

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Análisis de la eficiencia hidráulica de la red de distribución de agua potable de la parroquia Bayas perteneciente al cantón Azogues - Diagnóstico del sistema actual y propuesta de mejoras

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil


Autores:

Frank Eduardo Aguilar Gómez

Marco Vinicio Tenezaca Chimbaina


Director:

Esteban Remigio Sánchez Cordero

ORCID:  0000-0002-8206-386X

Co-Director:

Fausto Fernando García Ávila

ORCID:  0000-0002-9274-9769

Cuenca, Ecuador

2023-05-31

Resumen

El propósito de este estudio fue analizar la eficiencia hidráulica de la red de distribución de agua potable de la parroquia Bayas, perteneciente al cantón Azogues, proporcionando un diagnóstico del sistema actual y las propuestas de mejoras haciendo uso de la herramienta computacional Epanet. Se realizó una actualización de los datos geométrico – hidráulicos de la red existente, con la que se pudo evaluar el funcionamiento hidráulico. Se consideró el efecto en las variables hidráulicas de presión y velocidad cuando se incorpora un nuevo tanque de almacenamiento. Según el diagnóstico del sistema sin la incorporación del nuevo tanque, el 47.00 % de los nodos de toda la red superaron el límite de presión máxima establecida mientras que, en las zonas ramificadas de la red predominaron velocidades bajas en un 64.80 % de tuberías; así mismo se determinó que, con la simulación del nuevo tanque, persisten estos dos problemas. Se estudiaron tres propuestas de mejora para la optimización; la primera fue la incorporación de válvulas reductoras de presión en puntos estratégicos de la red, lo que permitió una mejora del 32 % en las presiones del sistema. La segunda fue el desarrollo de un algoritmo para hallar diámetros óptimos en la red, este fue implementado a través de la Toolkit de Epanet, obteniendo una mejora del 34 % y 5 % en las presiones y velocidades, respectivamente. La última propuesta estudiada consistió en la creación de circuitos cerrados, con esto se obtuvo una mejora del 8 % en las velocidades del sistema.

Palabras clave: red de distribución de agua potable, diagnostico, optimización, toolkit de epanet

Abstract

The purpose of this study was to analyze the hydraulic efficiency of the drinking water distribution network of the parish of Bayas belonging to the canton Azogues and provide a diagnosis of the current system and proposals for improvements by making use of the computational tool Epanet. An update of the geometric - hydraulic data of the existing network was made, with which the hydraulic performance could be evaluated. The effect of hydraulic variables (pressure and velocity) was considered when a new storage tank was incorporated. According to the diagnosis of the system without the incorporation of the new tank, 47.00% of the nodes of the entire network exceeded the maximum pressure limit established while in the branched areas of the network low speeds predominated in 64.80% of pipes. It was also determined that, with the simulation of the new tank these two problems persist. Three improvement proposals for optimization were considered; the first was the incorporation of pressure reducing valves at strategic points in the network, which allowed a 32% improvement in system pressures. The second was the development of an algorithm to find optimal diameters in the network; it was implemented through the Epanet Toolkit, obtaining an improvement of 34% and 5% in pressures and speeds respectively. The last proposal studied consisted of the creation of closed circuits, which resulted in an 8% improvement in system speeds.

Keywords: drinking water distribution network, diagnosis, optimization, epanet toolkit

Índice de contenido

| | |
|--|----|
| 1. Introducción y objetivos..... | 14 |
| 1.1 Descripción del problema..... | 14 |
| 1.2 Objetivos | 15 |
| 1.2.1 Objetivo general..... | 15 |
| 1.2.2 Objetivos específicos | 15 |
| 2. Estado del arte..... | 16 |
| 2.1 Modelación matemática de las redes de distribución de agua potable..... | 16 |
| 2.1.1 Redes de distribución de agua potable | 16 |
| 2.1.2 Modelación matemática | 17 |
| 2.1.3 Pasos para la elaboración de un modelo hidráulico | 23 |
| 2.1.4 Calibración del modelo hidráulico..... | 24 |
| 2.2 Descripción de programas computaciones | 27 |
| 2.2.1 Reseña histórica del avance tecnológico en la distribución de agua | 27 |
| 2.2.2 Método de análisis de redes | 28 |
| 2.2.3 Programas computacionales..... | 29 |
| 3. Materiales y métodos | 34 |
| 3.1 Descripción de la zona de estudio | 34 |
| 3.1.1 Ubicación y localización | 34 |
| 3.1.2 Topografía..... | 35 |
| 3.1.3 Demografía | 36 |
| 3.1.4 Climatología | 37 |
| 3.2 Epanet..... | 37 |
| 3.3 Elaboración del modelo | 41 |
| 3.3.1 Delimitación de la zona | 41 |
| 3.3.2 Modelación de la red..... | 41 |
| 3.3.3 Indicadores de rendimiento técnico (IRT) para las RDAP..... | 49 |
| 3.4 Programación con la Toolkit de Epanet | 52 |
| 3.4.1 Python..... | 54 |
| 3.4.2 EPANETTOOLS..... | 56 |
| 3.4.3 Lectura de datos | 56 |
| 3.4.4 Definición de variables y parámetros..... | 57 |
| 3.4.5 Correr Epanet en Python..... | 57 |
| 3.4.6 Cambio de las características de la red..... | 58 |
| 3.4.7 Algoritmo de optimización | 59 |
| 3.4.8 Penalización y restricciones | 59 |

| | |
|--|-----|
| 4. Resultados y contribución | 65 |
| 4.1 Modelación matemática de la red de distribución | 65 |
| 4.1.1 Recopilación de la información de catastro y topografía disponible..... | 65 |
| 4.1.2 Esquematación de la red..... | 69 |
| 4.1.3 Asignación de parámetros a la red de distribución | 72 |
| 4.1.4 Asignación de demandas a los nodos | 73 |
| 4.1.5 Modelación y calibración de la RDAP Bayas..... | 78 |
| 4.2 Evaluación y diagnóstico de la red de distribución..... | 82 |
| 4.2.1 Diagnostico de la RDAP Bayas sin el funcionamiento del nuevo tanque..... | 84 |
| 4.2.2 Diagnostico de la RDAP Bayas con el funcionamiento del nuevo tanque..... | 95 |
| 4.3 Propuesta de mejoras a la RDAP Bayas | 103 |
| 4.3.1 Colocación de válvulas reductoras de presión (VRP)..... | 103 |
| 4.3.2 Aplicación del algoritmo de optimización..... | 111 |
| 4.3.3 Creación de circuitos cerrados..... | 120 |
| 5. Efectividad del algoritmo desarrollado..... | 129 |
| 6. Conclusiones y recomendaciones..... | 136 |
| 7. Referencias..... | 139 |
| 8. Anexos | 142 |
| Anexo A: Asignación de predios y demanda base..... | 142 |
| Anexo B: Algoritmo de calibración..... | 157 |
| Anexo C: Presiones medidas en campo para calibración y validación..... | 173 |
| Anexo D: Mapa de nodos con presión fuera de los límites permisibles en la red sin el funcionamiento del nuevo tanque (01:00 pm)..... | 175 |
| Anexo E: Mapa de nodos con presión fuera de los límites permisibles en la red con el funcionamiento del nuevo tanque (01:00 pm)..... | 176 |
| Anexo F: Algoritmo de optimización y funciones..... | 177 |
| Anexo G: Presiones y velocidades con la primera propuesta a la 01:00 pm..... | 185 |
| Anexo H: Presiones y velocidades con la segunda propuesta a las 01:00 pm..... | 186 |
| Anexo I: Presiones y velocidades con la tercera propuesta a las 01:00 pm..... | 187 |
| Anexo J: Plano de las modificaciones realizadas en el sector Oriente Bajo por EMAPAL EP..... | 188 |
| Anexo K: Campaña de medición de presiones..... | 189 |

Índice de figuras

| | | |
|------------|--|----|
| Figura 1. | Tipos de redes de distribución de agua potable..... | 16 |
| Figura 2. | Tipos de modelos matemáticos..... | 19 |
| Figura 3. | Esquema del modelo matemático estático..... | 20 |
| Figura 4. | Datos de partida para la simulación del modelo matemático estático. | 21 |
| Figura 5. | Esquema del modelo matemático cuasi estático..... | 22 |
| Figura 6. | Datos de partida para la simulación de periodo extendido. | 22 |
| Figura 7. | Etapas de la construcción del modelo hidráulico..... | 23 |
| Figura 8. | Métodos numéricos de resolución..... | 29 |
| Figura 9. | Interfaz de trabajo de Epanet..... | 30 |
| Figura 10. | Interfaz de trabajo de WaterCAD. | 31 |
| Figura 11. | Interfaz de trabajo de WaterGEMS. | 32 |
| Figura 12. | Interfaz de trabajo de Giswater. | 33 |
| Figura 13. | Ubicación de la RDAP Bayas..... | 35 |
| Figura 14. | Fotografía aérea de la Parroquia Aurelio Bayas..... | 36 |
| Figura 15. | Representación de un sistema de distribución de agua en Epanet. | 37 |
| Figura 16. | Modificación de la red en el Sector Oriente Bajo en Qgis..... | 42 |
| Figura 17. | Distribución real de los caudales..... | 43 |
| Figura 18. | Idealización de las demandas en un tramo. | 43 |
| Figura 19. | Distribución de predios a lo largo de la red. | 44 |
| Figura 20. | Interfaz de trabajo del programa CovertGISEpanet..... | 45 |
| Figura 21. | Opciones de cálculo en Epanet..... | 46 |
| Figura 22. | Asignación del patrón de demanda a los nodos en Epanet..... | 46 |
| Figura 23. | Configuración de datos del depósito. | 49 |
| Figura 24. | Curvas de penalización para las variables de presión nodal y velocidad. | 51 |
| Figura 25. | Lenguajes de programación para trabajar con Toolkit de Epanet..... | 54 |
| Figura 26. | Grandes empresas que utilizan Python..... | 55 |
| Figura 27. | Índice TIOBE 2022 y 2023. | 55 |
| Figura 28. | Lanzamientos de Python por número de versión | 56 |
| Figura 29. | Instalación de EPANETTOOLS en el cmd. | 56 |
| Figura 30. | Código de lectura de la red. | 57 |
| Figura 31. | Definición de variables..... | 57 |
| Figura 32. | Obtención de resultados en Python. | 58 |
| Figura 33. | Ejemplo de cambio de diámetro en la red. | 58 |
| Figura 34. | Algoritmo de penalización por velocidad. | 60 |
| Figura 35. | Algoritmo de penalización por presión. | 61 |

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 36. | Curva de la función costo..... | 62 |
| Figura 37. | Función costo en Python..... | 63 |
| Figura 38. | Diagrama de flujo: Algoritmo de optimización. | 64 |
| Figura 39. | Diámetros nominales que existen en la red. | 68 |
| Figura 40. | División de la RDAP Bayas por sectores. | 69 |
| Figura 41. | Esquema de la RDAP Bayas. | 70 |
| Figura 42. | a) Esquemmatización antigua del sector Oriente Bajo vs. b) Esquemmatización actual del sector Oriente Bajo. | 73 |
| Figura 43. | Ubicación de la iglesia y escuelas de la parroquia Bayas. | 74 |
| Figura 44. | Curva de modulación de la RDAP Bayas..... | 75 |
| Figura 45. | Tuberías que convergen al nodo J92..... | 77 |
| Figura 46. | Comparación de las presiones observadas y calculadas. | 80 |
| Figura 47. | Informe de calibración emitido por Epanet..... | 81 |
| Figura 48. | Mapa contorno de la variación de cotas..... | 85 |
| Figura 49. | a) Mapa de contorno de las presiones a las 05:00 am vs b) Mapa de contorno de las presiones a la 01:00 pm. | 86 |
| Figura 50. | Nodos fuera de los limites permisibles durante la hora valle (05:00 am)..... | 86 |
| Figura 51. | a) Análisis estadístico de los nodos a las 05:00 am vs b) Análisis estadístico de los nodos a la 01:00 pm. | 88 |
| Figura 52. | Gráfico de barras de la cantidad de nodos que no cumplen la normativa por sector a las 05:00 am..... | 88 |
| Figura 53. | Gráfico de barras de la cantidad de nodos que no cumplen la normativa por sector a la 01:00 pm..... | 89 |
| Figura 54. | a) Velocidades en la red a las 05:00 am vs. b) Velocidades en la red a la 01:00 pm. | 90 |
| Figura 55. | a) Análisis estadístico de las velocidades a las 05:00 am vs. b) Análisis estadístico de las velocidades a la 01:00 pm. | 91 |
| Figura 56. | Gráfico de barras de la cantidad de tuberías que no cumplen la normativa por sector a las 05:00 am..... | 91 |
| Figura 57. | Gráfico de barras de la cantidad de tuberías que no cumplen la normativa por sector a las 01:00 pm..... | 92 |
| Figura 58. | Caudales en la red a las 05:00 am vs. b) Caudales en la red a la 01:00 pm. . | 92 |
| Figura 59. | Caudales entrantes y salientes del tanque principal..... | 93 |
| Figura 60. | Caudales entrantes y salientes de los tanques de Señor de Flores. | 93 |
| Figura 61. | a) Presiones en la red con el nuevo tanque (05:00 am) vs. b) Presiones en la red con el nuevo tanque (01:00 pm)..... | 96 |
| Figura 62. | Nodos fuera de los limites permisibles en la red con el nuevo tanque (05:00 am). | 96 |
| Figura 63. | a) Análisis estadístico de los nodos en la red con el nuevo tanque (05:00 am) vs. b) Análisis estadístico de los nodos en la red con el nuevo tanque (01:00 pm). | 97 |

| | |
|---|-----|
| Figura 64. Comparación de nodos que no cumplen la normativa, caso antiguo y actual con el nuevo tanque (05:00 am). | 98 |
| Figura 65. Comparación de nodos que no cumplen la normativa, caso antiguo y actual con el nuevo tanque (01:00 pm). | 98 |
| Figura 66. Velocidades en la red con el nuevo tanque (05:00 am) vs. b) Velocidades en la red con el nuevo tanque (01:00 pm). | 99 |
| Figura 67. Análisis estadístico de las tuberías en la red con el nuevo tanque (05:00 am) vs b) Análisis estadístico de las tuberías en la red con el nuevo tanque (01:00 pm). | 100 |
| Figura 68. Comparación de tuberías que no cumplen la normativa, caso antiguo y actual con el nuevo tanque (05:00 am). | 100 |
| Figura 69. Comparación de tuberías que no cumplen la normativa, caso antiguo y actual con el nuevo tanque (01:00 pm). | 101 |
| Figura 70. a) Caudales en la red con el nuevo tanque (05:00 am) vs. b) Caudales en la red con el nuevo tanque (01:00 pm). | 101 |
| Figura 71. Datos de entrada en las VRP. | 104 |
| Figura 72. Red con los cambios de posición de válvulas (izquierda). Mapa de la red con las nuevas válvulas (derecha). | 106 |
| Figura 73. a) Presiones en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Presiones en la red con las VRP (05:00 am). | 107 |
| Figura 74. a) Nodos fuera de los límites permisibles en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Nodos fuera de los límites permisibles en la red con las VRP (05:00 am). | 107 |
| Figura 75. Gráfico de barras comparativo de los nodos que no cumplen la normativa, en la red sin modificaciones y con las VRP (izquierda); y análisis estadístico de los nodos en la red con las VRP (derecha), a las 05:00 am. | 108 |
| Figura 76. a) Velocidades en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Velocidades en la red con las VRP (05:00 am). | 108 |
| Figura 77. Gráfico de barras comparativo de las tuberías que no cumplen la normativa, en la red sin modificaciones y con las VRP (izquierda); y análisis estadístico de las tuberías en la red con las VRP (derecha), a las 05:00 am. | 109 |
| Figura 78. a) Caudales en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Caudales en la red con las VRP (05:00 am). | 109 |
| Figura 79. Mapa de la red con los cambios de diámetro encontrados con el algoritmo desarrollado. | 112 |
| Figura 80. a) Presiones en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Presiones en la red con diámetros óptimos y VRP (05:00 am). | 115 |
| Figura 81. a) Nodos fuera de los límites permisibles en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Nodos fuera de los límites permisibles en la red con diámetros óptimos y VRP (05:00 am). | 116 |
| Figura 82. Gráfico de barras comparativo de los nodos que no cumplen la normativa, en la red sin modificaciones y con los diámetros óptimos y VRP (izquierda); análisis estadístico de los nodos en la red con los diámetros óptimos y VRP (derecha), a las 05:00 am. | 116 |
| Figura 83. a) Velocidades en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Velocidades en la red con los diámetros óptimos y VRP (05:00 am). | 117 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figura 84. | Gráfico de barras comparativo de las tuberías que no cumplen la normativa, en la red sin modificaciones y con los diámetros óptimos y VRP (izquierda); análisis estadístico de las tuberías en la red con los diámetros óptimos y VRP (derecha), a las 05:00 am..... | 117 |
| Figura 85. | a) Caudales en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Caudales en la red con los diámetros óptimos y VRP (05:00 am)..... | 118 |
| Figura 86. | Creación circuitos cerrados en el sector Señor De Flores..... | 121 |
| Figura 87. | Creación circuitos cerrados en el sector Leg Tabacay. | 121 |
| Figura 88. | Mapa de la red con la creación de circuitos cerrados..... | 122 |
| Figura 89. | a) Presiones en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Presiones en la red con la creación de circuitos cerrados (05:00 am). | 123 |
| Figura 90. | a) Nodos fuera de los límites permisibles en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Nodos fuera de los límites permisibles en la red con la creación de circuitos cerrados (05:00 am)..... | 124 |
| Figura 91. | Gráfico de barras comparativo de los nodos que no cumplen la normativa, en la red sin modificaciones y con la creación de circuitos cerrados (izquierda); y análisis estadístico de los nodos en la red con la creación de circuitos cerrados (derecha), a las 05:00 am. .. | 124 |
| Figura 92. | a) Velocidades en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Velocidades en la red con la creación de circuitos cerrados (05:00 am). | 125 |
| Figura 93. | Gráfico de barras comparativo de las tuberías que no cumplen la normativa, en la red sin modificaciones y con la creación de circuitos cerrados (izquierda); y análisis estadístico de las tuberías en la red con la creación de circuitos cerrados (derecha), a las 05:00 am. | 125 |
| Figura 94. | a) Caudales en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Caudales en la red con la creación de circuitos cerrados (05:00 am). | 126 |
| Figura 95. | Red de Hanoi en Epanet..... | 129 |
| Figura 96. | Regresión potencial para la función costo..... | 132 |
| Figura 97. | Presión optimizada aplicando AG. | 133 |
| Figura 98. | Presión optimizada aplicando AI..... | 133 |
| Figura 99. | Comparación de costos entre los dos algoritmos..... | 134 |
| Figura 100. | Mapa presiones obtenido con el AI..... | 135 |

Índice de tablas

| | | |
|-----------|---|-----|
| Tabla 1. | Valores típicos del coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams. | 25 |
| Tabla 2. | Criterios de calibración para los modelos hidráulicos. | 26 |
| Tabla 3. | Avances tecnológicos en la distribución del agua. | 27 |
| Tabla 4. | Ecuaciones usadas por Epanet para el cálculo de pérdidas. | 38 |
| Tabla 5. | Fórmulas para obtener el factor de fricción f | 39 |
| Tabla 6. | Coeficientes de pérdida menor. | 40 |
| Tabla 7. | Nivel de rendimiento en función de RSR y el índice E. | 47 |
| Tabla 8. | Nivel de rendimiento en función del IRT. | 50 |
| Tabla 9. | Funciones de la Toolkit de Epanet agrupado por tareas. | 53 |
| Tabla 10. | Precio, suministro e instalación tubería PVC por metro lineal | 62 |
| Tabla 11. | Características del nuevo tanque de almacenamiento | 67 |
| Tabla 12. | Características de los tanques de almacenamiento | 71 |
| Tabla 13. | Componentes físicos de la red. | 71 |
| Tabla 14. | Consumo de agua por sector. | 74 |
| Tabla 15. | Asignación de demanda en las tuberías. | 76 |
| Tabla 16. | Repartición de demandas en cada nodo. | 76 |
| Tabla 17. | Presiones medidas en campo y simuladas antes de calibrar. | 78 |
| Tabla 18. | Presiones medidas en campo y simuladas después de calibrar. | 79 |
| Tabla 19. | Resumen de la eficiencia de calibración y validación del modelo hidráulico. | 81 |
| Tabla 20. | Simulación del caudal inyectado a la red. | 82 |
| Tabla 21. | Límites de presión y velocidad recomendados. | 84 |
| Tabla 22. | Uso de tubería con base al caudal circulante. | 94 |
| Tabla 23. | Uso de tubería con base al caudal circulante en la red con el nuevo tanque. 102 | |
| Tabla 24. | Nuevas válvulas colocadas en la red. | 105 |
| Tabla 25. | Cambio de posición de válvulas en la red. | 105 |
| Tabla 26. | Uso de tubería con base al caudal circulante en la red con las VRP. | 109 |
| Tabla 27. | Cambios de diámetro y costo del suministro e instalación de tuberías en el sector Oriente Bajo. | 113 |
| Tabla 28. | Cambios de diámetro y costo del suministro e instalación de tuberías en el sector Corazón de María. | 114 |
| Tabla 29. | Uso de tubería con base al caudal circulante en la red con los diámetros óptimos y VRP. | 117 |
| Tabla 30. | Nuevas tuberías para la creación de circuitos cerrados. | 123 |
| Tabla 31. | Uso de tubería con base al caudal circulante en la red con la creación de circuitos cerrados. | 125 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Tabla 32. | Cota y demanda en los nodos de la red Hanoi..... | 130 |
| Tabla 33. | Longitud, diámetro y rugosidad en las tuberías de la red Hanoi..... | 130 |
| Tabla 34. | Costo de tubería por metro lineal para la red Hanoi..... | 131 |

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre Sonia Magaly Gómez Jarrin y a mi padre Franklin Eduardo Aguilar Cabrera por inculcarme valores y apoyarme en todo momento para que no me falte nada durante el transcurso de la elaboración de este trabajo y durante toda mi etapa universitaria.

A mis hermanas Leslie, Erika y Anahí quienes siempre han estado presentes y me han otorgado consejos para seguir adelante.

Frank Eduardo Aguilar Gómez

Todo el esfuerzo y dedicación para realizar este trabajo lo dedico a mi familia, especialmente a mis padres. Gracias por la motivación y el apoyo incondicional.

Marco Vinicio Tenezaca Chimbaina

Agradecimientos

Agradecemos a nuestro director Ing. Esteban Sánchez y co-director de este trabajo Ing. Fernando García, quienes con su conocimiento y experiencia han logrado que podamos culminar este proyecto. Así mismo agradecemos a la Junta de Agua Potable de Bayas por abrir las puertas para la actualización de la red de distribución y la obtención de los datos necesarios para la realización del trabajo. También agradecemos a todos nuestros compañeros y amigos que han formado parte de este trayecto, por su amistad, consejos y apoyo en momentos difíciles. En especial agradecemos nuestro gran amigo Diego Pizarro por su amistad y toda la ayuda prestada durante la elaboración de este trabajo.

1. Introducción y objetivos

1.1 Descripción del problema

El acceso al agua para consumo humano es un derecho universal que garantiza una calidad de vida digna a las comunidades beneficiadas. Sin embargo, en zonas rurales aún se presentan problemas asociados principalmente con: consideraciones de diseño, infraestructura deficiente, calidad del recurso, procedimientos y protocolos de manejo, administración del sistema, y organización de usuarios. Entre los trabajos más relevantes, que permiten identificar y priorizar las acciones emergentes para incrementar sustancialmente los índices de servicio, destacan la evaluación hidráulica de la conducción y red de distribución, la evaluación de transporte y decaimiento de cloro, y la evaluación de infraestructura en general.

La problemática dentro de las RDAP (Redes de Distribución de Agua Potable) implica la necesidad de manejar gran cantidad de información, por lo cual, dado el avance del arte en los tiempos modernos, varias entidades relacionadas con el manejo y distribución de agua potable a ciudades y comunidades han hecho uso de programas computacionales con el fin de analizar y optimizar el funcionamiento de las RDAP para dar solución a escenarios actuales y futuros. El uso de programas para simular RDAP ha ido creciendo y con ello la diversidad de criterios para mejorar la gestión y control de redes, hoy en día se utilizan programas digitales como EPANET, MATLAB (MATrix LABoratory), SSHH-I (Simulation System for Hydrophysical and Hydrochemical Investigations), WaterCAD (comandos de diseños asistidos), PIPE2000, HITSRED (gestión integral de redes) entre otros (Florián, 2017).

La infraestructura necesaria para el funcionamiento adecuado de las RDAP requiere una importante inversión económica, por lo que un diseño óptimo se convierte en algo muy importante y uno de los grandes retos a los que nos enfrentamos en la actualidad (Pino et al., 2017). Con el avance de la tecnología, aparecen numerosos algoritmos computacionales como herramientas de ayuda en el análisis, manejo y optimización de las RDAP. Uno de los métodos más populares y aplicados a todo tipo de problemas de optimización es el algoritmo genético (AG), que es un algoritmo de búsqueda basado en la teoría de la evolución de Darwin (Güç, 2006).

Las RDAP de muchos cantones del Ecuador presentan problemas en su funcionamiento, una de ellas se localiza en la parroquia Bayas perteneciente al cantón Azogues que se encuentra ubicado al sur de la provincia de Cañar, constituida por desniveles muy fuertes que han ocasionado problemas en la actualidad; Acurio & Priori (2021) encontraron: presiones que no

cumplen con la normativa, velocidades bajas, sobredimensionamiento de las tuberías y problemas en el tanque de almacenamiento. Una de las acciones tomadas por la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas (JAAPRB) fue la construcción de un nuevo tanque de almacenamiento desde el cual se empezará la distribución de agua potable a la parroquia.

Este estudio se enfoca en la evaluación del rendimiento hidráulico de la RDAP de la parroquia Bayas a través de la herramienta computacional Epanet. Además, se implementa un algoritmo de optimización para la propuesta de mejoras en lo referente a las variables hidráulicas de presión y velocidad. La optimización se centrará en el cumplimiento de los estándares nacionales e internacionales, lo que permitirá a las entidades encargadas del suministro de agua disponer de herramientas para actuar en la elaboración de planes de operación y mantenimiento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar la eficiencia hidráulica de la red de distribución de agua potable de la parroquia Bayas, perteneciente al cantón Azogues, proporcionando un diagnóstico del sistema actual y las propuestas de mejoras.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Recopilar información de infraestructura, catastro y topografía de la red de distribución.
2. Evaluar el funcionamiento hidráulico de la red de distribución de agua potable en la situación actual y con el funcionamiento del nuevo tanque de almacenamiento mediante uso del programa computacional Epanet.
3. Proponer mejoras para una optimización de la red de distribución de agua en base de las variables hidráulicas de caudal, velocidad y presión.

2. Estado del arte

2.1 Modelación matemática de las redes de distribución de agua potable

2.1.1 Redes de distribución de agua potable

Las redes de distribución son un conjunto de elementos que se encuentran interconectados para el transporte del agua desde la planta de tratamiento hasta los usuarios, garantizando caudales, velocidades y presiones óptimas (García, 2006).

La función primaria de las redes de distribución es proveer agua potable a los usuarios, estas incluyen las viviendas, servicios públicos, comerciales y pequeñas industrias, en caso de que la condición económica sea favorable también prestará el servicio a las grandes industrias. La función secundaria es proveer agua en cantidad y presiones adecuadas para combatir los incendios, si se dispone de un diseño por separado específicamente para atender esta problemática esta función podrá ser eliminada (CPE INEN 5, 1992).

En la figura 1 se muestra los diferentes tipos de redes de distribución de agua potable, de acuerdo con el tipo de diseño que se requiera, estas se clasifican en redes ramificadas, redes tipo malla y en redes mixtas.

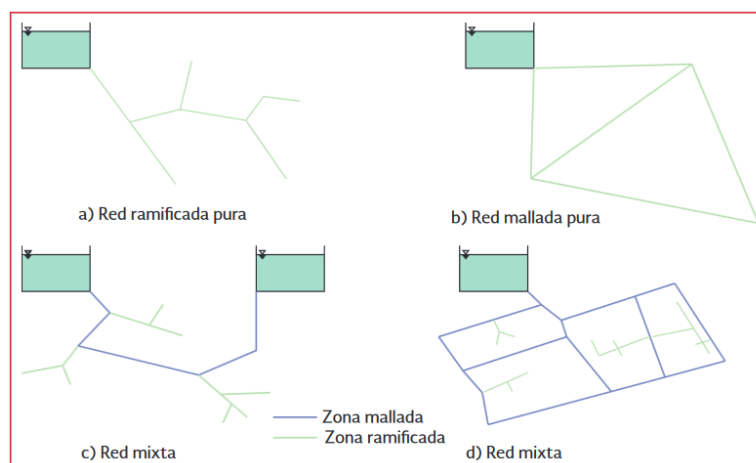


Figura 1. Tipos de redes de distribución de agua potable.
Fuente: Comisión Nacional del Agua [CONAGUA] (2008).

Desde el punto de vista geométrico las redes ramificadas tienen forma de raíces de árboles, ya que se ramifica desde la alimentación hasta los puntos de consumo, por otro lado, las redes de tipo malla tienen aspecto reticular, mediante la interconexión de las tuberías crean circuitos cerrados. Desde el punto de vista hidráulico, las redes ramificadas permiten obtener

el caudal que circula por la tubería únicamente con los datos de consumo, aplicando la ecuación de continuidad en cada nodo, junto con la ecuación de energía. En caso de una red mallada, los caudales no se pueden obtener solo con los datos de consumo, si no se requiere conocer las características hidráulicas de las tuberías (Mora, 2012).

a. Red ramificada:

- Desarrollo lineal a lo largo de una vía principal o carretera.
- Los caudales se obtienen de acuerdo a los datos de consumo.
- Más económica que una red mallada.
- Aplicado cuando la interrupción del servicio no causa problemas graves (sistemas de riego, industrias).

b. Red mallada:

- Presentan mayor seguridad en el suministro en caso de rotura de tuberías.
- Mayor complejidad en el diseño.
- Servicio más eficiente y permanente.
- Por la variedad de flujo a través de las tuberías, las presiones tienden a auto equilibrarse.

c. Red mixta

- Son las comunes en la construcción de las redes de agua potable.
- Combina las características de la red ramificada y mallada.

2.1.2 Modelación matemática

El avance de la tecnología ha permitido el análisis del comportamiento hidráulico y de calidad en las RDAP, junto con los Sistemas de Información Geográfico (SIG) han alcanzado un enorme potencial para la toma de decisiones, gestión, operación y mantenimiento de las redes de agua.

El modelo matemático se define como un conjunto de líneas y nodos que representan las tuberías, depósitos, embalses, puntos de consumo, bombas y válvulas, representados mediante ecuaciones matemáticas cuyo resultado arroja valores de caudal, velocidad y presión. El objetivo del modelo matemático es representar el comportamiento real del sistema físico a través de un ordenador (López et al., 2003).

La modelación matemática implica la necesidad de recopilar una gran cantidad de información existente de la red y tratarla para que sean asimilados por los programas computacionales, cuando la red de distribución es nueva, el problema está prácticamente resuelto, ya que la

información proviene de los parámetros de diseño, el problema radica en el análisis de las redes que están en funcionamiento, puesto que el comportamiento de los elementos de sistema han sufrido cambios con el paso del tiempo (López et al., 2003). Las circunstancias que provocan la variación en los parámetros de entrada son:

- Modificación de los diámetros y rugosidad de las tuberías a causa de depósitos de sales, cal y óxido, esto causa una mayor pérdida de carga.
- Incertidumbre de las pérdidas menores producto de los accesorios, cambios de dirección y cambios de la geometría del conducto.
- Pérdida de carga en las válvulas, por condiciones de operación estas no quedan perfectamente cerradas o abiertas.
- Distribución de consumos en la red, la demanda media no es representativo a lo largo de todo el día.
- Desconocimiento del valor y ubicación de las fugas.
- Mal funcionamiento de los contadores.
- Errores en la medición de las variables hidráulicas en campo, para la respectiva calibración del modelo.
- Error en la asignación de las cotas en los nodos, el error afecta directamente al valor de la presión en dicho nodo.

Todas estas indeterminaciones afectarán la calidad del modelo matemático, por lo que es importante contar con un catastro confiable de la red de distribución. En la figura 2 se muestra los diferentes tipos de modelos matemáticos presentados por CONAGUA (2008), estos se clasifican de acuerdo al tipo de aplicación, el grado de detalle, variación en el tiempo y según las variables del sistema; seguido de esta figura se describe con más detalle la clasificación.

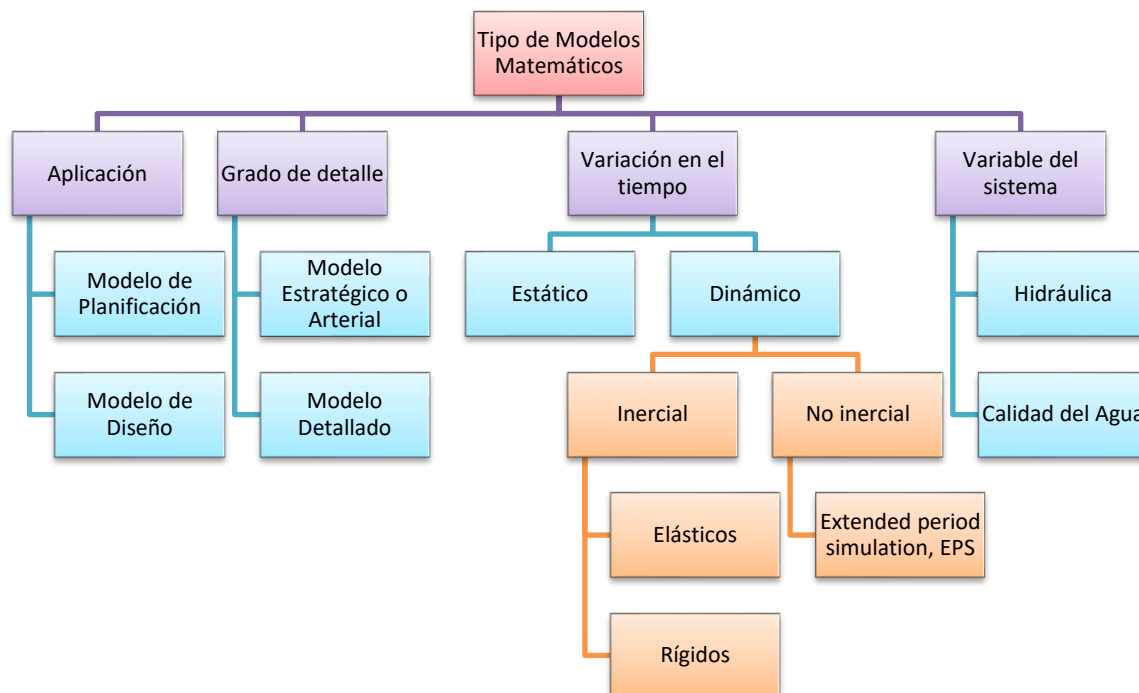


Figura 2. Tipos de modelos matemáticos.
Fuente: Elaboración propia a partir de CONAGUA (2008).

a. Según el tipo de aplicación

Modelos de planificación: Este tipo de modelos son utilizados para evaluar el rendimiento de la red, para el análisis económico y el comportamiento de los diferentes elementos del sistema.

Modelos operacionales o de diseño: Son utilizados para el análisis de las variables hidráulicas, como la presión, velocidad y caudales. Su objetivo es ayudar en la toma de decisiones.

b. Según Grado de detalle

Modelos estratégicos o arteriales: Estos modelos utilizan únicamente las tuberías principales y los tanques de almacenamiento y regulación. Aplicado a la ampliación de nuevas urbanizaciones.

Modelos detallados: Favorecen un mejor control y regulación de las redes de distribución, incluyen las tuberías principales, secundarias y las acometidas domiciliarias.

c. Según la variación en el tiempo

Modelo estático o flujo permanente: Al ser un flujo permanente, los caudales de demanda en cada nodo y los inyectados a la red permanecen constantes en el tiempo, el nivel de agua del depósito permanece constante, son utilizados para el análisis del caso más desfavorable, utilizando como dato el caudal máximo horario, además este tipo de simulación sirve como condición inicial para la modelación cuasi estático o de periodo extendido.

En la figura 3, se puede apreciar el esquema del modelo matemático estático. Para realizar la simulación, primero se necesita los datos de partida para su posterior solución numérica en el ordenador, donde se resuelve las ecuaciones de continuidad y pérdida de carga, para obtener finalmente los resultados de presión en los nodos, velocidad y caudal en las tuberías. En la figura 4 se presenta los datos de partida necesarios para llevar a cabo la simulación de modelo matemático estático.

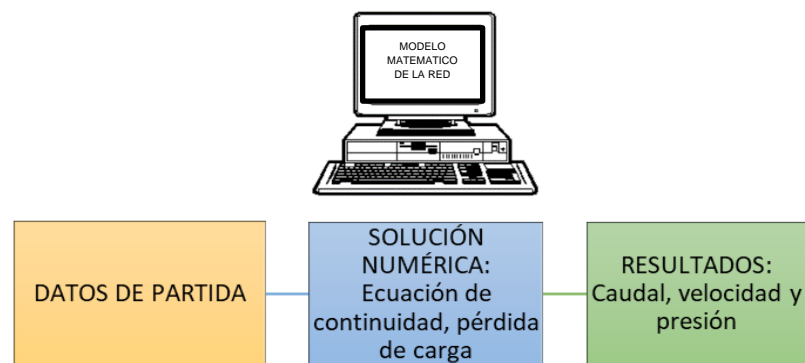


Figura 3. Esquema del modelo matemático estático.
Fuente: Elaboración propia.

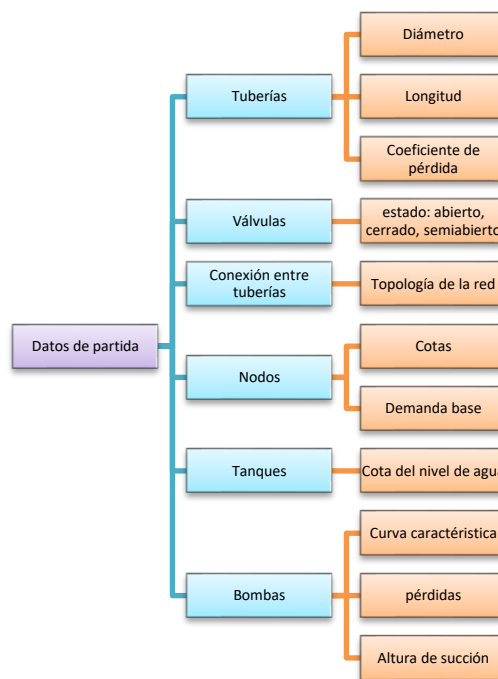


Figura 4. Datos de partida para la simulación del modelo matemático estático.
Fuente: Elaboración propia a partir de CONAGUA (2008).

Modelo dinámico o flujo no permanente: Los caudales de demanda en cada nodo y los inyectados a la red varían en el tiempo, el nivel de agua del depósito no permanece constante, son utilizados para la simulación de la evolución temporal de la red, en un intervalo determinado (CONAGUA, 2008). Los modelos dinámicos se clasifican en inerciales y no inerciales.

Los modelos inerciales toman en cuenta la fuerza de inercia del fluido (cambios de velocidad), los cambios bruscos de velocidad se producen en la ruptura de tuberías o en maniobras repentinas, si los cambios son rápidos se consideran los efectos elásticos en las tuberías y el fluido, estos son aplicados en los modelos elásticos, por ejemplo, el golpe de ariete. Si los cambios de velocidad son lentos, las tuberías se consideran indeformables y el fluido incompresible, sucede en los modelos rígidos (CONAGUA, 2008).

Los modelos no inerciales se emplean cuando la variación de la velocidad en las tuberías es muy baja, este modelo es conocido como cuasi estático, es ampliamente conocido como *simulación de periodo extendido* (Extended Period Simulation, EPS). Simula una serie de estados permanentes en los que se tiene en cuenta la variación de las demandas en los nodos, niveles en los depósitos de regulación, estado de funcionamiento de las estaciones de bombeo y variación de la posición de los elementos de regulación (López et al., 2003).

La secuencia para la simulación en periodo extendido se puede apreciar en la figura 5, como primer paso se tiene los datos de partida, en un segundo paso la solución numérica en el ordenador y finalmente resultados de caudal, velocidad y presión en diferentes intervalos de tiempo.

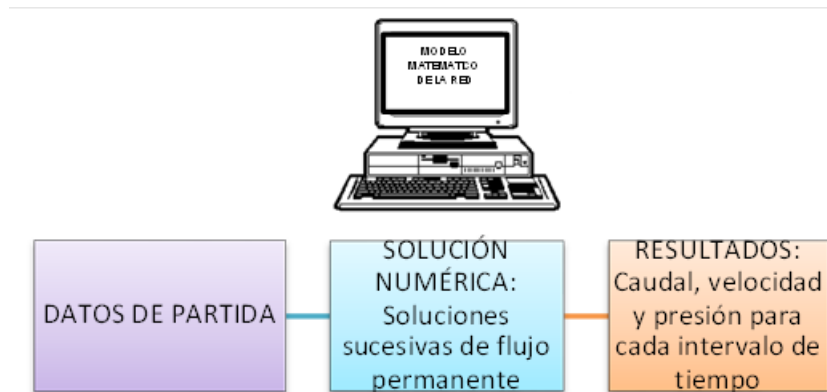


Figura 5. Esquema del modelo matemático cuasi estático.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6, se puede apreciar los datos de partida para la simulación en periodo extendido, estos datos son idénticos a los requeridas para la simulación estática, se diferencian únicamente en la asignación de un patrón de demanda en los nodos.

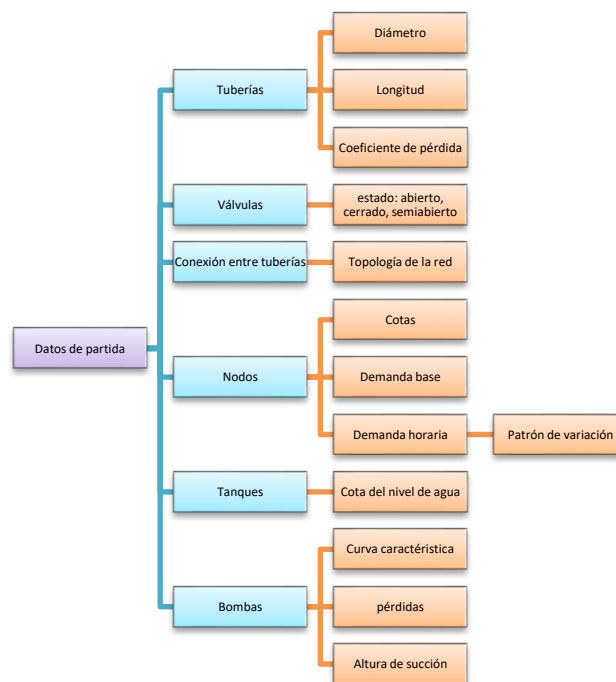


Figura 6. Datos de partida para la simulación de periodo extendido.
Fuente: Elaboración propia a partir de CONAGUA (2008).

d. Según las variables de interés del sistema

Modelos hidráulicos: Este tipo de modelos determinan los caudales, velocidades y presiones en la red de distribución.

Modelos de calidad del agua: La modelación de la calidad del agua necesita como partida la modelación hidráulica, es decir, datos de caudal y velocidad en la red de distribución. Este tipo de modelos tienen como finalidad determinar la variación espacial y temporal de un parámetro físico-químico de la calidad del agua, como ejemplo tenemos al cloro residual y al flúor (CONAGUA, 2008).

2.1.3 Pasos para la elaboración de un modelo hidráulico

CONAGUA (2008) menciona dos etapas para la implementación de un modelo de simulación hidráulico. La primera es la construcción del modelo de simulación hidráulico, que básicamente consiste en la recopilación de información, esquematización de la red, asignación de demandas, etc. En la figura 7 se indican los pasos para la construcción de un modelo hidráulico sin calibrar. La segunda etapa consiste en la calibración del modelo hidráulico, en esta parte se corrige y se ajustan los parámetros de la red, como el coeficiente de rugosidad de las tuberías, cambio de las demandas del sistema, la alteración de las características de funcionamiento de bombas y ajuste de otros parámetros que afectan el resultado de la simulación, esto con la finalidad de que el modelo sea lo más representativo posible del real funcionamiento de la red, las calibraciones por lo general se deben realizar periódicamente, ya que los componentes del sistema están en constante cambio.

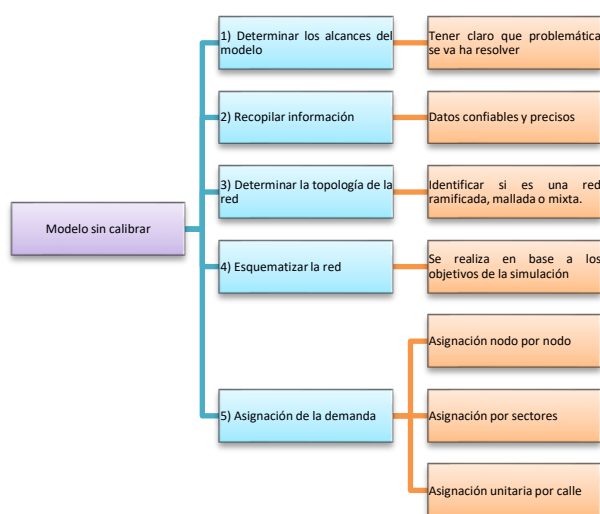


Figura 7. Etapas de la construcción del modelo hidráulico.
Fuente: Elaboración propia a partir de CONAGUA (2008).

2.1.4 Calibración del modelo hidráulico

La calibración es el proceso de comparar los resultados de la simulación con las variables medidas en campo, en caso de ser necesario ajustar los parámetros de entrada hasta que el rendimiento del modelo coincida razonablemente con el rendimiento del sistema medido en una amplia gama de condiciones de funcionamiento (Walski et al.,2003).

Ormsbee & Lingireddy (1997) proponen 7 pasos básicos para el proceso de calibración de un modelo hidráulico:

- a) Identificar el propósito del modelo hidráulico
- b) Determinar los parámetros iniciales del modelo
- c) Recopilar datos de calibración
- d) Evaluar los resultados del modelo
- e) Realizar la calibración a nivel macro
- f) Realizar el análisis de sensibilidad
- g) Realizar la calibración a nivel micro

a. Identificar el propósito del modelo hidráulico

Esto hace referencia a los diferentes tipos de modelos que existen, por ejemplo, tenemos los modelos estratégicos y los de diseño, modelos de la calidad de agua, modelos estáticos y dinámicos, etc. Los modelos estáticos se pueden calibrar realizando múltiples observaciones de presión y flujo estático recolectadas en diferentes momentos del día bajo diferentes condiciones de operación, por otro lado, las simulaciones de los modelos en periodo extendido requieren datos de campo recopilados durante un periodo prolongado, por ejemplo, de uno a siete días (Ormsbee & Lingireddy , 1997).

b. Determinar los parámetros iniciales del modelo

Corresponde a la obtención de los valores de rugosidad de la tubería, la asignación de la demanda en cada nodo de la red y el factor de modulación para el caso de la simulación de periodo extendido. En la tabla 1 se presenta los valores típicos del coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams (C) según el tipo de material, edad de la tubería y el diámetro.

Los dos primeros pasos a) y b) corresponden a las etapas de construcción de un modelo hidráulico que se describió en el apartado anterior.

Tabla 1. Valores típicos del coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams.

| Tubería | Edad (Años) | Diámetro | C |
|------------------------|------------------------|-------------------|----------|
| Hierro fundido | Nuevo | Todos los tamaños | 130 |
| | 5 | >380 mm (15 in) | 120 |
| | | > 100 mm (4 in) | 118 |
| | | >600 mm (24 in) | 113 |
| | 10 | >300 mm (12 in) | 111 |
| | | > 100 mm (4 in) | 107 |
| | | >600 mm (24 in) | 100 |
| | 20 | >300 mm (12 in) | 96 |
| | | > 100 mm (4 in) | 89 |
| | | >760 mm (30 in) | 90 |
| | 30 | >400 mm (16 in) | 87 |
| | | > 100 mm (4 in) | 75 |
| >760 mm (30 in) | | 83 | |
| 40 | >400 mm (16 in) | 80 | |
| | > 100 mm (4 in) | 64 | |
| | | | |
| Hierro dúctil | Nuevo | | 140 |
| PVC | Promedio | | 140 |
| Asbesto cemento | Promedio | | 140 |
| Duela de madera | Promedio | | 120 |

Fuente: Ormsbee & Lingireddy (1997).

c. Recopilar datos de calibración

Rondán (2016) recomienda que para verificar que los parámetros ingresados al modelo sean los correctos se debe realizar una comparación con los datos observados en campo, los datos de medición son:

- Datos de caudal y presión en los hidrantes, necesario para calibrar modelos estáticos.
- Caudal suministrado por las estaciones de bombeo.
- Datos de telemetría, estos corresponden a datos de caudal, presión y el nivel de agua en los tanques de almacenamiento, necesarios para calibrar simulaciones de periodo extendido.
- Los datos de pruebas con índices químicos conservativos o no conservativos que se usan para determinar el tiempo de viaje entre dos puntos de la red de distribución.

d. Evaluar los resultados del modelo

Existen varios criterios para evaluar los resultados del modelo matemático, en la tabla 2 se presenta un conjunto de criterios desarrollado por AWWA (1999) para definir el número de lecturas de presión y caudal de acuerdo con el uso previsto del modelo, el nivel de detalle y el tipo de simulación.

