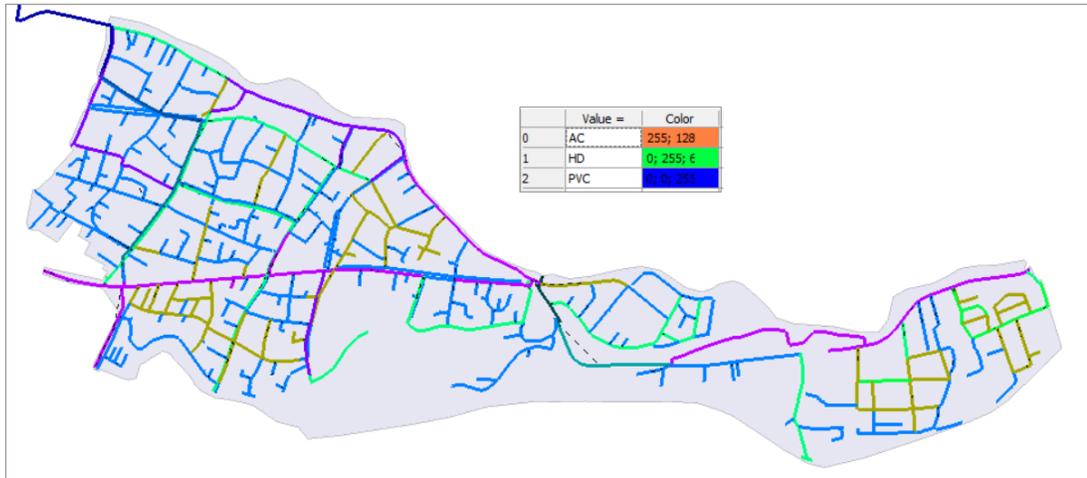
**Ilustración 22. Variaciones de presiones al año 2022.**

**Fuente: (Autor, 2022)**

### 5.1.4. Determinación de vulnerabilidades estado actual 2022

En cuanto a las presiones, de acuerdo a la ilustración 23 en el sector predominan los valores de presión entre 20 y 50 m.c.a. en un porcentaje de más del 92%, lo cual está acorde con el levantamiento de las presiones en campo. Lo cual concuerda con lo conversado con el personal de operación y mantenimiento de la zona, quienes manifestaron que no existen problemas de presión en estos lugares.

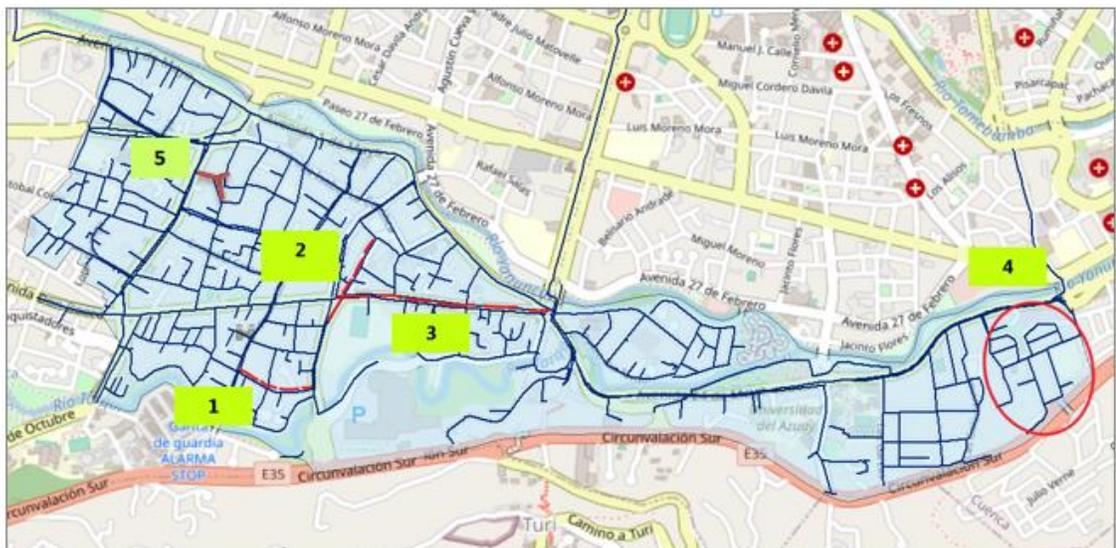
Por otro lado, las velocidades si representan un problema, debido a que no estarían dentro de los rangos solicitados dentro de la norma, además haremos una comparación con el tipo de material, debido a que también se manifestó que existen problemas con las tuberías de asbesto cemento y definiremos el tipo de relación que hay entre material y velocidad.