Tabla 2. Criterios de calibración para los modelos hidráulicos.

| Propósito del modelo | Nivel de detalle | Tipo de simulación | N.º mediciones de presión (% de nodos) | Precisión en medición de presión | N.º mediciones de caudal (% de tuberías) | Precisión en medición de caudal (%) |
|----------------------|------------------|--------------------|--|---|--|-------------------------------------|
| Planificación | Bajo | Estático-EPS | 10 | ±5 psi (3.5 mca) 100 % de las lecturas | 1 | ± 10 |
| Diseño | Moderado-alto | Estático-EPS | 5 - 2 | ±2 psi (1.4 mca) 90 % de las lecturas | 3 | ± 5 |
| Operación | Bajo-alto | Estático-EPS | 10 - 5 | ±2 psi (1.4 mca) 90 % de las lecturas | 2 | ± 5 |
| Calidad de agua | Alto | EPS | 2 | ±3 psi (2.1 mca) 70 % de las lecturas | 5 | ± 2 |

Fuente: Elaborado a partir de AWWA (1999).

e. Realizar la calibración a nivel macro

En esta etapa se verifica que, los datos de las variables hidráulicas medidas en campo sean semejantes a los que arroja el modelo matemático, en caso de que la diferencia sea mayor al 30 % (Ormsbee & Lingireddy , 1997), es probable que el error no solo sea en la estimación de los coeficientes de rugosidad y la demanda, si no, puede ser un error provocado por el estado incierto de una válvula, longitud incorrecta de una tubería, etc.

La única forma de disminuir el error es realizar una revisión sistemática de todos los parámetros que se introducen en el modelo para aumentar la precisión y que tengan una diferencia razonable, esto es, menor a 20 % de error (CONAGUA, 2008).

f. Realizar el análisis de sensibilidad

Consiste en variar los valores de los parámetros del modelo para identificar cuál de ellos afecta significativamente a los resultados del modelo, este análisis ayuda a identificar la fuente más probable de error. Es recomendable realizar antes de la calibración a nivel micro (Ormsbee & Lingireddy , 1997).

g. Realizar la calibración a nivel micro

En esta fase final, los parámetros más comunes que se ajustan son la rugosidad de la tubería y las demandas nodales, las correcciones se realizan de tal manera que, en la simulación de flujo permanente, los valores de presión y caudal coincidan con las observaciones estáticas del sistema. En la simulación de periodo extendido se espera que coincidan las presiones y caudales variables en el tiempo, así como la variación del nivel de agua en los residuos (Ormsbee & Lingireddy , 1997).

2.2 Descripción de programas computacionales

Antes de iniciar la descripción de los programas computacionales que existen en el mercado, se da una breve reseña histórica del avance tecnológico de la distribución de agua. También se describe los métodos de cálculo en los que se basan dichos programas.

2.2.1 Reseña histórica del avance tecnológico en la distribución de agua

En la tabla 3 se presenta los avances tecnológicos en la distribución del agua, desde la aplicación de los principios matemáticos y físicos en los sistemas de fluidos hasta la creación de herramientas computacionales para la simulación hidráulica y de calidad del agua.

Tabla 3. Avances tecnológicos en la distribución del agua.

| Año | Aportación |
|-------------|---|
| 1738 | "Hydrodynamica" publicado por Daniel Bernoulli, se extiende los principios de las matemáticas y física de Newton y Leibniz a los sistemas de fluidos. |
| 1770 | Chezy desarrolla una relación de la pérdida de carga. |
| 1843 | Desarrollo de las ecuaciones fundamentales que describen el movimiento de los fluidos por Navier, Stokes, Cauchy y Poisson. |

Tabla 3. (continuación) Avances tecnológicos en la distribución del agua.

| Año | Aportación |
|-----------|---|
| 1845 | Ecuación de pérdida de carga de Darcy-Weisbach. |
| 1906 | Ecuación de pérdida de carga de Hazen-Williams. |
| 1936 | Método de Hardy Cross utilizado para resolver ecuaciones de pérdida de carga en redes complejas. |
| 1960-1970 | Se crean los primeros modelos de las redes de tuberías, simulación en flujo permanente y periodo extendido. |
| 1980 | Modelación de la calidad de agua. |
| 1993 | Desarrollo de Epanet como herramienta para la modelación hidráulica y de calidad de agua. |
| 2001 | Calibración automática mediante algoritmos genéticos. |
| 2002 | Combinación de los modelos hidráulicos con los SIG. |

Fuente: Elaboración propia a partir de Walski et al. (2003).

2.2.2 Método de análisis de redes

Los métodos de análisis de las redes de distribución de agua van desde métodos gráficos hasta los modelos matemáticos, los métodos de análisis que se han incorporado en las computadoras a lo largo del tiempo son: Método de Hardy Cross, método de nodo simultáneo, método de bucle simultáneo, método lineal y el método de gradiente (Ormsbee L. E., 2008).

Método de Hardy-Cross

Para la resolución de redes simples se siguen los siguientes pasos:

- Suponer la mejor distribución de caudales iniciales en la red Q_o .
- Se calcula la corrección de los caudales para cada circuito con la ecuación 1.

$$\Delta Q = -\frac{\sum kQ_o|Q_o|^{n-1}}{\sum kn|Q_o|^{n-1}} \quad (1)$$

Donde: k , es el coeficiente de resistencia; n , exponente i .

- Se repite los pasos hasta que las correcciones ΔQ sean arbitrariamente pequeñas.

En 1957 Hoag & Weinberg adaptaron el método de Hardy Cross a la computadora digital y aplicaron el método numérico al sistema de distribución de agua de la ciudad de Palo Alto, California, donde los autores analizaron las velocidades, presiones y aspectos económicos (Ormsbee L. E., 2008). La dificultad de los métodos numéricos incrementa con el tamaño de la red y la incorporación de válvulas, bombas, etc. Por tal razón aparecen métodos de solución cada vez más sofisticados que se incluyen a los programas comerciales que existen en la actualidad. En la figura 8 se presenta los diferentes métodos para la solución numérica

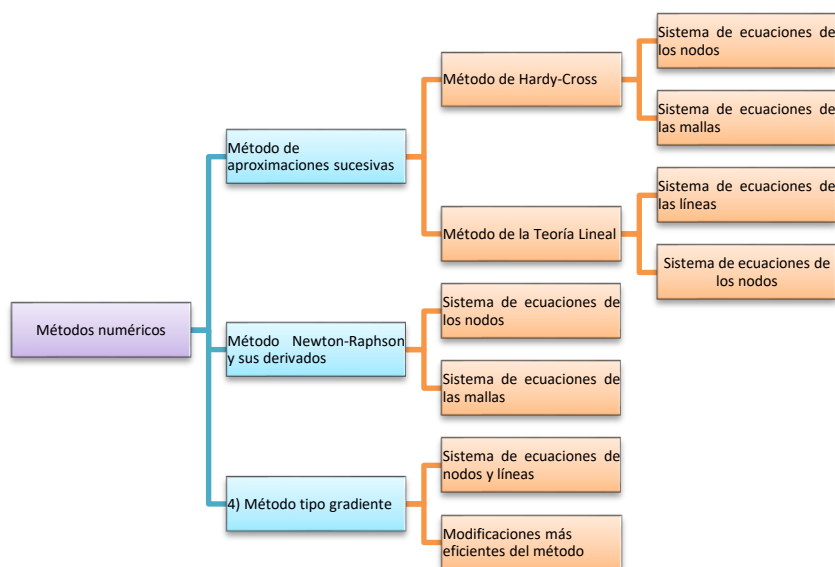


Figura 8. Métodos numéricos de resolución.
Fuente: Izquierdo et al. (2003).

2.2.3 Programas computacionales

a. Epanet

Fue creado en 1993 por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, es un programa computacional que permite realizar simulaciones del comportamiento hidráulico y de calidad de agua dentro de una red presurizada. El programa es capaz de obtener el caudal que circula por cada una de las tuberías, presión en los nodos, nivel de agua en los tanques, concentración de componentes químicos en la red y tiempo de permanencia del agua en las tuberías (Rossman, 2000). La interfaz de trabajo de Epanet se puede apreciar en la figura 9.

Características del programa:

- No tiene limitaciones en cuanto al tamaño de la red.
- Simulaciones en flujo permanente y en periodo extendido.
- Utiliza pérdida de carga: Hazen-Williams, Darcy Weisbach, Chezy-Manning.
- Puede incluir pérdidas menores.
- Modelación de bombas (consumo de energía y costos).
- Válvulas reguladoras y especiales (retención, reductoras de presión, etc).
- Almacenamiento de agua con tanques de cualquier tamaño.
- Se definen patrones temporales de demanda en cualquier punto.
- Modela la edad del agua a lo largo de la red.

Para resolver las ecuaciones de continuidad y pérdida de carga se aplica el método de gradiente, la forma de actualizar los caudales de circulación en las tuberías usado por Epanet es el más simple.

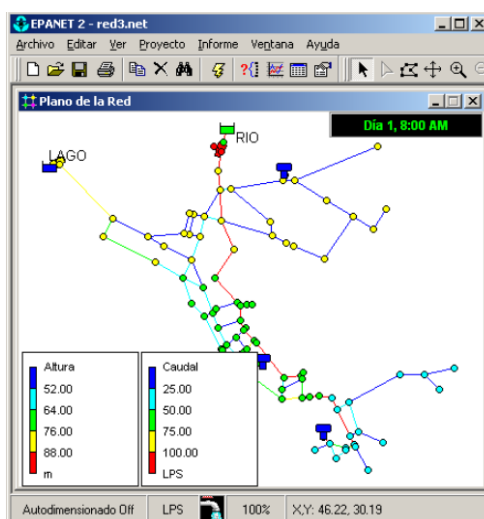


Figura 9. Interfaz de trabajo de Epanet.
Fuente: Rossman (2000).

b. WATERCAD

Fue desarrollado por la empresa Haestad Methods; las empresas de servicio público, municipios y empresas de ingeniería usan esta herramienta como una aplicación confiable, ahorro de recursos y de apoyo en la toma de decisiones para la infraestructura del agua (Bentley Systems Incorporated, 2022). El algoritmo de cálculo se basa en el que fue desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos para su programa Epanet. WaterCAD proporciona un acceso intuitivo y amigable a las herramientas de trabajo para la modelación de sistemas complejos, su interfaz de trabajo se presenta en la figura 10. Algunas características del programa presentadas por Bentley Systems Incorporated (2022) son:

- Permite realizar simulaciones en flujo permanente y en periodo extendido.
- Analiza las demandas variables en el tiempo en cualquier nodo.
- Modela el funcionamiento de las válvulas reguladoras y las válvulas especiales.
- Seguimiento de compuestos químicos conservativos y no conservativos.
- Determinar la edad del agua en red de distribución.
- Capacidad de identificar problemas operativos en el sistema.
- Esquematización equivalente de la red.
- Diámetros optimizados.
- Análisis de flujo de incendios y de calidad de agua.
- Calibración automática mediante algoritmos genéticos para el ajuste de rugosidad, demanda y los estados de válvulas y tuberías.
- Gráficos y resultados personalizados.

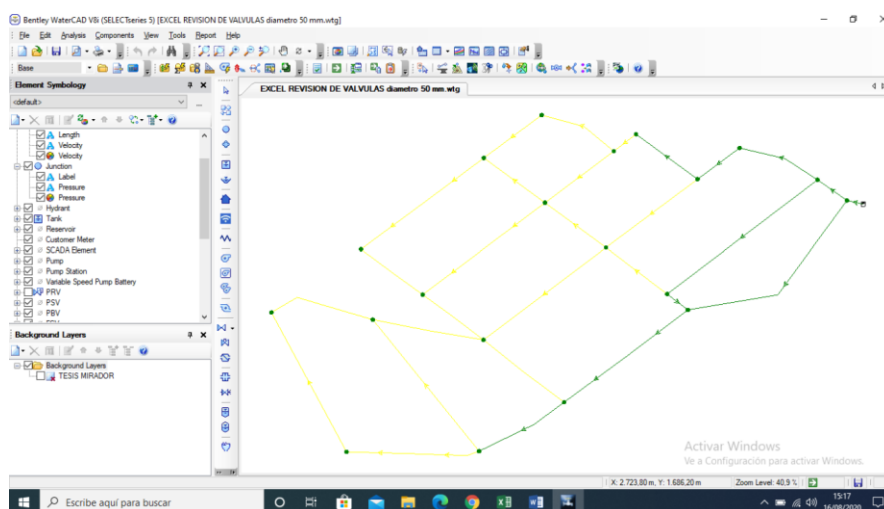


Figura 10. Interfaz de trabajo de WaterCAD.
Fuente: Chiquito (2020).

c. WATERGEMS

Gracias a las metodologías de análisis que ha venido realizando el Centro de Soluciones Haestad de Bentley Systems, se ha conseguido importantes desarrollos y avances para ofrecer las características y funcionalidades que han convertido a WaterCAD y WaterGEMS en las herramientas más complejas y líderes en el mercado (Gutierrez, 2022), la figura 11 presenta la interfaz de trabajo de WaterGEMS.

Bentley Systems Incorporated (2022), detalla las siguientes características del programa:

- Todas las capacidades de WaterCAD.
- Una versión independiente más la integración con tres plataformas MicroStation, AutoCAD y ArcGis.
- Planificación óptima de la operación y la calibración automatizada del modelo que no están incluidos en WaterCAD.

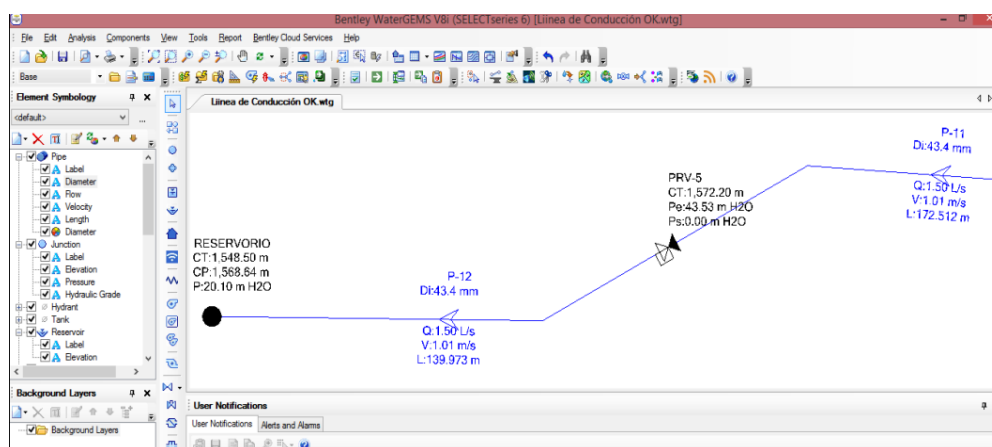


Figura 11. Interfaz de trabajo de WaterGEMS.
Fuente: Alfaro & Rodríguez (2019).

d. GISWATER

Giswater es una aplicación en formato libre pensada para la gestión y explotación de los elementos de infraestructuras hidráulicas (abastecimiento y saneamiento), tanto en base de datos como gráfica, a través de las que se tiene acceso desde cualquier SIG (GISWATER, 2018), la figura 12 indica las principales secciones de trabajo del programa.

- La primera versión apareció en 2014.
- La última versión mejorada apareció en 2017.
- Permite mejorar la gestión de las redes de abastecimiento, alcantarillado y drenaje urbano.

- Integra en una sola plataforma, elementos de un sistema de gestión integral para las redes de abastecimiento o saneamiento como son: Epanet, SIG, Base de datos, SWMM (Storm Water Management Model).
- QGIS es el software SIG ideal para conectarse a la base de datos espaciales.
- Mejora la capacidad de Epanet y SWMM ya que en todo momento se trabaja en un entorno gráfico SIG.

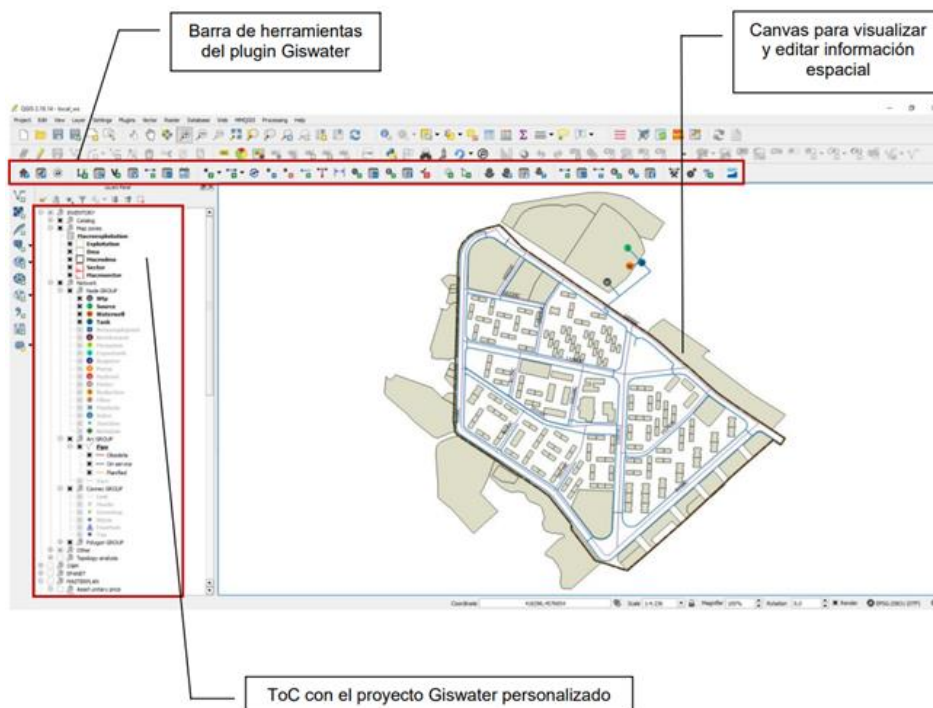


Figura 12. Interfaz de trabajo de Giswater.
Fuente: GISWATER (2018).

3. Materiales y métodos

3.1 Descripción de la zona de estudio

El presente estudio se ha llevado a cabo sobre la RDAP de la parroquia Bayas, que pertenece al cantón Azogues. Esta parroquia se extiende aproximadamente en 2.93 km² dentro del área urbana de la ciudad. La provisión del servicio de agua potable es llevada a cabo por la Junta Administradora de Agua Potable Regional Bayas (JAAPRB). Seguidamente, se describen otros aspectos relevantes del área de estudio.

3.1.1 Ubicación y localización

Azogues, capital de la provincia de Cañar, se encuentra ubicada al sur del Ecuador, en el callejón interandino de la vertiente del Atlántico, dentro de la cuenca del río Paute, a una altitud media de 2518 msnm. Su superficie es de aproximadamente 1200 km². El cantón está formado por cuatro parroquias urbanas: Central, San Francisco, Antonio Borrero (Charasol) y Aurelio Bayas (Upar); y ocho parroquias rurales: Rivera (Shoray), Pindilig, Taday, Luis Cordero, Guapán, Cojitambo, San Miguel de Porotos, y Javier Loyola (Chuquipata).

En el extremo noreste de la cabecera cantonal se encuentra la parroquia Aurelio Bayas, en la cual se desarrolla el presente trabajo. Esta parroquia cuenta con 10 barrios: Sector Zhirincay, Sector Señor de Flores, Barrio Bayas Centro, Sector Sigsiloma, Sector Los Troncos, Sector Leg Abuga, Barrio 4 Esquinas, Barrio El Calvario, Barrio Santa Maria y Sector Leg Tabacay (PDOT-AZOGES, 2018).

La figura 13 muestra la zona de estudio, la red de distribución de agua potable y los sectores a los que abastece.

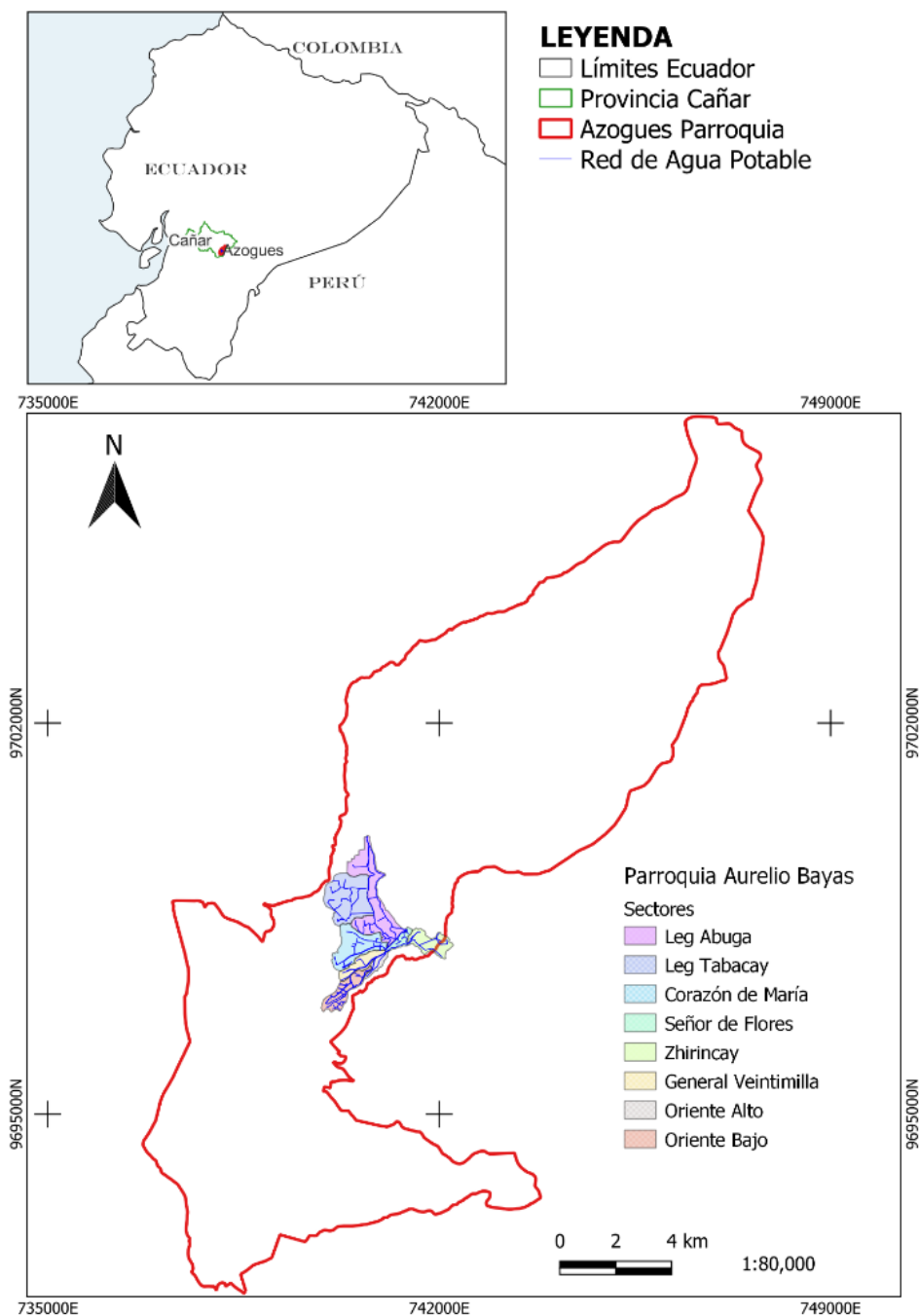


Figura 13. Ubicación de la RDAP Bayas.
Fuente: Elaboración propia.

3.1.2 Topografía

Según el PDOT-AZOGUES (2018) la topografía de Azogues se caracteriza por la presencia de pendientes pronunciadas, lomas y llanuras onduladas. Las pendientes del cantón varían desde el 0 % hasta más del 70 %, por lo tanto, esta notable irregularidad del territorio se

convierte en un factor importante a tener en cuenta en las diferentes obras que se llevan a cabo en el sector.

El cantón Azogues presenta un terreno fuertemente escarpado/muy escarpado, debido a que alrededor del 65 % del territorio tiene pendientes mayores a 50 %. Solo el 17 % de su superficie está compuesta por terrenos planos y ondulados, lo cual representa áreas de interés para el sector agrícola. En la figura 14 se visualiza una fotografía aérea de la parroquia Aurelio Bayas tomada desde Google Earth. La zona en la que se ubica la parroquia Aurelio Bayas, posee un desnivel superior al 16 % en la mayoría de sus caminos (PDOT-AZOGES, 2018).

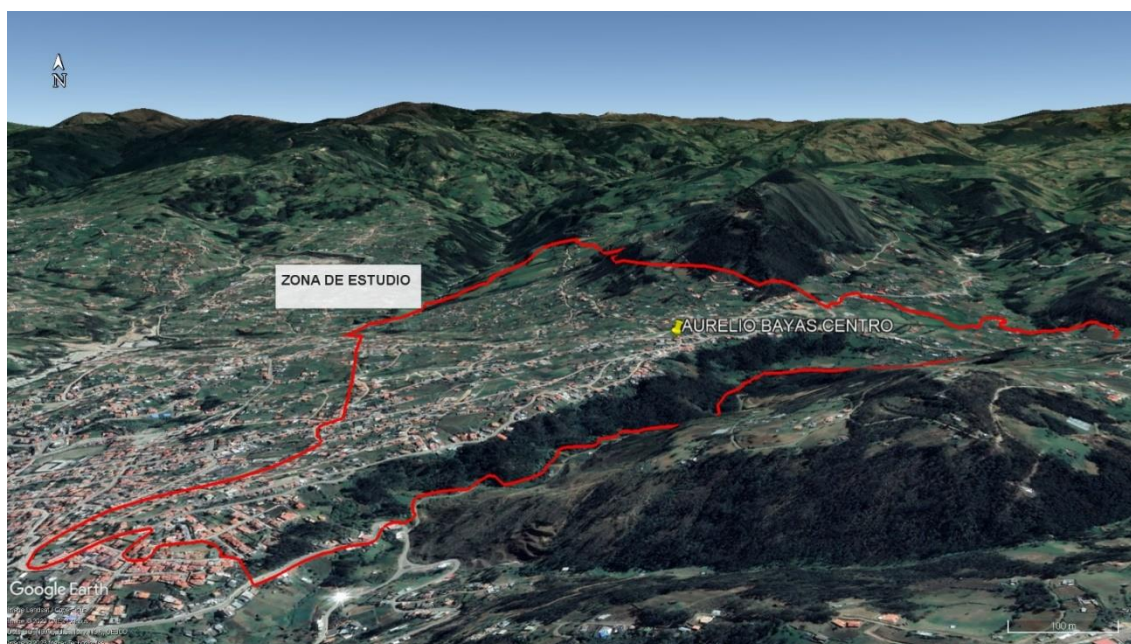


Figura 14. Fotografía aérea de la Parroquia Aurelio Bayas.
Fuente: Google Earth.

3.1.3 Demografía

De acuerdo con los datos oficiales del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) del año 2010, el cantón Azogues tiene una población de 70.064 habitantes, lo que representa un tercio de la población total de la Provincia de Cañar. La zona urbana del cantón registra una población de 33.848 habitantes.

La JAAPRB en el mes de octubre de 2022 registró un total de 1305 conexiones domiciliarias activas. Según los datos del INEC en el año 2010, existen 4.2 habitantes por vivienda, lo que significa que en la parroquia Aurelio Bayas hay aproximadamente 5481 habitantes que se benefician del servicio de agua potable.

3.1.4 Climatología

El PDOT-AZOGUES (2018), describe el clima del cantón como frío a muy frío en la parte alta y templado en la parte baja. De acuerdo con los datos de la estación meteorológica más cercana, se determinó que la temperatura media anual es de 14.01 °C. Esta temperatura fluctúa entre 8 y 12 °C en las parroquias orientales, y entre 12 y 18 °C en las demás.

El promedio máximo de precipitación mensual ocurre en el mes de junio y alcanza un valor de 530 mm en la zona nororiental del cantón. La precipitación media anual es de, 1106 mm, mientras que la humedad relativa promedio es del 67 % (Rivas, 2017; Romero, 2015). La evapotranspiración máxima se produce en la zona sur del cantón, mientras que la mínima evapotranspiración ocurre en la zona norte; el promedio mensual varía entre 60 y 110 mm (PDOT-AZOGES, 2018).

Según la información recopilada de la estación meteorológica más cercana, el viento tiene una dirección predominante sur-norte (viento desde el sur) (PDOT-AZOGES, 2018).

3.2 Epanet

Epanet modela un sistema de red de distribución de agua mediante líneas y nodos, las líneas representan las tuberías, bombas y válvulas, los nodos con demanda o sin demanda representan puntos de conexión de las tuberías y el extremo de estas, y también embalses y depósitos (Rossman, 2000). La figura 15 muestra la conexión de estos componentes para representar un sistema de distribución de agua.

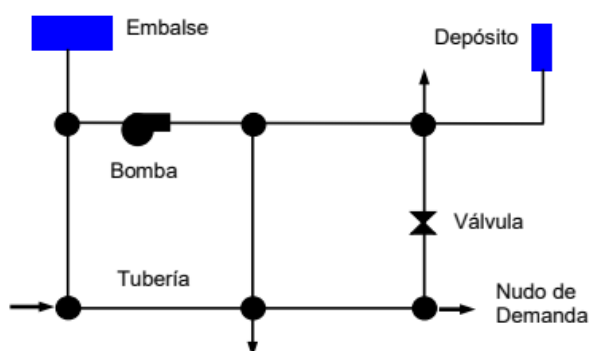


Figura 15. Representación de un sistema de distribución de agua en Epanet.
Fuente: Rossman (2000).

Las ecuaciones de pérdida de carga que utiliza Epanet son las de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y la de Chezy-Manning. Epanet cumple las siguientes restricciones a la hora de la simulación hidráulica:

a. Conservación de masa

Esta ley establece que la cantidad de volumen por unidad de tiempo que ingresa a un nodo i es igual al volumen de agua saliente, del mismo nodo, esta condición también puede describirse como: el caudal de entrada debe ser igual al caudal de salida en cada nodo del sistema (Pereyra, Pandolfi, & Villagra, 2017). La conservación de masa está representada por la ecuación 2.

$$-\sum Q_{int} + \sum Q_{out} + MD = 0 \tag{2}$$

Donde: Q_{int} , caudal que ingresa al nodo i ; Q_{out} , caudal saliente del nodo i ; MD , Consumo en dicho nodo.

b. Ecuaciones de pérdida de carga

La pérdida de carga en las RDAP corresponde a la pérdida de presión debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y por la fricción contra las paredes de la tubería que las conduce, estas llegan a ser pérdidas continuas. Por otro lado, las pérdidas localizadas se producen por la presencia de accesorios, cambios de dirección y cambios de la geometría del conducto (Pereyra, Pandolfi, & Villagra, 2017). La ecuación estándar de la pérdida de carga está dada por la ecuación 3.

$$h_f = kQ^n \tag{3}$$

Donde: h_f , pérdida de carga; k , coeficiente de resistencia; Q , caudal; n , exponente. Existen varios autores como Manning, Hazen-Williams y Darcy Weisbach que han formulado varias ecuaciones para obtener la pérdida de carga en las tuberías. En la tabla 4 se presenta las ecuaciones usadas por Epanet para el cálculo de pérdidas.

Tabla 4. Ecuaciones usadas por Epanet para el cálculo de perdidas.

| Autor | Ecuación | Exponente |
|-----------------|---|-----------|
| Chezy – Manning | $h_f = \frac{4^{\left(\frac{10}{3}\right)} \cdot n^2}{\pi^2 \cdot D^{\left(\frac{16}{3}\right)}} \cdot L \cdot Q^2$ | 2 |

Tabla 4. (continuación) Ecuaciones usadas por Epanet para el cálculo de pérdidas.

| Autor | Ecuación | Exponente |
|------------------|--|-----------|
| Hazen - Williams | $h_f = \frac{10.678 \cdot L}{D^{4.87}} \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852}$ | 1.852 |
| Darcy - Weisbach | $h_f = f \cdot \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{L}{g} \cdot \frac{Q^2}{D^5}$ | 2 |

Fuente: Rossman (2000).

Donde: C , coeficiente de rugosidad de Hazen – Williams; f , es el factor de fricción dependiente de: ε , D y Q ; ε , es el coeficiente de rugosidad de Darcy – Weisbach; n , es el coeficiente de rugosidad de Chezy – Manning; D , es el diámetro de la tubería; L , es la longitud de la tubería y Q es el caudal.

El factor de fricción f es adimensional, para calcular este valor se utiliza la ecuación empírica de Colebrook-White. En la tabla 5 se presenta las fórmulas para obtener este factor de fricción en los diferentes tipos de régimen.

Tabla 5. Fórmulas para obtener el factor de fricción f .

| Flujo | Ecuación | Reynolds(aproximado) | Autor |
|------------|--|----------------------|---------------------|
| Laminar | $f = \frac{64}{Re}$ | $Re < 2100$ | Jean Poiseuille |
| Transición | $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$ | $2100 < Re < 4000$ | Colebrook- White |
| Turbulento | $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$ | $Re > 4000$ | Colebrook- White |

Fuente: Rossman (2000).

La obtención del valor de f en el flujo transitorio y flujo turbulento es un proceso iterativo, por lo que se puede utilizar la fórmula explícita desarrollada por Swamee-Jain, tal como se muestra en la ecuación 4, esta expresión arroja un valor de f con una precisión del 1 % con respecto a la ecuación de Colebrook (Rossman, 2000).

$$f = \frac{1.325}{\left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (4)$$

Esta ecuación funciona para:

$$10^{-6} \leq \frac{\varepsilon}{D} \leq 10^{-2}$$

$$5000 \leq Re \leq 10^8$$

c. Conservación de energía

Esta ley establece que la sumatoria de cada una de las pérdidas de carga para un circuito debe ser igual a cero, la conservación de energía está representada por la ecuación 5.

$$\sum kQ^n = \sum kQ|Q|^{n-1} = 0 \quad (5)$$

El valor absoluto se usa para tomar en cuenta la dirección de la suma alrededor del circuito, el signo del caudal es positivo cuando el flujo es en dirección de las manecillas del reloj y negativo en la dirección contraria. Las pérdidas menores también pueden ser modeladas en Epanet, introduciendo un coeficiente que depende del tipo de accesorio, incluir estas pérdidas menores depende del grado de detalle del modelo. Para la red de estudio no se consideró las pérdidas por accesorios, cambios de dirección, etc., debido a la gran escala del modelo. Epanet modela las pérdidas menores usando la ecuación 6.

$$h_L = K \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

Donde: h_L , es la pérdida localizada o menor; K , coeficiente de pérdida menor; v , velocidad en la tubería y g es la aceleración de la gravedad. En la tabla 6 se presentan los coeficientes de pérdidas menores K según los diferentes tipos de accesorios.

Tabla 6. Coeficientes de pérdida menor.

| Accesorio | Coef. Perdidas |
|-------------------------------------|----------------|
| Válvula de Globo, todo abierta | 10.0 |
| Válvula de Angulo, todo abierta | 5.0 |
| Válv. Retenc. Clapeta, todo abierta | 2.5 |
| Válvula compuerta, todo abierta | 0.2 |
| Codo de radio pequeño | 0.9 |
| Codo de radio mediano | 0.8 |

Tabla 6. (continuación) Coeficientes de pérdida menor.

| Accesorio | Coef. Perdidas |
|-----------------------------|-----------------------|
| Codo de radio grande | 0.6 |
| Codo a 45 grados | 0.4 |
| Codo de Retorno (180") | 2.2 |
| Té Estándar -flujo recto | 0.6 |
| Té Estándar -flujo desviado | 1.8 |
| Entrada brusca | 0.5 |
| Salida brusca | 1.0 |

Fuente: Rossman (2000).

3.3 Elaboración del modelo

3.3.1 Delimitación de la zona

La red de distribución se encuentra localizada en la parroquia Aurelio Bayas Martínez, conformado por área urbana y rural del cantón. En 2018 se realizó la primera delimitación de la red mediante la localización geográfica de las tuberías y demás accesorios de la red, la ubicación y caracterización de los elementos se llevó a cabo con el apoyo de los operadores de la JAAPRB (Méndez & Valdiviezo , 2018).

A partir del año 2018 se han realizado algunas actualizaciones en la red, como el cambio de los tanques rompe presiones, la colocación de válvulas y ampliación de la red en determinados sectores.

3.3.2 Modelación de la red

a. Esquematización de la red

El levantamiento del catastro realizado por Méndez & Valdiviezo (2018), así como las actualizaciones de la red, calibración y validación del modelo realizadas por Acurio & Priori (2021), se utilizaron para la esquematización de la red. Los elementos hidráulicos, tales como tuberías, válvulas y tanques con sus respectivas características, fueron proporcionados en formato shape para su posterior análisis en el programa QGIS.

El diseño de la actualización en el sector Oriente Bajo fue realizado por EMAPAL EP, este diseño fue proporcionada en un archivo dwg. El archivo fue exportado al programa Qgis para la asignación de los nodos con sus respectivas cotas y demandas; longitud y rugosidad en las tuberías. A las tuberías se les asignó un coeficiente de rugosidad (Hazen-Williams) de 140. La construcción de las actualizaciones fue realizada por la JAAPRB, entidad que sigue

brindando agua potable al sector Oriente Bajo. En la figura 16, se presenta las actualizaciones de la red elaborados en el programa Qgis.



Figura 16. Modificación de la red en el Sector Oriente Bajo en Qgis.
Fuente: Elaboración propia.

b. Asignación de demanda base

En los últimos años, se han logrado grandes progresos en la modelación matemática de las RDAP, no obstante, no es así en lo que respecta a la modelación de los consumos (Alcocer-Yamanaka & Tzatchkov, 2009), que resulta en un parámetro muy difícil de estimar y que tiene mayor incidencia en los resultados del modelo. La investigación sobre el modelo de las demandas se centra en dos enfoques principales: el primer enfoque de "abajo hacia arriba", que modela el uso del agua a nivel de usuarios/medidores, y el segundo enfoque de "arriba hacia abajo", que modela el uso del agua a nivel del sistema completo (Chen & Broccoli, 2014). Para la asignación de los consumos se utilizó el primer enfoque, de "abajo hacia arriba".

En la figura 17 se presenta la distribución real de los caudales en un tramo de tubería, donde Qd_1, Qd_2, \dots, Qd_n representan las conexiones domiciliarias, una idealización de estos consumos consiste en sumar todos los caudales y obtener un caudal total a lo largo de la tubería, este caudal total se reparte en partes iguales a cada nodo, tal como se muestra en la figura 18.

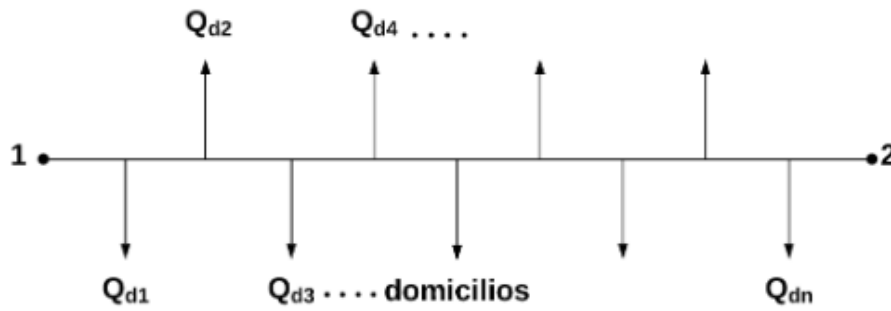


Figura 17. Distribución real de los caudales.
Fuente: Cano (2020).

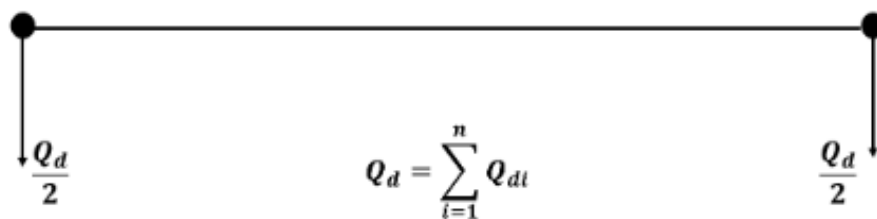


Figura 18. Idealización de las demandas en un tramo.
Fuente: Cano (2020).

En la figura 19, se presenta la cantidad de predios que existen en la parroquia Aurelio Bayas, con esta información se procedió de la siguiente manera para obtener la demanda base:

- La JAAPRB lleva su registro de consumo por sectores, con esta información y con la cantidad de predios en cada sector, se obtuvo una demanda unitaria (L/s/predio).
- En función de los predios más cercanos a cada tubería se obtuvo un caudal total a lo largo de la tubería.
- Con la demanda propia de cada tramo se hizo la repartición, a partes iguales, entre sus nodos extremos, para totalizar al final la demanda de cada nodo.

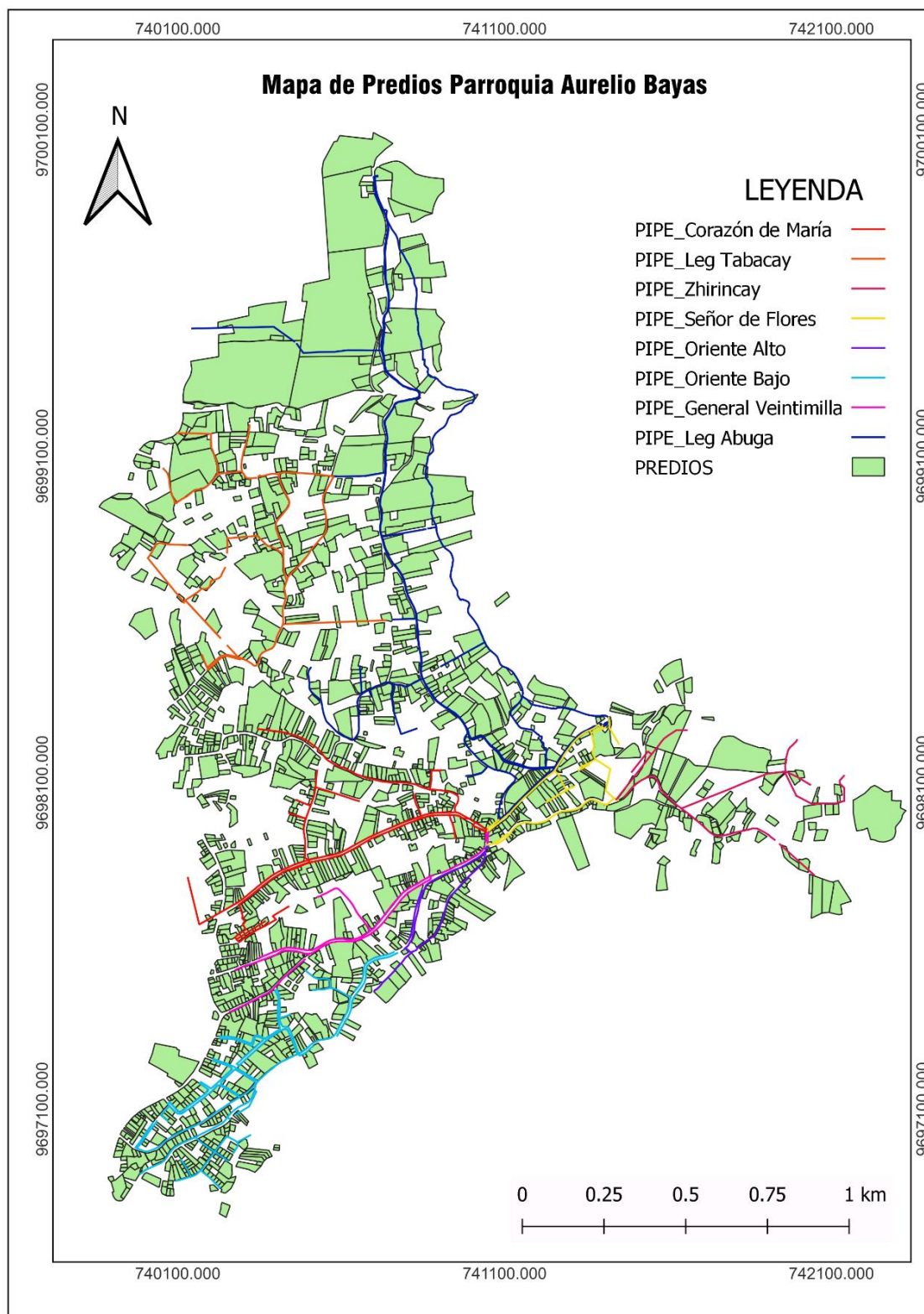


Figura 19. Distribución de predios a lo largo de la red.
Fuente: Elaboración propia.

c. Exportación de QGIS a Epanet

La actualización de las tuberías y válvulas se efectuó en conjunto con el técnico de la JAAPRB; cabe mencionar que el diseño propuesto por EMAPAL EP no se llevó a cabo en algunos tramos debido a la dificultad de la excavación. Para la exportación a Epanet se utilizó el programa CovertGISEpanet, lo que requiere la creación de una carpeta en la que se encuentren todos los archivos en formato shape de los nodos, embalses, depósitos, tuberías y válvulas. La figura 20 muestra la exportación de los shapes de los diferentes elementos de la red hacia un archivo con formato inp.

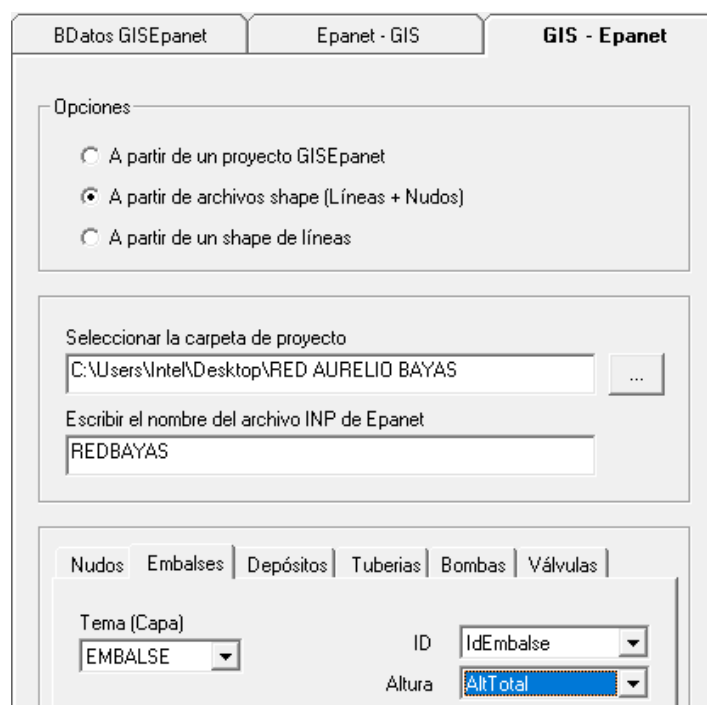


Figura 20. Interfaz de trabajo del programa CovertGISEpanet.
Fuente: Elaboración propia.

Se generó un nuevo archivo "REDBAYAS" con formato (.inp), que se pudo ejecutar de manera adecuada en el programa Epanet. Es importante modificar las opciones de cálculo antes de la primera simulación, las unidades del caudal para la simulación fueron LPS (Litros/segundo) y el coeficiente de pérdida asignado fue de Hazen-Williams como se puede apreciar en la figura 21.

Opciones de Hidráulica

| Propiedad | Valor |
|------------------------|-----------|
| Unidades de Caudal | LPS |
| Ecuación de Pérdidas | H-W |
| Peso Específico | 1 |
| Viscosidad Relativa | 1 |
| Iteraciones Máx. | 40 |
| Precisión | 0.001 |
| Sistema no equilibrado | Continuar |
| Patrón predeterminado | PDM |

Figura 21. Opciones de cálculo en Epanet.
Fuente: Elaboración propia.

d. Asignación del patrón de demanda

Los programas computacionales idealizan la variación del consumo doméstico a lo largo del día a través de la curva de variación horaria (Arreguín et al., 2010). Acurio & Priori (2021) realizaron las mediciones del caudal inyectado desde el tanque principal, mediante la medición de los niveles de agua en el tanque, esto permitió observar las costumbres de los usuarios en el consumo del agua. Con esta curva de variación horaria se realizó el análisis en periodo extendido. La figura 22 indica la asignación del patrón de demanda a todos los nodos en Epanet.