**Ilustración 23. Tipo de material de las tuberías**

Fuente: (Autor, 2022)

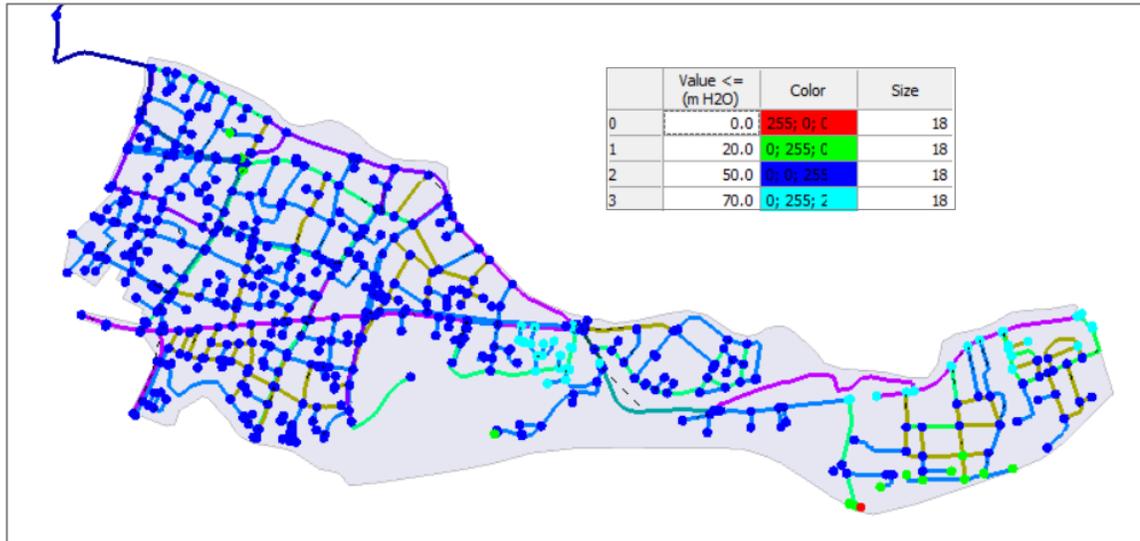
Una vez analizados las dos ilustraciones anteriores 21 y 22, se puede determinar los siguientes tramos en cuanto a problemas de velocidad y material, en la ilustración 25 se observa 4 puntos en donde de acuerdo al modelo hidráulico es necesario hacer una mejora de infraestructura, es decir hacer una sustitución de tuberías por nuevas redes o aumento de diámetro en caso de presentar altas pérdidas.



**Ilustración 24. Mapa de vulnerabilidades**

Fuente: (Autor, 2022)

1. Calle Gregorio Marañón entre Fernando de Aragón y Felipe II
2. Domingo Savio entre Av. Don Bosco y Antonio de Nebrija
3. Av. Don Bosco entre Av. Fray Vicente Solano y Felipe II
4. Sector Las Golondrinas, Capulispamba y Circunvalación Sur.
5. Calle Teresa Ávila y Fray Luis de León.



**Ilustración 25. Variaciones de consumo al año 2052**

**Fuente: (Autor, 2022)**

Las presiones en el sector Cruz Verde 4B1, se encuentran en su mayoría entre 50 m.c.a y 70 m.c.a, por lo que se puede decir que no existe problemas en cuanto a falta de presión en la zona, no es necesaria la implementación de válvulas reductoras de presión adicionales, al momento se encuentran en funcionamiento dos (manual de operación de la zona). En ningún caso las presiones sobrepasan los 75 m.c.a, por lo que se infiere que la presión nominal de las tuberías soporta esa sobrepresión.