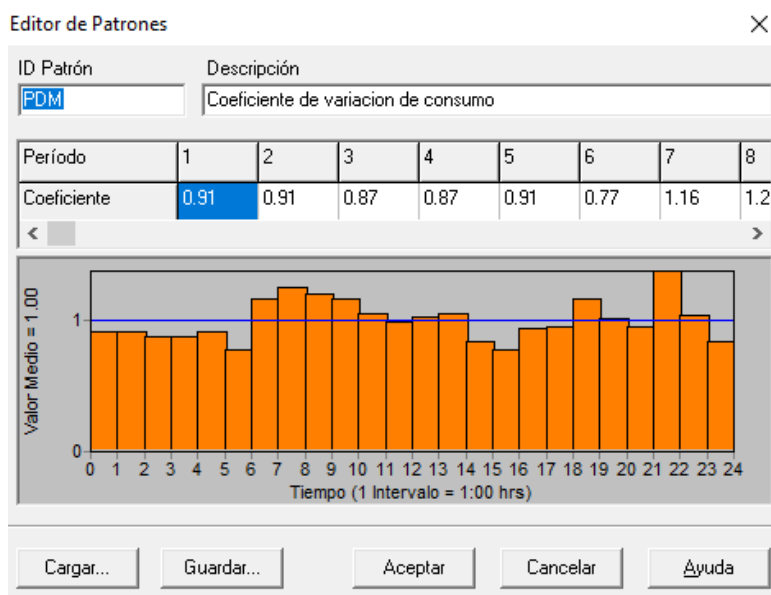


Figura 22. Asignación del patrón de demanda a los nodos en Epanet.
Fuente: Acurio & Priori (2021).

e. Calibración del modelo hidráulico

Un programa computacional de simulación hidráulica no obtiene un modelo matemático preciso de la realidad del sistema, el software simplemente resuelve las ecuaciones de continuidad y energía, por lo que es muy importante calibrar el modelo antes de utilizarlo para la toma de decisiones (Walski et al., 2003). La calibración permite ajustar los parámetros físicos de la red de tal forma que las presiones observadas en campo sean semejantes a las obtenidas en el modelo.

El proceso de calibración presenta una gran cantidad de variables que necesitan ser evaluadas, entre las cuales están: las demandas, rugosidades, estado de las válvulas, funcionamiento de las bombas, entre otras. Esta problemática ha sido enfrentada con diversas metodologías no exactas, dentro de las cuales se encuentran las técnicas de optimización, programación dinámica, inteligencia artificial y el método de ensayo y error (Leal, 2003).

Epanet es un programa muy potente para el análisis de las redes de distribución de agua, sin embargo, en la fase de calibración no cuenta con herramientas que agilicen la estimación de parámetros de la red, haciendo un proceso lento en cuanto a la calibración del modelo (Leal, 2003). En el presente estudio, para calibrar la RDAP Bayas se realizó un algoritmo, en el cual se obtuvieron los valores de demandas, rugosidades, cotas y consigan de las VRP adecuadas, de tal forma que minimice el error entre las presiones calculadas en el modelo y las observadas en campo.

Se realizó una campaña de mediciones de las presiones en un 8.7 % de los nodos totales (30 nodos) del modelo (anexo K). Para poder cuantificar la eficiencia de la calibración se utilizó el índice de Nash-Sutcliffe (E) (ecuación 7) y el error medio normalizado (RSR) (ecuación 8). En la tabla 7 se presenta el nivel de rendimiento del proceso de calibración según los valores de E y RSR.

Tabla 7. Nivel de rendimiento en función de RSR y el índice E.

| Nivel de rendimiento | RSR | E |
|------------------------|---------------|-------------|
| Muy bueno | 0.00<RSR<0.50 | 0.75<E<1.00 |
| Bueno | 0.50<RSR<0.60 | 0.65<E<0.75 |
| Satisfactorio | 0.60<RSR<0.70 | 0.50<E<0.65 |
| Insatisfactorio | RSR>0.70 | E<0.5 |

Fuente: Elaborado a partir de Moriasi et al. (2007).

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2} \quad (7)$$

Donde: Y_i^{obs} , es el dato observado en el tiempo t ; Y_i^{sim} , es el dato calculado en el tiempo t ; Y_i^{mean} , es el valor medio de los datos observados; n , es el número de intervalos temporales.

$$RSR = \frac{RMSE^{sim}}{STDEV^{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{mean})^2}} \quad (8)$$

Donde: $RMSE^{sim}$, es la raíz del error cuadrático medio; $STDEV^{obs}$, es la desviación estándar.

El RSR varía desde el valor óptimo de 0, que indica una simulación perfecta del modelo hasta un valor muy grande; E varía entre $-\infty$ y 1, siendo el 1 el valor más óptimo, los valores entre 0 y 1 generalmente se consideran niveles aceptables de rendimiento, mientras que un valor negativo indica un rendimiento inaceptable (Moriasi et al., 2007). Para la validación del modelo se tuvo que medir puntos distintos a los usados para la calibración, de la misma forma se calculó el índice de Nash-Sutcliffe (E) y el error medio normalizado (RSR).

f. Diagnóstico del estado actual y con el funcionamiento del nuevo tanque

CONAGUA (2016a) indica que para evaluar el rendimiento hidráulico de una red de distribución es necesario determinar las cargas de presión en los nodos que la conforman y las velocidades a través de las tuberías.

Con la red ya en Epanet se realizó la primera simulación y el diagnóstico de la red en el estado actual, también se obtuvieron los resultados de la simulación incluyendo el nuevo tanque de almacenamiento.

El nuevo tanque tiene forma rectangular, los datos de entrada para la simulación del tanque en Epanet son: nivel inicial, mínimo y máximo, y el diámetro. Se calculó un diámetro equivalente aplicando la ecuación 9.

$$D_e = \sqrt{\frac{4}{\pi} (L_x L_y - 6hb)} \quad (9)$$

Donde: D_e , es el diámetro equivalente; L_x y L_y , son las dimensiones en planta del tanque; h y b , son las dimensiones de la sección de la columna. En la figura 23 se muestra la

configuración en Epanet de los datos del nuevo tanque de almacenamiento, se asigna una cota de 2789.2 msnm (metros sobre el nivel del mar), un nivel inicial de 1 m, un nivel mínimo de 0.5 m, un nivel máximo de 2.59 m y un diámetro de 14 m.

| Propiedad | Valor |
|----------------|--------|
| Descripción | |
| Etiqueta | |
| *Cota | 2789.2 |
| *Nivel Inicial | 1 |
| *Nivel Mínimo | 0.5 |
| *Nivel Máximo | 2.59 |
| *Diámetro | 14 |
| Volumen Mínimo | |

Figura 23. Configuración de datos del depósito.
Fuente: Elaboración propia.

Con la red actualizada se realizó la simulación hidráulica en Epanet, la cual calcula las alturas piezométricas en los nodos y caudal en las tuberías, según las alturas iniciales de los embalses, depósitos y las demandas en los diferentes tiempos, con base el patrón de demanda aplicado a los nodos (Rossman, 2000). Para obtener estos caudales y alturas piezométricas se resuelve simultáneamente las ecuaciones de conservación de masa en cada nodo y las ecuaciones de pérdida en las tuberías, es un proceso iterativo y se lo conoce como “Equilibrio Hidráulico”.

3.3.3 Indicadores de rendimiento técnico (IRT) para las RDAP

El rendimiento óptimo de una red de distribución de agua potable se basa en la entrega a los usuarios de una cierta cantidad de agua demandada bajo una presión y un nivel de calidad aceptables (Tabesh & Dolatkahi, 2006). Existen herramientas que permiten evaluar el rendimiento técnico de los sistemas de agua potable a partir de determinados parámetros.

Este trabajo se centra en la evaluación de los aspectos del comportamiento hidráulico de las RDAP, para lo cual, Alegre & Coelho (1992, 1995) y Coelho (1997) han propuesto Indicadores de Rendimiento Técnico (IRT). Estos indicadores se han utilizado en otras áreas de investigación, tales como: sistemas de alcantarillado urbano, evaluación del desempeño operativo de plantas de tratamiento de agua, evaluación del rendimiento de calidad de las

redes de distribución de agua, entre otros (Muranho et al., 2014). En una RDAP, el uso de estos indicadores permite evaluar el rendimiento técnico en términos de presión nodal, velocidad, pérdidas de agua, confiabilidad, costos de bombeo y calidad del agua. La evaluación del rendimiento técnico emplea valores de desempeño que van desde 0 % (sin servicio) hasta 100 % (servicio óptimo) (Naamani & Sana, 2021).

Se evaluó el rendimiento técnico de la presión y velocidad con base a los criterios Naamani & Sana (2021), que propone puntuaciones vinculadas a una evaluación subjetiva del desempeño del sistema de distribución. En la tabla 8 se presenta el nivel de rendimiento de la red en función del IRT.

Tabla 8. Nivel de rendimiento en función del IRT.

| IRT (%) | Nivel de rendimiento |
|----------------|-----------------------------|
| 0 | sin servicio |
| 25 | servicio inaceptable |
| 50 | servicio regular |
| 75 | servicio bueno |
| 100 | servicio optimo |

Fuente: Elaborado a partir de Naamani & Sana (2021).

De acuerdo con (Coelho, 1997), la evaluación del rendimiento se fundamenta en tres aspectos que se especifican a continuación:

1. Variable de estado: está asociada a un aspecto particular como la presión, velocidad, calidad del agua, etc.
2. Curva de penalización o rendimiento: en función de la característica de análisis pretende identificar la importancia relativa del valor de la variable de estado. Las curvas de penalización se trazan con base de las investigaciones de expertos.

Muranho et al. (2014) presenta dos ejemplos de curvas de penalización, una para la presión nodal y otra para la velocidad. La función de la curva de penalización de la presión es evidenciar que las presiones de servicio cercanas al mínimo requerido son preferibles debido a que representan un nivel bajo de energía y de pérdidas; de la misma forma, en la curva de penalización de la velocidad se pretende mostrar que los valores indeseables están por encima de los máximos recomendados debido a que

generan mayor desgaste en las tuberías, pérdidas de carga y ruidos internos de las tuberías.

La figura 24 muestra las curvas de penalización para las variables de estado de presión nodal y velocidad en las tuberías. Los valores límite (mínimo y máximo) de presión de servicio y velocidad para el presente estudio se han establecido conforme al CPE INEN 5 (1992) y las guías del CEPIS (2005).

3. Operador de generalización: produce un rendimiento global a partir de la combinación de los rendimientos individuales.

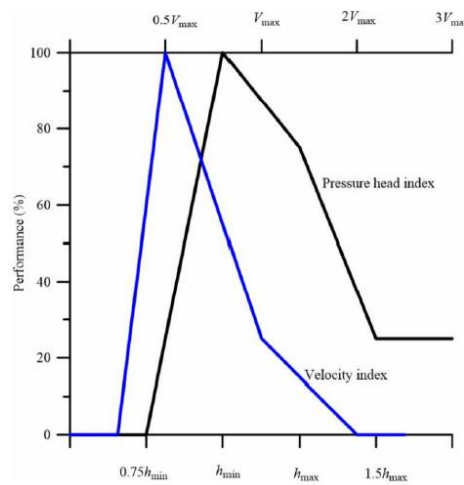


Figura 24. Curvas de penalización para las variables de presión nodal y velocidad.
Fuente: Muranho et al. (2014).

Los índices de rendimiento técnico totales se calcularon utilizando el operador de generalización de la variable en análisis. El índice de rendimiento total para la presión (IRT_{pres}) y para la velocidad (IRT_{vel}) se calcularon mediante las ecuaciones 10 y 11 considerando los criterios de Muranho et al. (2014) y Zischg et al. (2017):

$$IRT_i = \begin{cases} 0, & p_i < p_{min} \\ 1, & p_{min} \leq p_i \leq p_{max} \\ 1 - \frac{p_i - p_{max}}{p_{max} - p_{min}}, & p_{max} < p_i \leq 100 \\ 0, & p_i > 100 \end{cases}$$

$$IRT_{pres} = \frac{\sum_{i=1}^{NN} Q_i IRT_i}{\sum_{i=1}^{NN} Q_i} \tag{10}$$

$$IRT_i = \begin{cases} 0, & v_i < v_{min} \\ \frac{v_i - v_{min}}{v_{mean} - v_{min}}, & v_{min} \leq v_i \leq v_{mean} \\ \frac{v_i - v_{max}}{v_{mean} - v_{max}}, & v_{mean} < v_i \leq v_{max} \\ 0, & v_i > v_{max} \end{cases}$$

$$IRT_{vel} = \frac{\sum_{i=1}^{NP} Q_i IRT_i}{\sum_{i=1}^{NP} Q_i} \quad (11)$$

Donde: p_i , es la presión en metros de columna de agua del nodo i ; NN , es el número de nodos del sistema; Q_i , es la demanda nodal; p_{min} , es la presión mínima en metros de columna de agua según los estándares ecuatorianos; p_{max} , es la presión máxima en metros de columna de agua según los estándares ecuatorianos; v_i , es la velocidad de flujo en m/s en la tubería i ; v_{mean} , es la velocidad media en la tubería i ; NP , es el número de tuberías del sistema; Q_i , es la demanda de agua que circula por la tubería i ; v_{min} , es la velocidad mínima de flujo en las tuberías en m/s en referencia a las guías del CEPIS; v_{max} , es la velocidad máxima de flujo en las tuberías en m/s en referencia a las guías del CEPIS.

3.4 Programación con la Toolkit de Epanet

Los expertos en el manejo de Epanet requieren una herramienta que les permita simular de forma rápida, modificar elementos de forma sencilla y obtener resultados personalizados. Con esto nace la Toolkit de Epanet, que es un conjunto de herramientas y funciones que permite conectar el potente algoritmo de cálculo de Epanet con las demás herramientas de programación.

El Toolkit contiene la librería dinámica API (Application Programming Interface) con extensión .dll que permite a los usuarios personalizar el módulo de cálculo de Epanet de acuerdo a sus necesidades particulares (Vegas et al., 2017). La librería dinámica resulta útil para efectuar múltiples análisis de los parámetros de entrada de un proceso iterativo, por ejemplo, el cambio de rugosidades y demandas para la calibración automática y el cambio de diámetros para la optimización. Esta librería presenta 55 funciones que se detallan en la tabla 9.

Tabla 9. Funciones de la Toolkit de Epanet agrupado por tareas.

| Tarea | Funciones | |
|---|--|---|
| Ejecutar una simulación completa en una sola línea de comandos | ENepanet | |
| Abrir y cerrar la librería dinámica de Epanet | ENopen | ENclose |
| Recuperar información acerca de los nodos de la red | ENgetnodeindex ENgetnodeid | ENgetnodetype ENgetnodevalue |
| Recuperar información acerca de las líneas de la red | ENgetlinkindex ENgetlinkvalue ENgetlinktype | ENgetlinknodes ENgetlinkid |
| Recuperar información de las curvas de modulación | ENgetpatternid ENgetpatternindex | ENgetpatternlen ENgetpatternvalue |
| Obtener otra información de la red | ENgetcontrol ENgetqualtype ENgetoption ENgetversion | ENgetcount ENgetflowunits ENgettimeparam |
| Establecer nuevos valores para los parámetros de red | ENsetcontrol ENsetnodevalue ENsetlinkvalue ENaddpattern ENsetpattern | ENserpatternvalue ENsetqualtype ENsettimeparam ENsetoption |
| Guardar y utilizar ficheros de resultados de análisis hidráulico | ENsavehydfile | ENusehyfile |
| Ejecutar un análisis hidráulico | ENSolveH ENopenH ENinitH | ENrunH ENnextH ENcloseH |
| Ejecutar un análisis de calidad del agua | ENSolveQ ENopenQ ENinitQ ENrunQ | ENnextQ ENstepQ ENcloseQ |
| Generar un informe de salida | ENsaveH ENsaveinfile ENreport ENresetreport | ENsetreport ENsetstatusreport ENgeterror ENwriteline |

Fuente: Vegas et al. (2017).

Vegas et al. (2017), dan a conocer algunos usos de la librería dinámica API:

- Abrir y cerrar el módulo de herramientas.
- Recuperar y fijar los parámetros de la red.
- Ejecutar una simulación hidráulica.
- Ejecutar una simulación de la calidad del agua.
- Recuperar los resultados del cálculo.
- Generar un informe de resultados.

La figura 25 muestra los lenguajes de programación más usados para trabajar con la Toolkit de Epanet. La última versión de la librería de enlace dinámico fue lanzada en marzo del 2008. La declaración de las variables y funciones para obtener información o modificar los parámetros de la red depende del lenguaje de programación a utilizar.

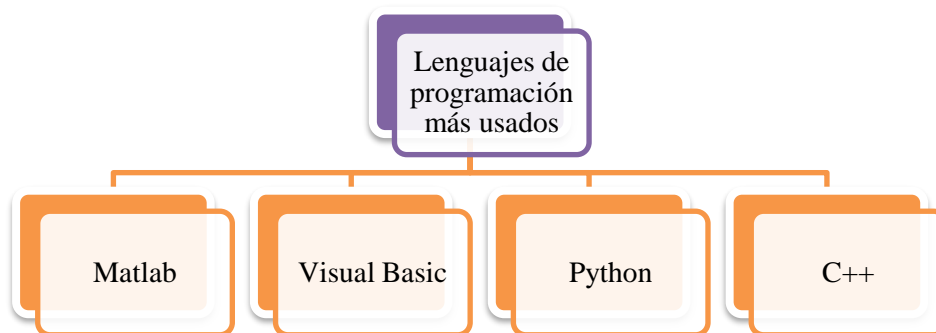


Figura 25. Lenguajes de programación para trabajar con Toolkit de Epanet.
Fuente: Elaborado a partir de Delgado (2023).

3.4.1 Python

Desde 1950 se han ido creando diversos lenguajes de programación, con una gran variedad de funcionalidades para cubrir las necesidades del desarrollo de aplicaciones. En los inicios de 1990 aparece el lenguaje de programación Python, el cual, en la actualidad, llega a ser considerado como el lenguaje de más alto nivel en el sentido de que sus instrucciones son más sencillas y entendibles por los programadores. Se trata de un lenguaje de programación de propósito general, siendo aplicable en todos los campos científico-tecnológicos (Delgado, 2023). En la figura 26, se presenta algunas de las empresas que usan el lenguaje de programación Python para mejorar sus sistemas de información.



Figura 26. Grandes empresas que utilizan Python.
Fuente: Delgado (2023).

Según el índice de la comunidad de programación TIOBE (2023), que es un indicador de la popularidad de los lenguajes de programación, Python ocupa el primer lugar, como podemos apreciar en la figura 27. Este índice se actualiza cada mes y toma en cuenta la frecuencia con la que se busca algún lenguaje en Internet.

| Feb 2023 | Feb 2022 | Change | Programming Language | Ratings | Change |
|----------|----------|--------|----------------------|---------|--------|
| 1 | 1 | | Python | 15.49% | +0.16% |
| 2 | 2 | | C | 15.39% | +1.31% |
| 3 | 4 | ▲ | C++ | 13.94% | +5.93% |
| 4 | 3 | ▼ | Java | 13.21% | +1.07% |
| 5 | 5 | | C# | 6.38% | +1.01% |

Figura 27. Índice TIOBE 2022 y 2023.
Fuente: TIOBE (2023).

Gracias a la variedad de librerías que se puede instalar en Python, este lenguaje de programación puede incorporar el módulo de cálculo de Epanet a través de la librería EPANETTOOLS. La descarga de este lenguaje de programación se puede realizar desde la página oficial de Python, donde se encuentran todas sus versiones lanzadas hasta la fecha, tal cómo se muestra en la figura 28.

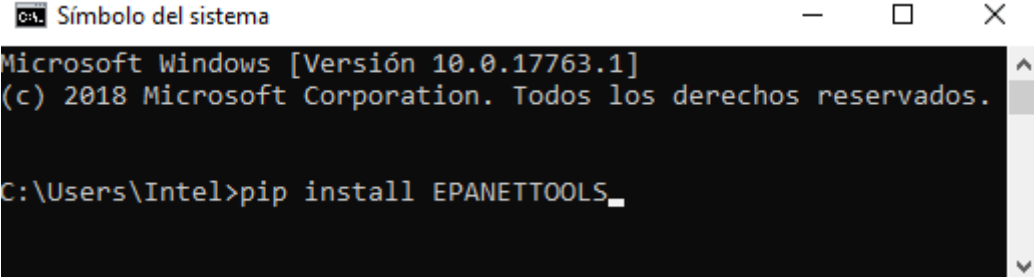
| Release version | Release date | |
|-------------------------------|---------------|--------------------------|
| Python 3.11.1 | Dec. 6, 2022 | Download |
| Python 3.10.9 | Dec. 6, 2022 | Download |
| Python 3.9.16 | Dec. 6, 2022 | Download |
| Python 3.8.16 | Dec. 6, 2022 | Download |
| Python 3.7.16 | Dec. 6, 2022 | Download |
| Python 3.11.0 | Oct. 24, 2022 | Download |
| Python 3.9.15 | Oct. 11, 2022 | Download |

Figura 28. Lanzamientos de Python por número de versión
Fuente: Python Software Foundation

3.4.2 EPANETTOOLS

EPANETTOOLS 1.0.0 es un módulo preparado para usar las capacidades informáticas de Epanet en Python, para esto hace uso de la Toolkit de Epanet (Peñaloza, 2020).

Una vez que se tuvo Python en el ordenador, se instaló esta librería en el cmd para poder analizar el modelo hidráulico de Epanet con extensión (.inp), se debe escribir en la consola *pip install EPANETTOOLS*, tal como se muestra en la figura 29. Es importante mencionar que EPANETTOOLS es compatible con la versión 3.7 de Python.



```
Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 10.0.17763.1]
(c) 2018 Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Users\Intel>pip install EPANETTOOLS_
```

Figura 29. Instalación de EPANETTOOLS en el cmd.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.3 Lectura de datos

Con la instalación de la librería EPANETTOOLS, Python permitió leer las características de las tuberías, embalses, nodos, bombas, válvulas y tanques. La ubicación del archivo en formato (.inp) debe estar en la misma carpeta donde se encuentra el código Python. La figura 30 muestra las líneas de código necesarios para poder leer la red de Epanet.


```
#importamos las librerías necesarias para el análisis del modelo matemático
from epanettools.epanettools import EPANetSimulation, Node, Link, Network
#Cargamos la red de Bayas
file='RED BAYAS.inp'
es= EPANetSimulation(file)
```

Figura 30. Código de lectura de la red.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.4 Definición de variables y parámetros

Antes de la simulación, es importante establecer las variables que se analizarán. Se definieron los nodos y tuberías como las más relevantes. De estas se obtuvo información de rugosidades, demandas, cotas, longitudes y, posteriormente, se encontró el caudal, velocidad y presión. En la figura 31 se presenta las líneas de código necesarios para la declaración de variables.

```
#Variables Nodos y tuberías
nodos = es.network.nodes
tuberias = es.network.links
#Características de la red
rugosidades = Link.value_type['EN_ROUGHNESS'] #PVC
diametros = Link.value_type['EN_DIAMETER'] #mm
elevaciones = Node.value_type['EN_ELEVATION'] #msnm
longitudes=Link.value_type['EN_LENGTH'] #m
demanda=Node.value_type['EN_DEMAND'] #L/s
#Resultados de la simulación
velocidades=Link.value_type['EN_VELOCITY'] #m/s
presiones=Node.value_type['EN_PRESSURE'] #mca
caudales=Link.value_type['EN_FLOW'] #L/s
```

Figura 31. Definición de variables.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.5 Correr Epanet en Python

Se empleó la función *run ()* para ejecutar la simulación hidráulica, y una vez completada, se pudieron obtener los resultados de caudal, velocidad y presión. En la figura 32 se presenta

las líneas de código para la obtener los resultados de presión en los nodos; velocidad y caudal en las tuberías. Se almacenaron estos datos en un vector para su posterior análisis y comparación en caso de que se modifiquen algunos parámetros de la red y se obtengan nuevos resultados.

```
#Run Epanet
es.run()
presion_cal=[]
velocidad_cal=[]
caudal_cal=[]
for id in range(0,len(nodos)):
    if nodos[id+1].node_type==0:#El id de Epanet comienza en 1
        print(nodos[id+1].id,"=",round(nodos[id+1].results[presiones][0],2),"mca")
        presion_cal.append(round(nodos[id+1].results[presiones][0],2))
    for id in range(0,len(tuberias)):
        if tuberias[id+1].link_type==1:#El id de Epanet comienza en 1
            velocidad_cal.append(round(tuberias[id+1].results[velocidades][0],2))
            caudal_cal.append(round(tuberias[id+1].results[caudales][0],2))
    for id in range(0,len(caudal_cal)):
        print("vel=",velocidad_cal[id],"m/s", "Caudal=",caudal_cal[id],"L/s")
```

Figura 32. Obtención de resultados en Python.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.6 Cambio de las características de la red

El cambio de rugosidad, longitud y diámetro de las tuberías se realizó con la función `ENsetlinkvalue`. Para que estos cambios sean permanentes y se guarde en un nuevo archivo. `inp` fue necesario importar las librerías `tempfile` y `os` a Python.

`ENsetlinkvalue` presenta tres datos de entrada: el primero es el id de la tubería; el segundo la variable hidráulica a efectuar el cambio, que puede ser la rugosidad, diámetro, longitud, etc.; en el último dato de entrada se encuentra el nuevo valor de la característica de la tubería. La figura 33 muestra un ejemplo de la aplicación de esta función, en este ejemplo se modificó el diámetro de la tubería con id "6", el nuevo diámetro asignado a esta tubería fue de 63 mm, en la penúltima línea de código se imprime el nuevo valor del diámetro y en la última línea de código se imprime el diámetro antes de realizar en cambio.

```
r=es.ENsetlinkvalue(6,diametros,63)
f=os.path.join('modificado.inp')
es.ENsaveinpfile(f)
es2=EPANetSimulation(f)
print(tuberias[6].id,"Cambio",es2.network.links[6].results[diametros][0])
print(tuberias[6].id,"Antes",es.network.links[6].results[diametros][0])
```

Figura 33. Ejemplo de cambio de diámetro en la red.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.7 Algoritmo de optimización

La programación en Python de las herramientas de simulación hidráulica, el almacenamiento de los resultados en un vector, la modificación de las características de los elementos de la red y la realización de la simulación hidráulica dentro de un bucle, son poderosas herramientas para el diagnóstico y optimización de las redes de distribución de agua potable. Además, gracias a la librería de matplotlib de Python se pueden generar gráficos personalizados para un mejor análisis de los datos.

En los últimos años, existe un gran número de investigadores que trabajan en la elaboración de algoritmos para el diseño y optimización de redes de distribución, considerando no solo los factores hidráulicos sino también factores económicos. El algoritmo desarrollado y aplicado a la zona de estudio, tiene como objetivo, seleccionar un conjunto de diámetros de manera que las presiones y velocidades cumplan en la mayoría de los casos los límites permisibles y, sobre todo, que la selección de estos diámetros sea la más económica.

3.4.8 Penalización y restricciones

La elección del diámetro óptimo se realizó con base a las restricciones y penalizaciones que fueron incluidas en la función costo. Peñaloza (2020) utilizó las ecuaciones 12, 13, 14 para evaluar la función objetivo.

a. Penalización por velocidad

si $v_i < v_{min}$

$$PVi = (v_{min} - v_i) * 1000000$$

si $v_i > v_{max}$

$$PVi = (v_i - v_{max}) * 1000000$$

si $v_{min} \leq v_i \leq v_{max}$

$$PVi = 0$$

La figura 34 muestra las líneas de código en Python para la penalización por velocidad, la cual será cero cuando las velocidades calculadas con un diámetro comercial se encuentren dentro de los límites máximos y mínimos permisibles, a medida que se alejen de estos límites, las penalizaciones serán más grandes.

```

for id in range (1,len(cant_link)+1):
    if (es.ENgetlinkvalue(id,velocidades)[1]) < vmin:
        pen_vel = (vmin-(es.ENgetlinkvalue(id,velocidades)[1]))*100000000
    elif (es.ENgetlinkvalue(id,velocidades)[1]) > vmax:
        pen_vel = ((es.ENgetlinkvalue(id,velocidades)[1])-vmax)*100000000
    else:
        pen_vel = 0
    PEN2.append(pen_vel)
PV=np.sum(PEN2)

```

Figura 34. Algoritmo de penalización por velocidad.
Fuente: Elaborado a partir de Peñaloza (2020).

La penalización total por velocidad fue calculada con la ecuación 12.

$$PV = \sum_{i=1}^n PV_i \quad (12)$$

Donde: PV , es la penalización total por velocidad; n , es el número de tuberías en la red; PV_i , es la penalización por tubería.

b. Penalización por presión

si $p_i < p_{min}$

$$PP_i = (p_{min} - p_i) * 1000000$$

si $p_i > p_{max}$

$$PP_i = (p_i - p_{max}) * 1000000$$

si $p_{min} \leq p_i \leq p_{max}$

$$PP_i = 0$$

La figura 35 muestra las líneas de código en Python para la penalización por presión, esta tomará un valor de cero cuando las presiones calculadas con un diámetro comercial se encuentren dentro de los límites máximos y mínimos, a medida que se alejen de estos límites, las penalizaciones serán más grandes.

```

for id in range (1,len(cant_node)+1):
    if cant_node[id].node_type==0:
        if (es.ENgetnodevalue(id,presiones)[1]) < pmin:
            pen_pre = (pmin-(es.ENgetnodevalue(id,presiones)[1]))*100000000
        elif (es.ENgetnodevalue(id,presiones)[1]) > pmax:
            pen_pre = ((es.ENgetnodevalue(id,presiones)[1])-pmax)*100000000
        else:
            pen_pre = 0
        PEN1.append(pen_pre)
PP=np.sum(PEN1)

```

Figura 35. Algoritmo de penalización por presión.
Fuente: Elaborado a partir de Peñaloza (2020).

La penalización total por presión fue calculada con la ecuación 13.

$$PP = \sum_{i=1}^N PPi \quad (13)$$

Donde: PP , es la penalización total por presión; N , es el número de nodos en la red; PPi , es la penalización por nodo.

Las penalizaciones individuales en los nodos y tuberías se multiplicaron por un número grande para que tengan una gran influencia al momento de descartar los diámetros comerciales que no sean apropiados para la optimización.

c. Costo mínimo

Se evaluaron las penalizaciones de presión y velocidad junto con la ecuación de costo. Los costos asociados a las redes de distribución incluyen el suministro y el montaje de tuberías. Para poder evaluar el costo de la red, fue necesario una ecuación que relacione la longitud de las tuberías y los diámetros.

La función de costo está dada por la ecuación 14.

$$CT = \sum_{i=1}^n aL_i D_i^b ; 1 \leq b \leq 2 \quad (14)$$

Donde: CT , es el costo total de la red; L_i , es la longitud de cada tubería; D_i , es el diámetro de cada tubería; a y b , son constantes obtenidas de una regresión potencial; n , es el número de tuberías en la red.

Para la zona de estudio se utilizó los precios unitarios del suministro e instalación de tuberías PVC, tal como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Precio, suministro e instalación tubería PVC por metro lineal

| Sum - Ins. Tubería PVC | |
|-------------------------|------------------------|
| Diámetro comercial (mm) | Precio Unitario (\$/m) |
| 20 | 1.16 |
| 25 | 1.31 |
| 32 | 1.76 |
| 40 | 2.06 |
| 50 | 2.88 |
| 63 | 3.28 |
| 90 | 5.83 |
| 110 | 8.78 |
| 160 | 18.71 |

Fuente: Elaboración propia.

Con cada diámetro comercial y su precio unitario se pudo obtener un conjunto de puntos, y aplicando la regresión potencial se obtuvo los coeficientes a y b, los valores de estos coeficientes y la curva de la función costo se muestra en la figura 36.

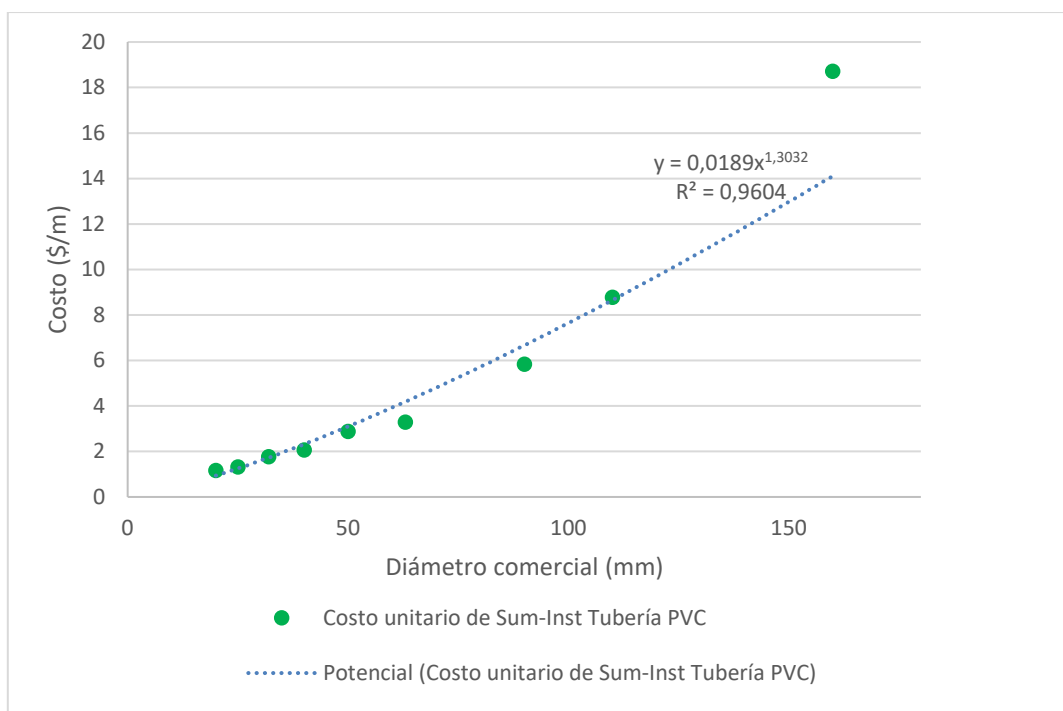


Figura 36. Curva de la función costo.
Fuente: Elaboración propia.

Se evaluó la función objetivo en Python a partir de la ecuación 15.

$$func = \sum_{i=1}^n 0.0189L_i D_i^{1.3032} + PP + PV \quad (15)$$

El diámetro comercial que minimice la función $func(DC)$ fue considerado como el diámetro óptimo. Donde DC , se refiere a los diámetros comerciales descritos en la tabla 10. La figura 37 muestra las líneas de código en Python para obtener la función costo y las penalizaciones por presión y velocidad.

```
for id in range (len(cant_link)):
    r=(es.ENsetlinkvalue((id+1),diametros,features[id]))
    f=os.path.join('parcial_modificada.inp')
    a=((es.ENgetlinkvalue(id+1,longitudes)[1])*(0.0189*(es.ENgetlinkvalue(id+1,diametros)[1])**1.3032))
    VA.append(a)
cost = np.sum(VA)
costo1=round(cost+PP+PV)
return costo1
```

Figura 37. Función costo en Python.
Fuente: Elaborado a partir de Peñaloza (2020).

En la figura 38, se presenta el diagrama de flujo del algoritmo de optimización cuyos pasos se describen a continuación:

- El primer paso consiste en la lectura de la red.
- El segundo paso consiste en asignar los datos de entrada, estos son los diámetros comerciales que deben ser ingresados dentro de un vector. Por otro lado, se tienen también los datos de presión y velocidad máximas y mínimas, los coeficientes de la regresión potencial, las tuberías de inicio y fin para realizar el análisis y como último dato de entrada está el valor del coeficiente de la variación de demanda, este coeficiente permitió realizar el análisis en cualquier hora del periodo extendido.
- El tercer paso consiste en correr Epanet, es decir realizar la simulación hidráulica.
- El cuarto paso consiste en el cálculo de la función objetivo con los diámetros originales.
- Como siguiente paso se tiene el cambio de diámetro de una tubería en particular por un diámetro comercial.
- El siguiente paso representa el cálculo de la función objetivo con el diámetro comercial y se realiza la evaluación respectiva. Si la función objetivo calculada con un diámetro comercial es menor que la calculada con el diámetro original se detiene la iteración caso contrario sigue buscando al diámetro óptimo.

- Cuando encuentra un diámetro óptimo, el diámetro es guardado en una nueva variable y finalmente se verifica si se analizó todas las tuberías, en caso de ser verdadero se imprime los mejores diámetros y se termina el algoritmo. Las modificaciones con los nuevos diámetros se quedan guardados automáticamente en un nuevo archivo con formato (.inp) gracias a la utilización de la función ENsaveinpfile.

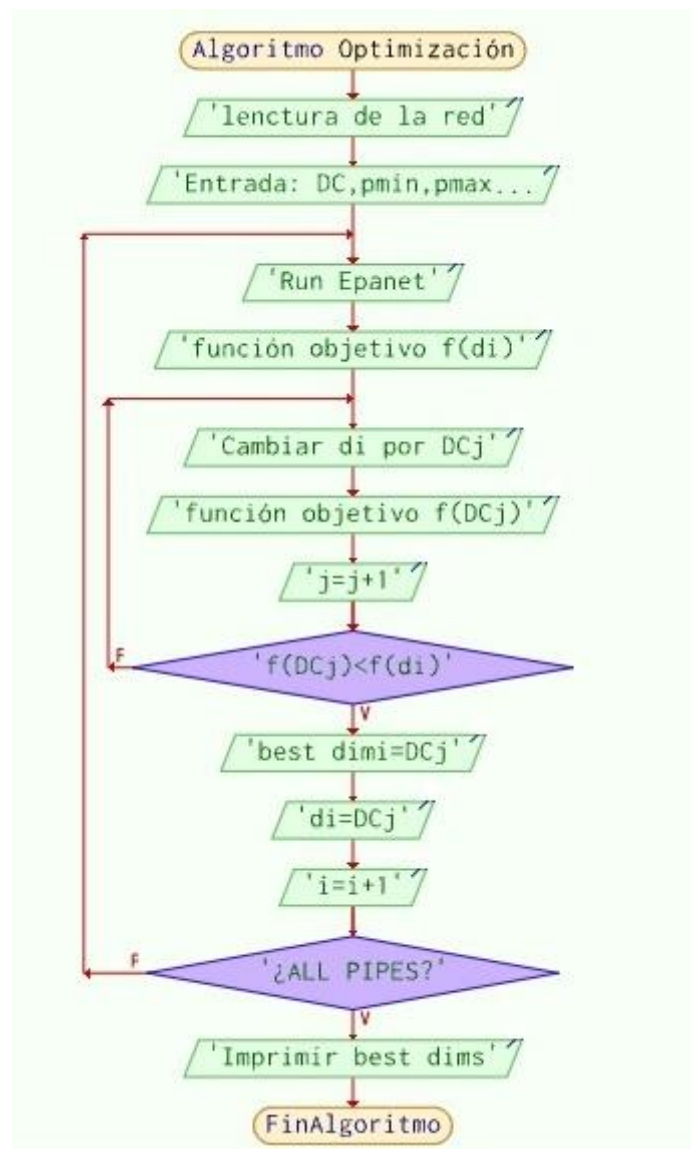


Figura 38. Diagrama de flujo: Algoritmo de optimización.
Fuente: Elaboración propia.

4. Resultados y contribución

4.1 Modelación matemática de la red de distribución

Los modelos hidráulicos de redes de distribución de agua potable se utilizan actualmente para planificar, diseñar y analizar la calidad del agua y el funcionamiento real de estos sistemas en los periodos más adversos, detectando anomalías y permitiendo plantear mejoras que optimicen el funcionamiento de la red y, por ende, la prestación de este servicio.

Los datos necesarios para elaborar un modelo matemático que simule el funcionamiento real de una RDAP incluyen: datos geométricos, datos hidráulicos y componentes de la red. Se cuenta con el respaldo de la JAAPRB para la transferencia de estos datos y la documentación necesaria para elaborar este trabajo.

La JAAPRB cuenta con un modelo matemático de la red de distribución, elaborado por Acurio & Priori (2021). Dicho modelo se encuentra desactualizado debido a las ampliaciones y mejoras realizadas en el Sector Oriente Bajo, así como también por la adecuación del nuevo tanque de almacenamiento, que entró en funcionamiento a partir del 06 de diciembre de 2022.

Para la elaboración de este trabajo se utilizó como base el modelo matemático creado en Epanet por Acurio & Priori (2021), el cual se actualizó con todos los cambios y mejoras de los componentes de la red de distribución efectuados hasta el momento.

Para la creación del modelo actualizado se usó el programa Epanet, en el cual se simulaban todos los elementos que conforman el sistema. Además, como herramienta auxiliar para la creación de bases de datos y elaboración de gráficos se empleó el programa Qgis 3.28.3, desarrollado por The Open Source Geospatial Foundation (OSGeo).

En este capítulo se describe el procedimiento seguido para elaborar el modelo matemático que simula la realidad de la RDAP de la parroquia Bayas.

4.1.1 Recopilación de la información de catastro y topografía disponible

Se tiene como base el modelo matemático de la RDAP Bayas realizado por Acurio & Priori (2021). Este archivo en formato (.inp) incluye el trazado de la red con sus elementos y características en tuberías tales como: longitud, diámetro y rugosidad; y en nodos, características como: demanda base, cotas y curva de modulación; además incluye válvulas, tanques y embalses con sus respectivas características de funcionamiento.

Fue necesario recopilar datos de la actualización del catastro de tuberías y accesorios de la RDAP Bayas, para lo cual se obtuvo información a partir de los documentos del proyecto:

“AMPLIACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE LA JUNTA ADMINISTRADORA DE AGUA POTABLE REGIONAL BAYAS EN LAS CALLES PADRE RAFAEL TAPIA, FAUSTO ANDRADE Y JOAQUÍN S. ASTUDILLO, PARROQUIA BAYAS CANTÓN AZOGUES”. La JAAPRB facilitó estos datos a través de los siguientes archivos:

- Memoria técnica del proyecto en formato PDF
- Presupuesto del proyecto en formato PDF
- Planos del proyecto en formato DWG
- Especificaciones técnicas del proyecto en formato PDF

Tras analizar la información facilitada por la JAAPRB, se constató que las ampliaciones realizadas comprenden la inclusión de dos tramos; el primero con una longitud de 1148.80 m y el segundo con una longitud de 1087.50 m, los dos tramos tienen tubería de 63 mm de diámetro de tipo PVC-U/E. Por último, esta ampliación incluía la incorporación de una válvula de regulación y un hidrante. En el anexo J se encuentra el plano que contiene todas las actualizaciones efectuadas en el proyecto antes mencionado.

a. Características del nuevo tanque

La JAAPRB, con el objetivo de mejorar el servicio prestado a la parroquia, ha considerado la necesidad de reutilizar un filtro lento que no se usaba para convertirlo en un nuevo tanque de reserva que se suma a la RDAP existente. Este empezó a funcionar el 06 de diciembre de 2022.

Es importante señalar que la Junta no dispone de planos de este nuevo tanque y la información recopilada acerca del mismo se detalla en la tabla 11.

Tabla 11. Características del nuevo tanque de almacenamiento

| Fecha | Sector | Parroquia | Cantón |
|-----------------------------------|-----------|---------------|----------------|
| 08/11/2022 | Mahuarcay | Aurelio Bayas | Azogues |
| Características del tanque | | | |
| Horas de operación | | | 24 |
| Días por semana | | | 7 |
| Nº Columnas centrales | | | 6 |
| Dimensión Columna | | | 30x30cm |
| Capacidad | | | |
| Volumen (m³) | | | 400 |
| Dimensión Lx (m) | | | 12.4 |
| Dimensión Ly (m) | | | 12.47 |
| Elevación máxima (m) | | | 2.93 |
| Bordo libre rebose (cm) | | | 34 |
| Cota fondo (msnm) | | | 2789.2 |
| Tubería de llegada | | | |
| Diámetro | | | ∅ 160mm, e=4mm |
| Longitud (m) | | | 5.94 |
| Material | | | PVC |
| Tubería de salida | | | |
| Rebose (mm) | | | 110 |
| D1 (mm) | | | 160 |
| D2 (mm) | | | 110 |
| Limpieza (mm) | | | 200 |
| Material | | | PVC |



Fotografías

Fuente: Elaboración propia.

b. Características de la red de distribución de agua potable Bayas

Aproximadamente, 42071 habitantes de Azogues reciben agua potable de la red pública municipal, el resto de la población recibe agua de las juntas regionales de agua potable de cada comunidad.

La gestión, administración y funcionamiento de la RDAP Bayas está a cargo de la JAAPRB. Esta es una red mixta tipo abierta que cuenta con partes ramificadas y malladas, abastecida por dos tanques principal de 200 m³ y 400 m³ respectivamente, que se encuentra en el sector Mahuarcay cerca de la planta de tratamiento, y dos tanques secundarios ubicados en el sector Señor de Flores con capacidad de 200 y 150 m³ respectivamente. Todas las tuberías son de tipo PVC. Los diámetros nominales de la red son de 20, 25, 32, 40, 50, 63 mm mientras que las líneas de conducción principales presentan diámetros nominales de 50, 110 y 160 mm, en la figura 39 se presenta el porcentaje de tuberías en la red con cada uno de estos diámetros. La longitud total de la red es de, 31045.456 metros. Existen 49 válvulas, de las cuales 11 son válvulas reductoras de presión (VRP) y el resto son válvulas de regulación (VRG).

La red distribuye agua en la zona urbana y rural de la parroquia Bayas. Actualmente, 1305 usuarios (5481 personas) se benefician de este servicio, consumiendo en total un caudal promedio de 6.88 L/s, este caudal fue obtenido a partir de los datos de micromedición, la cual no considera las pérdidas en el sistema, actualmente la planta trata en promedio 15 L/s, con la diferencia de la cantidad de agua producido por la planta y el agua consumido se puede notar que existe una gran cantidad de agua no contabilizada.

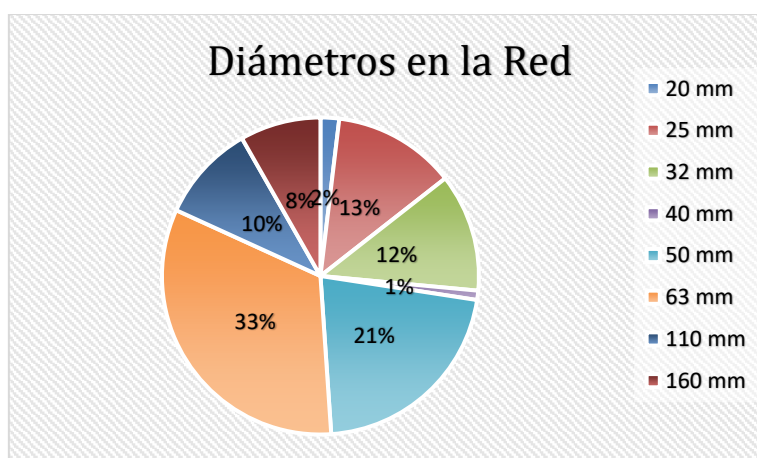


Figura 39. Diámetros nominales que existen en la red.
Fuente: Elaboración propia.

El abastecimiento de agua potable se realiza en un total de ocho sectores debidamente delimitados, a partir de las tuberías principales de la red y los límites urbanos de la parroquia. Como se muestra en la figura 40, los sectores se encuentran distribuidos y controlados con válvulas VRG, en esta y en las siguientes figuras que representen la red con sus respectivos componentes es importante señalar que los números entre corchetes hacen referencia al

número de tanques, tuberías conectadas entre dos nodos, válvulas o cualquier otro componente de la red que se indique con la simbología escogida.

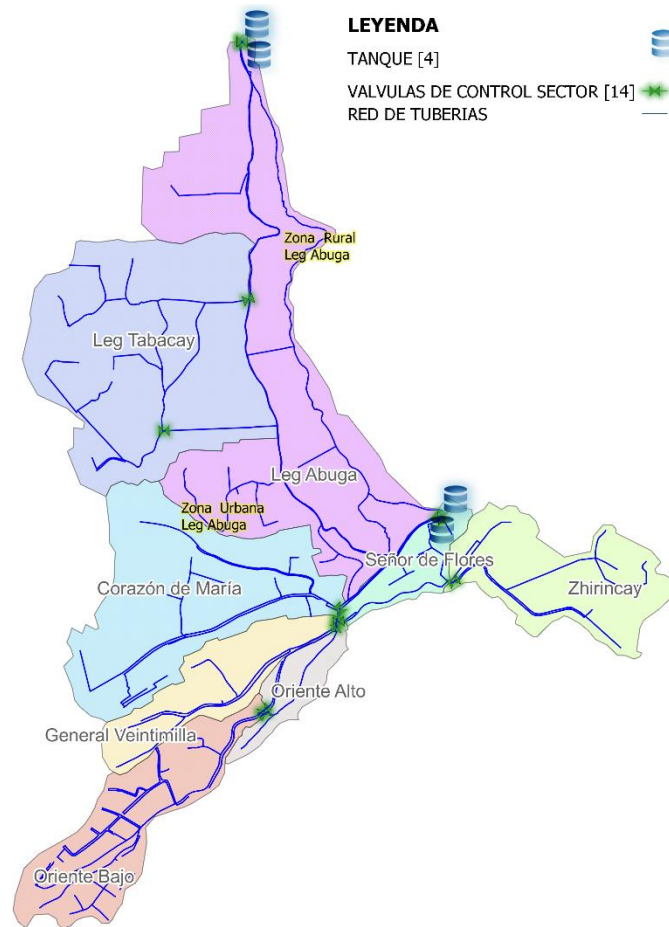


Figura 40. División de la RDAP Bayas por sectores.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Esquematización de la red

En términos simplificados, la conformación de la RDAP Bayas se compone de una estructura de tuberías, válvulas y tanques. A continuación, en la figura 41 se presenta un esquema que contiene los principales elementos de la red.

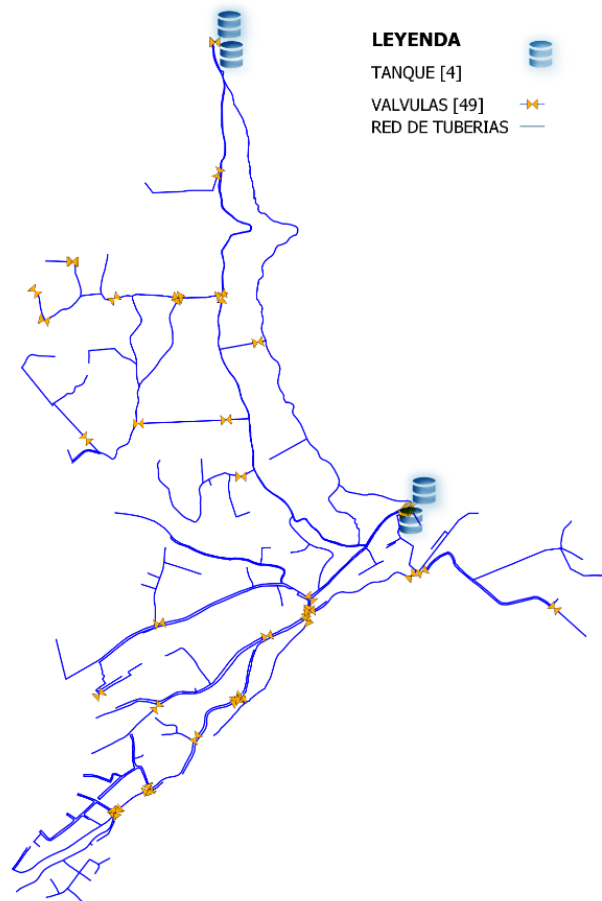


Figura 41. Esquema de la RDAP Bayas.
Fuente: Elaboración propia.

a. Embalses-tanques de almacenamiento

La RDAP Bayas está conformada por un total de cuatro tanques de almacenamiento, dos de los cuales se encuentran ubicados junto a la Planta de Tratamiento. Uno de ellos distribuye al Sector Leg Tabacay y la zona urbana del Sector Leg Abuga; el otro tanque suministra agua en la zona rural del Sector Leg Abuga y se conecta con los dos tanques ubicados en Señor de Flores. Estos últimos distribuyen a los sectores restantes. Los cuatro tanques están provistos de una valla perimetral que favorece la protección de estos.

El nuevo tanque situado junto a la Planta de Tratamiento tiene una sección rectangular, mientras que los otros tienen una sección circular; a continuación, en la tabla 12 se detallan otras características de cada uno.

Tabla 12. Características de los tanques de almacenamiento

| Id Tanque | Sección | Vol. | Coord. (Sist. WGS84 UTM Zona 17S) | Altura | Localización |
|------------------|----------------|-------------|--|---------------|---------------------------|
| 1 | Circular | 200 m3 | 740709.24 m E 9699956.31 m S | 2785 m | Sector Mahuarcay |
| 2 | Circular | 200 m3 | 741409.29 m E 9698275.62 m S | 2778 m | Sector Señor de Flores |
| 3 | Circular | 150 m3 | 741400.62 m E 9698266.29 m S | 2778 m | Sector Señor de Flores |
| 4 | Rectangular | 400 m3 | 740728.02 m E 9699949.97 m S | 2789.2 m | Sector Mahuarcay |

Fuente: Elaboración propia.

b. Tuberías y elementos de la red de distribución

La RDAP Bayas consta de tres líneas de distribución principales que después se ramifican en cada sector. Estas tuberías transportan agua desde los dos tanques ubicados en la Planta de tratamiento. La primera línea (PVC 50 mm) distribuye agua a los sectores Leg Tabacay y Leg Abuga. La segunda línea (PVC 160 mm) se conecta con los tanques de Señor de Flores. La tercera línea (PVC 110 mm) distribuye agua a la zona rural del sector Leg Abuga y también se conecta con los tanques de Señor de Flores.

Los elementos principales que componen la red de abastecimiento incluyen varias válvulas de tipo VRP y VRG. La tabla 13 contiene una descripción más detallada de los componentes de la red, en la que se enumera la cantidad de componentes existentes, y en el caso de las tuberías se contabiliza los tramos conectados entre dos nodos.

Tabla 13. Componentes físicos de la red.

| Componente | Cantidad de componentes | Longitud (metros) |
|-----------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Tubería 160 mm | 20 | 2473.630 |
| Tubería 110 mm | 21 | 2974.680 |
| Tubería 63 mm | 144 | 12009.480 |
| Tubería 50 mm | 43 | 5379.863 |
| Tubería 40 mm | 2 | 283.280 |
| Tubería 32 mm | 44 | 3604.710 |
| Tubería 25 mm | 36 | 3750.140 |

Tabla 13. (continuación) Componentes físicos de la red.

| Componente | Cantidad de componentes | Longitud (metros) |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Tubería 20 mm | 6 | 569.673 |
| VRP | 11 | |
| VRG | 38 | |
| Hidrante | 1 | |
| Tanque | 4 | |

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Asignación de parámetros a la red de distribución

Para llevar a cabo las actualizaciones necesarias en la red, se ha utilizado el programa ConvertGISEpanet, que es una herramienta gratuita desarrollada por el Grupo de Investigación REDHISP del Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medioambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Este programa permite convertir la información almacenada en archivos shape y tablas DBF de una RDAP, en un modelo de red comprensible para Epanet, y viceversa.

Se tiene como base el modelo de la RDAP Bayas desarrollado por Acurio & Priori (2021), en el cual se han ido efectuando todas las modificaciones que se han realizado en la red durante el periodo julio 2021 – diciembre 2022. Se procedió de la siguiente manera para ejecutar los cambios necesarios en la red.

- Mediante el programa ConvertGISEpanet, se trasladó el modelo de Epanet con extensión (.inp) a un archivo de formato shape (.shp), el cual se ejecutó correctamente en el programa Qgis.
- En el programa Qgis se dibujaron las actualizaciones de la red en el sector Oriente bajo, se trazaron nuevas tuberías, a las cuales se les agregaron sus características de diámetro, longitud y coeficiente de rugosidad, además se incorporaron válvulas y un hidrante.
- Se obtuvieron las elevaciones de todos los nodos agregados en la red mediante el programa Google Earth Pro.
- Se coordinó con el personal de la JAAPRB para verificar el estado inicial de funcionamiento de las válvulas y otros cambios en ciertas áreas de la red. Una vez completados los cambios pertinentes, se asignó un identificador a cada componente de la red.

Tras esto se recurrió de nuevo a ConvertGISEpanet para trasladar el archivo con formato shape (.shp) a un archivo con extensión (.inp), que se ejecutó correctamente en Epanet.

En la figura 42, se presenta un esquema de la red en el sector Oriente Bajo antes de realizar las actualizaciones (a) y un esquema del mismo sector después de realizar las actualizaciones (b).

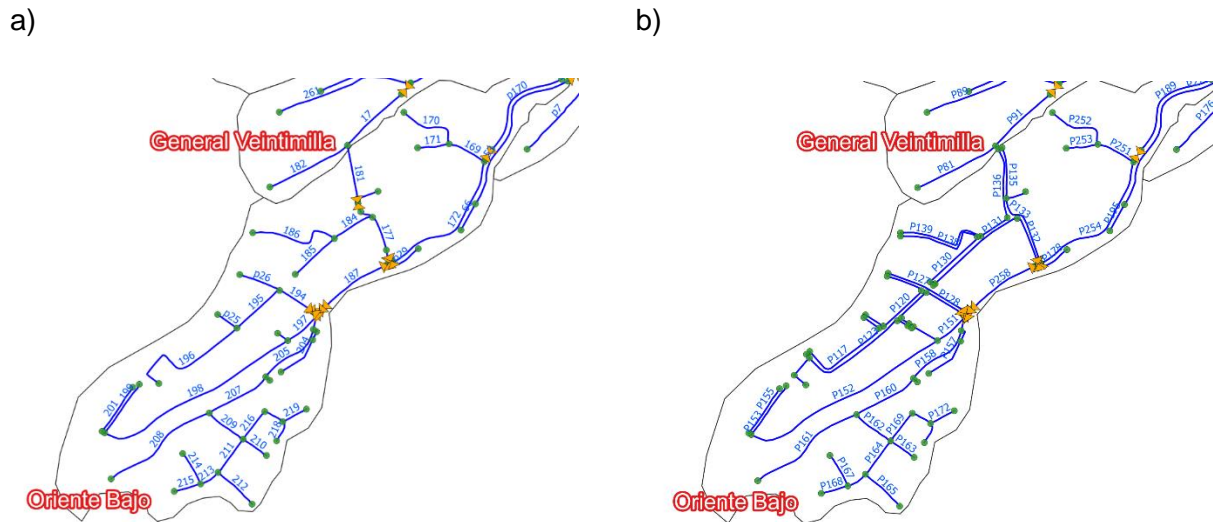


Figura 42. a) Esquematación antigua del sector Oriente Bajo vs. b) Esquematación actual del sector Oriente Bajo.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.4 Asignación de demandas a los nodos

Se examinaron las edificaciones que existen en la parroquia Bayas para obtener la información sobre el tipo de uso del agua. La figura 43 muestra la ubicación de las iglesias y escuelas que existen en la parroquia. De acuerdo con la información encontrada en el Geoportal Ecuador, este sector cuenta con dos iglesias, ubicadas en el sector Corazón de María y Señor de Flores; también se constató la existencia de dos escuelas. Se puede apreciar que el uso del agua en Bayas es generalmente doméstico, por consiguiente, se asumió un 100 % como acometidas domiciliarias para este trabajo.



Figura 43. Ubicación de la iglesia y escuelas de la parroquia Bayas.
Fuente: Elaboración propia.

a. Micromedición

La JAAPRB mantiene un registro de facturación sectorizado, con estos datos se obtuvo el caudal de consumo de cada sector y de la red en general, considerando los meses de enero a octubre del año 2022. En la tabla 14 se presentan los consumos promedios por sector, así como la cantidad de usuarios en el mes de octubre.

Tabla 14. Consumo de agua por sector.

| Sector (Abreviatura) | Consumo medio(L/s/usuario) | Usuarios- Octubre | Consumo(L/s) | Porcentaje (%) |
|------------------------------|----------------------------|-------------------|--------------|----------------|
| Leg Tabacay (Leg Tab) | 0.0044 | 133 | 0.59 | 8.52 |
| Leg Abuga (Leg Abu) | 0.0043 | 225 | 0.96 | 14.00 |
| Señor de Flores (S F) | 0.0058 | 73 | 0.42 | 6.13 |
| Corazon de María (C M) | 0.0051 | 250 | 1.27 | 18.42 |
| Oriente Alto (O A) | 0.0056 | 149 | 0.83 | 12.10 |
| Oriente Bajo (O B) | 0.0067 | 268 | 1.80 | 26.19 |
| General Veintimilla (Gen Ve) | 0.0059 | 122 | 0.72 | 10.48 |
| Zhirincay (Z H) | 0.0034 | 85 | 0.29 | 4.14 |
| Total | 0.0053 | 1305 | 6.88 | 100 |

Fuente: Elaboración propia.

Según la micromedición, en toda la red existe un consumo medio mensual de 6.88 L/s. El mayor porcentaje de consumo se da en el sector Oriente Bajo con un 26.19 %, lo que es evidente, ya que este sector pertenece a zona urbana, mientras que el consumo menor correspondiente a 4.14 % se da en el sector Zhirincay, que pertenece a la zona rural.

Aunque el sector Señor de Flores tiene la menor cantidad de usuarios, consume mayor cantidad de agua que Zhirincay, debido a que se encuentra en una zona urbana en la que se suele gastar mayor cantidad de agua por usuario debido a las actividades que realizan en su día a día. Según los datos de la “Encuesta de Buenas Prácticas Ambientales en Hogares del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) del 2012”, se determinó que el 72.10 % de los hogares del Ecuador desperdician agua, encontrándose que esta práctica se da con mayor frecuencia en las áreas urbanas.

b. Macromedición

Acurio & Priori (2021) realizaron la macromedición en la misma zona de estudio, obtuvieron un caudal promedio inyectado por el tanque principal de 16.01 L/s, con lo que obtuvieron un porcentaje de agua no contabilizada (%ANC) de 49.46 % y un factor de corrección k de 1.97 para la asignación de la demanda base a los nodos. Con este factor k y los consumos actualizados en cada sector se procedió a obtener la demanda base en cada nodo. La figura 44 muestra los coeficientes de variación de demanda durante las 24 horas.

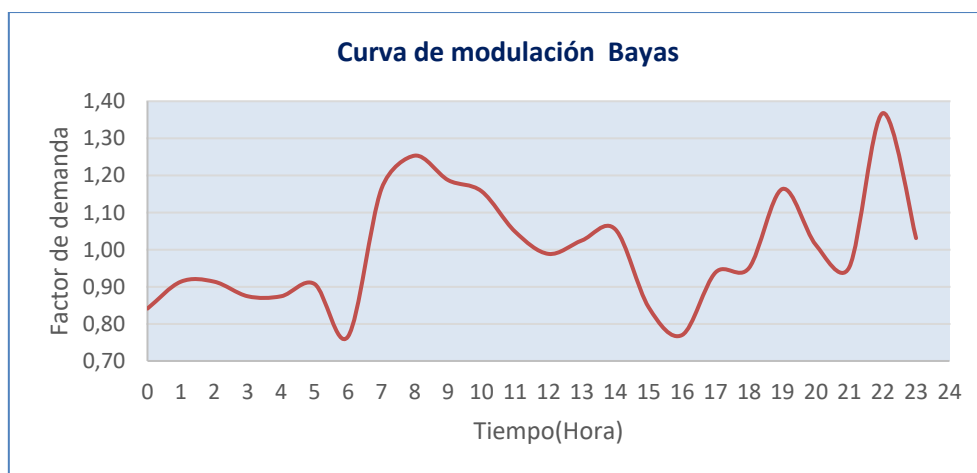


Figura 44. Curva de modulación de la RDAP Bayas.
Fuente: Acurio & Priori (2021).

Con la diferencia entre el volumen inyectado 16.01 L/s y el volumen registrado actualmente de 6.88 L/s se puede obtener el volumen de agua incontrolado, siendo este de 9.13 L/s, lo que representa una gran pérdida por fugas en la parroquia Bayas.

c. Asignación de la demanda base

Para la obtención de la demanda base se procedió de la siguiente manera:

- La tabla 15 muestra la cantidad de predios asignados a cada tramo de tubería, la demanda unitaria y la demanda total. La demanda unitaria se obtuvo con la información del consumo total y la cantidad de predios de cada sector.

Tabla 15. Asignación de demanda en las tuberías.

| Tubería | Nodo inicial | Nodo final | Sector | Predios | Demanda unitaria (L/s/predio) | Demanda total (L/s) |
|-------------|--------------|------------|---------|---------|-------------------------------|---------------------|
| P20 | J179 | J181 | S F | 19 | 0.0058 | 0.110 |
| P130 | J177 | J165 | S F | 16 | 0.0058 | 0.093 |
| P131 | J176 | J173 | S F | 6 | 0.0058 | 0.035 |
| P60 | J60 | J78 | Leg Abu | 7 | 0.0043 | 0.030 |
| P61 | J35 | J61 | Leg Abu | 9 | 0.0043 | 0.039 |
| P80 | J110 | J90 | Leg Tab | 3 | 0.0044 | 0.013 |
| P81 | J86 | J92 | Leg Tab | 3 | 0.0044 | 0.013 |
| P82 | J92 | J94 | Leg Tab | 4 | 0.0044 | 0.018 |
| P17 | J92 | J93 | Leg Tab | 9 | 0.0044 | 0.040 |

Fuente: Elaboración propia.

- Con la demanda propia de cada tramo se hizo la repartición, a partes iguales, entre sus nodos extremos para totalizar al final la demanda de cada nodo. En la tabla 16 se presenta un ejemplo del cálculo del consumo nodal para ciertos nodos de la red.

Tabla 16. Repartición de demandas en cada nodo.

| Nodo inicial | Demanda inicial (L/s) | Nodo final | Demanda final (L/s) |
|--------------|-----------------------|-------------|---------------------|
| J179 | 0.055 | J181 | 0.055 |
| J177 | 0.046 | J165 | 0.046 |
| J176 | 0.017 | J173 | 0.017 |
| J60 | 0.015 | J78 | 0.015 |
| J35 | 0.019 | J61 | 0.019 |
| J110 | 0.007 | J90 | 0.007 |

Tabla 16. (continuación) Repartición de demandas en cada nodo.

| Nodo inicial | Demanda inicial (L/s) | Nodo final | Demanda final (L/s) |
|--------------|-----------------------|------------|---------------------|
| J86 | 0.007 | J92 | 0.007 |
| J92 | 0.009 | J94 | 0.009 |
| J92 | 0.020 | J93 | 0.020 |

Fuente: Elaboración propia.

Para totalizar la demanda en cada nodo se realizó la suma de la repartición de caudales, como se puede apreciar en la figura 45, por ejemplo, el nodo J92 tiene el aporte de 3 tuberías P17, P82 y P81 por lo que la demanda será la suma del aporte de la mitad de cada tubería. Como herramienta de ayuda se utilizó las tablas dinámicas de Excel para obtener la demanda total en aquellos nodos que representaban puntos de convergencia de más de una tubería. En el anexo A se puede visualizar la asignación de predios en las tuberías y demanda base final en los nodos.

Para obtener las demandas definitivas se multiplicó cada nodo por el factor k , la demanda del nodo J92 (DB_{J92}) que se introdujo en Epanet fue:

$$DB_{J92} = k(0.020 + 0.009 + 0.007)$$

$$DB_{J92} = 1.97(0.036)$$

$$DB_{J92} = 0.07 \text{ L/s}$$

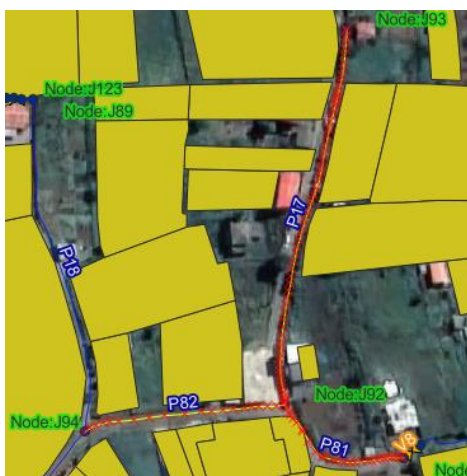


Figura 45. Tuberías que convergen al nodo J92.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.5 Modelación y calibración de la RDAP Bayas

Con la esquematización de la red, la asignación de cotas, demandas y colocación de las válvulas queda completo el modelo. La primera simulación realizada en Epanet fue de utilidad para verificar que los datos estén ingresados correctamente.

a. Calibración del modelo hidráulico

Acurio & Priori (2021) realizaron la calibración del modelo de la RDAP Bayas cambiando los valores de la rugosidad de las tuberías, diámetros, demandas y cotas en los nodos, pero debido a la incorporación de un nuevo tanque de almacenamiento y la ampliación en el sector Oriente Bajo, la red tuvo que ser calibrada de nuevo. Se realizó un algoritmo para encontrar las demandas, cotas, consigna de las VRP y rugosidades adecuadas en la red. La codificación se hizo con la Toolkit de Epanet en el lenguaje de programación Python, el diagrama de flujo fue muy similar al usado para encontrar los diámetros óptimos, con la diferencia de que, para la calibración la función objetivo fue el índice de Nash-Sutcliffe (E) que se presentó en la ecuación 7. El algoritmo desarrollado para calibrar la red se encuentra en el anexo B.

Los valores de demanda, cotas, consignas y rugosidades que maximicen el índice de Nash-Sutcliffe (E) fueron seleccionados para obtener el modelo calibrado. En la tabla 17 se presenta los valores de presión observadas en campo y las simuladas antes de la calibración. Las presiones de calibración medidas en campo se encuentran en el anexo C.

Tabla 17. Presiones medidas en campo y simuladas antes de calibrar.

| Localización | Observada (mca) | Calculada (mca) | Error (%) |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|
| J339 | 88.56 | 93.57 | 6% |
| J179 | 38.72 | 49.27 | 27% |
| J60 | 10.56 | 12.41 | 18% |
| J61 | 49.28 | 54.35 | 10% |
| J21 | 77.44 | 74.89 | 3% |
| J92 | 42.24 | 42.64 | 1% |
| J89 | 66.88 | 59.9 | 10% |
| J143 | 102 | 119.44 | 17% |
| J102 | 77.44 | 86.54 | 12% |
| J85 | 77.44 | 89.07 | 15% |
| J128 | 109.12 | 125.15 | 15% |
| J28 | 91.52 | 106.57 | 16% |
| J30 | 52.8 | 63.22 | 20% |
| J11 | 45.76 | 59.37 | 30% |

Tabla 17. (continuación) Presiones medidas en campo y simuladas antes de calibrar.

| Localización | Observada (mca) | Calculada (mca) | Error (%) |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|
| J6 | 7.04 | 3.95 | 44% |
| J166 | 9.86 | 9.36 | 5% |
| J169 | 17.6 | 25.52 | 45% |
| J325 | 59.84 | 64.62 | 8% |
| J333 | 70.4 | 79.5 | 13% |
| J211 | 56.32 | 77.3 | 37% |
| J247 | 66.88 | 85.23 | 27% |
| J242 | 113 | 134.6 | 19% |
| J218 | 68.29 | 62.69 | 8% |
| J234 | 79.16 | 77.81 | 2% |
| J294 | 80.96 | 72.94 | 10% |
| J289 | 73.92 | 65.94 | 11% |
| J141 | 80.26 | 81.96 | 2% |
| J149 | 99.97 | 122.91 | 23% |
| J312 | 83.78 | 86.61 | 3% |
| J322 | 90.11 | 91.32 | 1% |

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con CONAGUA (2008), el error en la calibración debe ser menor al 20 % en las presiones observadas y calculadas. En la tabla 18 se muestra el error entre las presiones observadas y calculas después de calibrar.

Tabla 18. Presiones medidas en campo y simuladas después de calibrar.

| Localización | Observada (mca) | Calculada (mca) | Error (%) |
|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|
| J339 | 88.56 | 91.1 | 3% |
| J179 | 38.72 | 42.99 | 11% |
| J60 | 10.56 | 10.67 | 1% |
| J61 | 49.28 | 47.64 | 3% |
| J21 | 77.44 | 72.51 | 6% |
| J92 | 42.24 | 44.26 | 5% |
| J89 | 66.88 | 66.42 | 1% |
| J143 | 102 | 102.36 | 0% |
| J102 | 77.44 | 76.08 | 2% |
| J85 | 77.44 | 78.96 | 2% |
| J128 | 109.12 | 113.42 | 4% |
| J28 | 91.52 | 95.52 | 4% |
| J30 | 52.8 | 56.33 | 7% |
| J11 | 45.76 | 50.66 | 11% |
| J6 | 7.04 | 6.5 | 8% |

Tabla 18. (continuación) Presiones medidas en campo y simuladas después de calibrar.

| Localización | Observada (mca) | Calculada (mca) | Error (%) |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------|
| J166 | 9.86 | 11.64 | 18% |
| J169 | 17.6 | 19.65 | 12% |
| J325 | 59.84 | 63.12 | 5% |
| J333 | 70.4 | 73.78 | 5% |
| J211 | 56.32 | 58.31 | 4% |
| J247 | 66.88 | 69.48 | 4% |
| J242 | 113 | 117.54 | 4% |
| J218 | 68.29 | 71.51 | 5% |
| J234 | 79.16 | 81.73 | 3% |
| J294 | 80.96 | 81.71 | 1% |
| J289 | 73.92 | 74.78 | 1% |
| J141 | 80.26 | 76 | 5% |
| J149 | 99.97 | 104.04 | 4% |
| J312 | 83.78 | 86.12 | 3% |
| J322 | 90.11 | 94.52 | 5% |

Fuente: Elaboración propia.

La figura 46 muestra la comparación entre las presiones observadas y calculas obtenidas en Epanet, la diferencia varía desde 0 hasta 4.933 mca, el índice de Nash-Sutcliffe (E) fue de 0.989 y el error medio normalizado (RSR) de 0.106. Los resultados obtenidos poseen una calificación “muy buena” para la calibración de la red. Por consiguiente, el modelo calibrado representa la realidad del sistema y puede ser utilizado para el diagnóstico y optimización de las variables hidráulicas.

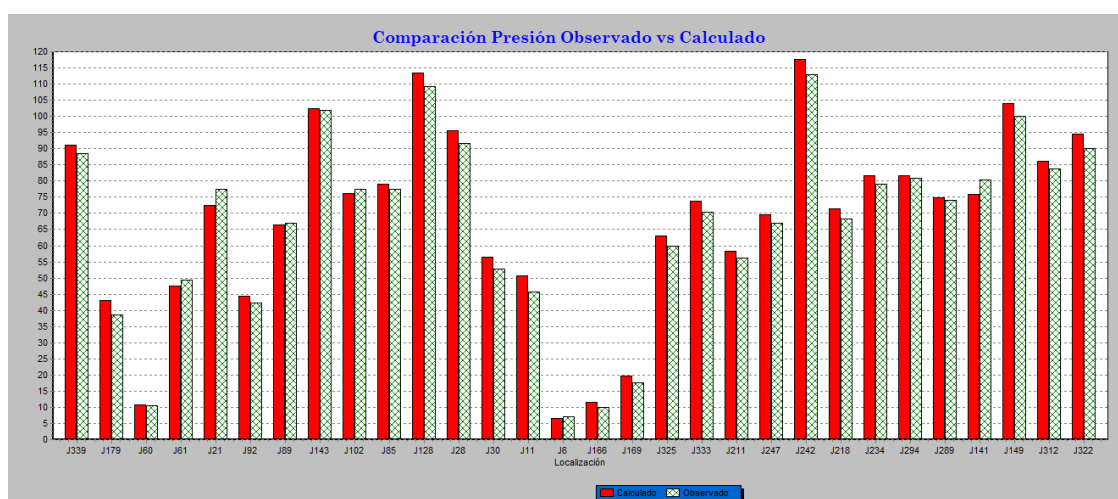


Figura 46. Comparación de las presiones observadas y calculadas.
Fuente: Elaboración propia.

b. Validación del modelo hidráulico

Para la validación del modelo se tomó medidas de la presión en 17 puntos diferentes a los usados para la calibración, en la figura 47 se presenta el informe emitido por Epanet, donde se puede apreciar las presiones observadas en campo, las calculadas y el error. Para la validación del modelo el índice de Nash-Sutcliffe (E) obtenido fue de 0.990 y el error medio normalizado (RSR) fue de 0.0998, estos representan una calificación “muy buena”. Las presiones de validación medidas en campo se encuentran en el anexo C.

En la tabla 19 se muestra un resumen de la eficiencia de la calibración del modelo hidráulico, la calificación se lo realizó según los criterios presentados en la tabla 7.

| Estadísticas de Calibración para Presión | | | | | | |
|--|-----|--------|--------|-------|-------|-------|
| Localización | N° | Observ | Calc | Media | RMS | Error |
| | Obs | | Media | Media | Error | Error |
| J110 | 1 | 66.88 | 65.78 | 1.101 | 1.101 | |
| J116 | 1 | 97.48 | 97.74 | 0.263 | 0.263 | |
| J119 | 1 | 102.08 | 99.33 | 2.748 | 2.748 | |
| J14 | 1 | 116.16 | 120.77 | 4.606 | 4.606 | |
| J74 | 1 | 33.12 | 34.79 | 1.674 | 1.674 | |
| J19 | 1 | 10.56 | 8.05 | 2.506 | 2.506 | |
| J336 | 1 | 21.12 | 18.35 | 2.774 | 2.774 | |
| J188 | 1 | 42.00 | 43.27 | 1.268 | 1.268 | |
| J326 | 1 | 77.44 | 82.22 | 4.778 | 4.778 | |
| J217 | 1 | 109.82 | 113.93 | 4.105 | 4.105 | |
| J261 | 1 | 73.92 | 77.57 | 3.647 | 3.647 | |
| J278 | 1 | 60.76 | 60.06 | 0.698 | 0.698 | |
| J286 | 1 | 72.20 | 67.72 | 4.478 | 4.478 | |
| J310 | 1 | 112.64 | 109.76 | 2.879 | 2.879 | |
| J314 | 1 | 85.89 | 81.42 | 4.468 | 4.468 | |
| J163 | 1 | 61.20 | 57.88 | 3.322 | 3.322 | |
| J145 | 1 | 95.04 | 96.31 | 1.267 | 1.267 | |
| Sistema de Red 17 | | 72.84 | 72.64 | 2.740 | 3.095 | |
| Correlación entre los Términos: 0.996 | | | | | | |

Figura 47. Informe de calibración emitido por Epanet.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Resumen de la eficiencia de calibración y validación del modelo hidráulico.

| Índice | Calibración | | Validación | |
|------------|-------------|--------------|------------|--------------|
| | Valor | Calificación | Valor | Calificación |
| E | 0.989 | Muy bueno | 0.990 | Muy bueno |
| RSR | 0.106 | Muy bueno | 0.100 | Muy bueno |

Fuente: Elaboración propia.

c. Modelo hidráulico calibrado y validado

A partir de los cambios de rugosidad, consignas, demandas y cotas en los nodos realizados durante la calibración, se procedió a ejecutar la simulación y diagnóstico de la red, descritos en el siguiente apartado.

Los factores de demanda y los demás parámetros hidráulicos introducidos en Epanet revelaron los caudales inyectados en la red presentados en la tabla 20, en los cuales se pudo apreciar que la hora de mínimo consumo (hora valle) fue a las 05:00 am, mientras que la hora de máximo consumo (hora pico) fue a las 01:00 pm.

Tabla 20. Simulación del caudal inyectado a la red.

| Hora | Caudal inyectado (L/s) | Coficiente |
|-----------------|-------------------------------|-------------------|
| 1:00:00 | 17.08 | 1.023 |
| 2:00:00 | 17.01 | 1.019 |
| 3:00:00 | 16.72 | 1.002 |
| 4:00:00 | 16.56 | 0.992 |
| 5:00:00 | 15.97 | 0.957 |
| 6:00:00 | 16.35 | 0.980 |
| 7:00:00 | 16.58 | 0.993 |
| 8:00:00 | 17.18 | 1.029 |
| 9:00:00 | 16.35 | 0.980 |
| 10:00:00 | 16.89 | 1.012 |
| 11:00:00 | 17.01 | 1.019 |
| 12:00:00 | 17.09 | 1.024 |
| 13:00:00 | 17.23 | 1.032 |
| 14:00:00 | 17.05 | 1.022 |
| 15:00:00 | 16.66 | 0.998 |
| 16:00:00 | 16.39 | 0.982 |
| 17:00:00 | 16.26 | 0.974 |
| 18:00:00 | 16.36 | 0.980 |
| 19:00:00 | 16.68 | 0.999 |
| 20:00:00 | 16.73 | 1.002 |
| 21:00:00 | 17.08 | 1.023 |
| 22:00:00 | 16.40 | 0.983 |
| 23:00:00 | 16.57 | 0.993 |
| 0:00:00 | 16.36 | 0.980 |

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Evaluación y diagnóstico de la red de distribución

En este capítulo se estudió la RDAP Bayas antes del funcionamiento del nuevo tanque y con el funcionamiento de este. Fue necesario identificar los sectores críticos y posibles falencias del sistema de distribución, con la finalidad de otorgar un servicio óptimo a los usuarios que garantice el buen funcionamiento hidráulico de la RDAP. Se evaluaron las fluctuaciones de los parámetros de rendimiento hidráulico en dos escenarios desfavorables correspondientes a la hora mínimo consumo (hora valle) y de máximo consumo (hora pico).

El análisis de la red se fundamentó en el estudio de las presiones y velocidades en todos los sectores abastecidos; de igual modo, se evaluó el caudal inyectado al sistema. Este

diagnóstico permitió formular una serie de propuestas para mejorar el rendimiento hidráulico de la red.

Naamani & Sana (2021) señalan que el rendimiento hidráulico de un sistema de distribución de agua potable depende de diversos factores tales como la vida útil del sistema, la cobertura, la topografía, el crecimiento industrial y comercial, la población futura, la información del consumo de agua, los tanques de almacenamiento y las presiones mínimas y máximas aceptables.

Los parámetros de rendimiento hidráulico (presión y velocidad) deben encontrarse dentro de un rango permisible, ya que un incumplimiento de esto puede generar los problemas que se detallan a continuación.

Presiones altas

- Producen fisuras en las tuberías y otros elementos de la red, lo cual incrementa las fugas de agua en el sistema.
- En los domicilios, las presiones altas pueden dañar los aparatos sanitarios, lo que provoca fugas internas de agua en las viviendas.

Presiones bajas

- Las presiones bajas generan malestar en la población beneficiaria debido a que interfieren en sus actividades cotidianas al no poder usar correctamente algunos electrodomésticos.

Velocidades altas

- Las altas velocidades producen fricción en las paredes de las tuberías, lo que provoca el desgaste acelerado de las mismas y, por ende, se reduce su vida útil.

Velocidades bajas

- La presencia de velocidades bajas produce sedimentación en las tuberías y disminuye la calidad del agua que se entrega a los usuarios.

A fin de evitar los problemas señalados, el análisis de la red se fundamentó en la normativa vigente nacional e internacional, tal como se muestra en la tabla 21, esto permitió verificar el cumplimiento de presión nodal y velocidad en las tuberías.

Tabla 21. Límites de presión y velocidad recomendados.

| CPE INEN 5 | CEPIS |
|--------------------------------|--------------------------|
| Presión máxima estática 70 mca | Presión mínima 5 mca |
| Presión máxima dinámica 50 mca | |
| Presión mínima 10 mca | |
| Velocidad alrededor de 1.5 m/s | Velocidad máxima 2 m/s |
| | Velocidad mínima 0.3 m/s |

Fuente: Elaboración propia a partir de CPE INEN 5 (1992) y CEPIS (2005).

Se estableció un valor máximo de presión de 70 mca para el diagnóstico de la red, principalmente debido a las condiciones orográficas del terreno en donde la mayoría de los sectores se encuentran con desniveles que favorecen la generación de presiones muy altas. Además, la presión mínima se evaluó con un valor de 10 mca debido a que la red cuenta con varias zonas desfavorables.

Para el estudio de las velocidades se toman como referencia los límites establecidos por el CEPIS (Organización Panamericana de la Salud; Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente), es decir, se evaluó con un valor mínimo de velocidad de 0,3 m/s y un valor máximo de 2 m/s.

El CPE INEN 5 (1997), establece que, el diámetro nominal mínimo de los conductos de la red será de 19 mm (3/4"). La RDAP Bayas cubre tanto zonas rurales como urbanas, las zonas rurales y urbanas presentan un diámetro nominal de 20 mm y 63 mm respectivamente.

Los indicadores de rendimiento técnico (IRT), según la formulación descrita en las ecuaciones 10 y 11, se usaron como herramienta de evaluación para complementar el análisis de presiones y velocidades.

4.2.1 Diagnostico de la RDAP Bayas sin el funcionamiento del nuevo tanque

La topografía bastante irregular de la parroquia permitió deducir la existencia de presiones altas en la red. Al analizar los desniveles topográficos, se identificaron dos sectores en los que la red tiene mayor probabilidad de presentar sobrepresiones: Leg Tabacay y Oriente Bajo. Por el contrario, en la zona rural del Sector Leg Abuga se notó que existe poco desnivel respecto a los tanques principales, siendo esta una zona propensa a tener presiones bajas.

La diferencia de nivel entre los tanques principales y los puntos más bajos a los que abastecen es de aproximadamente 226 m, mientras que entre los tanques de Señor de Flores y los

puntos más bajos a los que se distribuye agua posee una diferencia de nivel aproximada de 192 m. Aunque existen válvulas reguladoras de presión en ciertas áreas, estas no aseguran el funcionamiento óptimo de la red.

Como se puede apreciar en la figura 48, el mapa de contorno muestra la variación de alturas descrita. En las zonas de color rojo se encuentran ubicados los tanques, mientras que las zonas de color azul corresponden a las áreas más críticas de los sectores Oriente Bajo y Leg Tabacay.

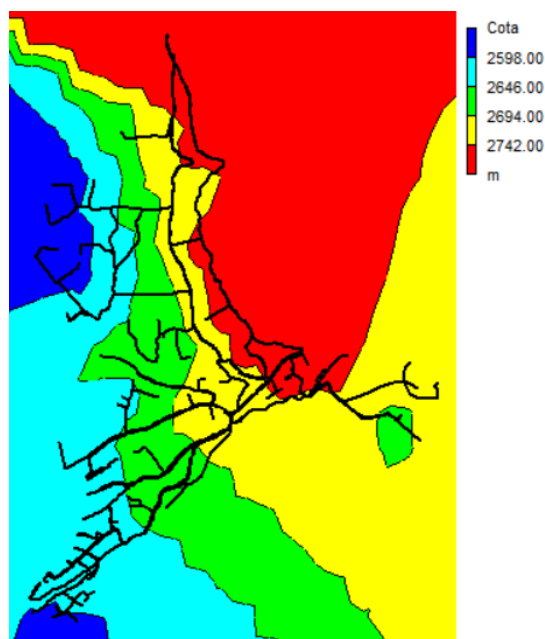


Figura 48. Mapa contorno de la variación de cotas.
Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.1 Estudio de presiones

En la figura 49, se muestran los gráficos extraídos del programa Epanet que corresponden al análisis de presiones en la hora valle (05:00 am) y en la hora pico (01:00 pm).

La figura 50 presenta la red de distribución de agua potable con sus respectivos sectores y nodos, los cuales presentaron presiones fuera de los límites permitidos, según el análisis de la hora valle (05:00 am). En el anexo D se puede apreciar esta misma figura durante la hora pico (01:00 pm), se ha omitido la presentación de esta gráfica en este apartado, puesto que los resultados en la hora pico y hora valle no presentan variaciones significativas.

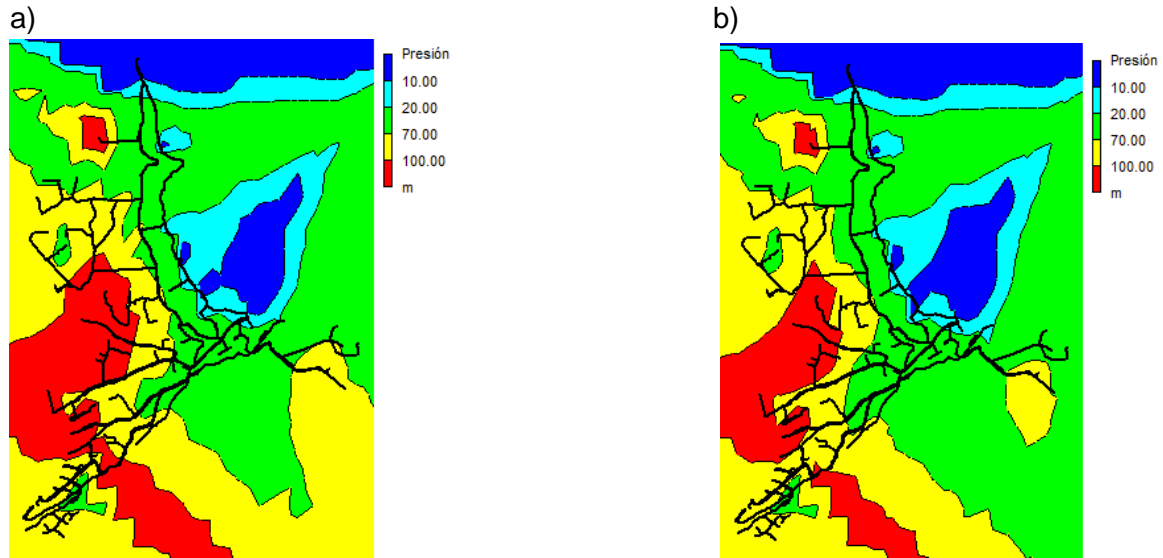


Figura 49. a) Mapa de contorno de las presiones a las 05:00 am vs b) Mapa de contorno de las presiones a la 01:00 pm.
Fuente: Elaboración propia

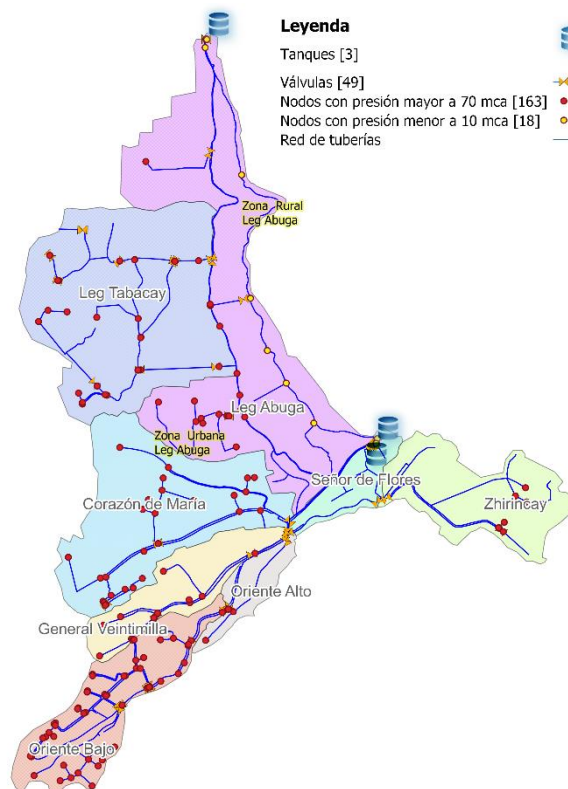


Figura 50. Nodos fuera de los límites permisibles durante la hora valle (05:00 am)
Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a las presiones mínimas en la hora valle (05:00 am), en la figura 49 se observa que la zona rural del sector Leg Abuga (color azul) tiene presiones inferiores a los 10 mca, como se indicó anteriormente, este problema se debe al poco desnivel existente entre esta zona y los tanques principales. Existen 18 nodos que no cumplen con la presión mínima establecida.

En la figura 49, durante la hora pico (01:00 pm) el problema de presiones mínimas persiste, presentándose en la zona rural del sector Leg Abuga un total de 18 nodos con este problema. Como se esperaría en este escenario, existe una disminución en las presiones de la red. No obstante, esta reducción no implica que existan más nodos con presión mínima, ya que en la zona más desfavorable las presiones disminuyen en menos de 1 mca en comparación con las presiones de la hora valle.

El análisis en la hora valle (05:00 am) que se puede observar en la figura 50 evidencia que, el problema de las presiones radica en las sobrepresiones existentes en la red, ya que hay varios sectores con nodos en los cuales la presión supera los 70 mca e incluso los 100 mca. Siete de los ocho sectores de la red no cumplen con la presión máxima establecida en la normativa, en los cuales se ha contabilizado un total de 163 nodos sobre los 70 mca; la presión media en este escenario es de 68.70 mca. Este problema se da principalmente por los grandes desniveles entre los puntos finales de distribución y los tanques de almacenamiento, además de contar con válvulas reductoras de presión que no se encuentran ubicadas estratégicamente o que no están siendo operadas correctamente.

Como es de esperar, en la hora pico (01:00 pm) se reduce el número de nodos con presiones máximas, en comparación con la hora valle. En este escenario se presentan 156 nodos con presiones superiores a 70 mca. No obstante, los problemas de sobrepresión siguen siendo evidentes en siete de los ocho sectores de la red. Durante esta hora se tiene una presión media de 65.61 mca.

En la figura 51 se puede visualizar un análisis estadístico de los nodos durante los escenarios de hora pico y hora valle. Se ha contabilizado el número de nodos con presión dentro de los límites establecidos por el CPE INEN 5, el número de nodos con presión superior al límite permitido y el número de nodos con presión inferior al límite permitido.

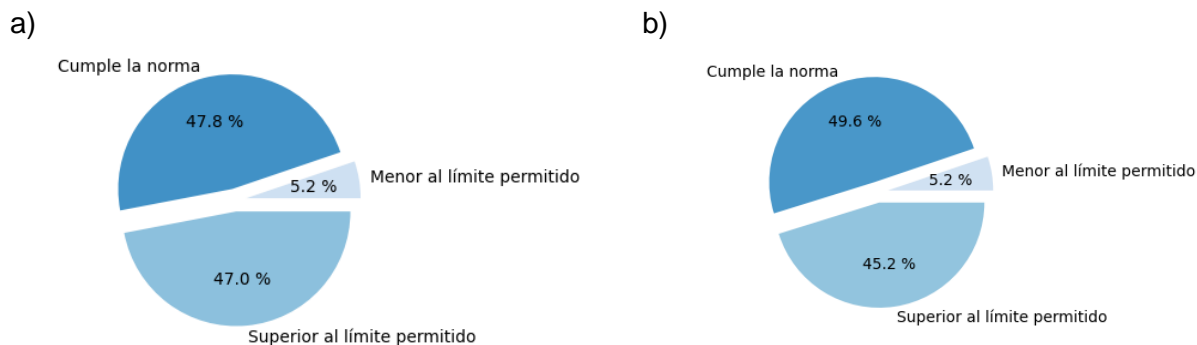


Figura 51. a) Análisis estadístico de los nodos a las 05:00 am vs b) Análisis estadístico de los nodos a la 01:00 pm. Fuente: Elaboración propia.

En general, se puede concluir que tanto en la hora valle (05:00 am) como en la hora pico (01:00 pm) existen presiones fuera los límites superiores e inferiores permitidos. En la figura 51 se aprecia que el problema más grave se presenta en la hora valle (05:00 am), en donde los nodos con presiones superiores al límite permitido representan el 47.00 % de la red. Estas presiones no solo provocan fugas de agua, sino que también generan problemas en los aparatos sanitarios de los usuarios. Por lo tanto, es necesario plantear soluciones que permitan la reducción de estas presiones en los sectores más desfavorables.

- **Identificación del sector crítico**

En la figura 52 y figura 53 se presentan los resultados del estudio de presiones obtenido en cada sector, estos presentan la cantidad de nodos que no cumplen la normativa.

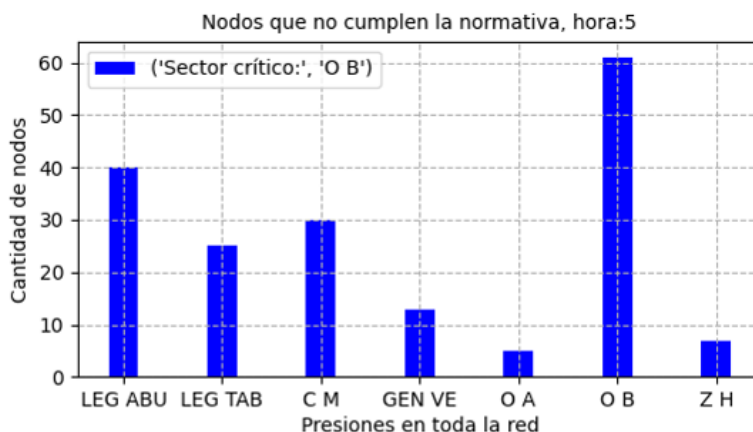


Figura 52. Gráfico de barras de la cantidad de nodos que no cumplen la normativa por sector a las 05:00 am. Fuente: Elaboración propia.

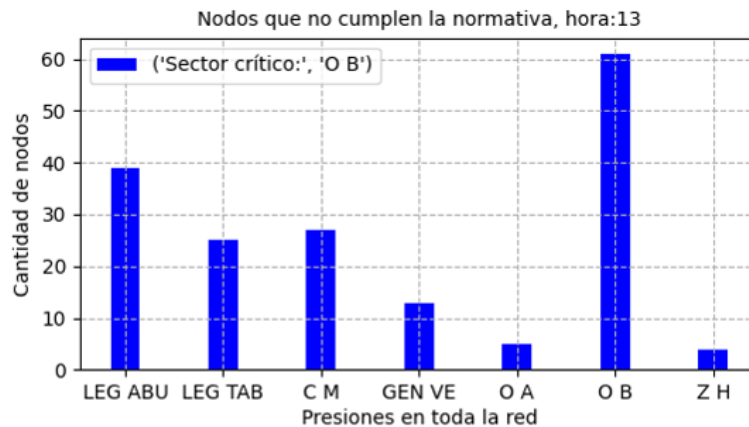


Figura 53. Gráfico de barras de la cantidad de nodos que no cumplen la normativa por sector a la 01:00 pm.
Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la figura 52 y figura 53, los sectores Oriente bajo, Leg Abuga, Corazón de María y Leg Tabacay presentan el mayor número de nodos con presiones que no cumplen lo establecido en la normativa. Se identifica como sector crítico a Oriente Bajo, sin embargo, también es importante considerar críticos a los sectores Corazón de María y Leg Tabacay debido a que forman parte de la problemática de sobrepresiones en la red. Por otro lado, se descarta a Leg Abuga como un sector crítico, debido a que la problemática general de la red se debe al incumplimiento de presiones máximas, y en este sector la mayoría de nodos contabilizados son por el incumplimiento de presiones mínimas.