## CAPÍTULO 6

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones con respecto a la zona de estudio

El sector es Cruz Verde 4B1 perteneciente al Sistema Tomebamba, tiene un área de 255,15 Ha, que se abastece desde la planta potabilizadora de El Cebollar, su perímetro es 10279,655m.

Posee un estimado de 5868 conexiones con un consumo aproximado de 103924 m<sup>3</sup>/mes.

Está conformada por 44,64 km de tuberías, 40276,89 m (90.23%) en material PVC y 4363,06 m (9.77%) en asbesto cemento (AC), con diámetros entre 50mm a 250mm.

La población actual servida de la zona de análisis es 16928 personas, no es factible proyectar en base a lo establecido en la norma (10, 20 años), debido a que el sector es urbano y está consolidado, por lo que el crecimiento demográfico se consideraría lineal.

#### 6.2. Conclusiones referentes a la calibración

Se elaboró un modelo inicial en base a los datos proporcionados por la ETAPA EP.

Si bien es cierto que se realizó una calibración mediante la ayuda de una herramienta computacional, fue necesario verificar previamente los parámetros de calibración (presiones y rugosidades).

El modelo que se ha generado en un modelo base, pero en el que se introducen por primera vez parámetros de demandas y presiones, en donde los resultados si son útiles para visualizar el comportamiento de velocidades, rugosidades ajustadas y pérdidas de carga.

Como se conoce el análisis se ha realizado sobre una base de usuarios actuales y sus consumos mensuales. En donde se pudo observar su lento crecimiento en cuanto a medidores instalados, por lo que se puede decir que el sector se debería considerar netamente consolidado y con crecimiento vertical en cuánto a edificaciones, lo que nos indicaría que no se debería hacer un análisis en cuanto a diámetros de las redes existentes sino en capacidad del tanque de 3000m<sup>3</sup> y su comportamiento de acuerdo a la curva de consumo.

Para la calibración se tomaron 18 puntos de presión, los cuales fueron tomados en campo y

con gran dificultad, debido a que la ciudadanía no está presta totalmente a dejar ingresar a los domicilios para realizar estas muestras, por lo que en el caso de que se requiera tomar una muestra más grande se debe considerar este factor.

En el proceso de calibración, en base a la información disponible, se ha logrado definir una un método para elaborar un modelo hidráulico, en diferentes zonas de características similares, y el cual es útil para resolver emergencias futuras, como por ejemplo la evaluación del sector en cuanto a la eliminación de un tramo de tubería por reparación y observar el comportamiento del resto de las redes en cuanto a presiones y flujos.

### **6.3. Conclusiones referentes a la red de distribución**

El sector de Cruz Verde 4B1, se considera un sector consolidado, pues ya no existen extensiones de matriz que superen los 20m de longitud.

Fue necesario hacer una distinción entre usuarios residenciales y comerciales, al ser un sector establecido y que se ubica en la parte céntrica de la ciudad, existió diferencia al evaluar por separado consumos residenciales y comerciales, lo cual fue útil al momento de obtener la población actual servida (Numeral 3.3).

El sector no presenta problemas de presión, sin embargo, de acuerdo al departamento del Centro de Control de Operaciones, si presenta problemas con matrices de asbesto cemento y domiciliarias antiguas, por lo que se puede decir que el modelo hidráulico es válido para emitir certificaciones a nivel de presiones de servicio, pero no es válido para emitir criterios a nivel de funcionamiento de domiciliarias.

### **6.4. Recomendaciones**

Se recomienda verificar el índice de agua no contabilizada, el mismo que de acuerdo a estándares internacionales, no puede superar el 30%, por lo que puede ser un factor que afecte al consumo y por lo tanto a las reservas del sector.

Se recomienda actualizar constantemente el modelo presentado, en cuanto a usuarios y consumos mes a mes, así como continuar con la toma de presiones para tener una mayor referencia del comportamiento en zonas en donde se encuentre una mayor densidad. Adicionalmente estos trabajos deberán ser complementados con mediciones de caudal en las matrices principales.

Se sugiere que, el modelo y el SIG se trabajen a futuro dentro de la misma base de datos, de tal manera que cualquier actualización del SIG sea compatible con el modelo presentado.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Norma co 10.07-601. (1992). normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes.

Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento, conagua. datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado. mexico isbn: 978-607-626-036-4

Cabrera, e., & abreu, j. (2005). análisis, diseño, operación y gestión de redes de agua con epanet (tomo i, tomo ii)

Frente al diseño convencional de redes de agua para la ciudad de querecotillo tesis para optar el título de ingeniero civil rodrigo alonso de la cruz rojas asesor(es): dr. ing. francisco arteaga núñez piura, junio de 2020 facultad de ingeniería

Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento diseño de redes de distribución de agua potable comisión nacional del agua de mexico subdirección general de agua potable, drenaje y saneamiento ecuador.

Código ecuatoriano de la construcción de parte ix obras sanitarias r. o. no. 6-1992-08-18 (1992) co 10.07 – 601, normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes.

[https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/conagua%20s.f.a.%20dise%C3%B1o%20de%20redes%20de%20distribuci%C3%B3n%20de%20agua%20potable.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/conagua%20s.f.a.%20dise%C3%B1o%20de%20redes%20de%20distribuci%C3%B3n%20de%20agua%20potable.pdf)

<https://www.bentley.com/es/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/watergems#:~:text=watergems%20es%20una%20herramienta%20de,sistemas%20de%20distribuci%C3%B3n%20de%20agua.>

<https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/8226/1/13949.pdf>

Martínez-Solano, F. J., Iglesias-Rey, P. L., Mora-Meliá, D., & Fuertes-Miquel, V. S. (2017). Exact Skeletonization Method in Water Distribution Systems for Hydraulic and Quality Models. *Procedia Engineering*, 186, 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.246>

Paluszczyszyn, D., Skworcow, P., & Ulanicki, B. (2015). Modelling and simulation of water

distribution systems with quantised state system methods. *Procedia Engineering*, 119, 554–563. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.908>

Rondán, E. (2016). Estado del arte de la calibración de modelos hidráulicos. Modelado de fugas con Epanet. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería*, 57–70. <https://idus.us.es/handle/11441/47948>

Walski, T. M., DeFrank, N., Voglino, T., Wood, R., & Whitman, B. E. (2007). Determining the accuracy of automated calibration of pipe network models. *8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*, 67. [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)67](https://doi.org/10.1061/40941(247)67)