4.2.1.2 Estudio de velocidades

En la figura 54 se muestran los gráficos extraídos del programa Epanet que corresponden al análisis de velocidades en la hora valle (05:00 am) y en la hora pico (01:00 pm).

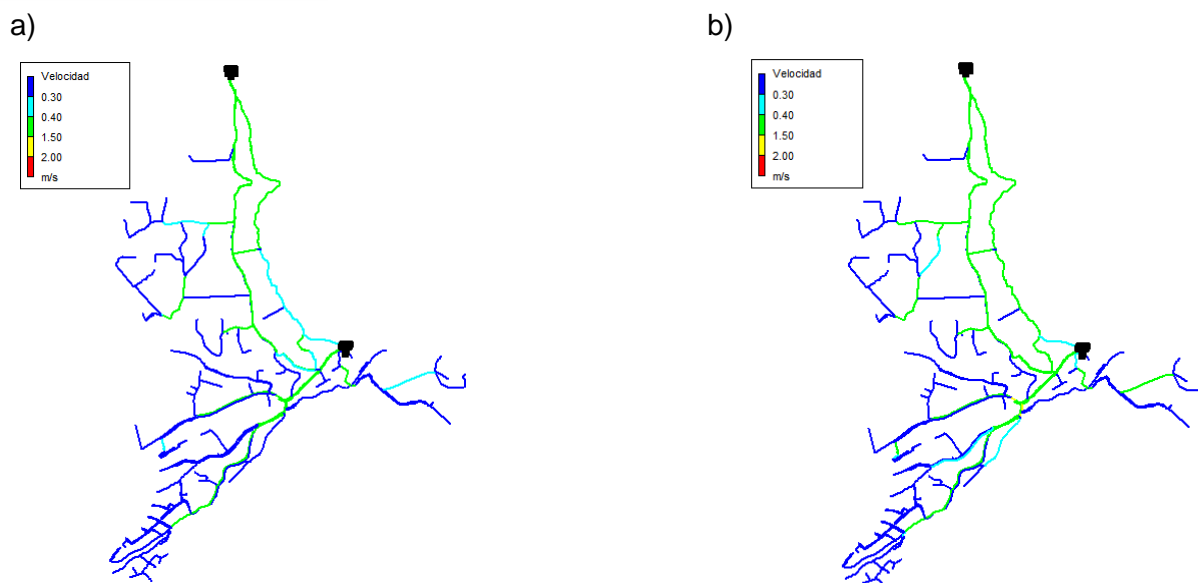


Figura 54. a) Velocidades en la red a las 05:00 am vs. b) Velocidades en la red a la 01:00 pm.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados alcanzados durante la hora valle (05:00 am) que se exponen en la figura 54 indican que existen tres tramos de tubería con velocidad superior a 2 m/s. Con base a los resultados se determina que la red se encuentra funcionando con una velocidad media de 0.30 m/s. Las zonas ramificadas de la red son las más críticas, en donde se han hallado velocidades inferiores a los 0.3 m/s, esto puede ser consecuencia de un sobredimensionamiento de tuberías en la red.

Se pudo identificar mediante el análisis efectuado durante la hora pico (01:00 pm) que, existe un solo tramo de tubería con velocidad mayor a 2 m/s. Por otro lado, se pudo constatar que durante la hora de mayor demanda aumentan las velocidades, pero no de manera significativa como para descartar el problema de bajas velocidades previamente identificado. En este escenario la red se encuentra funcionando con una velocidad media de 0.37 m/s.

Del mismo modo como se ha realizado con los nodos, en la figura 55 se aprecia un análisis estadístico, en el que se han contabilizado los tramos de tubería con velocidad dentro de los límites que establece el CEPIS, superior al límite permitido e inferior al límite permitido.

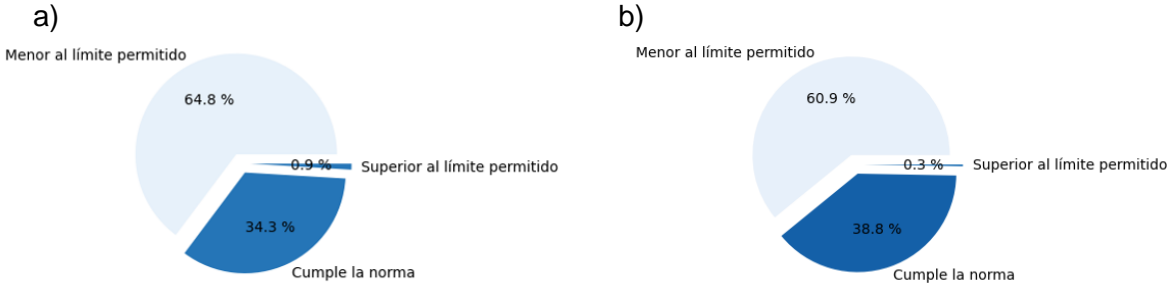


Figura 55. a) Análisis estadístico de las velocidades a las 05:00 am vs. b) Análisis estadístico de las velocidades a la 01:00 pm. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados estadísticos de las velocidades presentados en la figura 55 revelan que el escenario más desfavorable se presenta durante la hora valle (05:00 am), en la que solo el 34.30 % de los tramos tuberías cumplen con los estándares de velocidad establecidos por el CEPIS, el 64.80 % se encuentran por debajo del límite mínimo permitido y el 0.9 % por encima del límite máximo permisible. Por otro lado, se puede notar que durante la hora de máximo consumo (01:00 pm) aumentan las velocidades del sistema, se incrementan los tramos de tubería que cumplen con los estándares de diseño pasando de 34.30 % hasta un porcentaje de 38.80 %.

• **Identificación del sector crítico**

En la figura 56 y figura 57 se presentan los resultados del estudio de velocidades obtenido en cada sector, estos presentan la cantidad de tramos de tubería que no cumplen la normativa.

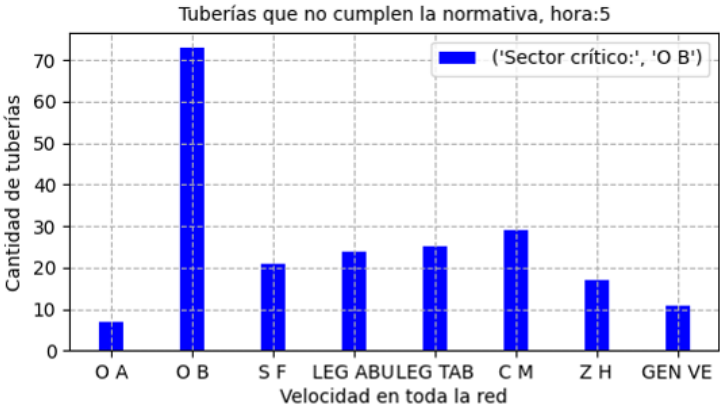


Figura 56. Gráfico de barras de la cantidad de tuberías que no cumplen la normativa por sector a las 05:00 am. Fuente: Elaboración propia.

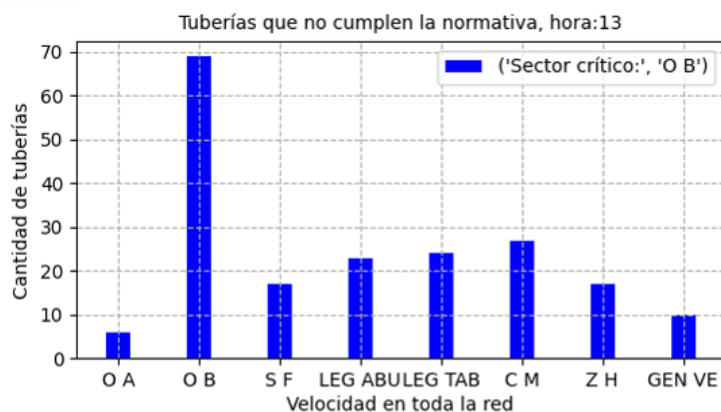


Figura 57. Gráfico de barras de la cantidad de tuberías que no cumplen la normativa por sector a las 01:00 pm.
Fuente: Elaboración propia.

A través de la figura 56 y figura 57 se puede identificar que, durante los dos escenarios del análisis, el sector crítico con mayor diferencia es Oriente Bajo. De manera general, los dos escenarios del análisis (demanda máxima y mínima) presentan un grave problema de bajas velocidades que promueve la sedimentación y compromete la calidad del agua que reciben los usuarios.

4.2.1.3 Estudio de caudales

En la figura 58 se presenta el caudal circulante a través de las tuberías del sistema durante los escenarios de hora valle y hora pico.

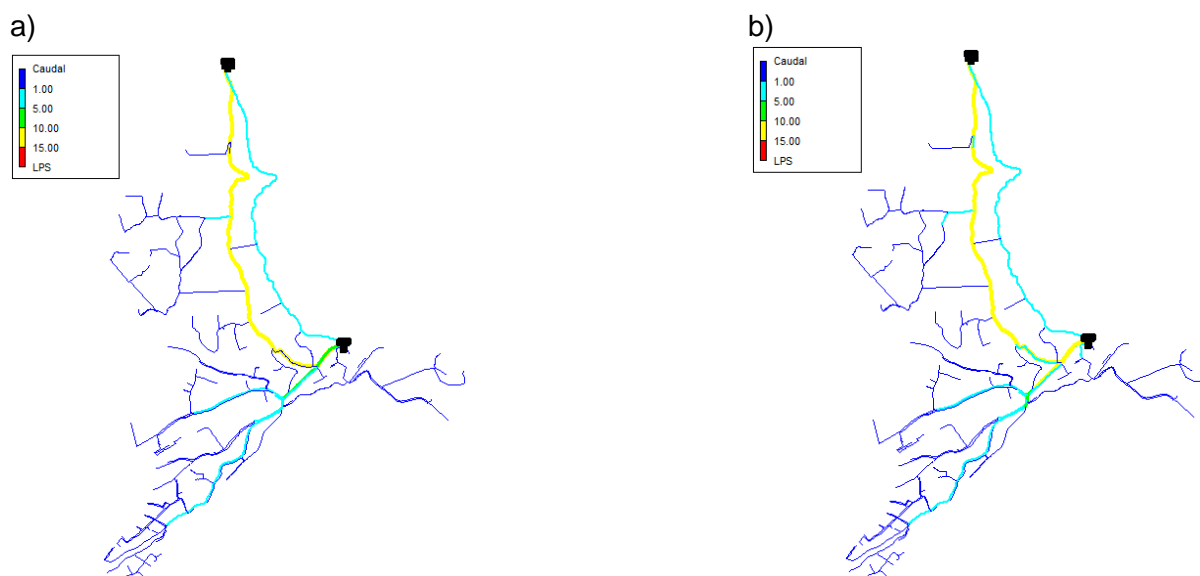


Figura 58. Caudales en la red a las 05:00 am vs. b) Caudales en la red a la 01:00 pm.
Fuente: Elaboración propia.

De la figura 58, se destaca que las líneas principales son las que conducen más caudal mientras que las tuberías de las zonas ramificadas de la red son las que llevan los caudales más bajos. Por otro lado, se pudo identificar que durante la hora valle (05:00 am), el caudal enviado desde el tanque principal fue de 15.97 L/s.

Se puede apreciar en la figura 59 y figura 60 que las tuberías que conducen los caudales más abundantes son las que están conectadas a los tanques de almacenamiento.

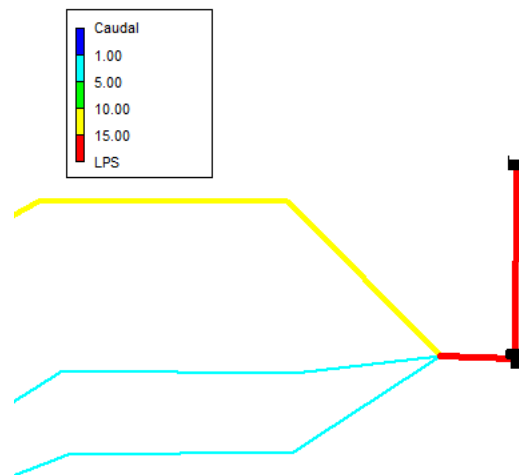


Figura 59. Caudales entrantes y salientes del tanque principal.
Fuente: Elaboración propia.

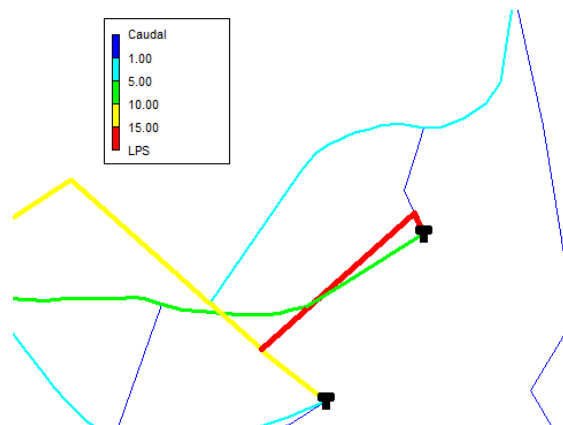







Figura 60. Caudales entrantes y salientes de los tanques de Señor de Flores.
Fuente: Elaboración propia.

Las líneas de distribución principales de la red transportan caudales que van desde 5 hasta 15 L/s, repartidos en tuberías de 50, 110 y 160 mm.

En la hora pico (01:00 pm) se identificó que el caudal enviado desde el tanque principal fue de 17.23 L/s. La diferencia respecto al caudal enviado durante la hora valle fue de 1.26 L/s. Como se puede notar no existe una marcada diferencia en las variaciones de consumo durante estos dos escenarios.

La tabla 22 clasifica los caudales circulantes de la red con los detalles del uso de tubería para la hora pico (01:00 pm) y la hora valle (05:00 am).

Tabla 22. Uso de tubería con base al caudal circulante.

| Caudal (L/s) | Hora pico (01:00 pm) | | Hora valle (05:00 am) | | Simbología |
|-----------------------|----------------------|--------|-----------------------|--------|---|
| | Tubería (m) | % | Tubería (m) | % | |
| Q ≤ 1 | 22020.52 | 70.94 | 22795.41 | 73.44 |  |
| 1 < Q ≤ 5 | 5970.72 | 19.24 | 5265.81 | 16.96 |  |
| 5 < Q ≤ 10 | 116.12 | 0.37 | 496.39 | 1.60 |  |
| 10 < Q ≤ 15 | 2930.65 | 9.44 | 2467.69 | 7.95 |  |
| Q > 15 | 1.50 | 0.005 | 14.21 | 0.05 |  |
| Total | 31039.51 | 100.00 | 31039.51 | 100.00 | |

Fuente: Elaboración propia.

En general de la tabla 22 se destaca que, durante la hora pico, el 70.94 % de las tuberías presentaron caudales menores a 1 L/s, mientras que durante la hora valle el porcentaje de uso de tubería fue de 73.44 %. Otra característica notable en la red es la presencia de tuberías con un caudal entre 1 y 5 L/s, lo cual equivale al 19.24 % de tuberías de la red durante la hora de mayor consumo, mientras que durante la hora de menor consumo esto representa el 16.96 %. De igual manera, otro punto relevante es la escasa o casi nula presencia de caudales superiores a 15 L/s, estos caudales representan menos del 1 % en uso de tuberías de la red y corresponden a las líneas que alimentan los tanques de almacenamiento.

4.2.1.4 Rendimiento de la red de distribución

Los resultados de presión obtenidos en Epanet durante la hora valle (05:00 am) se utilizaron en la aplicación de la ecuación 10, la cual determinó el indicador de rendimiento técnico de la presión $IRT_{pres} = 65.22 \%$. El valor alcanzado indica que el rendimiento hidráulico de las presiones en la red brinda un servicio regular. Es necesario plantear mejoras que permitan que una mayor cantidad de nodos estén dentro de los límites permisibles especialmente en los sectores críticos de la red.

El rendimiento hidráulico de la red para la velocidad durante la hora valle (05:00 am) fue calculado empleando los resultados de Epanet aplicados a la ecuación 11, lo cual dio un $IRT_{vel} = 29.84 \%$. Este valor indica que la red presenta un servicio inaceptable en cuanto a velocidades se refiere. Como se ha visto en el estudio de velocidades, esto se atribuye principalmente al no cumplimiento de las velocidades mínimas permisibles según las guías del CEPIS.

4.2.2 Diagnostico de la RDAP Bayas con el funcionamiento del nuevo tanque

La RDAP Bayas actualmente se encuentra funcionando con cuatro tanques de almacenamiento, dos tanques principales ubicados junto a la Planta de tratamiento, y dos tanques secundarios ubicados en el sector Señor de Flores. El nuevo tanque se halla a una cota más elevada que el antiguo, existiendo entre ambos un desnivel aproximado de 4,20 m. La ubicación y cota del nuevo tanque es bastante similar al antiguo, por lo que se espera que no existan mayor diferencia en los resultados del rendimiento hidráulico de la red (presión y velocidad) con este nuevo tanque.

4.2.2.1 Estudio de presiones

De la misma manera como se ha realizado el diagnóstico de la red antes del funcionamiento del nuevo tanque, en la figura 61 se presentan los gráficos de contorno extraídos del programa Epanet, y en la figura 62 el mapa de la red con los nodos que no cumplen las presiones establecidas por la normativa. En el anexo E se puede verificar el mapa de la red con los nodos que no cumplen las presiones establecidas por la normativa durante la hora pico (01:00 pm).

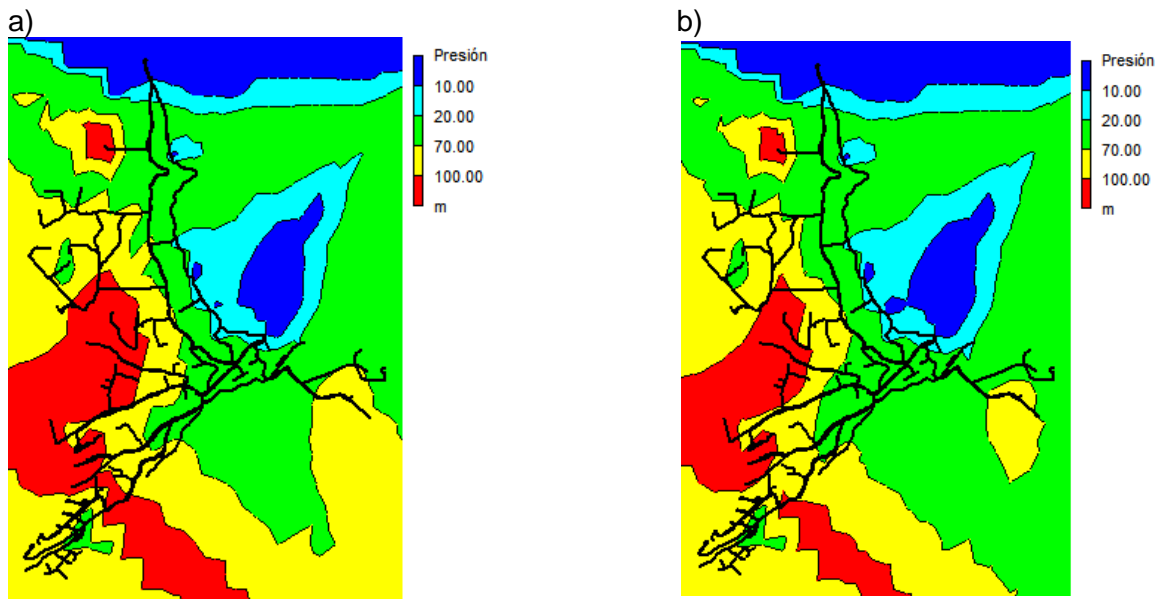


Figura 61. a) Presiones en la red con el nuevo tanque (05:00 am) vs. b) Presiones en la red con el nuevo tanque (01:00 pm).
Fuente: Elaboración propia.

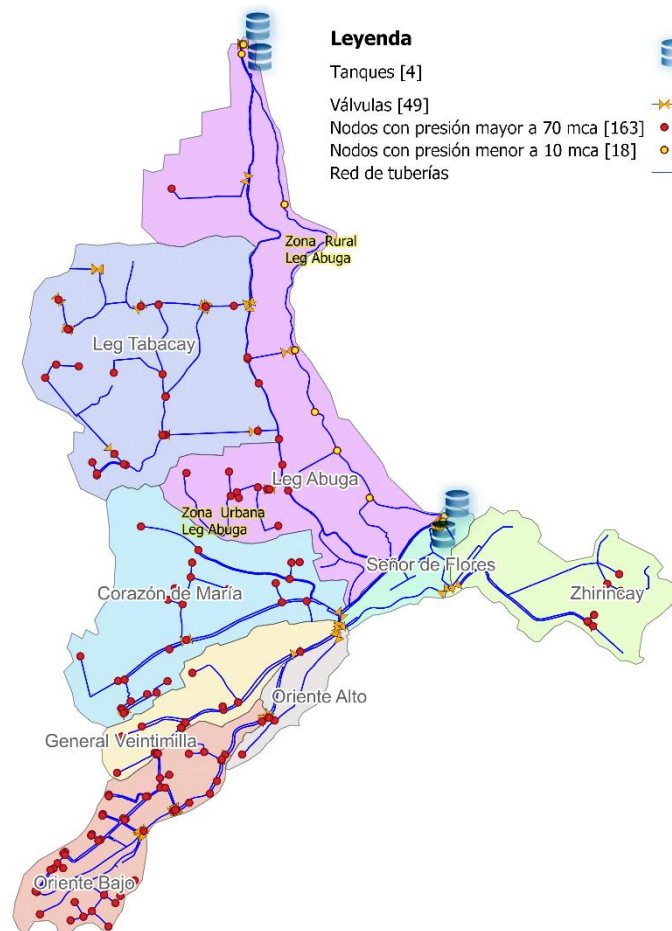


Figura 62. Nodos fuera de los límites permisibles en la red con el nuevo tanque (05:00 am).
Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los mapas de contorno en la figura 61, se aprecia que durante la hora valle (05:00 am) el funcionamiento de la RDAP Bayas incluyendo el nuevo tanque no soluciona el problema de sobrepresiones existente. Hay un total de 163 nodos que tienen una presión superior al límite permitido, similar a lo que ocurría antes de la implementación de este tanque. Por otro lado, el problema de las bajas presiones en la zona rural del Sector Leg Abuga persiste, lo cual indica que la cota de este nuevo tanque no es suficiente para solventar dicho problema. La mejora en las presiones es casi imperceptible si se lo compara con el funcionamiento anterior de la red, únicamente se ha evidenciado que las presiones bajas de Leg Abuga incrementan en aproximadamente 1 mca. En este escenario se halla una presión media de 68.71 mca.

Durante la hora pico (01:00 pm), ocurre lo mismo, es decir, los problemas de sobrepresión existentes antes del funcionamiento del nuevo tanque siguen presentes. Al igual que ocurría antes del funcionamiento del nuevo tanque, existen presiones máximas fuera del límite permisible en siete de los ocho sectores que forman parte de la red. Se tiene una presión media de 65.70 mca, respecto al funcionamiento antiguo de la red este incrementa en 0.19 mca.

En la figura 63 se muestra el análisis estadístico de la presión en los nodos, con el funcionamiento del nuevo tanque.

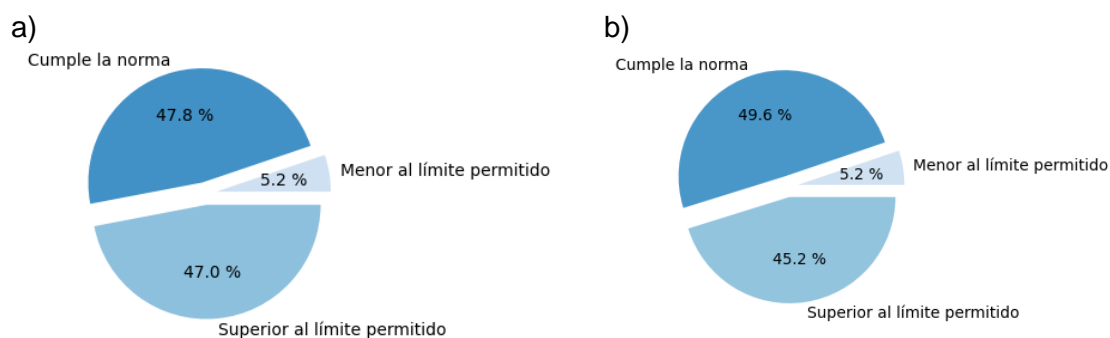


Figura 63. a) Análisis estadístico de los nodos en la red con el nuevo tanque (05:00 am) vs. b) Análisis estadístico de los nodos en la red con el nuevo tanque (01:00 pm).

Fuente: Elaboración propia.

Con base a los resultados estadísticos de la presión que se presentan en la figura 63, se ha identificado que en la hora valle (05:00 am) el 47.00% de los nodos tienen presiones superiores a 70 mca, mientras que el 5.20% de los nodos tienen presiones inferiores a 10 mca. En el caso de la hora pico (01:00 pm) se encuentra la única diferencia de que los nodos con presiones mayores a 70 mca disminuyen a 45.20% del total de nodos de la red.

- **Identificación del sector crítico**

En la figura 64 y figura 65 se presenta un gráfico de barras por sectores, en los que se contabiliza el número de nodos que no cumplen los criterios de evaluación, y se compara con el funcionamiento de la red sin la implementación del nuevo tanque, durante los dos escenarios de análisis respectivamente.

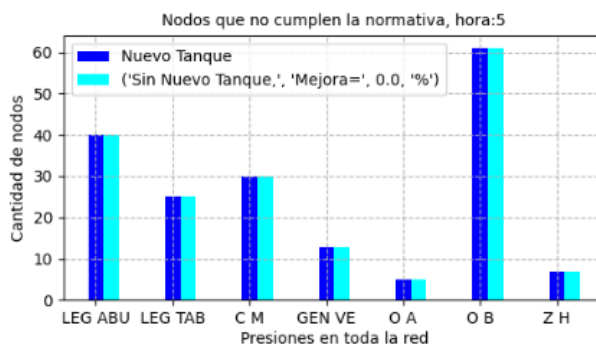


Figura 64. Comparación de nodos que no cumplen la normativa, caso antiguo y actual con el nuevo tanque (05:00 am).
Fuente: Elaboración propia.

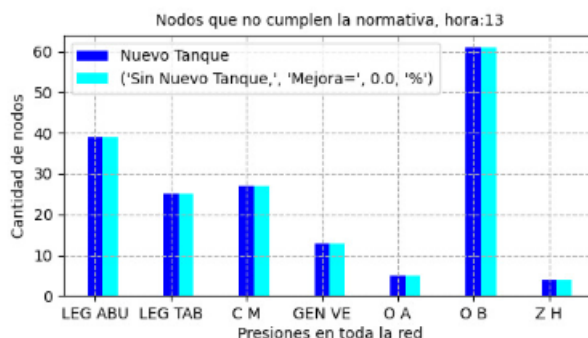


Figura 65. Comparación de nodos que no cumplen la normativa, caso antiguo y actual con el nuevo tanque (01:00 pm).
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 64 y figura 65, tanto en la hora valle (05:00 am) como en la hora pico (01:00 pm), la mejora del funcionamiento hidráulico de la red con el nuevo tanque es del 0 %. Con el funcionamiento del nuevo tanque, la RDAP Bayas continúa presentando sectores críticos en Oriente Bajo, Corazón de María y Leg Tabacay.

En general, se puede notar que la implementación del nuevo tanque no contribuye a mejorar los problemas de presión existentes en la red. Este resultado se debe, principalmente, a que el nuevo tanque se sitúa en la misma zona y a un desnivel similar al del tanque antiguo. La

orografía de la parroquia es uno de los principales factores que condiciona el funcionamiento hidráulico de la red con presiones fuera de un rango permisible.

4.2.2.2 Estudio de velocidades

En la figura 66 se presentan los resultados de velocidades en la red, extraídos del programa Epanet para los escenarios de hora valle (05:00 am) y hora pico (01:00 pm).

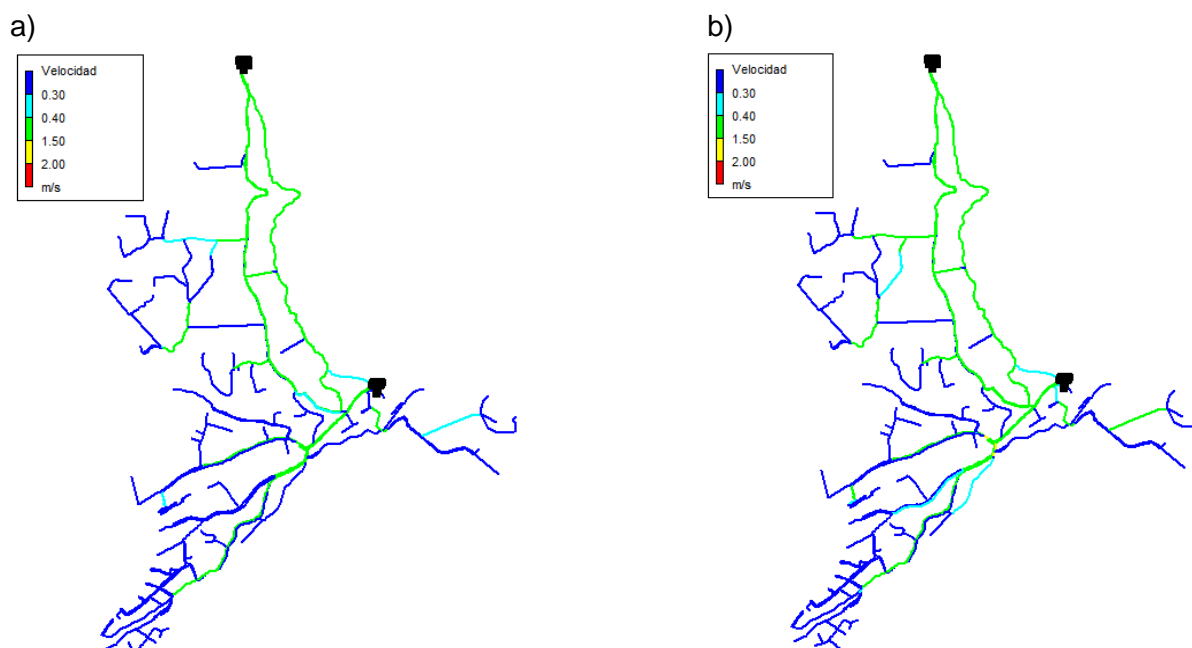


Figura 66. Velocidades en la red con el nuevo tanque (05:00 am) vs. b) Velocidades en la red con el nuevo tanque (01:00 pm).
Fuente: Elaboración propia.

Al examinar los resultados de las velocidades en la hora pico (01:00 pm) y en la hora valle (05:00 am), se puede apreciar que el funcionamiento del nuevo tanque no soluciona el problema de las velocidades bajas que presentaba la red desde un principio. Los resultados de Epanet indican que en la hora pico (01:00 pm) existieron 211 tramos tubería que no cumplieron con los requerimientos mínimos de velocidad, mientras que durante la hora valle (5:00 am) se obtuvieron 230 tramos de tubería con velocidad inferior a 0.3 m/s. Los resultados permiten identificar en la red una velocidad media de 0.31 y 0.39 m/s durante la hora valle y hora pico respectivamente, lo cual indica que respecto al funcionamiento antiguo de la red si existe un incremento en las velocidades, no obstante, este no es suficiente como para solventar los problemas de baja velocidad.

La figura 67 muestra el análisis estadístico de las velocidades en la red con la implementación del nuevo tanque.

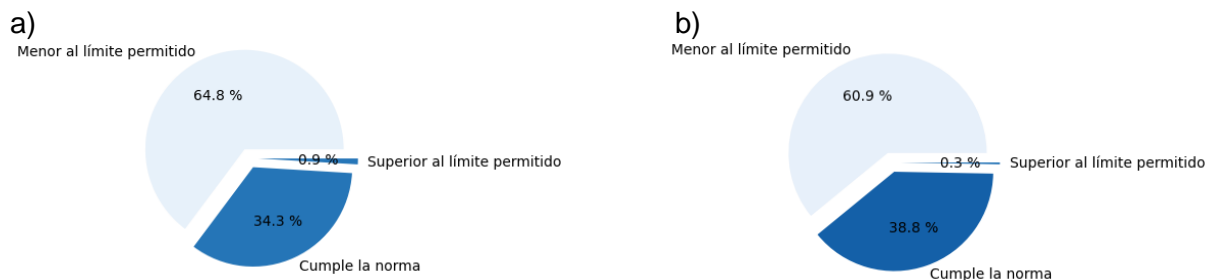


Figura 67. Análisis estadístico de las tuberías en la red con el nuevo tanque (05:00 am) vs b) Análisis estadístico de las tuberías en la red con el nuevo tanque (01:00 pm).

Fuente: Elaboración propia.

A partir del análisis estadístico de velocidades presentado en la figura 67, se identifica que el escenario menos favorable se produce durante la hora valle (05:00 am), en el cual el 64.80 % de las tuberías transporta agua con una velocidad inferior a 0.3 m/s, el 0.9 % de las tuberías transporta agua con una velocidad superior a 2 m/s, el 34.30 % de las tuberías si cumplen los estándares de velocidad. Durante la hora pico (01:00 pm) se produce un incremento de velocidades, en donde los tramos de tuberías con velocidad entre 0.3 y 2 m/s corresponde al 38.80 % de todo el entramado de tuberías.

- **Identificación del sector crítico**

En la figura 68 y figura 69 se presenta la cantidad de tuberías que no cumplen la normativa en cada sector.



Figura 68. Comparación de tuberías que no cumplen la normativa, caso antiguo y actual con el nuevo tanque (05:00 am).

Fuente: Elaboración propia.



Figura 69. Comparación de tuberías que no cumplen la normativa, caso antiguo y actual con el nuevo tanque (01:00 pm). Fuente: Elaboración propia.

Con el funcionamiento del nuevo tanque, persiste la presencia de bajas velocidades durante los dos escenarios de análisis, se puede notar que el sector crítico sigue siendo Oriente Bajo.

Una comparación general con el funcionamiento de la red sin el nuevo tanque evidencia que los problemas del rendimiento hidráulico de la red siguen presentes, por lo que es necesario implementar soluciones alternativas para mejorar los problemas de sobrepresiones y velocidades bajas.

4.2.2.3 Estudio de caudales

La figura 70 muestra los gráficos extraídos del programa Epanet para el análisis de caudales a través de las tuberías del sistema.

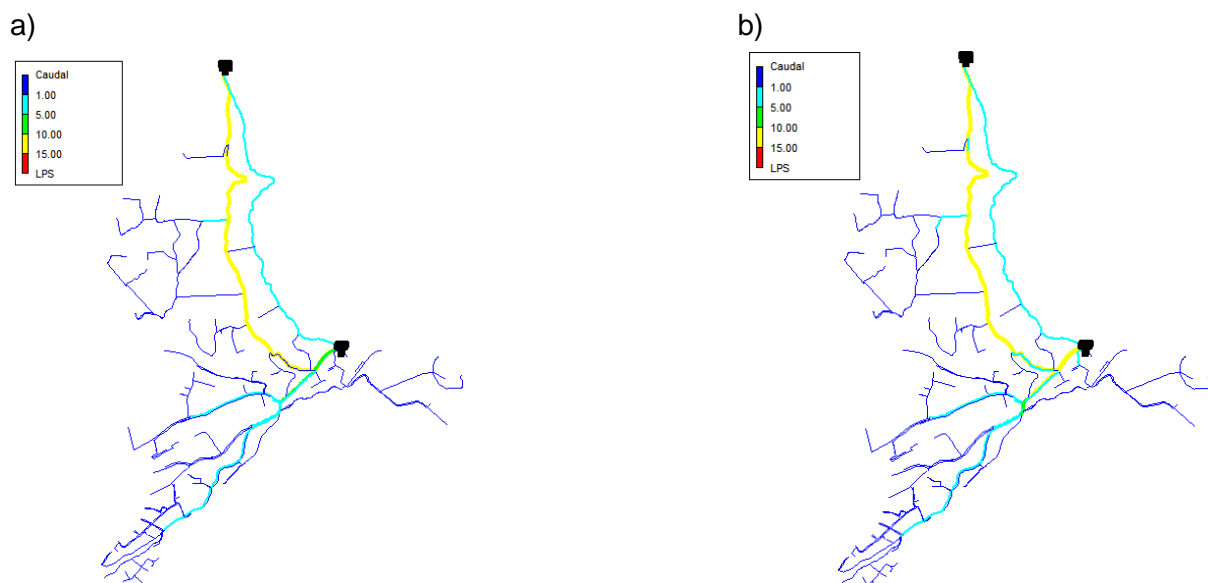





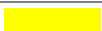

Figura 70. a) Caudales en la red con el nuevo tanque (05:00 am) vs. b) Caudales en la red con el nuevo tanque (01:00 pm). Fuente: Elaboración propia.

Los caudales circulantes en la red durante los dos escenarios de análisis se muestran en la figura 70, en la que se evidencian resultados bastante similares a lo que ocurría antes del funcionamiento del nuevo tanque, es decir las líneas principales conducen caudales altos mientras que las líneas ramificadas conducen caudales bajos.

En la hora pico (01:00 pm), el caudal suministrado desde los tanques principales fue de 18.44 L/s. Se puede observar que, en comparación con el funcionamiento sin el nuevo tanque, este incrementa 1.21 L/s. La presencia del nuevo tanque favorece que el caudal suministrado sea mayor. Durante la hora valle (05:00 am), el caudal enviado desde los tanques principales fue de 17.46 L/s, al igual que ocurre en la hora pico; este caudal es mayor al que se transportaba desde la planta cuando existía un solo tanque principal.

En la tabla 23 se presenta el caudal que circula en la red y el uso de tubería correspondiente en cada intervalo de caudal.

Tabla 23. Uso de tubería con base al caudal circulante en la red con el nuevo tanque.

| Caudal (L/s) | Hora pico (01:00 pm) | | Hora valle (05:00 am) | | Simbología |
|-----------------------|----------------------|--------|-----------------------|--------|---|
| | Tubería (m) | % | Tubería (m) | % | |
| Q ≤ 1 | 21509.08 | 69.28 | 22801.35 | 73.45 |  |
| 1 < Q ≤ 5 | 6479.12 | 20.87 | 5266.31 | 16.96 |  |
| 5 < Q ≤ 10 | 116.12 | 0.37 | 496.39 | 1.60 |  |
| 10 < Q ≤ 15 | 2917.66 | 9.40 | 2463.87 | 7.94 |  |
| Q > 15 | 23.47 | 0.08 | 17.53 | 0.06 |  |
| Total | 31045.45 | 100.00 | 31045.45 | 100.00 | |

Fuente: Elaboración propia.

De forma general, la tabla 23 demuestra que, durante los dos escenarios desfavorables de la red (hora valle y hora pico), existe una predominancia de tuberías que transportan caudal menor a 1 L/s, sin embargo, la presencia del nuevo tanque ha garantizado que durante la hora pico exista 1.63 % más de tuberías que transportan caudal entre 1 y 5 L/s.

Los resultados del análisis de la RDAP Bayas con el funcionamiento del nuevo tanque indicaron que la presencia de este no mejora significativamente los parámetros hidráulicos de la red como son la presión y velocidad. Este nuevo tanque dará beneficios futuros debido al crecimiento de la población y, por tanto, el aumento de las solicitudes de caudal en la red.

4.2.2.4 Rendimiento de la red de distribución

Los resultados de presión obtenidos en Epanet durante la hora valle (05:00 am) se utilizaron en la aplicación de la ecuación 10, la cual determinó el índice de rendimiento técnico de la presión $IRT_{pres} = 65.21 \%$, este valor indica que el rendimiento hidráulico de las presiones en la red presenta un servicio regular. Por otro lado, el rendimiento hidráulico de la red para la velocidad fue calculado empleando los resultados de Epanet aplicados a la ecuación 11, lo cual dio como resultado un $IRT_{vel} = 29.86 \%$, esto indica que la red presenta un servicio inaceptable.

El funcionamiento hidráulico de la red no se ha resuelto con la presencia del nuevo tanque, por lo cual en el siguiente apartado se detallan las propuestas de mejora que se han estudiado para solucionar problemas de sobrepresiones y velocidades bajas existentes en el sistema.

4.3 Propuesta de mejoras a la RDAP Bayas

Los análisis efectuados permitieron identificar sectores críticos en los cuales el principal problema fue el de las sobrepresiones. Esto, como ya se ha mencionado, provoca que la red esté sometida a un aumento del volumen de agua fugado debido a daños que se generan en las tuberías y otros elementos del sistema; a su vez, los daños en las tuberías requieren de una constante reparación, lo cual ocasiona interrupciones del servicio y un gasto económico importante por parte de la JAAPRB.

La gestión de las presiones en la red implica el manejo de los niveles de presión dentro de un rango óptimo de servicio que garantice el suministro suficiente y eficiente para usos y consumos legítimos.

Otra cuestión relevante detectada en la red fue el problema de las velocidades bajas. Estas limitan la auto limpieza de las tuberías y, por ende, compromete la calidad del agua que reciben los usuarios.

Las propuestas de mejora examinadas se centraron en controlar las sobrepresiones en los sectores críticos y mejorar las velocidades en el sistema, evitando en lo posible tener que implementar componentes que requieren un mayor gasto en personal de operación, como es el caso de las bombas de impulsión.

4.3.1 Colocación de válvulas reductoras de presión (VRP)

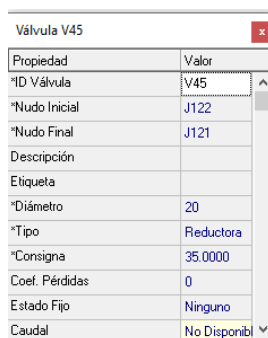
Las válvulas son líneas que limitan las presiones o caudales en puntos específicos de la red (Rossman, 2000). Epanet requiere los siguientes datos de entrada:

- a) Nodos aguas arriba y aguas abajo
- b) Diámetro
- c) Consigna
- d) Estado

Las VRP limitan la presión aguas abajo de la válvula. En Epanet las VRP no pueden conectarse directamente a un embalse, en caso de realizarlo se debe conectar con una línea que tenga una longitud pequeña, no pueden compartir nodos aguas arriba y aguas abajo, tampoco se pueden colocar en serie. Estas válvulas presentan tres tipos de estado:

- *Parcialmente abierto*: En este estado la VRP se encuentra activa y la presión aguas abajo toma el valor de la consigna, siempre y cuando la presión aguas arriba es mayor a la presión de aguas abajo.
- *Completamente abierto*: Sucede cuando la presión aguas arriba es menor al valor de la consigna, funciona como si fuera una válvula de regulación.
- *Cerrada*: La presión aguas abajo resulta mayor a la presión aguas arriba, en este caso funciona como una válvula de retención, impidiendo el flujo en dirección contraria.

En Epanet se tienen los estados: abiertos, cerrado y ninguno. Para las VRG se colocó el estado abierto y cerrado dependiendo de su funcionamiento. A Las VRP se les asignó el estado ninguno con un valor prefijado a la consigna, tal como se aprecia en la figura 71.



| Propiedad | Valor |
|----------------|--------------|
| *ID Válvula | V45 |
| *Nudo Inicial | J122 |
| *Nudo Final | J121 |
| Descripción | |
| Etiqueta | |
| *Diámetro | 20 |
| *Tipo | Reductora |
| *Consigna | 35.0000 |
| Coef. Pérdidas | 0 |
| Estado Fijo | Ninguno |
| Caudal | No Disponibl |

Figura 71. Datos de entrada en las VRP.
Fuente: Elaboración propia.

CONAGUA (2016b) recomienda el uso de VRP para controlar las presiones altas en la red. Para este propósito, sugiere que se deben colocar las válvulas en los sectores con diferenciales de cotas superiores a 50 metros. Una vez identificados estos sectores, las

válvulas se deben ubicar en el punto en el que tengan mayor área de influencia y generen la menor cantidad de obra posible.

Se han instalado siete nuevas válvulas, de las cuales seis son VRP y una VRG, además se ha visto la necesidad de mover seis válvulas que se encontraban ubicadas en puntos donde el área de influencia de estas no generaba los mejores resultados en el sistema. Estos cambios se realizaron conforme a los criterios establecidos por CONAGUA (2016b).

La tabla 24 muestra las válvulas que se han añadido al sistema, así como su identificación, sector y consigna.

Tabla 24. Nuevas válvulas colocadas en la red.

| ID | Tipo | Sector | Consigna (mca) |
|------------|-------------|-----------------------|-----------------------|
| V50 | Reductora | Leg Abuga (LEG ABU) | 30 |
| V51 | Reductora | Leg Tabacay (LEG TAB) | 35 |
| V52 | Reductora | Leg Abuga (LEG ABU) | 30 |
| V53 | Reductora | Corazón de María (CM) | 35 |
| V54 | Reductora | Oriente Alto (OA) | 35 |
| V55 | Regulación | Oriente Bajo (OB) | |
| V56 | Reductora | Zhirincay (ZH) | 35 |

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 25 se detallan las válvulas que se han cambiado de posición a puntos donde generen una mayor área de influencia.

Tabla 25. Cambio de posición de válvulas en la red.

| Id | Tipo | Sector | Consigna (mca) |
|-----------|-------------|---------------------------|-----------------------|
| V12 | Reductora | Gen. Veintimilla (GEN VE) | 35 |
| V24 | Reductora | Leg Tabacay (LEG TAB) | 35 |
| V26 | Reductora | Leg Tabacay (LEG TAB) | 35 |
| V33 | Reductora | Corazón de María (CM) | 35 |
| V41 | Reductora | Oriente Bajo (OB) | 35 |
| V45 | Reductora | Leg Tabacay (LEG TAB) | 35 |

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 72, se pueden visualizar las válvulas que se han cambiado de posición (izquierda), y el mapa de la red con las válvulas que se han agregado al sistema (derecha).

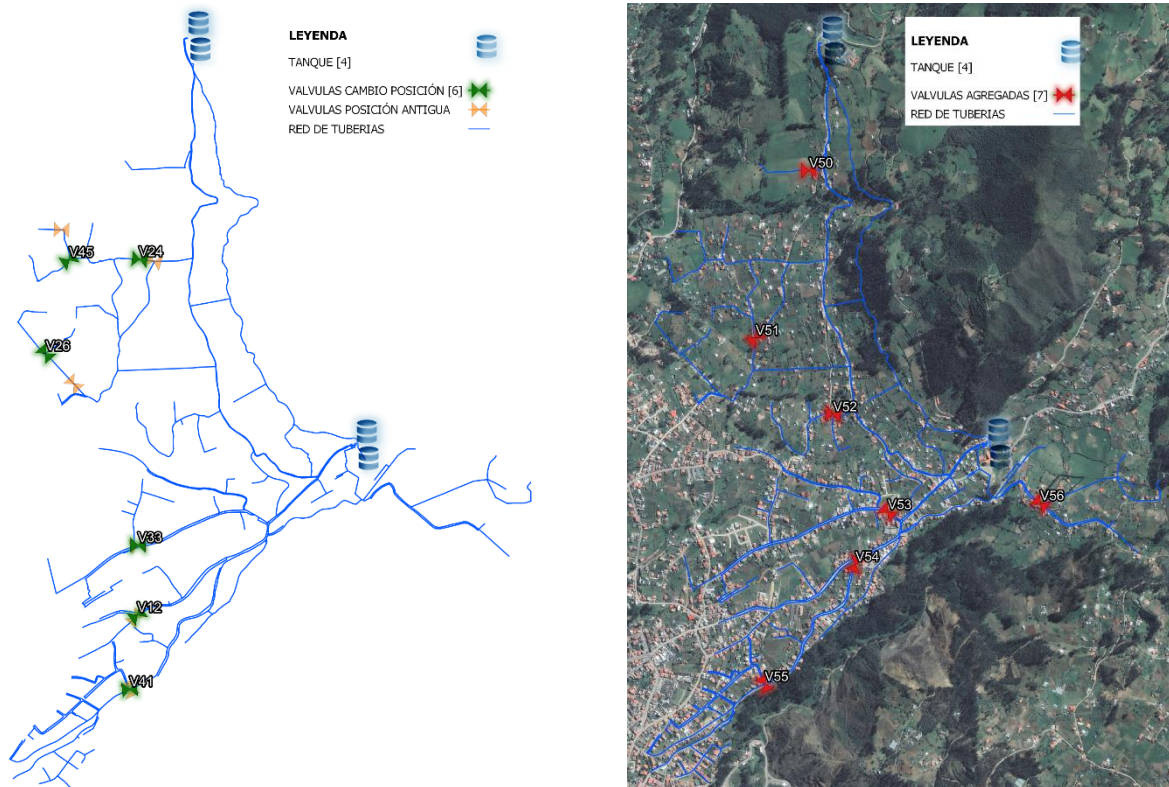


Figura 72. Red con los cambios de posición de válvulas (izquierda). Mapa de la red con las nuevas válvulas (derecha).
Fuente: Elaboración propia.

Los cambios propuestos en el sistema han sido confirmados y validados con el modelo hidráulico ejecutado en el programa Epanet. A continuación, se presentan los resultados alcanzados con esta propuesta de mejora; en el anexo G se incluyen los resultados generales de presión y velocidad durante la hora pico (01:00 pm).

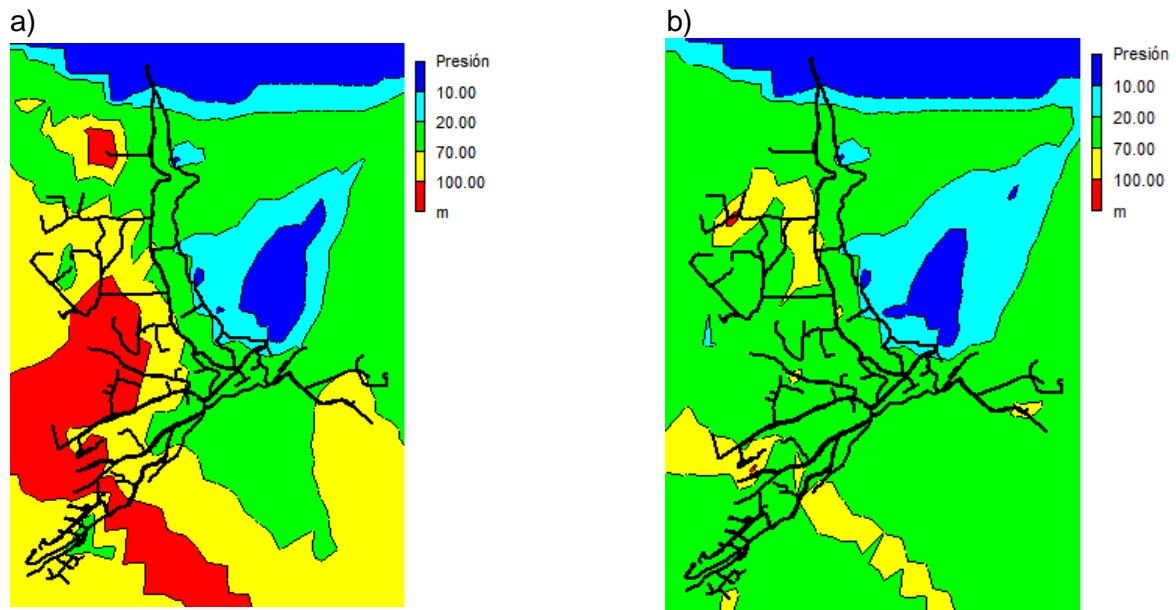


Figura 73. a) Presiones en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Presiones en la red con las VRP (05:00 am).
Fuente: Elaboración propia.

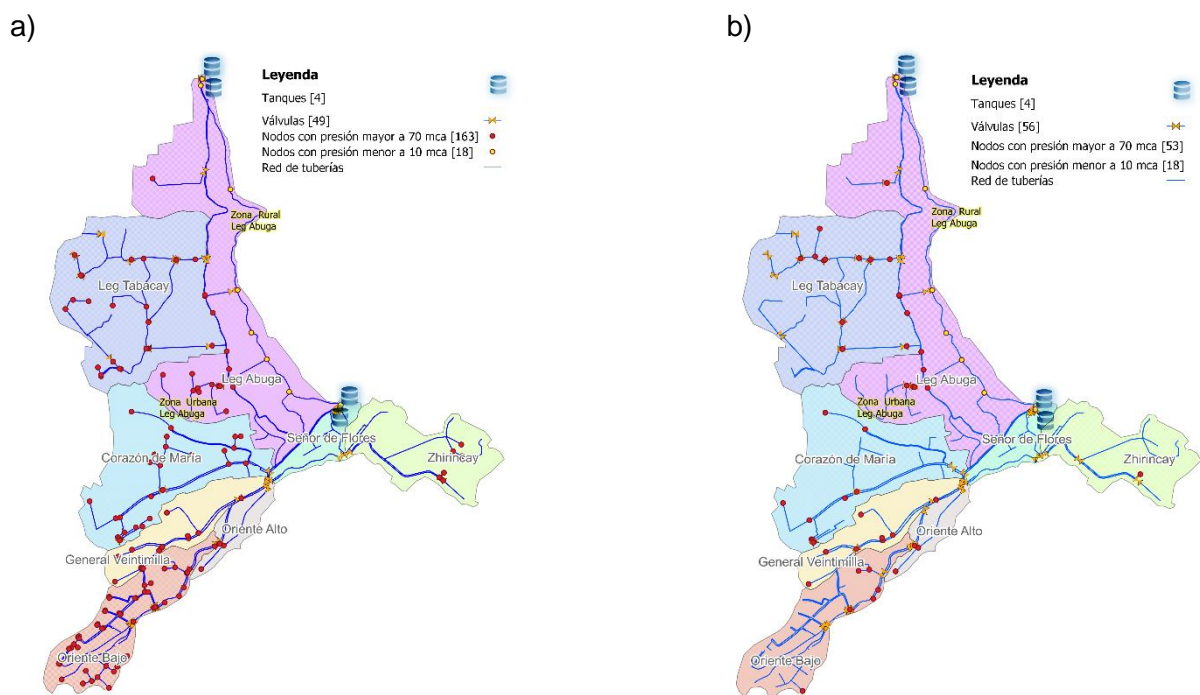


Figura 74. a) Nodos fuera de los límites permisibles en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Nodos fuera de los límites permisibles en la red con las VRP (05:00 am).
Fuente: Elaboración propia.

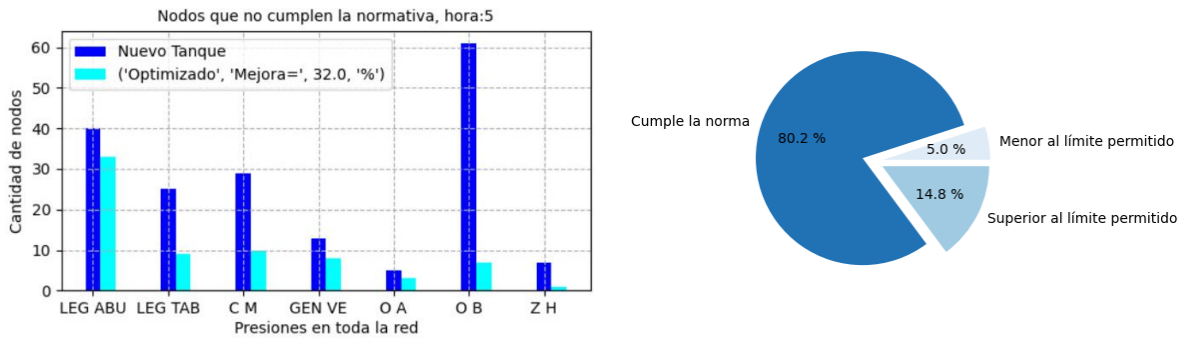


Figura 75. Gráfico de barras comparativo de los nodos que no cumplen la normativa, en la red sin modificaciones y con las VRP (izquierda); y análisis estadístico de los nodos en la red con las VRP (derecha), a las 05:00 am. Fuente: Elaboración propia.

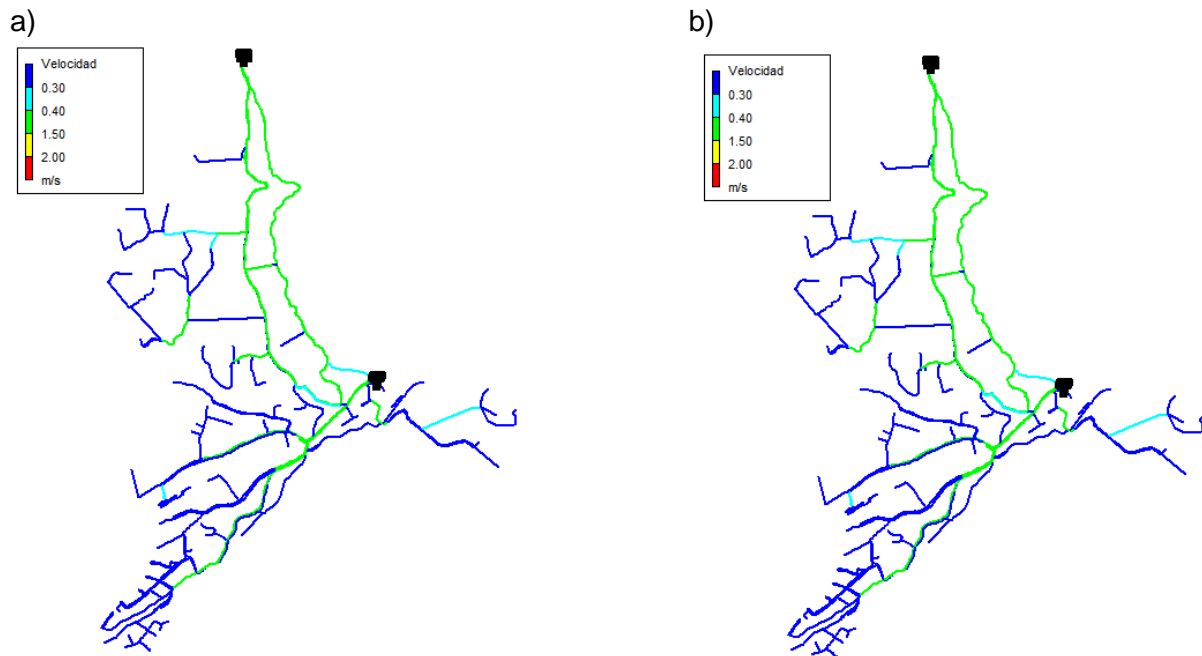


Figura 76. a) Velocidades en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Velocidades en la red con las VRP (05:00 am). Fuente: Elaboración propia.

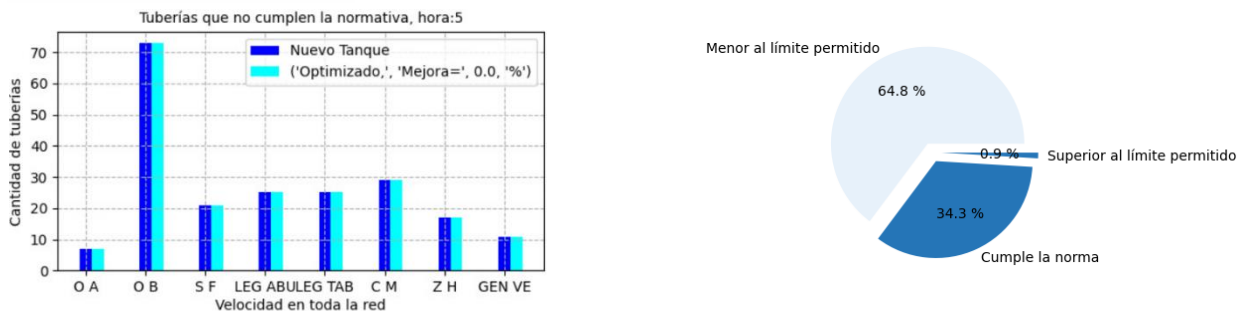


Figura 77. Gráfico de barras comparativo de las tuberías que no cumplen la normativa, en la red sin modificaciones y con las VRP (izquierda); y análisis estadístico de las tuberías en la red con las VRP (derecha), a las 05:00 am.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Uso de tubería con base al caudal circulante en la red con las VRP.

| Caudal (L/s) | Hora pico (9:00 pm) | | Hora valle (5:00 am) | | Simbología |
|--------------|---------------------|---------------|----------------------|---------------|------------|
| | Tubería (m) | % | Tubería (m) | % | |
| Q ≤ 1 | 21512.44 | 69.28 | 22804.71 | 73.44 | ■ |
| 1 < Q ≤ 5 | 6483.12 | 20.88 | 5270.31 | 16.97 | ■ |
| 5 < Q ≤ 10 | 116.12 | 0.37 | 496.39 | 1.60 | ■ |
| 10 < Q ≤ 15 | 2917.66 | 9.40 | 2463.87 | 7.93 | ■ |
| Q > 15 | 23.47 | 0.08 | 17.53 | 0.06 | ■ |
| Total | 31052.81 | 100.00 | 31052.81 | 100.00 | |

Fuente: Elaboración propia.

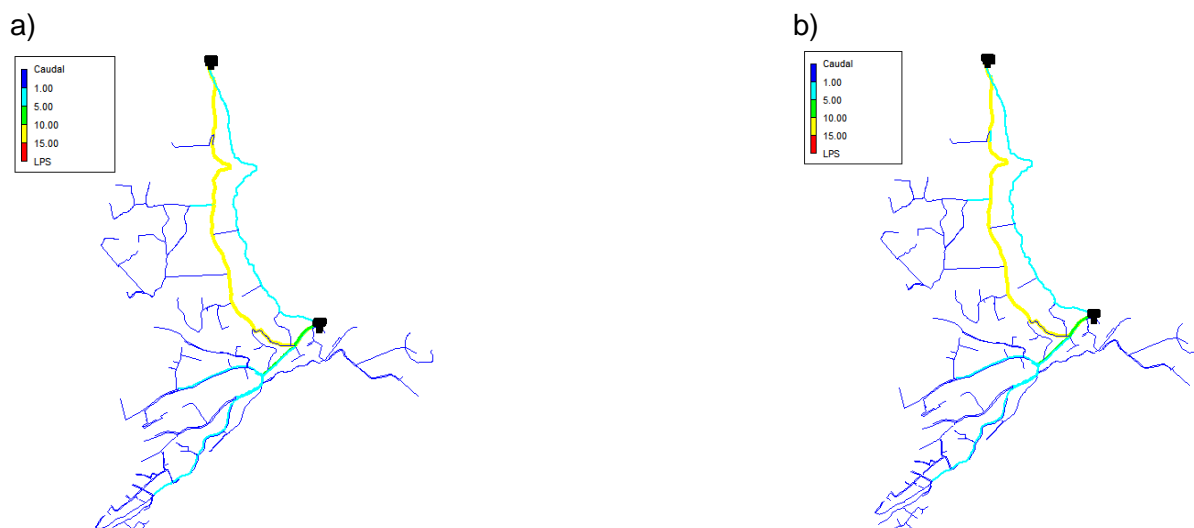


Figura 78. a) Caudales en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Caudales en la red con las VRP (05:00 am).
Fuente: Elaboración propia.

- Análisis de la propuesta

Al evaluar los resultados obtenidos con esta propuesta, se puede verificar a través de la figura 73 que existen más zonas (color verde) con presiones que van desde 20 hasta 70 mca.

La instalación de las válvulas reductoras de presión contribuye a mejorar las sobrepresiones existentes, pasando de 163 nodos con presión superior a 70 mca, a solo 53 nodos con presión superior a 70 mca, tal como se puede apreciar en la figura 74. Por otro lado, se puede notar que respecto a las presiones bajas no se obtiene ninguna mejora, siguen presentes 18 nodos con presión inferior a 10 mca en el sector Leg Abuga.

La figura 75 muestra una mejora significativa de las presiones del sistema, especialmente en el sector Oriente Bajo. Asimismo, conviene destacar la mejora de las presiones en los sectores Corazón de María y Leg Tabacay. Con esta propuesta se ha logrado reducir la presión media hasta 47.11 mca.

Se puede apreciar en la figura 76 que, no ha existido incremento de velocidad en ninguno de los tramos de la red. En la figura 77 se puede notar que no ha existido mejora de las velocidades en ningún sector, siendo así que únicamente el 34.30 % de tuberías cumplen con los estándares de velocidad establecidos por el CEPIS. La velocidad media en el sistema se mantiene en 0.31 m/s.

Con respecto a los caudales que circulan en la red tanto en la hora pico (01:00 pm) como en la hora valle (05:00 am), se puede apreciar en la tabla 26 que con la implementación de estas válvulas no existe cambio alguno en el flujo de agua a través de las tuberías, predomina la presencia de tuberías que transportan caudal menor a 1 L/s. En la figura 78 se puede visualizar que las líneas principales de la red siguen siendo las únicas que transportan caudales altos.

Se obtuvo un $IRT_{pres} = 92.87\%$, el cual nos indica que la RDAP Bayas con esta propuesta tiene un servicio bueno cercano al óptimo, en cuanto a presiones se refiere. Se puede apreciar que comparado al IRT_{pres} hallado sin aplicar esta propuesta, se mejoró un 27.66 %.

En cuanto al IRT_{vel} , se obtuvo un valor de 29.86 % lo cual indica que la colocación de VRP no mejora el rendimiento hidráulico de la red en cuanto a velocidades se refiere. Este valor obtenido clasifica a la red con un servicio inaceptable en cuanto a velocidades se refiere.

En general, esta propuesta ha mejorado de forma significativa el problema de sobrepresiones en varios sectores de la red, principalmente en el sector Oriente Bajo, seguido de Corazón

de María y Leg Tabacay. En los nodos con presiones fuera de los límites permisibles se ha logrado una mejora del 32 % en comparación con el estado actual de la red, esto se puede apreciar en la figura 81. No obstante, el problema de las bajas velocidades persiste, ya que las VRP no cumplen con dicho objetivo.

4.3.2 Aplicación del algoritmo de optimización

En esta propuesta se desarrolló un algoritmo con base en la metodología indicada en el capítulo 3, este algoritmo tuvo como objetivo encontrar un diámetro que minimice la función costo detallada en la ecuación 15. Uno de los requisitos para la aplicación fue que las tuberías tengan un ID específico: $P_1, P_2, P_3, \dots, P_i, \dots, P_n$. Esta nomenclatura ayudó a la optimización por sectores. En el anexo F se encuentra la codificación completa del algoritmo desarrollado. La aplicación de esta propuesta se realizó en dos sectores críticos del sistema de distribución.

Según el diagnóstico de la red, se halló que el sector más crítico tanto en presiones como en velocidades fue Oriente Bajo. Este sector abarca una considerable zona urbana del sistema, por lo cual para poder aplicar el algoritmo se tuvo que condicionar la solución óptima dentro de un rango de diámetros cercanos a los 63 mm.

El segundo sector en el que se aplicó este algoritmo fue Corazón de María, este es otro sector crítico que abarca una gran cantidad de nodos con sobrepresión y tuberías con velocidad baja. En este no se tuvo la necesidad de limitar la solución óptima, debido a que es un sector menos urbanizado que Oriente Bajo.

Es importante mencionar que se descartó la aplicación del algoritmo en otros sectores de la red debido a que las mejoras obtenidas con el cambio de diámetros no representaban resultados favorables en el sistema.

Se han establecido los diámetros comerciales para la sustitución de tuberías en función de las características de los sectores en los que se aplicó el algoritmo, como se indica a continuación.

Para el sector Oriente Bajo se usaron diámetros comerciales 40, 50 y 63 mm. Mientras que para el sector Corazón de María se utilizaron diámetros comerciales 25, 32, 40, 50 y 63 mm.

Cabe destacar que el algoritmo en cada ejecución evalúa un solo sector, por lo que en primer lugar se usó el algoritmo para el sector Corazón de María, una vez que se encontraron los diámetros óptimos para este, se procedió a ejecutar el algoritmo para optimizar el sector Oriente Bajo.

Otro aspecto a tener en cuenta es que se ejecutó este algoritmo en la red sin ninguna mejora, sin embargo, se comprobó que, colocando las válvulas de la primera propuesta y luego ejecutando el algoritmo en los sectores antes mencionados, se obtuvieron los mejores resultados para optimizar la eficiencia hidráulica de la red.

En la figura 79 se puede apreciar el total de tramos de tubería que necesitan cambio de diámetro en los sectores Oriente Bajo y Corazón de María, con base a la solución óptima encontrada mediante el algoritmo desarrollado.

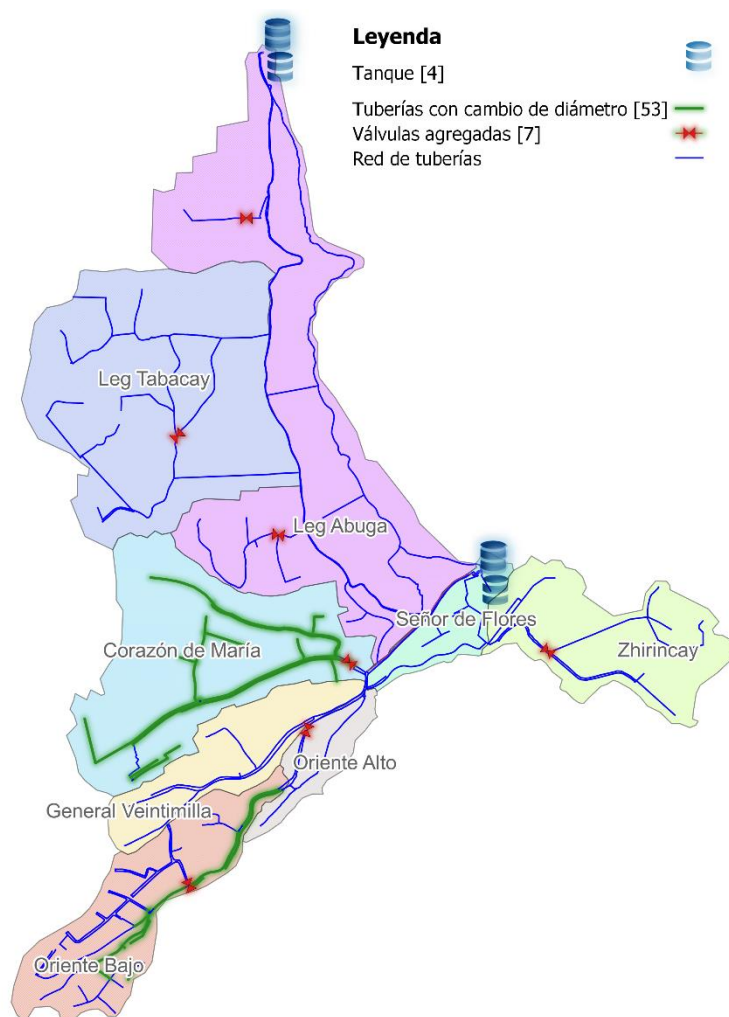


Figura 79. Mapa de la red con los cambios de diámetro encontrados con el algoritmo desarrollado.

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 27 y tabla 28 detalla los cambios de diámetro en los dos sectores críticos, se indica la longitud de cada tramo de tubería con su respectivo id, diámetro actual, diámetro nuevo (óptimo) y costo de instalación.

Tabla 27. Cambios de diámetro y costo del suministro e instalación de tuberías en el sector Oriente Bajo.

| Sector | id | Longitud (m) | Diámetro Actual (mm) | Diámetro Nuevo (mm) | Precio unitario (\$/m) | Costo Sum-Inst. (\$) |
|---------------|-----------|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| O B | T159 | 58.10 | 63 | 40 | 2.06 | 119.69 |
| O B | T167 | 187.20 | 63 | 50 | 2.88 | 539.14 |
| O B | T168 | 50.00 | 25 | 40 | 2.06 | 103.00 |
| O B | T166 | 4.81 | 63 | 50 | 2.88 | 13.85 |
| O B | T161 | 252.55 | 63 | 50 | 2.88 | 727.34 |
| O B | T139 | 127.93 | 63 | 50 | 2.88 | 368.44 |
| O B | T137 | 2.19 | 63 | 40 | 2.06 | 4.51 |
| O B | T110 | 65.89 | 63 | 40 | 2.06 | 135.73 |
| O B | T111 | 28.69 | 63 | 40 | 2.06 | 59.10 |
| O B | T102 | 79.99 | 25 | 40 | 2.06 | 164.78 |
| O B | T104 | 119.17 | 63 | 40 | 2.06 | 245.49 |
| O B | T101 | 9.09 | 63 | 40 | 2.06 | 18.73 |
| O B | T100 | 116.18 | 63 | 40 | 2.06 | 239.33 |
| O B | T98 | 73.86 | 63 | 40 | 2.06 | 152.15 |
| O B | T96 | 35.84 | 25 | 63 | 3.28 | 117.56 |
| O B | T95 | 37.24 | 25 | 63 | 3.28 | 122.15 |
| O B | T162 | 280.00 | 32 | 40 | 2.06 | 576.80 |
| O B | T130 | 4.14 | 63 | 40 | 2.06 | 8.53 |
| O B | T131 | 1.70 | 63 | 40 | 2.06 | 3.50 |
| O B | T133 | 1.29 | 63 | 40 | 2.06 | 2.66 |
| O B | T132 | 5.36 | 63 | 40 | 2.06 | 11.04 |
| O B | T103 | 25.11 | 25 | 40 | 2.06 | 51.73 |
| Total | | 1566.33 | | | | \$3,785.24 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Cambios de diámetro y costo del suministro e instalación de tuberías en el sector Corazón de María.

| Sector | id | Longitud (m) | Diámetro Actual (mm) | Diámetro Nuevo (mm) | Precio unitario (\$/m) | Costo Sum- Inst. (\$) |
|---------------|-----------|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| C M | T76 | 71.55 | 50 | 25 | 1 | 71.55 |
| C M | T72 | 53.82 | 63 | 25 | 1.31 | 70.50 |
| C M | T52 | 260.30 | 63 | 25 | 1.31 | 340.99 |
| C M | T84 | 142.82 | 63 | 25 | 1.31 | 187.09 |
| C M | T77 | 106.90 | 50 | 40 | 2.06 | 220.21 |
| C M | T83 | 58.39 | 32 | 25 | 1.31 | 76.49 |
| C M | T82 | 29.16 | 32 | 25 | 1.31 | 38.20 |
| C M | T80 | 344.05 | 63 | 40 | 2.06 | 708.75 |
| C M | T75 | 364.77 | 50 | 40 | 2.06 | 751.43 |
| C M | T63 | 1.16 | 50 | 32 | 1.76 | 2.04 |
| C M | T53 | 281.57 | 50 | 25 | 1.31 | 368.86 |
| C M | T73 | 139.77 | 50 | 40 | 2.06 | 287.93 |
| C M | T71 | 41.14 | 50 | 25 | 1.31 | 53.89 |
| C M | T69 | 58.72 | 50 | 25 | 1.31 | 76.92 |
| C M | T68 | 139.33 | 32 | 25 | 1.31 | 182.52 |
| C M | T67 | 51.47 | 50 | 25 | 1.31 | 67.43 |
| C M | T62 | 0.31 | 50 | 40 | 2.06 | 0.64 |
| C M | T61 | 260.45 | 50 | 25 | 1.31 | 341.19 |
| C M | T78 | 61.30 | 50 | 25 | 1.31 | 80.30 |
| C M | T66 | 75.86 | 40 | 25 | 1.31 | 99.38 |
| C M | T65 | 519.25 | 50 | 25 | 1.31 | 680.22 |
| C M | T54 | 74.74 | 32 | 25 | 1.31 | 97.91 |
| C M | T57 | 102.91 | 63 | 25 | 1.31 | 134.81 |
| C M | T56 | 11.46 | 63 | 25 | 1.31 | 15.01 |
| C M | T55 | 131.77 | 63 | 25 | 1.31 | 172.62 |
| C M | T88 | 21.89 | 50 | 63 | 3.28 | 71.80 |
| C M | T85 | 1.00 | 63 | 40 | 2.06 | 2.06 |
| C M | T81 | 505.87 | 63 | 25 | 1.31 | 662.69 |
| C M | T79 | 228.28 | 50 | 25 | 1.31 | 299.04 |
| C M | T74 | 1.00 | 50 | 40 | 2.06 | 2.06 |

Tabla 28. (continuación) Cambios de diámetro y costo del suministro e instalación de tuberías en el sector Corazón de María.

| Sector | id | Longitud (m) | Diámetro Actual (mm) | Diámetro Nuevo (mm) | Precio unitario (\$/m) | Costo Sum-Inst. (\$) |
|--------------|-----|--------------|----------------------|---------------------|------------------------|----------------------|
| C M | T87 | 1.00 | 50 | 63 | 3.28 | 3.28 |
| Total | | 4142.01 m | | | | \$6,167.82 |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los resultados de colocar las válvulas descritas en la primera propuesta y ejecutar el algoritmo para obtener los diámetros óptimos para el funcionamiento de la red; en el anexo H se incluyen los resultados generales de presiones y velocidades durante la 01:00 pm.

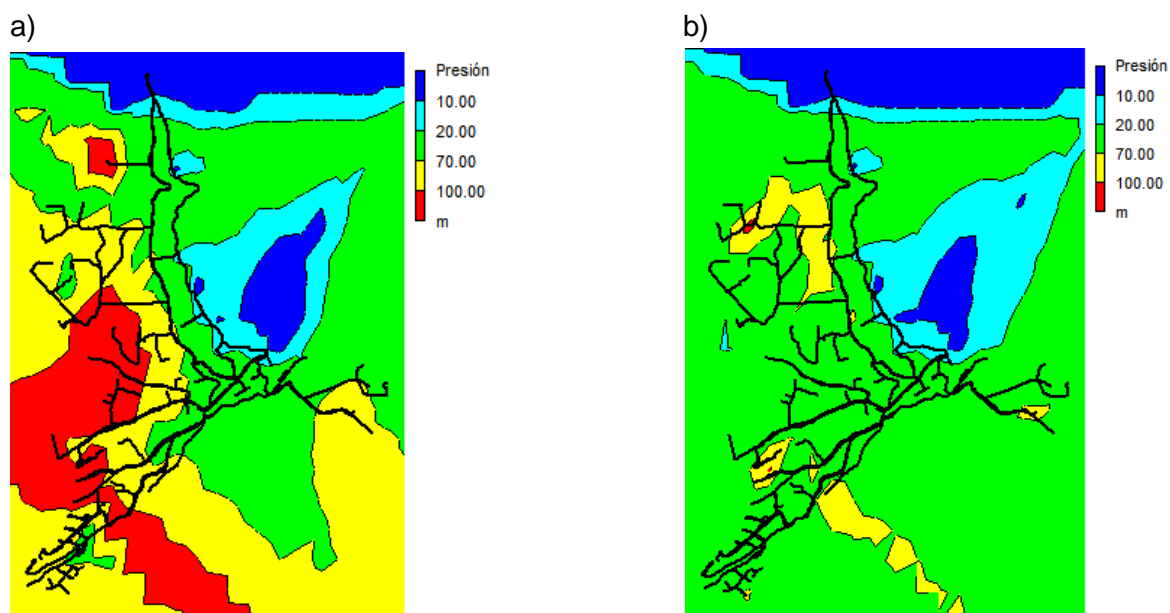


Figura 80. a) Presiones en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Presiones en la red con diámetros óptimos y VRP (05:00 am).

Fuente: Elaboración propia.

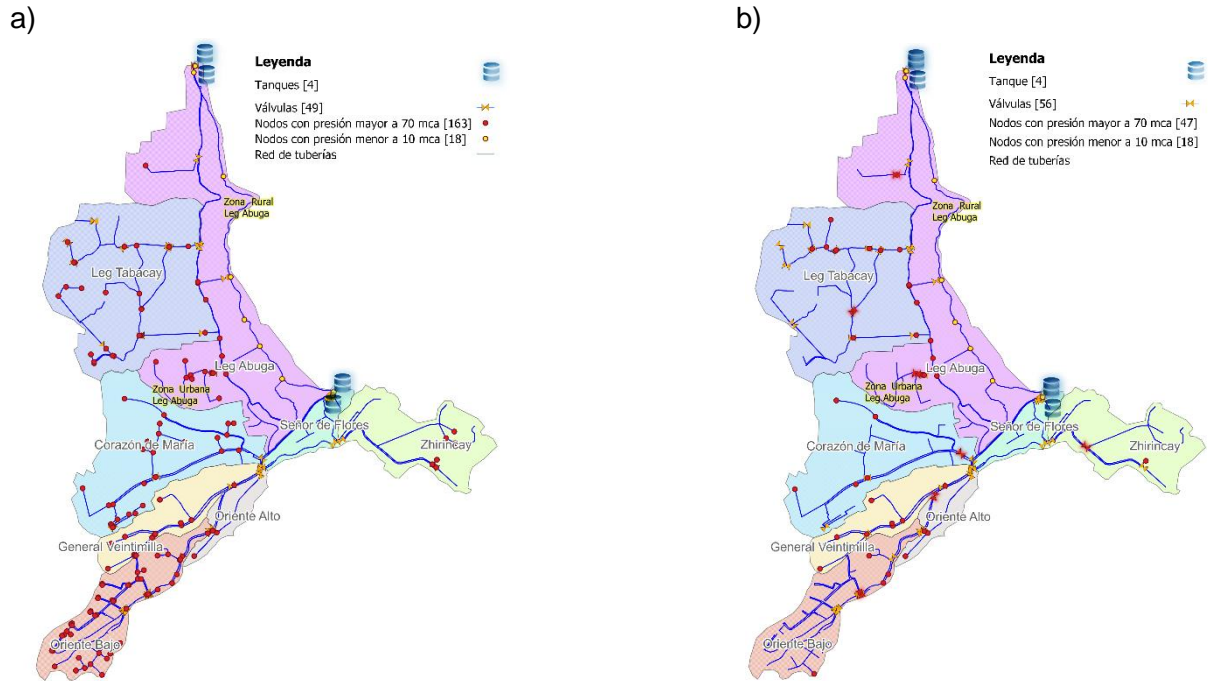


Figura 81. a) Nodos fuera de los límites permisibles en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Nodos fuera de los límites permisibles en la red con diámetros óptimos y VRP (05:00 am).

Fuente: Elaboración propia.

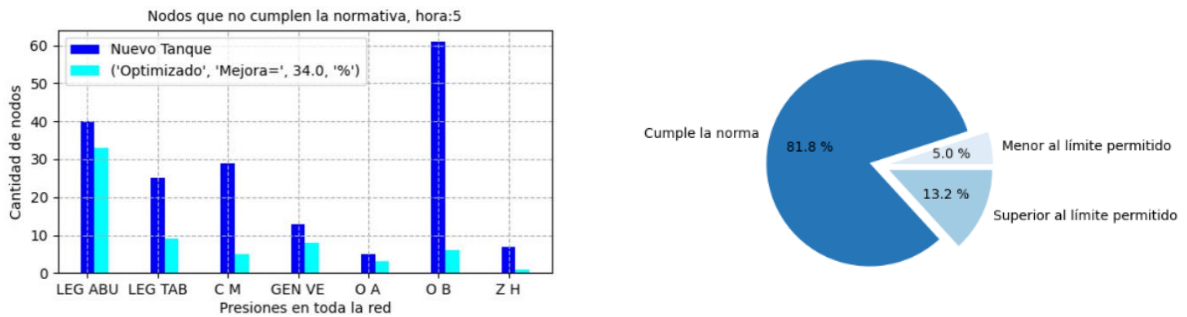


Figura 82. Gráfico de barras comparativo de los nodos que no cumplen la normativa, en la red sin modificaciones y con los diámetros óptimos y VRP (izquierda); análisis estadístico de los nodos en la red con los diámetros óptimos y VRP (derecha), a las 05:00 am.

Fuente: Elaboración propia.

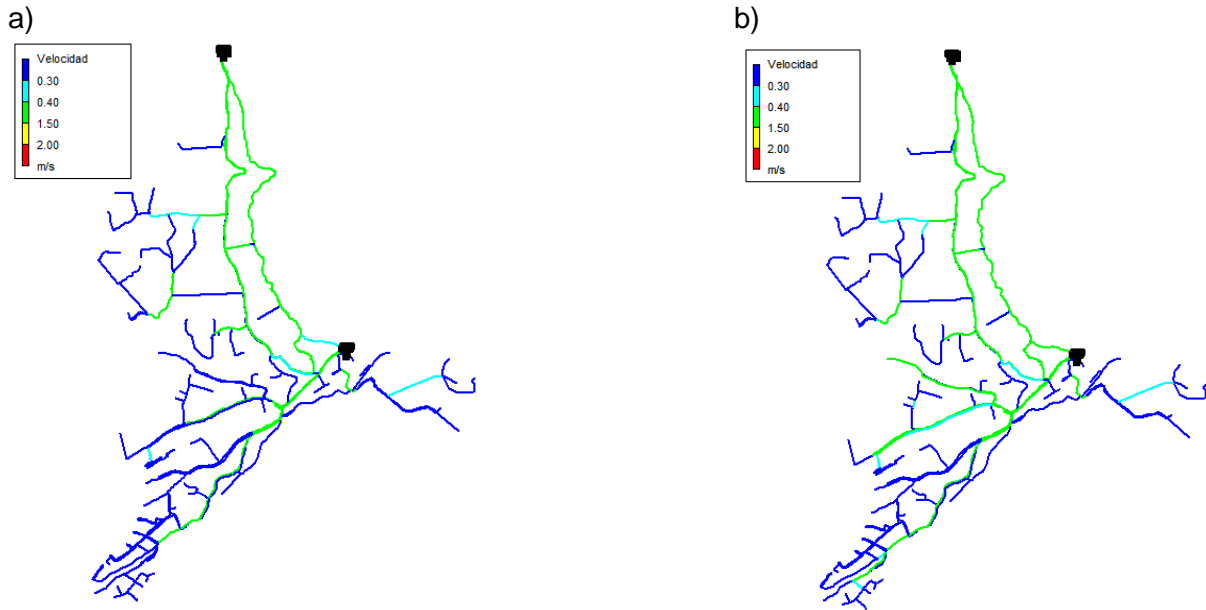


Figura 83. a) Velocidades en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Velocidades en la red con los diámetros óptimos y VRP (05:00 am). Fuente: Elaboración propia.

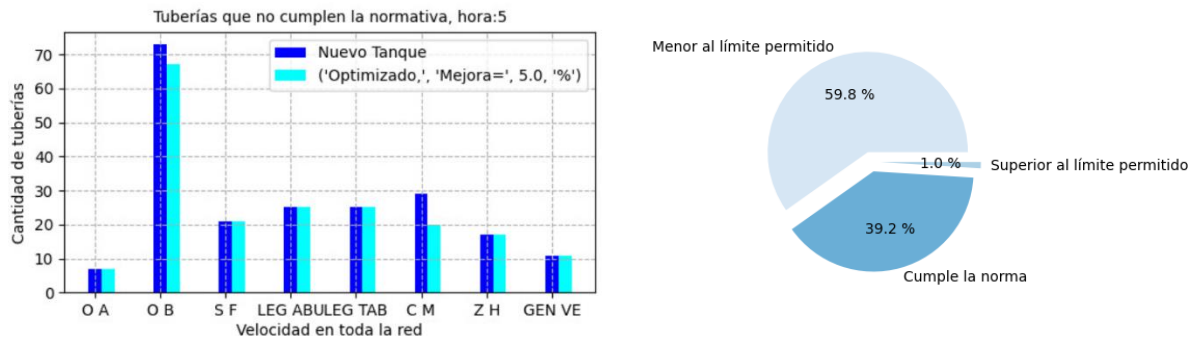

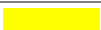



Figura 84. Gráfico de barras comparativo de las tuberías que no cumplen la normativa, en la red sin modificaciones y con los diámetros óptimos y VRP (izquierda); análisis estadístico de las tuberías en la red con los diámetros óptimos y VRP (derecha), a las 05:00 am. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Uso de tubería con base al caudal circulante en la red con los diámetros óptimos y VRP.

| Caudal (L/s) | Hora pico (01:00 pm) | | Hora valle (05:00 am) | | Simbología |
|--------------|----------------------|-------|-----------------------|-------|------------|
| | Tubería (m) | % | Tubería (m) | % | |
| Q ≤ 1 | 21512.44 | 69.28 | 22804.71 | 73.44 | ■ |
| 1 < Q ≤ 5 | 6483.12 | 20.88 | 5270.31 | 16.97 | ■ |

Tabla 29. (continuación) Uso de tubería con base al caudal circulante en la red con los diámetros óptimos y VRP.

| Caudal (L/s) | Hora pico (01:00 pm) | | Hora valle (05:00 am) | | Simbología |
|--------------|----------------------|---------------|-----------------------|---------------|---|
| | Tubería (m) | % | Tubería (m) | % | |
| 5<Q<=10 | 116.12 | 0.37 | 496.39 | 1.60 |  |
| 10<Q<=15 | 2917.66 | 9.40 | 2463.87 | 7.93 |  |
| Q>15 | 23.47 | 0.08 | 17.53 | 0.06 |  |
| Total | 31052.81 | 100.00 | 31052.81 | 100.00 | |

Fuente: Elaboración propia.

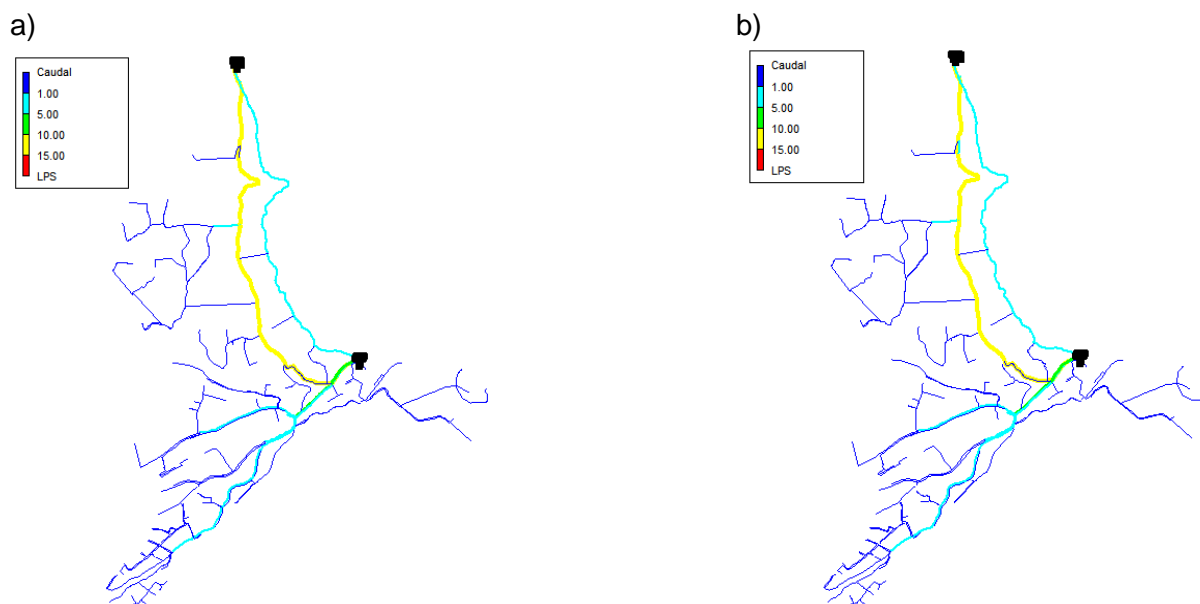


Figura 85. a) Caudales en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Caudales en la red con los diámetros óptimos y VRP (05:00 am).

Fuente: Elaboración propia.

- Análisis de la propuesta

El costo inicial de la red fue de 139563.43 \$ con la optimización en los 2 sectores el costo disminuye a 124641.94 \$, lo que representa una reducción del 10.69 % del diseño original, este diseño económico presenta un ahorro de 14921.49 \$.

La figura 80 presenta una comparación del mapa de contorno de las presiones durante la hora valle (05:00 am), en el que se observa una notable mejora en el problema de sobrepresiones existente. Se aprecia que las zonas críticas pertenecientes a los sectores Oriente Bajo y Corazón de María, con la propuesta establecida, tienen un área más amplia de presiones entre 20 y 70 mca.

Al analizar la figura 81, se puede observar que la propuesta planteada reduce en un 71.20 % los nodos con sobrepresiones, es decir, de 163 nodos se redujeron a 47 nodos con dicho problema. Como se puede apreciar en esta misma figura, hay una reducción significativa de los nodos con sobrepresiones en los sectores críticos Corazón de María y Oriente Bajo.

En la figura 82 se puede apreciar que, con la aplicación del algoritmo y la instalación de VRP se ha conseguido una mejora del 34 % en las presiones del sistema. Se ha logrado que el 81.80 % de los nodos estén dentro de los parámetros establecidos por la normativa, el porcentaje restante está compuesto por el 13.20 % de nodos con presión superior a 70 mca y el 5.00 % de nodos con presión inferior a 10 mca. El gráfico de barras comparativo indica que en todos los sectores de la red se ha reducido el problema de sobrepresiones existente. La presión media en comparación al estado actual se ha reducido en un 32.40 %, teniendo así un valor de 46.44 mca.

Respecto a las velocidades del sistema, en la figura 83 se puede apreciar que en los sectores Oriente Bajo y Corazón de María ha existido un incremento de tuberías de color verde, es decir tuberías con velocidades entre 0.40 y 1.5 m/s.

Existe una mejora del 5 % en las velocidades del sistema, se puede apreciar en la figura 84 que esto se consigue en los sectores Oriente Bajo y Corazón de María, lo que indica que, con el cambio de diámetros se ha conseguido una mejora tanto de presiones como de velocidades en dichos sectores. Mediante esta propuesta, el 39.20 % de las tuberías han logrado transportar agua con velocidades dentro de los límites permitidos, mientras que el 59.80 % de las tuberías siguen teniendo el problema de velocidades bajas, y el 1 % de las tuberías transporta agua a velocidades superiores a 2 m/s. Se ha comprobado que las tuberías que transportan agua con velocidad superior a 2 m/s corresponden a las líneas que salen de los tanques de almacenamiento.

Con base a los resultados obtenidos se halla que aplicando esta propuesta la velocidad media incrementa desde 0.31 m/s hasta 0.35 m/s.

El análisis de los caudales en la red mostrados en la tabla 29, revela una importante presencia de tuberías que transportan agua con caudales entre 1 y 5 L/s, así como también la poca presencia de tuberías con caudales mayores a los 5 L/s representado este último menos del 10 % en uso de tubería. En la figura 85 se puede visualizar que las líneas principales de distribución siguen siendo las únicas que transportan caudales grandes mientras que en las ramificaciones de la red persiste la presencia de caudales entre 1 y 5 L/s.

Se obtuvo un indicador de rendimiento técnico de la presión $IRT_{pres} = 93.71 \%$, este mejoró en un 28.50 % respecto al hallado con el estado actual de la red. El valor obtenido con este indicador nos sirve confirmar que las presiones de la red con la propuesta planteada hacen que esta brinde un servicio muy cercano al óptimo.

Se alcanzó un indicador de rendimiento técnico de velocidad $IRT_{vel} = 34.05 \%$, lo que indica que las velocidades en las tuberías de la red proporcionan un servicio próximo al aceptable. Es importante señalar que tanto el IRT_{pres} como el IRT_{vel} no proporcionan información específica sobre el funcionamiento de la red en cada sector. Como se ha explicado con anterioridad en el caso de las velocidades, si existe una mejora del rendimiento en los sectores Oriente Bajo y Corazón de María, siendo estos en los que se ha aplicado el algoritmo propuesto.

El estudio de esta propuesta ha permitido establecer que, aunque es una solución más costosa, los beneficios que aporta al sistema son evidentes, especialmente cuando se necesita mejorar la velocidad y presión.

4.3.3 Creación de circuitos cerrados

Actualmente, el sistema de distribución de agua potable de la parroquia Bayas presenta una red mixta, en la cual predominan las zonas ramificadas, aunque esta es una solución de diseño económico y sencillo de calcular, trae consigo una serie de inconvenientes en el funcionamiento de la red. González (2017) señala que en los puntos terminales de la red el agua no fluye constantemente; los nodos reciben agua de una sola línea y se conectan por un solo camino, lo cual genera problemas en la continuidad del servicio cuando se realizan reparaciones.

La generación de redes malladas contribuye a un mejor comportamiento hidráulico, evitando la creación de puntos muertos o circulación nula, incrementando el flujo de agua a través de las tuberías. Además, debido a esta variación del flujo, las presiones tienden a auto equilibrarse (González, 2017).

Debido a estos motivos, se propuso mejorar el rendimiento hidráulico de la RDAP Bayas mediante la conexión de tuberías con el objetivo de generar circuitos cerrados en puntos específicos de la red y así obtener los beneficios de ello. Se ha tenido en cuenta la orografía de la zona y la urbanización de la parroquia para la aplicación de esta propuesta.

El programa Qgis ha permitido identificar todos los nodos terminales que podrían conectarse, además de esto se han agregado nuevos nodos para conectar otros puntos de la red. Una vez hecho esto, se procedió a trazar las nuevas tuberías para formar circuitos cerrados en determinadas zonas de la red. En la figura 86 se aprecian las tuberías agregadas en el sector Señor de Flores, mientras que en la figura 87 se muestran algunas de las tuberías agregadas en el sector Leg Tabacay.