## **8. ANEXOS**

### **8.1. Manual de operación de la subsectorización del sector 4 B1.**

	<b>SECTORIZACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN</b>  <b>SISTEMA - TOMBAMBA</b>	<b>DAIAS</b> <small>DEPARTAMENTO DE ASEGURAMIENTO INTERNO DE AGUA Y SANEAMIENTO</small>																																								
<b>MANUAL DE OPERACIÓN DE LA SUBSECTORIZACIÓN SUB SECTOR 4 B1</b>																																										
<p>El sector 4B1 está ubicado en la zona suroeste de la Ciudad, es abastecido desde el centro de reserva de Cruz Verde con una capacidad actual de reserva de 6.000 m<sup>3</sup> (2591 m<sup>3</sup> / 2587 m<sup>3</sup>); lo definen los límites: Norte: Río Yanuncay, Sur: Autopista Circunvalación Sur (Río Tarqui), Este: sectores 6B y 4B2 y Oeste: Sector 3.2 (Sur); posee 37.9 km. de redes de distribución (ver cuadro a continuación), y se lo ha dividido para su operación en 13 subsectores (Ver Plano). Tiene 4575 abonados, divididos en 4214 residenciales, 278 comerciales, 62 construcciones, 9 industriales y 11 especiales.</p> <p>Las cotas de terreno máximas y mínimas son: 2560 msnm y 2503 msnm respectivamente, para la zona de alta presión, esto es la Ciudadela Ferroviaria y alrededores, se ha instalado una cámara reductora de presión (ERP-2), la cual está ubicada en la Av. 24 de Mayo y Golondrinas, regulando presiones a esta zona a máximas de 65 psi y mínima en la zona más alta (Mollobamba y Circunvalación Sur) de 30 psi. Adicionalmente se encuentran instalada una (ERP) en la Av. 12 de Octubre y Cristóbal Colón que regula la presión a los sub sectores 05 y 09.</p> <p>En el cuadro a continuación se pueden ver las longitudes de tubería, clasificadas por diámetros y materiales:</p>																																										
<p><b>CLASIFICACIÓN DE LA TUBERÍA DE DISTRIBUCIÓN.</b></p> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">MATERIAL</th> <th colspan="5">DIÁMETRO TUBERÍA</th> <th rowspan="2">TOTAL</th> </tr> <tr> <th>50-63</th> <th>100-110</th> <th>150-160</th> <th>200</th> <th>350/355</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PVC</td> <td>23.372.6</td> <td>7.183.7</td> <td>1.745.0</td> <td>2.562.9</td> <td>470.0</td> <td>35.334.3</td> </tr> <tr> <td>AC</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>2.590.0</td> <td></td> <td>2.590.0</td> </tr> <tr> <td>HD</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>0.0</td> </tr> <tr> <td><b>TOTAL</b></td> <td><b>23,372.6</b></td> <td><b>7,183.7</b></td> <td><b>1,745.0</b></td> <td><b>5,152.9</b></td> <td><b>470.0</b></td> <td><b>37,924.3</b></td> </tr> </tbody> </table> <p>Fuente: Catastros de redes: DAIAS (Septiembre 2016).</p>			MATERIAL	DIÁMETRO TUBERÍA					TOTAL	50-63	100-110	150-160	200	350/355	PVC	23.372.6	7.183.7	1.745.0	2.562.9	470.0	35.334.3	AC				2.590.0		2.590.0	HD						0.0	<b>TOTAL</b>	<b>23,372.6</b>	<b>7,183.7</b>	<b>1,745.0</b>	<b>5,152.9</b>	<b>470.0</b>	<b>37,924.3</b>
MATERIAL	DIÁMETRO TUBERÍA					TOTAL																																				
	50-63	100-110	150-160	200	350/355																																					
PVC	23.372.6	7.183.7	1.745.0	2.562.9	470.0	35.334.3																																				
AC				2.590.0		2.590.0																																				
HD						0.0																																				
<b>TOTAL</b>	<b>23,372.6</b>	<b>7,183.7</b>	<b>1,745.0</b>	<b>5,152.9</b>	<b>470.0</b>	<b>37,924.3</b>																																				
<p><b>OPERACIÓN DEL SECTOR 4B1</b></p> <p>En Plano adjunto se muestran los 13 subsectores en los cuales se ha dividido al Subsector 4B1, en el Cuadro siguiente se pueden ver las válvulas con las cuales se puede operar cada subsector, a fin de optimizar las tareas de mantenimiento:</p>																																										
<b>SUBSECTOR</b>	<b>VÁLVULAS A MANTENER CERRADAS</b>	<b>F MATRIZ</b>	<b>VÁLVULAS DE OPERACIÓN</b>	<b>F MATRIZ</b>																																						
<b>1</b>	Av. Solano y Av. Primero de Mayo Pasaje Yanuncay y Av. Solano Don Bosco y 1° de Mayo (redondeal) Calle Carlos V y Av. Don Bosco Calle Domingo Sabio y Don Bosco Calle Felipe II y Av. Don Bosco Padre Valverde y Calle Fernando de Aragón Rafael Peñaherrera y Padre Valverde Isabel la Católica y Calle Felipe II	300 AC 50 AC 200 AC 50 PVC 50 PVC 63 PVC 63 PVC 63 PVC 110 PVC	Av. 1° de Mayo y Calle Felipe II	160 PVC																																						
<b>2</b>	Tiño de Molina y Av. Primero de Mayo Isabel la Católica y Fernando de Aragón Isabel la Católica y Fernando de Aragón Isabel la Católica y Felipe II Padre Valverde y Calle Fernando de Aragón Fernando de Aragón y Fray Bartolomé de las Casas Fernando de Aragón y Fray Bartolomé de las Casas Tiño de Molina y Fray Bartolomé de las Casas Francisco de Quevedo y Fray Bartolomé de las Casas Fray Luis de León y Fray Bartolomé de las Casas Gaspar de Jovellanos y 12 de Octubre Av. 12 de Octubre e Isabel la Católica	63 PVC 160 PVC 63 PVC 110 PVC 63 PVC 110 PVC 63 PVC 63 PVC 50 PVC 63 PVC 63 PVC 110 PVC	Av. 12 de Octubre e Isabel la Católica (ERP - 1)	100 PVC																																						
<b>3*</b>	Tiño de Molina y Av. Primero de Mayo Isabel la Católica y Fernando de Aragón Isabel la Católica y Fernando de Aragón Av. 1° de Mayo y Pedro Rocha	63 PVC 160 PVC 63 PVC 160 PVC	Pedro de la Rocha y Av. 12 de Octubre	50 PVC																																						
<b>4</b>	Av. 1° de Mayo y Pedro Rocha Av. 12 de Octubre e Isabel la Católica Gaspar de Jovellanos y 12 de Octubre Fray Bartolomé de las Casas y 12 de Octubre Av. 12 de Octubre y Cristóbal Colón Lope de Vega y Pasaje 12 de Octubre Pasaje 12 de Octubre y Lope de Vega	160 PVC 110 PVC 63 PVC 160 PVC 63 PVC 63 PVC	Francisco de Orellana y Pedro Calderón de la Barca	160 PVC																																						
FECHA ÚLTIMA REVISIÓN:	2 de agosto de 2022	REALIZADO:	Jorge Martínez - Pablo Zhindón																																							
LUGAR:	DAIAS	REVISADO:	Pablo Muñoz																																							
VERSIÓN:	1.5	EN VIGENCIA:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> OBSOLETO	<input type="checkbox"/>																																					