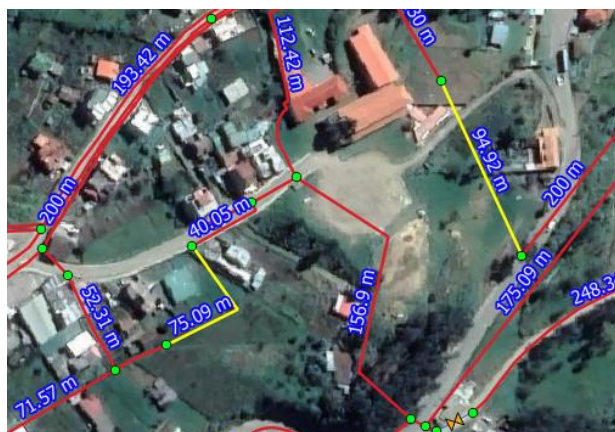


Figura 86. Creación circuitos cerrados en el sector Señor De Flores.
Fuente: Elaboración propia.

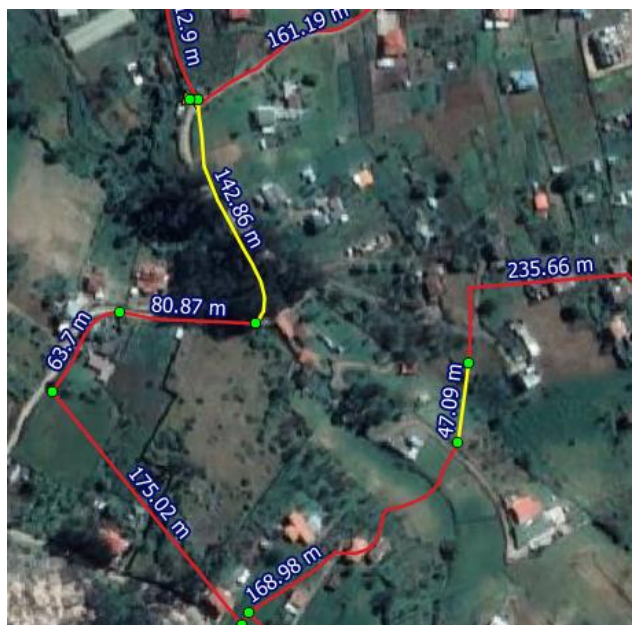


Figura 87. Creación circuitos cerrados en el sector Leg Tabacay.
Fuente: Elaboración propia.

Se realizó un análisis preliminar con las nuevas líneas agregadas, determinando que, en la zona de estudio, al unir tuberías entre diferentes sectores se incrementa significativamente

las presiones, lo cual permitió descartar varias líneas que se habían establecido para generar dicha red. Se ha detectado también la necesidad de instalar las VRP sugeridas en la primera propuesta. En la figura 88 se aprecia la red con los cambios propuestos.

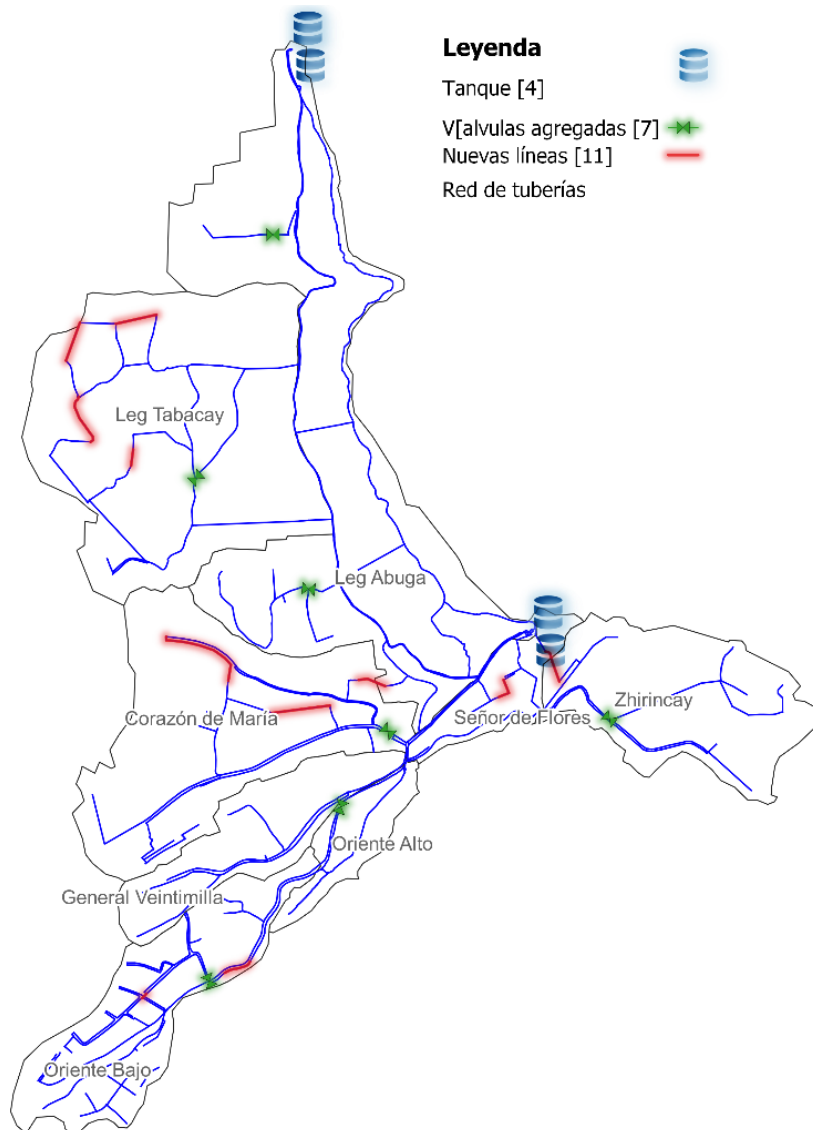


Figura 88. Mapa de la red con la creación de circuitos cerrados.
Fuente: Elaboración propia.

La tabla 30 contiene los datos de las tuberías necesarias para cerrar circuitos, incluyendo el identificador, longitud, el diámetro y la rugosidad.

Tabla 30. Nuevas tuberías para la creación de circuitos cerrados.

| Nuevas Tuberías | | | |
|-----------------|--------------|---------------|----------------------|
| ID | Longitud (m) | Diámetro (mm) | Rugosidad de H-W (C) |
| P329 | 200.00 | 25 | 130 |
| P330 | 50.00 | 25 | 120 |
| P331 | 168.55 | 25 | 130 |
| P332 | 78.18 | 20 | 130 |
| P333 | 75.09 | 32 | 130 |
| P334 | 94.92 | 25 | 130 |
| P335 | 16.90 | 63 | 130 |
| P336 | 270.57 | 32 | 130 |
| P337 | 121.91 | 25 | 120 |
| P338 | 117.06 | 25 | 120 |
| P339 | 81.08 | 63 | 120 |

Fuente: Elaboración propia.

Se ha simulado la red con los cambios propuestos en el programa Epanet, obteniéndose los siguientes resultados. En el anexo I se incluyen los resultados generales de presiones y velocidades durante la 01:00 pm.

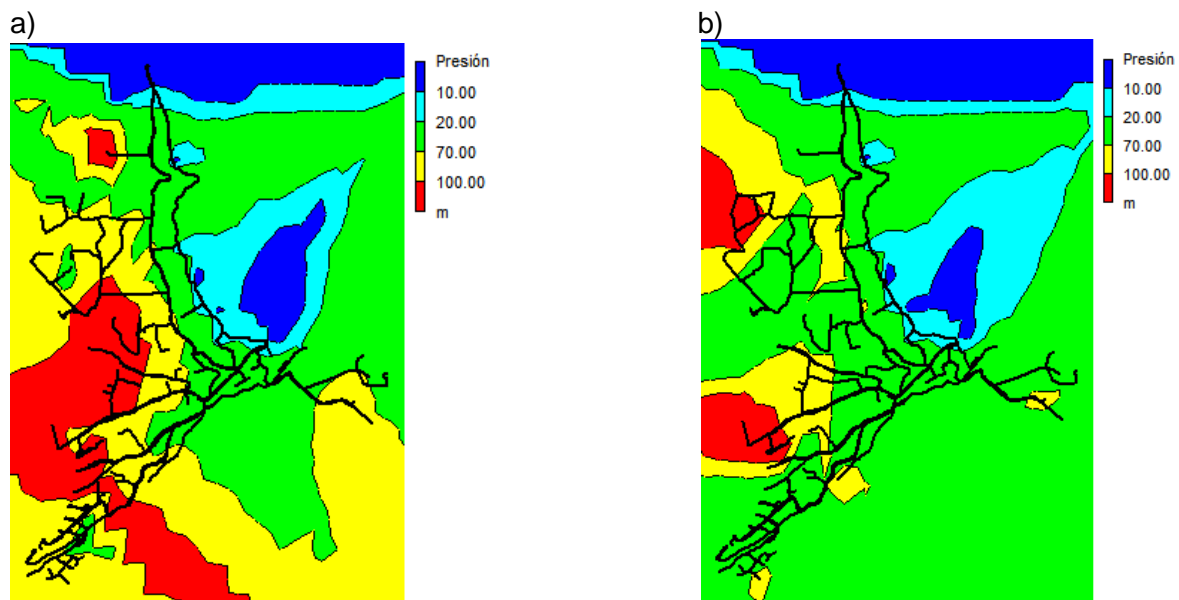


Figura 89. a) Presiones en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Presiones en la red con la creación de circuitos cerrados (05:00 am).

Fuente: Elaboración propia.

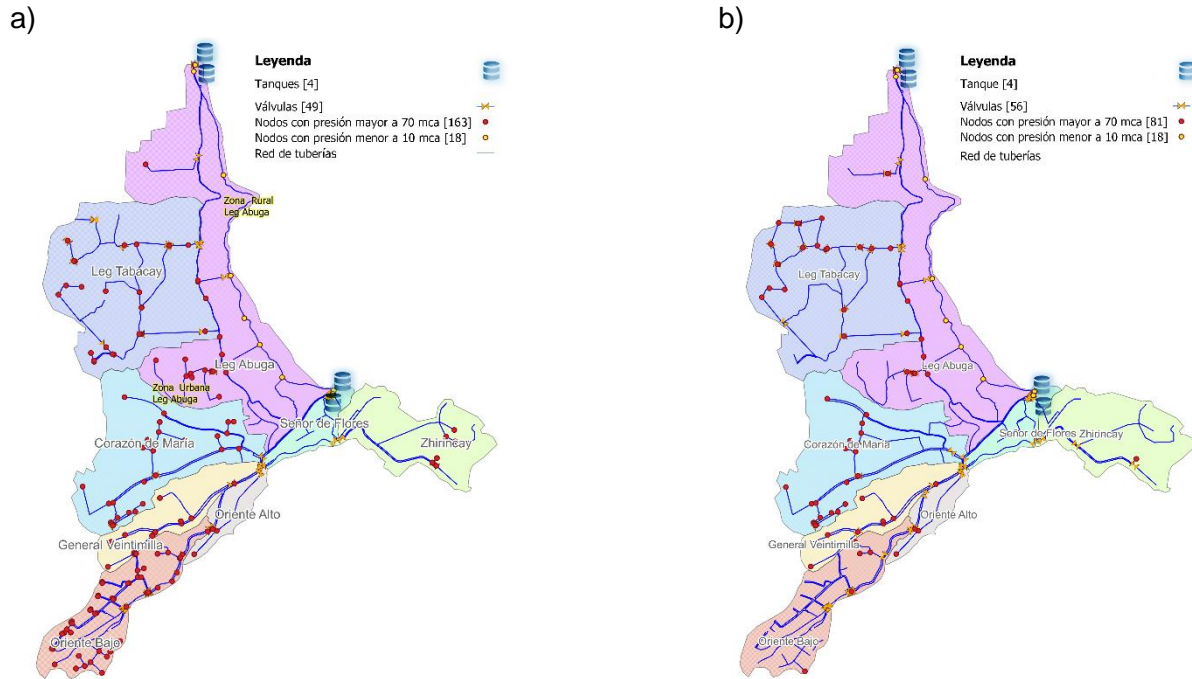


Figura 90. a) Nodos fuera de los límites permisibles en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Nodos fuera de los límites permisibles en la red con la creación de circuitos cerrados (05:00 am).
Fuente: Elaboración propia.

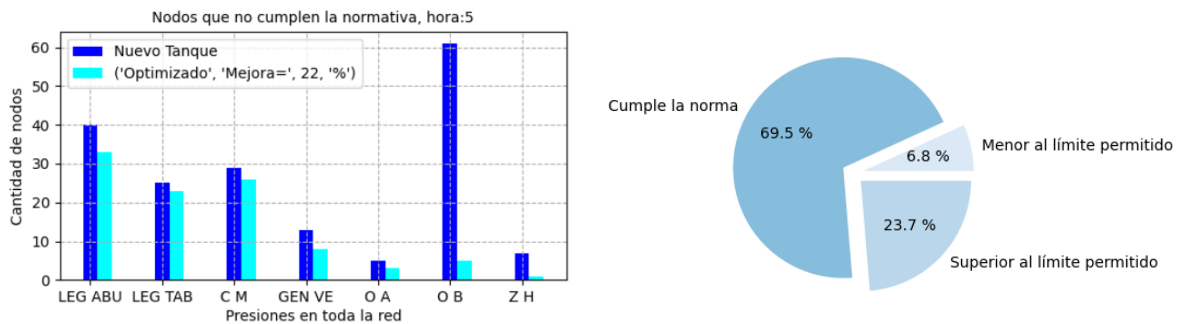


Figura 91. Gráfico de barras comparativo de los nodos que no cumplen la normativa, en la red sin modificaciones y con la creación de circuitos cerrados (izquierda); y análisis estadístico de los nodos en la red con la creación de circuitos cerrados (derecha), a las 05:00 am.
Fuente: Elaboración propia.

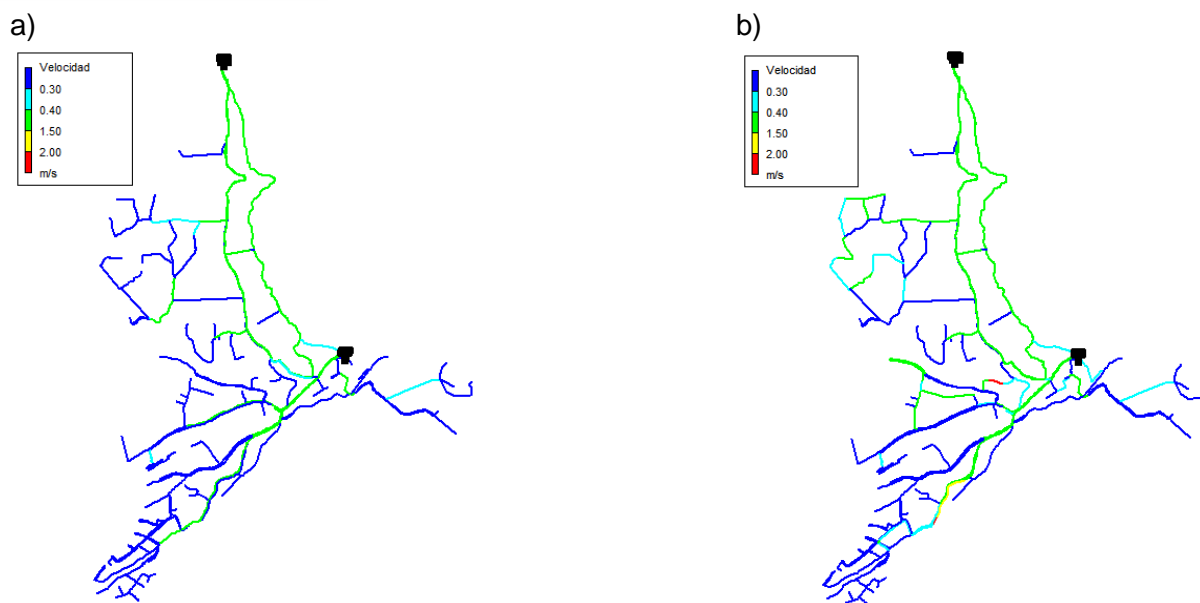


Figura 92. a) Velocidades en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Velocidades en la red con la creación de circuitos cerrados (05:00 am). Fuente: Elaboración propia.

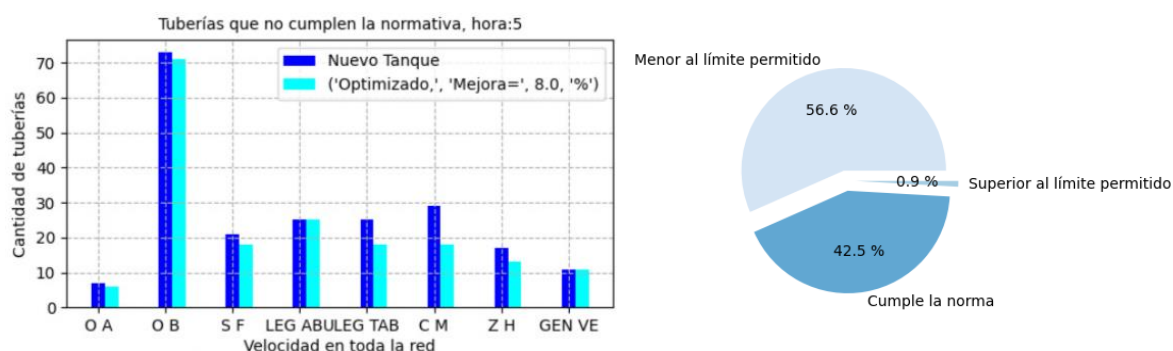





Figura 93. Gráfico de barras comparativo de las tuberías que no cumplen la normativa, en la red sin modificaciones y con la creación de circuitos cerrados (izquierda); y análisis estadístico de las tuberías en la red con la creación de circuitos cerrados (derecha), a las 05:00 am. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. Uso de tubería con base al caudal circulante en la red con la creación de circuitos cerrados.

| Caudal (L/s) | Hora pico (01:00 pm) | | Hora valle (05:00 am) | | Simbología |
|--------------|----------------------|-------|-----------------------|-------|---|
| | Tubería (m) | % | Tubería (m) | % | |
| Q ≤ 1 | 21395.83 | 66.19 | 23599.32 | 73.00 | |
| 1 < Q ≤ 5 | 7888.01 | 24.40 | 5744.02 | 17.77 | |

Tabla 31. (continuación) Uso de tubería con base al caudal circulante en la red con la creación de circuitos cerrados.

| Caudal (L/s) | Hora pico (01:00 pm) | | Hora valle (05:00 am) | | Simbología |
|--------------|----------------------|---------------|-----------------------|---------------|---|
| | Tubería (m) | % | Tubería (m) | % | |
| 5<Q<=10 | 111.59 | 0.35 | 499.93 | 1.55 |  |
| 10<Q<=15 | 2914.12 | 9.01 | 2466.27 | 7.63 |  |
| Q>15 | 17.53 | 0.05 | 17.53 | 0.05 |  |
| Total | 32327.07 | 100.00 | 32327.07 | 100.00 | |

Fuente: Elaboración propia.

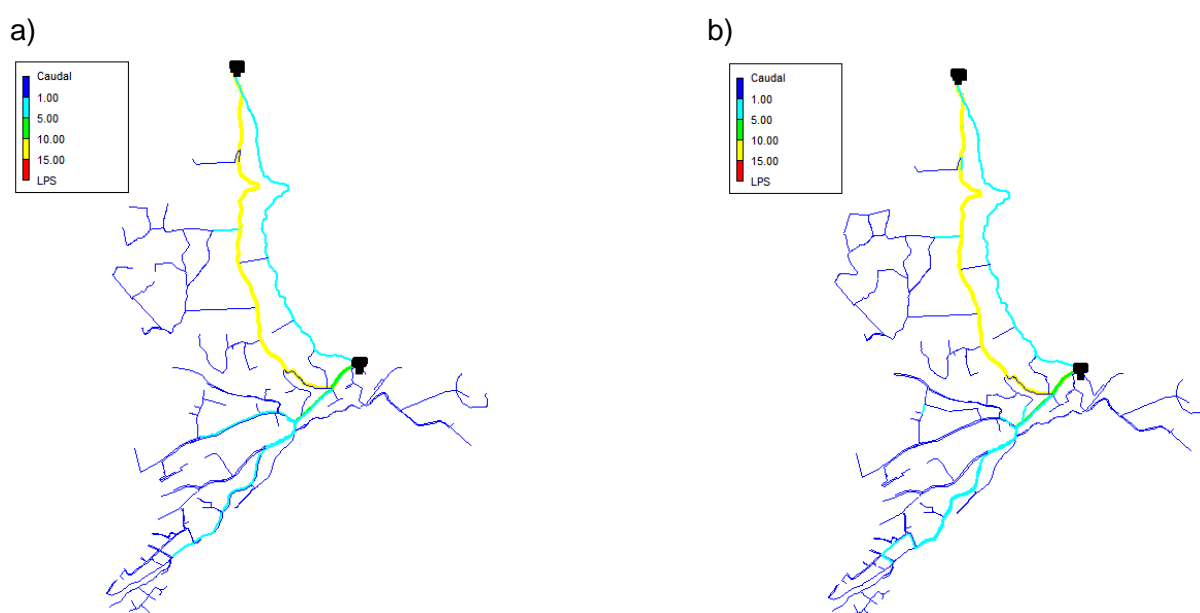


Figura 94. a) Caudales en la red sin modificaciones (05:00 am) vs. b) Caudales en la red con la creación de circuitos cerrados (05:00 am).

Fuente: Elaboración propia.

- Análisis de la propuesta

Como se muestra en la figura 89, con esta propuesta existió un aumento de presiones en algunos puntos donde se han conectado tuberías. Esto se debe a que en el presente caso de estudio las conexiones realizadas tienen desniveles considerables entre los nodos conectados, lo que sumado al ya existente problema de sobrepresiones provoca que generar circuitos cerrados no sea una solución óptima en cuanto a presiones se refiere.

Al examinar los resultados presentados, en la figura 90 se puede apreciar que la conexión de tuberías ha provocado un ligero incremento de nodos con presiones altas en el sector Corazón de María, debido a los grandes desniveles existentes en esta zona las presiones no

han logrado equilibrarse dentro del rango establecido en el CPE INEN 5. En toda la red se ha obtenido una reducción de nodos con sobrepresión del 50.30 %, es decir se pasa de tener 163 nodos a solo presentar 81 nodos con este problema.

En este caso, la mejora de las presiones que ofrece esta propuesta con respecto al estado actual de la red es del 22 % tal como se indica en la figura 91, asimismo en esta se puede apreciar que Corazón de María (C M) es el único sector en donde las presiones no mejoran.

Por otro lado, si bien en las presiones del sistema no se ha obtenido una mejora significativa, se puede notar que, en lo referente a velocidades ha existido un incremento considerable de tuberías que transportan agua con una velocidad superior a 0.40 m/s, esto se puede apreciar en la figura 92 en las tuberías de color verde.

Del análisis estadístico presentado en la figura 93, se destaca que las velocidades del sistema mejoran un 8 % en comparación con el estado actual de la red. Este análisis ha permitido identificar que, si bien la conexión de tuberías no contribuye a equilibrar las presiones dentro de un rango óptimo reduciendo las sobrepresiones, sí se ha registrado una mejora significativa en el problema de bajas velocidades. En concreto, se puede apreciar que los sectores Leg Tabacay, Corazón de María y Señor de Flores se benefician de la creación de una red mallada.

De acuerdo con esta propuesta, la figura 93 indica que el 42.50 % de las tuberías tienen velocidades dentro de los estándares establecidos por la norma, el 56.60 % de las tuberías presentan velocidades inferiores a 0.3 m/s y el 0.90 % de las tuberías con velocidades superiores a 2 m/s. Este porcentaje de tuberías con velocidad superior al límite, corresponde a las líneas que salen de los tanques de almacenamiento.

Con la creación de circuitos cerrados la presión media se reduce en un 18.97 %, obteniendo un valor de 55.67 mca. Por otro lado, se destaca que la velocidad media incrementa hasta 0.37 m/s.

En la tabla 31 se puede observar que, durante las horas de máxima y mínima demanda, se produce una disminución del número de tuberías con caudales inferiores a 1 L/s, mientras que, por otro lado, se identifica un aumento del número de tuberías con caudales comprendidos entre 1 y 5 L/s. Se ha mejorado el transporte de flujo al conectar tuberías en los extremos de la red; redireccionar el flujo ha provocado que aumente el uso de tubería con caudales entre 1 y 5 L/s. En la figura 94 se puede visualizar que la creación de circuitos cerrados ha incrementado el caudal circulante en determinados puntos de la red, se puede

notar que, respecto al estado inicial de la red, existen más tuberías de color celeste en los sectores Corazón de María y Oriente Bajo.

El indicador de rendimiento técnico de la presión obtenido fue de $IRT_{pres} = 87.30 \%$. Este valor representa una mejora del 22.09 % en comparación al hallado con el estado actual de la red.

El indicador de rendimiento técnico de velocidad mejoró un 6,30 % respecto a lo obtenido con el estado actual de la red. Este valor de $IRT_{vel} = 36.16 \%$, representa el mejor indicador de rendimiento técnico de la velocidad hallado con las propuestas planteadas.

El estudio de esta propuesta ha revelado que concretamente en la RDAP Bayas, la creación de zonas con redes malladas no contribuye a mejorar el problema de sobrepresiones. A pesar de haber mejorado considerablemente las bajas velocidades respecto a las otras propuestas estudiadas, se ha determinado que instalar nuevas tuberías para cerrar circuitos representa un costo elevado en comparación a los beneficios globales de presión y velocidad obtenidos.

5. Efectividad del algoritmo desarrollado

Para evaluar la fiabilidad de los cambios de diámetros en los sectores Oriente Bajo y Corazón de María, en este capítulo se comprueba la efectividad del algoritmo desarrollado. Para cumplir este propósito se realiza una comparación entre un Algoritmo Genético (AG) realizado por Peñaloza (2020) y el Algoritmo Iterativo (AI) desarrollado en este estudio. La comparación de estos dos algoritmos requirió el uso de una red más pequeña, debido a que un AG presenta ciertas limitaciones cuando el número de tuberías es muy grande, por lo que no se pudo aplicar en la zona de estudio. Por consiguiente, se comparó los resultados de estos algoritmos aplicados a la red de Hanoi, la cual representa un problema clásico de optimización y diseño de RDAP.

Es importante mencionar que para la comparación se usa un AG debido a que este es un algoritmo de propósito general que puede ser utilizado para resolver cualquier problema de optimización y es la herramienta más poderosa y eficaz en la actualidad (Pereyra, Pandolfi, & Villagra, 2017).

En la figura 95, se presenta la esquematización de la red de Hanoi en Epanet.

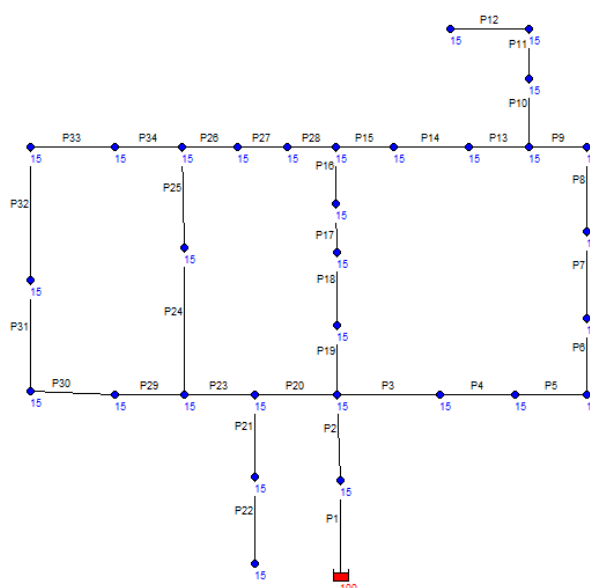


Figura 95. Red de Hanoi en Epanet.
Fuente: Elaboración propia.

La red de Hanoi se sitúa en Vietnam y fue presentada por primera vez por Fujiwara y Khang en 1990. La red presenta 34 tuberías y 31 nodos de mando, 3 circuitos y dos líneas ramificadas. Se abastece por un solo embalse cuyo nivel de agua es de 100 m. Todos los nodos presentan la misma cota (Pino et al., 2017).

Se asignó una cota de 15 m a todos los nodos, la ecuación de pérdida empleada fue la de Hazen-Williams con un valor de 130 para todas las líneas. En la tabla 32 y tabla 33, se detallan las características que presenta la red de Hanoi.

Tabla 32. Cota y demanda en los nodos de la red Hanoi.

| ID Nodo | Cota (m) | Demanda Base (L/s) | ID Nodo | Cota (m) | Demanda Base (L/s) |
|--------------------|----------|--------------------|--------------------|----------|--------------------|
| Embalse 1 | 100 | -5538.9 | Conexión 17 | 15 | 240.28 |
| Conexión 2 | 15 | 247.22 | Conexión 18 | 15 | 373.61 |
| Conexión 3 | 15 | 236.11 | Conexión 19 | 15 | 16.67 |
| Conexión 4 | 15 | 36.11 | Conexión 20 | 15 | 354.17 |
| Conexión 5 | 15 | 201.39 | Conexión 21 | 15 | 258.33 |
| Conexión 6 | 15 | 279.17 | Conexión 22 | 15 | 134.72 |
| Conexión 7 | 15 | 375 | Conexión 23 | 15 | 290.28 |
| Conexión 8 | 15 | 152.78 | Conexión 24 | 15 | 227.78 |
| Conexión 9 | 15 | 145.83 | Conexión 25 | 15 | 47.22 |
| Conexión 10 | 15 | 145.83 | Conexión 26 | 15 | 250 |
| Conexión 11 | 15 | 138.89 | Conexión 27 | 15 | 102.78 |
| Conexión 12 | 15 | 155.56 | Conexión 28 | 15 | 80.56 |
| Conexión 13 | 15 | 261.11 | Conexión 29 | 15 | 100 |
| Conexión 14 | 15 | 170.83 | Conexión 30 | 15 | 100 |
| Conexión 15 | 15 | 77.78 | Conexión 31 | 15 | 29.17 |
| Conexión 16 | 15 | 86.11 | Conexión 32 | 15 | 223.61 |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Longitud, diámetro y rugosidad en las tuberías de la red Hanoi.

| ID Línea | Longitud (m) | Diámetro (mm) | ID Línea | Longitud (m) | Diámetro (mm) |
|-----------|--------------|---------------|------------|--------------|---------------|
| P1 | 100 | 1016 | P18 | 800 | 609.6 |
| P2 | 1350 | 1016 | P19 | 400 | 609.6 |
| P3 | 900 | 1016 | P20 | 2200 | 1016 |
| P4 | 1150 | 1016 | P21 | 1500 | 508 |
| P5 | 1450 | 1016 | P22 | 500 | 304.8 |
| P6 | 450 | 1016 | P23 | 2650 | 1016 |
| P7 | 850 | 1016 | P24 | 1230 | 762 |
| P8 | 850 | 1016 | P25 | 1300 | 762 |

Tabla 33. (continuación) Longitud, diámetro y rugosidad en las tuberías de la red Hanoi.

| ID Línea | Longitud (m) | Diámetro (mm) | ID Línea | Longitud (m) | Diámetro (mm) |
|----------|--------------|---------------|----------|--------------|---------------|
| P9 | 800 | 1016 | P26 | 850 | 508 |
| P10 | 950 | 762 | P27 | 300 | 304.8 |
| P11 | 1200 | 762 | P28 | 750 | 304.8 |
| P12 | 3500 | 609.6 | P29 | 1500 | 406.4 |
| P13 | 800 | 406.4 | P30 | 2000 | 406.4 |
| P14 | 500 | 406.4 | P31 | 1600 | 304.8 |
| P15 | 550 | 304.8 | P32 | 150 | 304.8 |
| P16 | 2730 | 406.4 | P33 | 860 | 406.4 |
| P17 | 1750 | 508 | P34 | 950 | 508 |

Fuente: Elaboración propia.

Para calcular la función costo fue necesario obtener los coeficientes aplicando la regresión potencial. En la tabla 34 se presenta los precios por metro lineal para los diferentes diámetros existentes en la red de Hanoi y en la figura 96 se obtiene los coeficientes para la función costo a partir de la regresión potencial.

Tabla 34. Costo de tubería por metro lineal para la red Hanoi.

| N.º Diámetro | Diámetro (mm) | Costo (\$/m) |
|--------------|---------------|--------------|
| 1 | 304.8 | 45.73 |
| 2 | 406.4 | 70.4 |
| 3 | 508 | 98.39 |
| 4 | 609.6 | 129.33 |
| 5 | 762 | 180.75 |
| 6 | 1016 | 278.28 |

Fuente: Pino et al. (2017).

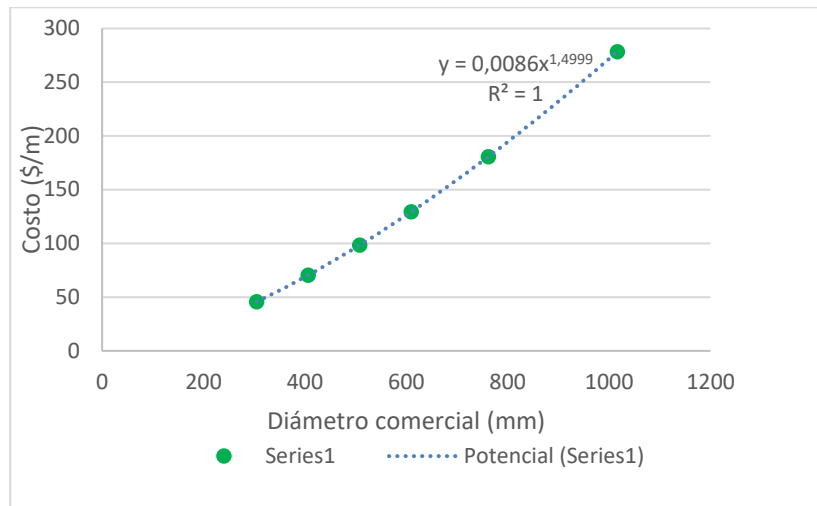


Figura 96. Regresión potencial para la función costo.
Fuente: Elaboración propia.

La función objetivo se evaluó con la ecuación 16.

$$func = \sum_{i=1}^n 0.0086L_i D_i^{1.4999} + PP + PV \quad (16)$$

Pino et al. (2017) en su investigación “Diseño Óptimo de Redes de Distribución de Agua Usando Un Software Basado En Microalgoritmos Genéticos Multiobjetivos” utilizaron como presión mínima de servicio 10 mca y una velocidad máxima de 10 m/s en la red de Hanoi. En este caso las restricciones a considerar en las presiones y velocidades fueron:

- Presión mínima 20 mca
- Presión máxima 50 mca
- Velocidad mínima 1.5 m/s
- Velocidad máxima 10 m/s

La red de Hanoi sin aplicar ningún cambio en los diámetros presentó 10 nodos con presiones inferiores a 20 mca, la presión mínima fue de 15.85 mca correspondiente al nodo número 30, el índice de rendimiento técnico obtenido fue de $IRT_{pres} = 69.9\%$, las figuras 97 y 98 muestran las presiones antes de la optimización (barras rojas) y después de la optimización (barras verdes) con la aplicación del AG y el AI respectivamente.

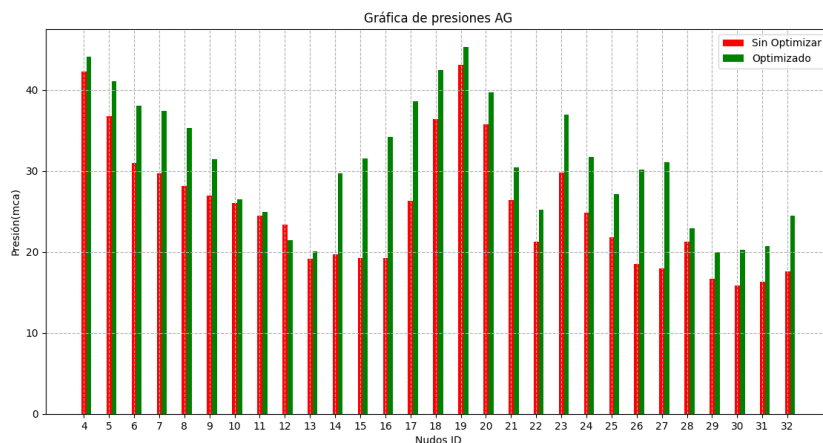


Figura 97. Presión optimizada aplicando AG.
Fuente: Elaboración propia.

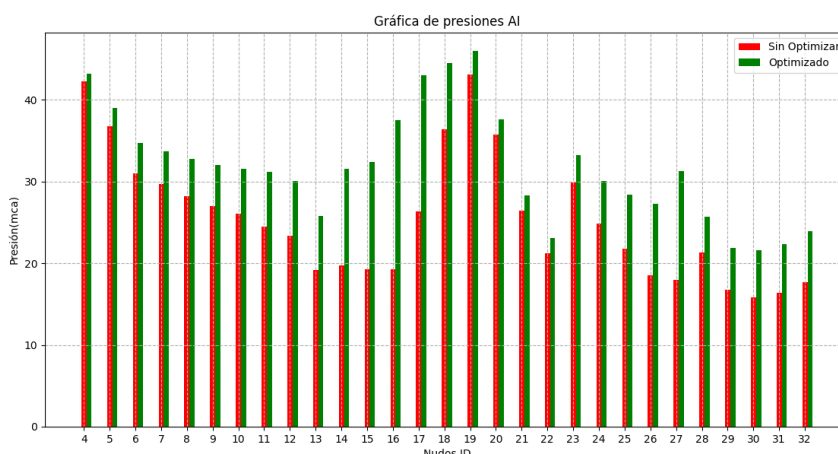


Figura 98. Presión optimizada aplicando AI.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 97 y figura 98, se puede apreciar que los resultados obtenidos por el AI son muy semejantes a los resultados obtenidos por el AG, el algoritmo desarrollado incrementa el valor de las presiones cumpliendo el objetivo de mejorar el servicio de la red, los índices del rendimiento técnico obtenidos en la primera iteración fueron de $IRT_{pres} = 93\%$ y $IRT_{pres} = 95\%$ correspondientes al AG y AI respectivamente.

Los algoritmos de optimización (AG y AI) no encontraron la mejor solución en el primer análisis, por lo que se realizó varias iteraciones para evaluar los costos y la combinación de diámetros. La figura 99 muestra los costos de la combinación de diámetros óptimos en varias

iteraciones, los costos mínimos encontrados por el AG y AI fueron de 7082848.1 y 6751593.92 \$ respectivamente. El AG puede llegar a obtener una solución más acertada, pero esta conllevaría mucho tiempo, ya que la asignación de los diámetros iniciales es aleatoria y la evolución artificial depende del número de población, cromosomas y la probabilidad de mutaciones, mientras que el AI en tan solo 4 iteraciones obtiene una solución óptima, tal como se muestra en la figura 99.

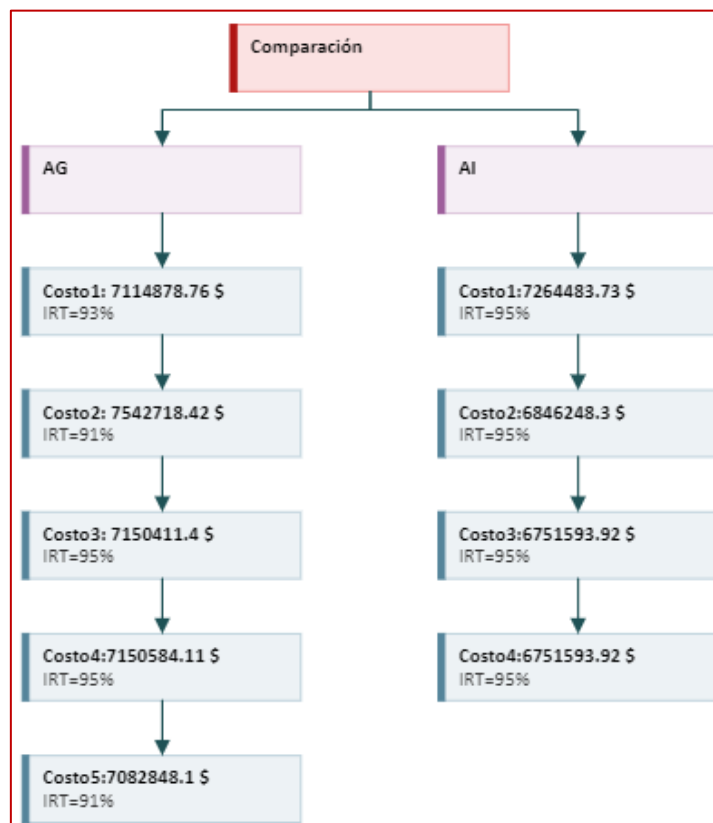


Figura 99. Comparación de costos entre los dos algoritmos.
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 100, se presenta el mapa de contorno con los nuevos diámetros obtenidos por el AI, los resultados indican que, salvo un nodo, todos los demás cumplen los límites establecidos. En general los resultados expuestos, evidencian la confiabilidad del algoritmo desarrollado en este estudio, pudiendo servir como herramienta de ayuda para el diseño y optimización de las redes de distribución de agua potable.

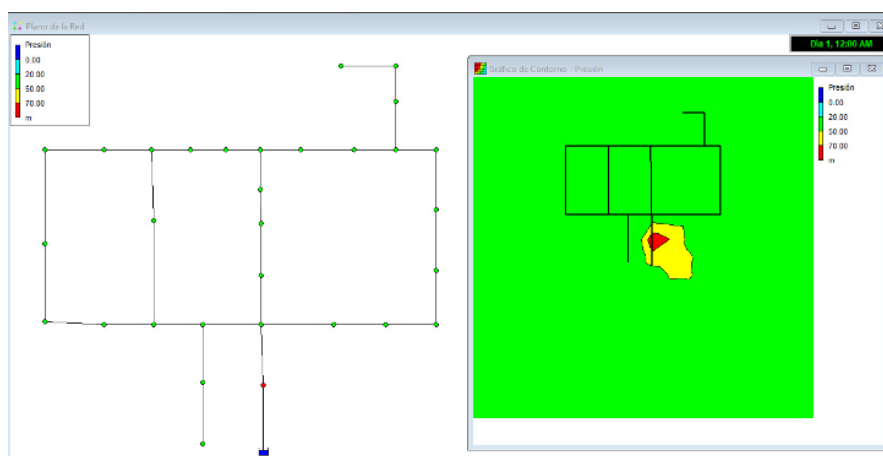


Figura 100. Mapa presiones obtenido con el AI.
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la comparación del algoritmo desarrollado (AI) con un Algoritmo Genético (AG) fueron favorables, por lo que el algoritmo creado en este trabajo fue eficazmente usado en las propuestas de optimización de la RDAP Bayas, además de esto se comprueba que también puede ser utilizado para el diseño optimizado de ampliaciones en la misma zona de estudio y en otras redes.

6. Conclusiones y recomendaciones

El presente estudio permitió analizar y optimizar la eficiencia hidráulica de la RDAP de la parroquia Bayas haciendo uso del programa computacional Epanet, el mismo que facilitó la actualización del modelo hidráulico a partir de la información recopilada de las tuberías y válvulas agregadas al sistema, así como la incorporación del nuevo tanque de almacenamiento. Con el uso del programa computacional Epanet se logró evaluar el funcionamiento hidráulico de la red con y sin las propuestas de optimización; de los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

Según la evaluación del funcionamiento hidráulico en la situación inicial de la red, los principales problemas que se han identificado son: presiones superiores a 70 mca en siete de los ocho sectores que conforman el sistema de distribución, así como una fuerte presencia de velocidades inferiores a 0,3 m/s en el 64.80 % de las tuberías, durante el escenario más desfavorable. Con base a la normativa nacional vigente, se halló que el 47.00 % de los nodos de toda la red superan el límite de presión máxima establecida. Los sectores que abarcan la mayor cantidad de área con presiones altas son: Oriente Bajo, Corazón de María y Leg Tabacay.

Por otro lado, la inclusión de un nuevo tanque principal en la red no mejoró la eficiencia hidráulica de la misma, persisten las altas presiones en el 47.00 % de los nodos y velocidades bajas en el 64.80 % de las tuberías. Esto se debe a que el nuevo tanque se encuentra situado junto al tanque principal ya existente; además, se atribuyen los problemas detectados en la red a la orografía de la zona y el sobredimensionamiento de tuberías en algunos sectores del sistema por lo que las soluciones se deben enfocar en solventar dichos aspectos.

La presencia del nuevo tanque aumentó el porcentaje de tuberías con caudales entre 1 y 5 L/s, en un 1.63 %. Como resultado, se concluye que la principal ventaja que el nuevo tanque proporciona al sistema de distribución es que este duplica en capacidad al tanque antiguo, permitiendo hacer frente a la variación de los consumos actuales y futuros.

Los indicadores de rendimiento técnico (IRT) de la red con el funcionamiento del nuevo tanque fueron: $IRT_{pres} = 65.21 \%$ y $IRT_{vel} = 29.86 \%$, los cuales permitieron calificar a las presiones del sistema dentro de un servicio regular, mientras que las velocidades se sitúan con un servicio inaceptable.

La simulación del modelo hidráulico en la red sin el nuevo tanque y con la inclusión de este, reveló que actualmente principalmente se requiere gestionar la presencia de presiones muy

altas en la red, ya que causan malestar a los usuarios y, sobre todo, generan fugas en el sistema debido a la rotura en las tuberías, lo cual supone un gasto económico importante.

Para optimizar la eficiencia hidráulica, se ha propuesto la instalación de válvulas reductoras de presión (VRP) en puntos estratégicos de la red, lo cual se ha traducido en una marcada disminución del problema de sobrepresiones en los sectores Oriente Bajo, Corazón de María y Leg Tabacay. Esto ha logrado que el 80.20 % de los nodos estén con presiones dentro de los límites permitidos. Se incrementó el indicador de rendimiento técnico de la presión a un valor de $IRT_{pres} = 92.87 \%$, el cual calificó las presiones en la red con un servicio bueno, cercano al óptimo. Por otro lado, esta propuesta no ha contribuido a mejorar los problemas de bajas velocidades del sistema, en tanto que la variable hidráulica de caudal se mantiene similar al estado inicial de la red.

Se ha creado un algoritmo de optimización para el cambio automatizado de los diámetros considerando los parámetros hidráulicos (presión y velocidad) y el factor económico. Esta propuesta de optimización junto a la colocación de las VRP mejoró el índice de rendimiento técnico de la red IRT_{pres} en un 28.50%, mientras que el IRT_{vel} en un 4.19%. El cambio de diámetros en el sector Oriente Bajo presentó una reducción de 61 a 6 nodos con problema de sobrepresión y una reducción de 73 a 67 tuberías con problemas de velocidades inferiores a 0.3 m/s. Por otro lado, en el sector Corazón de María presentó una reducción de 29 a 5 nodos con problema de sobrepresión y una reducción de 29 a 20 tuberías con problemas de velocidades inferiores a 0.3 m/s.

Tras aplicar la propuesta del cambio de diámetros, el costo de toda la red presentó una reducción de 139563.43 \$ a 124641.94 \$, lo cual permitió concluir que concretamente en los sectores Oriente Bajo y Corazón de María existen tuberías sobredimensionadas. El algoritmo desarrollado ayudó a identificar los problemas de diseño en estos sectores.

Por último, se estudió una propuesta de optimización mediante la creación de circuitos cerrados en los sectores Leg Tabacay, Corazón de María, Señor de Flores y Oriente Bajo, lo cual contribuyó a la recirculación del flujo. Con esta propuesta se obtuvo una mejora en toda la red del 8 % para las velocidades y 22 % para las presiones.

Se concluyó que la propuesta de crear circuitos cerrados en la red mejoró significativamente el problema de velocidades bajas, concretamente en el sector Corazón de María, pasando de 29 a 18 tuberías con velocidades inferiores a 0,3 m/s. El rendimiento técnico (IRT) de toda la red aumento en un 22.09 % y 6.30 % para la presión y velocidad respectivamente.

De las tres propuestas planteadas y estudiadas en este trabajo, la que dio los mejores resultados fue la colocación de las VRP y el cambio de diámetros, ya que esto generó una mejora tanto en las presiones como en las velocidades de la red. Se pasó de una presión media de 68.70 mca hasta una presión media de 46.44 mca, mientras que la velocidad media incrementó de 0.31 m/s hasta 0.35 m/s.

Se concluye que la propuesta de instalar VRP es la que mas se adapta a la realidad de la parroquia debido a que es la que supone el menor gasto económico y trabajo constructivo a cambio de reducir significativamente las sobrepresiones en la red, pasando de una presión de media de 68.71 mca hasta 47.11 mca. A pesar de que con esta propuesta no se mejoran las velocidades, se espera que en un futuro se incremente la velocidad media de la red debido al crecimiento poblacional en la parroquia y por ende al incremento de las demandas que esto genere.

Como recomendaciones se sugiere:

Es fundamental que la JAAPRB mantenga un registro de las actualizaciones de la red realizadas en campo para tener una mayor facilidad y fiabilidad a la hora de modificar el modelo matemático.