		<b>SECTORIZACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN</b>  <b>SISTEMA - TOMEBAMBA</b>		<b>DAIAS</b> DEPARTAMENTO DE ASEGURAMIENTO INTERNO DE AGUA Y SANEAMIENTO	
<b>MANUAL DE OPERACIÓN DE LA SUBSECTORIZACIÓN</b> <b>SUB SECTOR 4 B1</b>					
5	Av. Don Bosco y Pasaje 12 de Octubre Lope de Vega y Pasaje 12 de Octubre Pasaje 12 de Octubre y Lope de Vega Av. 12 de Octubre y Cristóbal Colón Fray Bartolomé de las Casas y Av. 12 de Octubre Fray Bartolomé de las Casas y Av. 12 de Octubre Fray Luis de León y Fray Bartolomé de las Casas Francisco de Quevedo y Fray Bartolomé de las Casas Tiro de Molina y Fray Bartolomé de las Casas Fernando de Aragón y Fray Bartolomé de las Casas Fernando de Aragón y Fray Bartolomé de las Casas Padre Ververde y Calle Fernando de Aragón Rafael Pefachemera y Padre Ververde Fernando de Aragón y Av. Don Bosco Fernando de Aragón y Av. Don Bosco Francisco de Quevedo y Av. Don Bosco Fray Luis de León y Av. Don Bosco	110 PVC 63 PVC 63 PVC 63 PVC 160 PVC 110 PVC 63 PVC 50 PVC 63 PVC 110 PVC 63 PVC 63 PVC 63 PVC 63 PVC 110 PVC 50 PVC 63 PVC	Av. 12 de Octubre y Pasaje 12 de Octubre (Bypass) Pablo Picasso y Av. Don Bosco Felipe II y Av. Don Bosco	160 PVC 110 PVC 160 PVC	
6	Diego Velázquez y Av. Don Bosco El Greco y Av. Don Bosco José Ortega y Gasset y Av. Don Bosco	63 PVC 63 PVC 110 PVC	Pablo Picasso y Av. Don Bosco	110 PVC	
07	Domingo Sabio y Av. Don Bosco Fernando de Aragón y José Ortega Gasset Fernando de Aragón y Gregorio Menafón Fernando de Aragón y Av. Don Bosco José Vasconcelos y Av. Don Bosco	50 PVC 63 PVC 50 PVC 63 PVC 63 PVC	Felipe II y Av. Don Bosco	160 PVC	
08*	Fernando de Aragón y Fray Bartolomé de las Casas Fernando de Aragón y Fray Bartolomé de las Casas Felipe II y Av. Don Bosco Domingo Sabio y Av. Don Bosco Carlos V y Av. Don Bosco Av. Solano y Av. Primero de Mayo José Ortega y Gasset y Av. Don Bosco El Greco y Av. Don Bosco Diego Velázquez y Av. Don Bosco Pablo Picasso y Av. Don Bosco Domingo Sabio y Av. Don Bosco José Vasconcelos y Av. Don Bosco Fernando de Aragón y Av. Don Bosco	110 PVC 63 PVC 63 PVC 50 PVC 50 PVC 200 AC 110 PVC 63 PVC 63 PVC 63 PVC 63 PVC	Fernando de Aragón y Av. Don Bosco	200 AC	
09	Fernando de Aragón y Av. Don Bosco Gregorio Menafón y Fernando de Aragón Fernando de Aragón y José Ortega Gasset Av. Don Bosco y Calle 14h Av. Don Bosco y Bartolomé Ruiz Av. Don Bosco y Bartolomé Ruiz Av. Don Bosco y Pasaje 12 de Octubre Fray Luis de León y Av. 12 de Octubre Francisco de Quevedo y Av. Don Bosco	63 PVC 50 PVC 63 PVC 63 PVC 200 AC 63 PVC 110 PVC 50 PVC 50 PVC	Av. 12 de Octubre y Av. Don Bosco	355 PVC	
10			Av. 24 de Mayo y Calle de los Canarios (ERP - 2)	200 PVC	
11***	Calle de las Golondrinas y Av. 24 de Mayo Calle de los Chugos y 24 de Mayo	63 PVC 63 PVC	Diego González del Barco y Av. 24 de Mayo	250 AC	
12			Av. 24 de Mayo y calle 14h	63 PVC	
13	Paseo Río Yanuncay y Av. Solano Av. Solano (junto al Puente)	50 AC 300 AC	Paseo Tarqui y Av. 24 de Mayo	110 PVC	

**NOTAS.**

Las válvulas en punto rojo en el plano, deberán trabajar siempre abiertas y son las denominadas de operación.

\* Al cerrar el sub sector 03 se cierra simultáneamente el sub sector 01.

\*\* Al suspender subsector 08 se suspende simultáneamente los subsectores: 06 y 07.

\*\*\* Al cerrar el sub sector 11 se cierra simultáneamente el sub sector 10 y 12.

ESTACIONES REDUCTORAS DE PRESIÓN			
Ubicación	ERP	Sub Sectores Controlados	Presión en Salida
AV. Isabel la Católica y Av. 12 de Octubre	ERP-1	02	45 psi
Av. 24 de Mayo y Calle de los Canarios	ERP-2	10	70 psi <sup>(1)</sup>
Av. 12 de Octubre y Cristóbal Colón		05 y 09	45 psi

(1) ERP no está funcionando

\* Para facilitar la ubicación de las válvulas denominadas de "operación" estas se encuentran depositadas con tapas metálicas

\* Es necesario acotar que para un vaciado más rápido de cada distrito, se puede descargar la red mediante desfogues e hidrantes, los cuales se encuentran también indicados en el plano, se deberá tener el cuidado de utilizarlos necesariamente también durante el llenado de las tuberías para facilitar la extracción de aire.

\* Si al intentar cortar el servicio a uno de los distritos, este no seca, será necesario revisar que todas las válvulas que constan como "mantener cerradas" en el cuadro anterior, lo estén realmente.

\* Cada vez que el servicio se suspende o se manipule alguna de las válvulas, se deberá notificar al Centro de Control de forma obligatoria, de igual manera cuando se reintegre el servicio al subsector (es).

\* Cualquier cambio que se requiera implementar en la operación actual del sector, se deberá sugerir al Ing. Responsable de la operación para su estudio y posible adopción.

FECHA ÚLTIMA REVISIÓN:	2 de agosto de 2022	REALIZADO:	Jorge Martínez - Pablo Zbindón
LUGAR:	DAIAS	REVISADO:	Pablo Muñoz
VERSIÓN:	1.5	EN VIGENCIA:	<input checked="" type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> OBSOLETO