Emplear los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para una mayor facilidad de la actualización de la red y llevar un registro ordenado de las características y elementos del sistema.

Colocar medidores de caudal a la salida de los tanques principales, para llevar registro del volumen de agua consumido por los usuarios y fugado.

Instalar una válvula de regulación (VRG) en el sector Corazón de María para llevar un control y gestión del sector, además instalar las VRP recomendadas en este estudio.

Seguir investigando el uso de la Toolkit de Epanet para el desarrollo de nuevas herramientas con el objetivo de mejorar la eficiencia en el procesamiento de datos, evaluación y optimización de las RDAP.

7. Referencias

- Acurio, H., & Priori, J. (2021). *Modelamiento hidráulico y de la calidad del agua en un sistema de suministro de agua potable en una zona rural del cantón Azogues*. Universidad de Cuenca.
- Alcocer-Yamanaka, V., & Tzatchkov, V. (2009). Estimación de parámetros del consumo instantáneo de agua potable de lecturas acumuladas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 10(3), 237–246. doi:<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2009.10n3.022>
- Alegre, H., & Coelho, S. T. (1992). Diagnosis oh hydraulic performance of water distribution networks. En B. E. Coulbeck, *"Pipeline Systems"*. Kluwer Academic Press.
- Alegre, H., & Coelho, S. T. (1995). Hydraulic performance and rehabilitation strategies. En E. V. Cabrera, *"Improving Efficiency and Reliability in WaterDistribution Systems"*. Kluwer Academic Press.
- Alegre, H., & Coelho, S. T. (2012). Infrastructure asset management of urban water systems. En *Water Supply System Analysis - Selected Topics*. InTech.
- Alfaro, J., & Rodríguez, O. (2019). *Propuesta de diseño de un Sistema de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario para el Caserío el Progreso, aplicando fórmulas matemáticas y el uso del software Watergems y Sewergems*. Universidad Privada Antenor Orrego.
- Arreguín, F. I., Alcocer-Yamanaka, V. H., & Hernández-Padrón, D. S. (2010). Modelación de redes de agua potable con enfoques determinísticos y estocásticos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(4), 119-136.
- AWWA (American Water Works Association). (1999). Calibration Guidelines for Water Distribution System Modeling. *Proceedings of AWWA 1999 ImTech Conference, Engineering Computer Applications Committee*.
- Bentley Systems Incorporated. (2022). *OpenFlows WaterGEMS Water Distribution Analysis and Design Software*. Obtenido de <https://www.bentley.com/software/openflows-watergems/>
- Cano, A. (2020). *Estimación de demandas en redes de distribución de agua vía EKF*. Tecnológico Nacional de México.
- CEPIS. (2005). Guía para el diseño de redes de distribución en sistemas rurales de abastecimiento de agua. 13.
- Chen, J., & Broccoli, D. L. (2014). Demand forecasting for water distribution systems. *Procedia Engineering*, 70, 339-342. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.03>
- Chiquito, J. (2020). *Diseño de la red de distribución de agua potable de la ciudadela El Mirador del cantón Puerto López*. Universidad Estatal Del Sur De Manabí.
- Coelho, S. (1997). Performance indicators in water distribution through mathematical modelling, IWA Workshop on Performance Indicators for Transmission and Distribution Systems. LNEC.
- Comisión Nacional del Agua. (2008). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. En *Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Distribución*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2008: 1-50.

- Comisión Nacional del Agua. (2016a). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. En *Diseño de Redes de Distribución de Agua Potable*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2016: 1-134.
- Comisión Nacional del Agua. (2016b). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. En *Mejora de Eficiencia Física*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2016: 1-188.
- CPE INEN 5. (1992). Normas Para Estudio Y Diseño De Sistemas De Agua Potable Y Disposición De Aguas Residuales. *Normas Para Estudio Y Diseño De Sistemas De Agua Potable Y Disposición De Aguas Residuales Para Poblaciones Mayores a 1000 Habitantes, 9.1*, 291.
- CPE INEN 5. (1997). Normas Para Estudio Y Diseño De Sistemas De Agua Potable Y Disposición De Aguas Residuales. *Código De Practica Para El Diseño De Sistemas De Abastecimiento De Agua Potable, Disposición De Excretas Y Residuos Líquidos En El Area Rural, 9.2*, 50.
- Delgado, S. (2023). *Aprende Python*. [MOOC]. Obtenido de <https://aprendepython.es/>
- Florián, S. (2017). *Propuesta de optimización del servicio de la red de distribución de agua potable - RDAP- del municipio de Madrid, Cundinamarca*. Universidad Católica de Colombia.
- García, M. (2006). *Modelación y simulación de redes hidráulicas a presión mediante herramientas informáticas*. Universidad Politecnica de Cartagena.
- GISWATER. (2018). Manual de usuario Giswater. https://giswater.gitbook.io/giswater_manual_es/.
- González, P. (2017). *Diseño y estudio de la robustez de una red mallada de distribución de agua potable*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Güç, G. (2006). *Optimization of water distribution networks using genetic algorithm*. Middle East Technical University.
- Gutierrez, J. (2022). *Sintesis de diferencias entre Bentley WaterCAD/GEMS V8i y EPANET*. Obtenido de Bentley Communities: <https://communities.bentley.com/>
- Izquierdo, J., Iglesias, P., López, P., & Pérez, R. (2003). Análisis de redes en régimen permanente. En *Ingeniería hidráulica en los abastecimientos de agua* (págs. 323-369). GMF.
- Leal, F. (2003). *Metodología para la calibración de redes de distribución bajo ambiente de fugas*. Universidad de los Andes.
- López, G., Martínez, J., Iglesias, P., & Izquierdo, J. (2003). Modelación de redes de distribución de agua. En *Ingeniería hidráulica en los abastecimientos de agua* (págs. 475-500). GMF.
- Méndez, I., & Valdiviezo, K. (2018). *Elaboración del catastro de la red de agua potable en la parroquia aurelio bayas de la ciudad de azogues*. Universidad de Cuenca.
- Mora, D. (2012). *Diseño de redes de distribución de agua mediante algoritmos evolutivos. Análisis de eficiencia*. Universidad Politecnica de Valencia.
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., & Veith, T. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. doi:<https://doi.org/10.13031/2013.23153>

- Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A., & Marques, A. S. (2014). Technical performance evaluation of water distribution networks based on EPANET. *Procedia Engineering*, 70, 1201-1210. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.133>
- Naamani, A. A., & Sana, A. (2021). Operational and technical performance of a water distribution network in Oman. *Water Science & Technology: Water Supply*, 21(8), 4593-4607. doi:<https://doi.org/10.2166/ws.2021.203>
- Ormsbee, L. E. (2008). The History of Water Distribution Network Analysis: The Computer Age. *Water Distribution System Analysis Symposium 2006*.
- Ormsbee, L., & Lingireddy, S. (1997). Calibration of Hydraulic Network Models. *Journal of the American Water Works Association*, 89(2), 42-50.
- PDOT-AZOGES. (2018). *Plan Nacional De Desarrollo Y Ordenamiento Territorial Del Canton Azogues*, 1-383.
- Peñaloza, H. (2020). *Optimización del diseño de una red de suministro de agua para un proyecto de expansión en la sabana de Bogotá*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Pereyra, G., Pandolfi, D., & Villagra, A. (2017). Diseño y optimización de redes de distribución de agua utilizando algoritmos genéticos. *Informes Científicos - Técnicos UNPA*, 9(1), 37-63. doi:<https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v9i1.236>
- Pino, E., Valle, A., Condori, F., Mejia, J., Chavarri, E., & Alfaro, L. (2017). Diseño Óptimo de Redes de Distribución de Agua Usando Un Software Basado En Microalgoritmos Genéticos Multiobjetivos. *Ribagua*, 4(1), 6-23. doi:<https://doi.org/10.1080/23863781.2017.1317087>
- Rivas, P. (2017). *Confort Térmico En Viviendas Vernáculas, Técnica De Construcción De Bahareque En Azogues - Ecuador*. Universidad de Cuenca.
- Romero, Z. (2015). "Atlas del Cantón Azogues", 73.
- Rondán, E. (2016). *Estado del arte de la calibración de modelos hidráulicos. Modelado de fugas con Epanet*. Universidad de Sevilla.
- Rossman, L. (2000). Epanet 2 users manual. *Environmental Protection Agency*.
- Tabesh, M., & Dolatkahi, A. (2006). Effects of pressure dependent analysis on quality performance assessment of water distribution networks. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering*, 30(B1).
- TIOBE. (2023). *TIOBE Index for February 2023*. Obtenido de <https://www.tiobe.com/tiobe-index/>
- Vegas, O., Martínez, F., Alonso, J., & Tzatchkov, V. (2017). *Iniciación a la programación con la Toolkit de Epanet v2.00.12 en un entorno windows*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Walski, T., Chase, D., Savic, D., Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Haestad Press, Waterbury, CT, USA.
- Zischg, J., Mair, M., Rauch, W., & Sitzenfrei, R. (2017). Enabling efficient and sustainable transitions of water distribution systems under network structure uncertainty. *Water*, 9(9), 715. doi:<https://doi.org/10.3390/w9090715>.

8. Anexos

Anexo A: Asignación de predios y demanda base.

| id | Sector | Nodo inicial | Nodo final | Consumo-Sector (L/s/predio) | Predios |
|-------------|------------------------|---------------------|-------------------|------------------------------------|----------------|
| P27 | Corazón de María | J140 | J141 | 0.0051 | 9 |
| P29 | Corazón de María | J149 | J150 | 0.0051 | 7 |
| P30 | Corazón de María | J151 | J152 | 0.0051 | 5 |
| P48 | Corazón de María | J136 | J158 | 0.0051 | 17 |
| P69 | Corazón de María | J126 | J125 | 0.0051 | 0 |
| P183 | Corazón de María | J125 | J133 | 0.0051 | 1 |
| P184 | Corazón de María | J139 | J127 | 0.0051 | 4 |
| P185 | Corazón de María | J127 | J148 | 0.0051 | 12 |
| P186 | Corazón de María | J127 | J140 | 0.0051 | 8 |
| P187 | Corazón de María | J148 | J147 | 0.0051 | 13 |
| P188 | Corazón de María | J147 | J146 | 0.0051 | 8 |
| P189 | Corazón de María | J148 | J128 | 0.0051 | 27 |
| P190 | Corazón de María | J140 | J142 | 0.0051 | 11 |
| P191 | Corazón de María | J142 | J134 | 0.0051 | 5 |
| P192 | Corazón de María | J134 | J155 | 0.0051 | 0 |
| P193 | Corazón de María | J135 | J157 | 0.0051 | 2 |
| P194 | Corazón de María | J157 | J136 | 0.0051 | 8 |
| P195 | Corazón de María | J142 | J149 | 0.0051 | 8 |
| P196 | Corazón de María | J149 | J151 | 0.0051 | 5 |
| P197 | Corazón de María | J151 | J144 | 0.0051 | 4 |
| P198 | Corazón de María | J144 | J145 | 0.0051 | 4 |
| P199 | Corazón de María | J144 | J143 | 0.0051 | 3 |
| P200 | Corazón de María | J157 | J156 | 0.0051 | 6 |
| P201 | Corazón de María | J156 | J137 | 0.0051 | 10 |
| P202 | Corazón de María | J137 | J153 | 0.0051 | 7 |
| P203 | Corazón de María | J153 | J129 | 0.0051 | 3 |
| P204 | Corazón de María | J129 | J130 | 0.0051 | 2 |
| P205 | Corazón de María | J139 | J131 | 0.0051 | 8 |
| P206 | Corazón de María | J131 | J132 | 0.0051 | 8 |
| P207 | Corazón de María | J131 | J138 | 0.0051 | 19 |
| P225 | Corazón de María | J160 | J154 | 0.0051 | 2 |
| P226 | Corazón de María | J130 | J159 | 0.0051 | 4 |
| P233 | Corazón de María | J130 | J161 | 0.0051 | 2 |
| P234 | Corazón de María | J161 | J160 | 0.0051 | 1 |
| P235 | Corazón de María | J126 | J164 | 0.0051 | 1 |
| P237 | Corazón de María | J164 | J163 | 0.0051 | 2 |
| P238 | Corazón de María | J163 | J133 | 0.0051 | 2 |
| P305 | Corazón de María | J133 | J139 | 0.0051 | 2 |
| P40 | General Veintimilla | J317 | J318 | 0.0059 | 0 |

| | | | | | |
|-------------|------------------------|------|------|--------|----|
| P150 | General Veintimilla | J316 | J310 | 0.0059 | 10 |
| P208 | General Veintimilla | J319 | J309 | 0.0059 | 9 |
| P209 | General Veintimilla | J309 | J313 | 0.0059 | 13 |
| P210 | General Veintimilla | J313 | J314 | 0.0059 | 5 |
| P211 | General Veintimilla | J314 | J315 | 0.0059 | 4 |
| P212 | General Veintimilla | J313 | J312 | 0.0059 | 11 |
| P213 | General Veintimilla | J314 | J320 | 0.0059 | 14 |
| P214 | General Veintimilla | J309 | J322 | 0.0059 | 13 |
| P215 | General Veintimilla | J322 | J308 | 0.0059 | 20 |
| P216 | General Veintimilla | J322 | J321 | 0.0059 | 4 |
| P222 | General Veintimilla | J316 | J323 | 0.0059 | 9 |
| P223 | General Veintimilla | J323 | J311 | 0.0059 | 5 |
| P236 | General Veintimilla | J164 | J307 | 0.0059 | 1 |
| P290 | General Veintimilla | J165 | J215 | 0.0059 | 3 |
| P6 | Leg Abuga | J6 | J7 | 0.0043 | 5 |
| P11 | Leg Abuga | J12 | J13 | 0.0043 | 9 |
| P12 | Leg Abuga | J15 | J16 | 0.0043 | 2 |
| P14 | Leg Abuga | J19 | J20 | 0.0043 | 8 |
| P28 | Leg Abuga | J22 | J23 | 0.0043 | 6 |
| P32 | Leg Abuga | J28 | J29 | 0.0043 | 6 |
| P34 | Leg Abuga | J30 | J31 | 0.0043 | 6 |
| P35 | Leg Abuga | J37 | J36 | 0.0043 | 2 |
| P39 | Leg Abuga | J45 | J12 | 0.0043 | 5 |
| P43 | Leg Abuga | J46 | J47 | 0.0043 | 0 |
| P49 | Leg Abuga | 2 | J51 | 0.0043 | 0 |
| P52 | Leg Abuga | J21 | J32 | 0.0043 | 1 |
| P54 | Leg Abuga | J9 | J58 | 0.0043 | 7 |
| P55 | Leg Abuga | J57 | J45 | 0.0043 | 1 |
| P56 | Leg Abuga | J77 | J33 | 0.0043 | 0 |
| P57 | Leg Abuga | J77 | J55 | 0.0043 | 0 |
| P58 | Leg Abuga | J1 | J59 | 0.0043 | 1 |
| P59 | Leg Abuga | J59 | J60 | 0.0043 | 3 |
| P60 | Leg Abuga | J60 | J78 | 0.0043 | 7 |
| P61 | Leg Abuga | J35 | J61 | 0.0043 | 9 |
| P62 | Leg Abuga | J61 | J37 | 0.0043 | 5 |

| | | | | | |
|-------------|-----------|-----|------|--------|----|
| P63 | Leg Abuga | J37 | J41 | 0.0043 | 6 |
| P64 | Leg Abuga | J41 | J30 | 0.0043 | 11 |
| P65 | Leg Abuga | J30 | J9 | 0.0043 | 12 |
| P66 | Leg Abuga | J9 | J11 | 0.0043 | 11 |
| P67 | Leg Abuga | J2 | J182 | 0.0043 | 5 |
| P71 | Leg Abuga | J11 | J22 | 0.0043 | 8 |
| P72 | Leg Abuga | J22 | J10 | 0.0043 | 6 |
| P73 | Leg Abuga | J10 | J182 | 0.0043 | 6 |
| P74 | Leg Abuga | J79 | J18 | 0.0043 | 3 |
| P76 | Leg Abuga | J38 | J21 | 0.0043 | 0 |
| P77 | Leg Abuga | J32 | J56 | 0.0043 | 0 |
| P92 | Leg Abuga | J12 | J15 | 0.0043 | 6 |
| P93 | Leg Abuga | J15 | J28 | 0.0043 | 6 |
| P94 | Leg Abuga | J28 | J14 | 0.0043 | 11 |
| P95 | Leg Abuga | J62 | J63 | 0.0043 | 0 |
| P96 | Leg Abuga | J63 | J64 | 0.0043 | 0 |
| P97 | Leg Abuga | J64 | J65 | 0.0043 | 0 |
| P98 | Leg Abuga | J65 | J39 | 0.0043 | 0 |
| P99 | Leg Abuga | J40 | J66 | 0.0043 | 0 |
| P100 | Leg Abuga | J66 | J67 | 0.0043 | 0 |
| P101 | Leg Abuga | J67 | J68 | 0.0043 | 0 |
| P102 | Leg Abuga | J68 | J69 | 0.0043 | 0 |
| P103 | Leg Abuga | J69 | J70 | 0.0043 | 0 |
| P104 | Leg Abuga | J70 | J71 | 0.0043 | 0 |
| P105 | Leg Abuga | J71 | J72 | 0.0043 | 0 |
| P106 | Leg Abuga | J72 | J73 | 0.0043 | 0 |
| P107 | Leg Abuga | J73 | J49 | 0.0043 | 0 |
| P108 | Leg Abuga | J5 | J27 | 0.0043 | 0 |
| P109 | Leg Abuga | J25 | J44 | 0.0043 | 2 |
| P110 | Leg Abuga | J44 | J26 | 0.0043 | 2 |
| P111 | Leg Abuga | J26 | J19 | 0.0043 | 3 |
| P112 | Leg Abuga | J19 | J6 | 0.0043 | 5 |
| P113 | Leg Abuga | J6 | J53 | 0.0043 | 4 |
| P114 | Leg Abuga | J53 | J46 | 0.0043 | 2 |
| P179 | Leg Abuga | J8 | J52 | 0.0043 | 0 |
| P180 | Leg Abuga | J52 | J3 | 0.0043 | 1 |
| P181 | Leg Abuga | J3 | J2 | 0.0043 | 3 |
| P217 | Leg Abuga | J46 | J27 | 0.0043 | 0 |
| P218 | Leg Abuga | J77 | J34 | 0.0043 | 0 |
| P219 | Leg Abuga | J50 | 3 | 0.0043 | 0 |
| P220 | Leg Abuga | E4 | 1 | 0.0043 | 0 |
| P227 | Leg Abuga | J44 | J43 | 0.0043 | 1 |
| P228 | Leg Abuga | J42 | J41 | 0.0043 | 5 |
| P242 | Leg Abuga | J7 | J74 | 0.0043 | 3 |
| P243 | Leg Abuga | J11 | J74 | 0.0043 | 5 |

| | | | | | |
|-------------|-------------|------|------|--------|---|
| P244 | Leg Abuga | J74 | J2 | 0.0043 | 3 |
| P245 | Leg Abuga | J27 | J75 | 0.0043 | 0 |
| P246 | Leg Abuga | J75 | J4 | 0.0043 | 0 |
| P247 | Leg Abuga | J48 | J76 | 0.0043 | 0 |
| P248 | Leg Abuga | J76 | 2 | 0.0043 | 0 |
| P249 | Leg Abuga | J75 | J76 | 0.0043 | 0 |
| P250 | Leg Abuga | 1 | J77 | 0.0043 | 0 |
| P284 | Leg Abuga | J81 | J79 | 0.0043 | 0 |
| P285 | Leg Abuga | J78 | J80 | 0.0043 | 2 |
| P301 | Leg Abuga | J78 | J35 | 0.0043 | 4 |
| P302 | Leg Abuga | J54 | J62 | 0.0043 | 0 |
| P303 | Leg Abuga | J24 | J25 | 0.0043 | 1 |
| P13 | Leg Tabacay | J84 | J85 | 0.0044 | 7 |
| P16 | Leg Tabacay | J90 | J91 | 0.0044 | 1 |
| P17 | Leg Tabacay | J92 | J93 | 0.0044 | 9 |
| P18 | Leg Tabacay | J94 | J89 | 0.0044 | 5 |
| P21 | Leg Tabacay | J96 | J95 | 0.0044 | 3 |
| P22 | Leg Tabacay | J98 | J99 | 0.0044 | 2 |
| P23 | Leg Tabacay | J99 | J100 | 0.0044 | 9 |
| P24 | Leg Tabacay | J98 | J101 | 0.0044 | 0 |
| P25 | Leg Tabacay | J95 | J102 | 0.0044 | 3 |
| P26 | Leg Tabacay | J102 | J103 | 0.0044 | 4 |
| P31 | Leg Tabacay | J106 | J107 | 0.0044 | 4 |
| P36 | Leg Tabacay | J111 | J97 | 0.0044 | 7 |
| P37 | Leg Tabacay | J113 | J114 | 0.0044 | 8 |
| P38 | Leg Tabacay | J115 | J116 | 0.0044 | 2 |
| P78 | Leg Tabacay | J83 | J82 | 0.0044 | 3 |
| P79 | Leg Tabacay | J82 | J110 | 0.0044 | 2 |
| P80 | Leg Tabacay | J110 | J90 | 0.0044 | 3 |
| P81 | Leg Tabacay | J86 | J92 | 0.0044 | 3 |
| P82 | Leg Tabacay | J92 | J94 | 0.0044 | 4 |
| P83 | Leg Tabacay | J94 | J106 | 0.0044 | 3 |
| P84 | Leg Tabacay | J106 | J87 | 0.0044 | 1 |
| P85 | Leg Tabacay | J121 | J88 | 0.0044 | 2 |
| P86 | Leg Tabacay | J97 | J104 | 0.0044 | 5 |
| P87 | Leg Tabacay | J104 | J116 | 0.0044 | 3 |
| P88 | Leg Tabacay | J116 | J84 | 0.0044 | 4 |
| P89 | Leg Tabacay | J84 | J98 | 0.0044 | 2 |
| P90 | Leg Tabacay | J112 | J108 | 0.0044 | 2 |
| P91 | Leg Tabacay | J108 | J96 | 0.0044 | 2 |
| P229 | Leg Tabacay | J104 | J119 | 0.0044 | 4 |
| P230 | Leg Tabacay | J119 | J105 | 0.0044 | 9 |
| P231 | Leg Tabacay | J108 | J109 | 0.0044 | 4 |
| P232 | Leg Tabacay | J119 | J120 | 0.0044 | 9 |
| P286 | Leg Tabacay | J89 | J124 | 0.0044 | 2 |

| | | | | | |
|-------------|--------------|------|------|--------|----|
| P287 | Leg Tabacay | J123 | J122 | 0.0044 | 0 |
| P304 | Leg Tabacay | J32 | J111 | 0.0044 | 4 |
| P1 | Oriente Alto | J200 | J201 | 0.0056 | 12 |
| P2 | Oriente Alto | J202 | J203 | 0.0056 | 29 |
| P5 | Oriente Alto | J205 | J206 | 0.0056 | 13 |
| P41 | Oriente Alto | J211 | J212 | 0.0056 | 11 |
| P135 | Oriente Alto | J207 | J208 | 0.0056 | 2 |
| P136 | Oriente Alto | J209 | J205 | 0.0056 | 1 |
| P137 | Oriente Alto | J205 | J200 | 0.0056 | 16 |
| P138 | Oriente Alto | J216 | J202 | 0.0056 | 8 |
| P139 | Oriente Alto | J202 | J210 | 0.0056 | 8 |
| P140 | Oriente Alto | J213 | J214 | 0.0056 | 0 |
| P141 | Oriente Alto | J200 | J204 | 0.0056 | 19 |
| P178 | Oriente Alto | J204 | J213 | 0.0056 | 6 |
| P241 | Oriente Alto | J215 | J207 | 0.0056 | 2 |
| P307 | Oriente Alto | J204 | J211 | 0.0056 | 16 |
| P4 | Oriente Bajo | J239 | J240 | 0.0067 | 6 |
| P42 | Oriente Bajo | J247 | J248 | 0.0067 | 0 |
| P53 | Oriente Bajo | J252 | J217 | 0.0067 | 8 |
| P142 | Oriente Bajo | J250 | J243 | 0.0067 | 3 |
| P143 | Oriente Bajo | J243 | J246 | 0.0067 | 6 |
| P144 | Oriente Bajo | J246 | J244 | 0.0067 | 8 |
| P145 | Oriente Bajo | J246 | J245 | 0.0067 | 4 |
| P146 | Oriente Bajo | J243 | J239 | 0.0067 | 6 |
| P147 | Oriente Bajo | J239 | J241 | 0.0067 | 4 |
| P148 | Oriente Bajo | J241 | J268 | 0.0067 | 4 |
| P149 | Oriente Bajo | J268 | J251 | 0.0067 | 3 |
| P151 | Oriente Bajo | J253 | J254 | 0.0067 | 0 |
| P152 | Oriente Bajo | J255 | J232 | 0.0067 | 0 |
| P153 | Oriente Bajo | J232 | J256 | 0.0067 | 0 |
| P154 | Oriente Bajo | J232 | J233 | 0.0067 | 0 |
| P155 | Oriente Bajo | J299 | J238 | 0.0067 | 1 |
| P156 | Oriente Bajo | J238 | J278 | 0.0067 | 3 |
| P157 | Oriente Bajo | J278 | J234 | 0.0067 | 6 |
| P158 | Oriente Bajo | J234 | J235 | 0.0067 | 8 |
| P159 | Oriente Bajo | J234 | J236 | 0.0067 | 6 |
| P160 | Oriente Bajo | J236 | J237 | 0.0067 | 7 |
| P161 | Oriente Bajo | J257 | J260 | 0.0067 | 2 |
| P162 | Oriente Bajo | J231 | J230 | 0.0067 | 1 |
| P163 | Oriente Bajo | J260 | J229 | 0.0067 | 4 |
| P164 | Oriente Bajo | J229 | J228 | 0.0067 | 5 |
| P165 | Oriente Bajo | J229 | J218 | 0.0067 | 6 |
| P166 | Oriente Bajo | J218 | J258 | 0.0067 | 6 |
| P167 | Oriente Bajo | J218 | J224 | 0.0067 | 6 |
| P168 | Oriente Bajo | J224 | J225 | 0.0067 | 7 |

| | | | | | |
|------|--------------|------|------|--------|---|
| P169 | Oriente Bajo | J224 | J221 | 0.0067 | 5 |
| P170 | Oriente Bajo | J221 | J220 | 0.0067 | 6 |
| P171 | Oriente Bajo | J221 | J222 | 0.0067 | 4 |
| P172 | Oriente Bajo | J222 | J223 | 0.0067 | 5 |
| P173 | Oriente Bajo | J222 | J219 | 0.0067 | 4 |
| P174 | Oriente Bajo | J224 | J226 | 0.0067 | 4 |
| P175 | Oriente Bajo | J226 | J261 | 0.0067 | 2 |
| P176 | Oriente Bajo | J261 | J227 | 0.0067 | 2 |
| P177 | Oriente Bajo | J261 | J262 | 0.0067 | 1 |
| P224 | Oriente Bajo | J249 | J252 | 0.0067 | 4 |
| P251 | Oriente Bajo | J295 | J294 | 0.0067 | 2 |
| P252 | Oriente Bajo | J294 | J293 | 0.0067 | 3 |
| P253 | Oriente Bajo | J293 | J292 | 0.0067 | 3 |
| P254 | Oriente Bajo | J291 | J290 | 0.0067 | 4 |
| P255 | Oriente Bajo | J288 | J289 | 0.0067 | 2 |
| P256 | Oriente Bajo | J289 | J290 | 0.0067 | 2 |
| P257 | Oriente Bajo | J286 | J287 | 0.0067 | 3 |
| P258 | Oriente Bajo | J287 | J288 | 0.0067 | 3 |
| P259 | Oriente Bajo | J291 | J292 | 0.0067 | 3 |
| P260 | Oriente Bajo | J279 | J293 | 0.0067 | 3 |
| P261 | Oriente Bajo | J281 | J280 | 0.0067 | 2 |
| P262 | Oriente Bajo | J286 | J285 | 0.0067 | 2 |
| P263 | Oriente Bajo | J285 | J284 | 0.0067 | 4 |
| P264 | Oriente Bajo | J300 | J284 | 0.0067 | 3 |
| P265 | Oriente Bajo | J283 | J281 | 0.0067 | 2 |
| P266 | Oriente Bajo | J277 | J276 | 0.0067 | 3 |
| P267 | Oriente Bajo | J275 | J276 | 0.0067 | 4 |
| P268 | Oriente Bajo | J263 | J274 | 0.0067 | 4 |
| P269 | Oriente Bajo | J269 | J274 | 0.0067 | 4 |
| P270 | Oriente Bajo | J242 | J267 | 0.0067 | 1 |
| P271 | Oriente Bajo | J267 | J266 | 0.0067 | 4 |
| P272 | Oriente Bajo | J267 | J265 | 0.0067 | 3 |
| P273 | Oriente Bajo | J273 | J264 | 0.0067 | 4 |
| P274 | Oriente Bajo | J264 | J265 | 0.0067 | 4 |
| P275 | Oriente Bajo | J275 | J271 | 0.0067 | 5 |
| P276 | Oriente Bajo | J272 | J270 | 0.0067 | 5 |
| P277 | Oriente Bajo | J270 | J271 | 0.0067 | 6 |
| P278 | Oriente Bajo | J273 | J272 | 0.0067 | 5 |
| P279 | Oriente Bajo | J277 | J263 | 0.0067 | 2 |
| P280 | Oriente Bajo | J282 | J283 | 0.0067 | 1 |
| P281 | Oriente Bajo | J238 | J298 | 0.0067 | 0 |
| P282 | Oriente Bajo | J241 | J296 | 0.0067 | 1 |
| P283 | Oriente Bajo | J268 | J297 | 0.0067 | 3 |
| P294 | Oriente Bajo | J299 | J301 | 0.0067 | 0 |
| P295 | Oriente Bajo | J302 | J300 | 0.0067 | 0 |

| | | | | | |
|-------------|-----------------|------|------|--------|----|
| P296 | Oriente Bajo | J280 | J303 | 0.0067 | 1 |
| P297 | Oriente Bajo | J279 | J304 | 0.0067 | 1 |
| P298 | Oriente Bajo | J304 | J303 | 0.0067 | 1 |
| P299 | Oriente Bajo | J304 | J306 | 0.0067 | 1 |
| P300 | Oriente Bajo | J278 | J305 | 0.0067 | 7 |
| P306 | Oriente Bajo | J260 | J231 | 0.0067 | 2 |
| P308 | Oriente Bajo | J259 | J299 | 0.0067 | 0 |
| P3 | Señor de Flores | J165 | J167 | 0.0058 | 3 |
| P7 | Señor de Flores | J168 | J166 | 0.0058 | 2 |
| P8 | Señor de Flores | J169 | J170 | 0.0058 | 1 |
| P9 | Señor de Flores | J171 | J172 | 0.0058 | 4 |
| P10 | Señor de Flores | J191 | J185 | 0.0058 | 0 |
| P15 | Señor de Flores | J170 | J196 | 0.0058 | 0 |
| P19 | Señor de Flores | J170 | J188 | 0.0058 | 0 |
| P20 | Señor de Flores | J179 | J181 | 0.0058 | 19 |
| P44 | Señor de Flores | J52 | J185 | 0.0058 | 0 |
| P47 | Señor de Flores | J53 | J189 | 0.0058 | 2 |
| P50 | Señor de Flores | 3 | J192 | 0.0058 | 0 |
| P68 | Señor de Flores | J182 | J184 | 0.0058 | 3 |
| P70 | Señor de Flores | J184 | J183 | 0.0058 | 1 |
| P115 | Señor de Flores | J185 | J175 | 0.0058 | 0 |
| P116 | Señor de Flores | J186 | J169 | 0.0058 | 2 |
| P117 | Señor de Flores | J169 | J171 | 0.0058 | 2 |
| P118 | Señor de Flores | J171 | J187 | 0.0058 | 2 |
| P119 | Señor de Flores | J188 | J180 | 0.0058 | 0 |
| P129 | Señor de Flores | J166 | J177 | 0.0058 | 6 |
| P130 | Señor de Flores | J177 | J165 | 0.0058 | 16 |
| P131 | Señor de Flores | J176 | J173 | 0.0058 | 6 |
| P132 | Señor de Flores | J173 | J178 | 0.0058 | 2 |
| P133 | Señor de Flores | J173 | J174 | 0.0058 | 4 |
| P134 | Señor de Flores | J177 | J176 | 0.0058 | 6 |
| P182 | Señor de Flores | J184 | J126 | 0.0058 | 1 |
| P221 | Señor de Flores | 3 | J193 | 0.0058 | 0 |
| P239 | Señor de Flores | J181 | J194 | 0.0058 | 5 |
| P288 | Señor de Flores | J179 | J195 | 0.0058 | 5 |
| P289 | Señor de Flores | J194 | J197 | 0.0058 | 0 |
| P291 | Señor de Flores | J215 | J199 | 0.0058 | 0 |
| P292 | Señor de Flores | J198 | J197 | 0.0058 | 0 |
| P293 | Señor de Flores | J197 | J190 | 0.0058 | 1 |
| P33 | Zhirincay | J332 | J333 | 0.0034 | 3 |
| P45 | Zhirincay | J336 | J337 | 0.0034 | 4 |
| P46 | Zhirincay | J328 | J338 | 0.0034 | 5 |
| P51 | Zhirincay | J339 | J327 | 0.0034 | 22 |
| P120 | Zhirincay | J188 | J336 | 0.0034 | 2 |
| P121 | Zhirincay | J336 | J335 | 0.0034 | 8 |

| | | | | | |
|-------------|-----------|------|------|--------|---|
| P122 | Zhirincay | J334 | J325 | 0.0034 | 6 |
| P123 | Zhirincay | J325 | J326 | 0.0034 | 6 |
| P124 | Zhirincay | J325 | J332 | 0.0034 | 7 |
| P125 | Zhirincay | J332 | J331 | 0.0034 | 3 |
| P126 | Zhirincay | J331 | J324 | 0.0034 | 1 |
| P127 | Zhirincay | J331 | J330 | 0.0034 | 4 |
| P128 | Zhirincay | J329 | J328 | 0.0034 | 6 |
| P240 | Zhirincay | J333 | J329 | 0.0034 | 5 |

| ID nodo | Sector | Cota (msnm) | Requerimiento nodal sin %ANC (L/s) | Demanda base (L/s) |
|----------------|------------------|--------------------|---|---------------------------|
| J125 | Corazón de María | 2721 | 0.0025 | 0.005 |
| J126 | Corazón de María | 2721 | 0 | 0 |
| J127 | Corazón de María | 2710 | 0.0406 | 0.08 |
| J128 | Corazón de María | 2649 | 0.1244 | 0.245 |
| J129 | Corazón de María | 2617 | 0.0076 | 0.015 |
| J130 | Corazón de María | 2618 | 0.0152 | 0.03 |
| J131 | Corazón de María | 2708 | 0.1015 | 0.2 |
| J132 | Corazón de María | 2710 | 0.0051 | 0.01 |
| J133 | Corazón de María | 2717 | 0.0127 | 0.025 |
| J134 | Corazón de María | 2656 | 0 | 0 |
| J135 | Corazón de María | 2656 | 0 | 0 |
| J136 | Corazón de María | 2621 | 0.0635 | 0.125 |
| J137 | Corazón de María | 2624 | 0.0558 | 0.11 |
| J138 | Corazón de María | 2650 | 0.0888 | 0.175 |
| J139 | Corazón de María | 2715 | 0.0203 | 0.04 |
| J140 | Corazón de María | 2698 | 0.0863 | 0.17 |
| J141 | Corazón de María | 2692 | 0.0178 | 0.035 |
| J142 | Corazón de María | 2656 | 0.0787 | 0.155 |
| J143 | Corazón de María | 2651 | 0.0051 | 0.01 |
| J144 | Corazón de María | 2649 | 0.0305 | 0.06 |
| J145 | Corazón de María | 2670 | 0.0076 | 0.015 |
| J146 | Corazón de María | 2701 | 0.0254 | 0.05 |
| J147 | Corazón de María | 2697 | 0.0305 | 0.06 |
| J148 | Corazón de María | 2698 | 0.1472 | 0.29 |
| J149 | Corazón de María | 2647 | 0.0457 | 0.09 |
| J150 | Corazón de María | 2640 | 0.0178 | 0.035 |
| J151 | Corazón de María | 2647 | 0.0254 | 0.05 |
| J152 | Corazón de María | 2641 | 0.0152 | 0.03 |
| J153 | Corazón de María | 2621 | 0.0228 | 0.045 |
| J154 | Corazón de María | 2641 | 0.0051 | 0.01 |
| J155 | Corazón de María | 2656 | 0 | 0 |
| J156 | Corazón de María | 2655 | 0.0406 | 0.08 |
| J157 | Corazón de María | 2655 | 0.0279 | 0.055 |
| J158 | Corazón de María | 2610 | 0.0558 | 0.11 |

| | | | | |
|-------------|---------------------|------|--------|-------|
| J159 | Corazón de María | 2628 | 0.0152 | 0.03 |
| J160 | Corazón de María | 2632 | 0.0051 | 0.01 |
| J161 | Corazón de María | 2618 | 0.0051 | 0.01 |
| J162 | Corazón de María | 2618 | 0 | 0 |
| J163 | Corazón de María | 2718 | 0.0102 | 0.02 |
| J164 | Corazón de María | 2721 | 0.0102 | 0.02 |
| J307 | General Veintimilla | 2717 | 0 | 0 |
| J308 | General Veintimilla | 2618 | 0.1066 | 0.21 |
| J309 | General Veintimilla | 2699 | 0.1538 | 0.303 |
| J310 | General Veintimilla | 2615 | 0.0416 | 0.082 |
| J311 | General Veintimilla | 2644 | 0 | 0 |
| J312 | General Veintimilla | 2650 | 0.0416 | 0.082 |
| J313 | General Veintimilla | 2670 | 0.0766 | 0.151 |
| J314 | General Veintimilla | 2664 | 0.0178 | 0.035 |
| J315 | General Veintimilla | 2663 | 0.0178 | 0.035 |
| J316 | General Veintimilla | 2633 | 0.0472 | 0.093 |
| J317 | General Veintimilla | 2717 | 0 | 0 |
| J318 | General Veintimilla | 2702 | 0 | 0 |
| J319 | General Veintimilla | 2702 | 0 | 0 |
| J320 | General Veintimilla | 2626 | 0.0827 | 0.163 |
| J321 | General Veintimilla | 2644 | 0.0000 | 0 |
| J322 | General Veintimilla | 2645 | 0.0711 | 0.14 |
| J323 | General Veintimilla | 2643 | 0.0650 | 0.128 |
| J1 | Leg Abuga | 2784 | 0 | 0 |
| J2 | Leg Abuga | 2748 | 0.0320 | 0.063 |
| J3 | Leg Abuga | 2773 | 0.0086 | 0.017 |
| J4 | Leg Abuga | 2772 | 0 | 0 |
| J5 | Leg Abuga | 2772 | 0 | 0 |
| J6 | Leg Abuga | 2781 | 0.0340 | 0.067 |
| J7 | Leg Abuga | 2758 | 0.0193 | 0.038 |
| J8 | Leg Abuga | 2772 | 0 | 0 |
| J9 | Leg Abuga | 2707 | 0.0792 | 0.156 |
| J10 | Leg Abuga | 2729 | 0.0259 | 0.051 |
| J11 | Leg Abuga | 2720 | 0.0665 | 0.131 |
| J12 | Leg Abuga | 2687 | 0.0492 | 0.097 |
| J13 | Leg Abuga | 2688 | 0.0234 | 0.046 |
| J14 | Leg Abuga | 2637 | 0.0426 | 0.084 |
| J15 | Leg Abuga | 2673 | 0.0259 | 0.051 |
| J16 | Leg Abuga | 2674 | 0 | 0 |
| J18 | Leg Abuga | 2670 | 0.0107 | 0.021 |
| J19 | Leg Abuga | 2780 | 0.0259 | 0.051 |
| J20 | Leg Abuga | 2726 | 0.0259 | 0.051 |
| J21 | Leg Abuga | 2703 | 0.0041 | 0.008 |
| J22 | Leg Abuga | 2725 | 0.0340 | 0.067 |
| J23 | Leg Abuga | 2714 | 0.0127 | 0.025 |

| | | | | |
|-----|-----------|------|--------|-------|
| J24 | Leg Abuga | 2784 | 0 | 0 |
| J25 | Leg Abuga | 2783 | 0.0086 | 0.017 |
| J26 | Leg Abuga | 2781 | 0.0086 | 0.017 |
| J27 | Leg Abuga | 2772 | 0 | 0 |
| J28 | Leg Abuga | 2668 | 0.0533 | 0.105 |
| J29 | Leg Abuga | 2666 | 0.0086 | 0.017 |
| J30 | Leg Abuga | 2715 | 0.0792 | 0.156 |
| J31 | Leg Abuga | 2693 | 0 | 0 |
| J32 | Leg Abuga | 2677 | 0.0041 | 0.008 |
| J33 | Leg Abuga | 2784 | 0 | 0 |
| J34 | Leg Abuga | 2784 | 0 | 0 |
| J35 | Leg Abuga | 2737 | 0.0234 | 0.046 |
| J36 | Leg Abuga | 2722 | 0 | 0 |
| J37 | Leg Abuga | 2722 | 0.0234 | 0.046 |
| J38 | Leg Abuga | 2722 | 0 | 0 |
| J39 | Leg Abuga | 2722 | 0 | 0 |
| J40 | Leg Abuga | 2722 | 0 | 0 |
| J41 | Leg Abuga | 2709 | 0.0599 | 0.118 |
| J42 | Leg Abuga | 2772 | 0 | 0 |
| J43 | Leg Abuga | 2772 | 0 | 0 |
| J44 | Leg Abuga | 2782 | 0.0127 | 0.025 |
| J45 | Leg Abuga | 2694 | 0.0066 | 0.013 |
| J46 | Leg Abuga | 2780 | 0 | 0 |
| J47 | Leg Abuga | 2779 | 0 | 0 |
| J48 | Leg Abuga | 2779 | 0 | 0 |
| J49 | Leg Abuga | 2772 | 0 | 0 |
| J50 | Leg Abuga | 2772 | 0 | 0 |
| J51 | Leg Abuga | 2772 | 0 | 0 |
| J52 | Leg Abuga | 2772 | 0 | 0 |
| J53 | Leg Abuga | 2781 | 0.0193 | 0.038 |
| J54 | Leg Abuga | 2784 | 0 | 0 |
| J55 | Leg Abuga | 2784 | 0 | 0 |
| J56 | Leg Abuga | 2675 | 0 | 0 |
| J57 | Leg Abuga | 2696 | 0 | 0 |
| J58 | Leg Abuga | 2696 | 0.0020 | 0.004 |
| J59 | Leg Abuga | 2783 | 0.0066 | 0.013 |
| J60 | Leg Abuga | 2774 | 0.0213 | 0.042 |
| J61 | Leg Abuga | 2725 | 0.0299 | 0.059 |
| J62 | Leg Abuga | 2781 | 0 | 0 |
| J63 | Leg Abuga | 2778 | 0 | 0 |
| J64 | Leg Abuga | 2737 | 0 | 0 |
| J65 | Leg Abuga | 2727 | 0 | 0 |
| J66 | Leg Abuga | 2709 | 0 | 0 |
| J67 | Leg Abuga | 2717 | 0 | 0 |
| J68 | Leg Abuga | 2721 | 0 | 0 |

| | | | | |
|-------------|-------------|------|--------|-------|
| J69 | Leg Abuga | 2713 | 0 | 0 |
| J70 | Leg Abuga | 2712 | 0 | 0 |
| J71 | Leg Abuga | 2708 | 0 | 0 |
| J72 | Leg Abuga | 2728 | 0 | 0 |
| J73 | Leg Abuga | 2765 | 0 | 0 |
| J74 | Leg Abuga | 2746 | 0.0127 | 0.025 |
| J75 | Leg Abuga | 2772 | 0 | 0 |
| J76 | Leg Abuga | 2779 | 0 | 0 |
| J77 | Leg Abuga | 2784 | 0 | 0 |
| J78 | Leg Abuga | 2748 | 0.0193 | 0.038 |
| J79 | Leg Abuga | 2732 | 0.0041 | 0.008 |
| J80 | Leg Abuga | 2744 | 0 | 0 |
| J81 | Leg Abuga | 2744 | 0 | 0 |
| J82 | Leg Tabacay | 2663 | 0.0086 | 0.017 |
| J83 | Leg Tabacay | 2675 | 0.0086 | 0.017 |
| J84 | Leg Tabacay | 2620 | 0.0284 | 0.056 |
| J85 | Leg Tabacay | 2628 | 0.0218 | 0.043 |
| J86 | Leg Tabacay | 2618 | 0.0066 | 0.013 |
| J87 | Leg Tabacay | 2564 | 0 | 0 |
| J88 | Leg Tabacay | 2559 | 0.0086 | 0.017 |
| J89 | Leg Tabacay | 2587 | 0.0218 | 0.043 |
| J90 | Leg Tabacay | 2634 | 0.0066 | 0.013 |
| J91 | Leg Tabacay | 2618 | 0 | 0 |
| J92 | Leg Tabacay | 2605 | 0.0355 | 0.07 |
| J93 | Leg Tabacay | 2617 | 0.0198 | 0.039 |
| J94 | Leg Tabacay | 2587 | 0.0284 | 0.056 |
| J95 | Leg Tabacay | 2559 | 0.0178 | 0.035 |
| J96 | Leg Tabacay | 2593 | 0.0086 | 0.017 |
| J97 | Leg Tabacay | 2616 | 0.0310 | 0.061 |
| J98 | Leg Tabacay | 2620 | 0.0046 | 0.009 |
| J99 | Leg Tabacay | 2627 | 0.0132 | 0.026 |
| J100 | Leg Tabacay | 2621 | 0.0310 | 0.061 |
| J101 | Leg Tabacay | 2611 | 0 | 0 |
| J102 | Leg Tabacay | 2559 | 0.0112 | 0.022 |
| J103 | Leg Tabacay | 2566 | 0.0112 | 0.022 |
| J104 | Leg Tabacay | 2616 | 0.0152 | 0.03 |
| J105 | Leg Tabacay | 2634 | 0.0244 | 0.048 |
| J106 | Leg Tabacay | 2564 | 0.0112 | 0.022 |
| J107 | Leg Tabacay | 2561 | 0.0132 | 0.026 |
| J108 | Leg Tabacay | 2594 | 0.0152 | 0.03 |
| J109 | Leg Tabacay | 2585 | 0.0112 | 0.022 |
| J110 | Leg Tabacay | 2648 | 0.0066 | 0.013 |
| J111 | Leg Tabacay | 2666 | 0.0310 | 0.061 |
| J112 | Leg Tabacay | 2611 | 0.0046 | 0.009 |
| J113 | Leg Tabacay | 2693 | 0.0178 | 0.035 |

| | | | | |
|------|--------------|------|--------|-------|
| J114 | Leg Tabacay | 2612 | 0.0178 | 0.035 |
| J115 | Leg Tabacay | 2612 | 0.0000 | 0 |
| J116 | Leg Tabacay | 2611 | 0.0284 | 0.056 |
| J117 | Leg Tabacay | 2564 | 0 | 0 |
| J118 | Leg Tabacay | 2561 | 0 | 0 |
| J119 | Leg Tabacay | 2617 | 0.0421 | 0.083 |
| J120 | Leg Tabacay | 2586 | 0.0244 | 0.048 |
| J121 | Leg Tabacay | 2585 | 0 | 0 |
| J122 | Leg Tabacay | 2585 | 0 | 0 |
| J123 | Leg Tabacay | 2585 | 0 | 0 |
| J124 | Leg Tabacay | 2585 | 0 | 0 |
| J200 | Oriente Alto | 2714 | 0.1843 | 0.363 |
| J201 | Oriente Alto | 2712 | 0 | 0 |
| J202 | Oriente Alto | 2677 | 0.1396 | 0.275 |
| J203 | Oriente Alto | 2657 | 0.1340 | 0.264 |
| J204 | Oriente Alto | 2696 | 0.0949 | 0.187 |
| J205 | Oriente Alto | 2715 | 0.0223 | 0.044 |
| J206 | Oriente Alto | 2713 | 0.0726 | 0.143 |
| J207 | Oriente Alto | 2718 | 0.0279 | 0.055 |
| J208 | Oriente Alto | 2718 | 0 | 0 |
| J209 | Oriente Alto | 2718 | 0 | 0 |
| J210 | Oriente Alto | 2681 | 0 | 0 |
| J211 | Oriente Alto | 2694 | 0.1340 | 0.264 |
| J212 | Oriente Alto | 2684 | 0 | 0 |
| J213 | Oriente Alto | 2681 | 0 | 0 |
| J214 | Oriente Alto | 2681 | 0 | 0 |
| J215 | Oriente Alto | 2718 | 0 | 0 |
| J216 | Oriente Alto | 2712 | 0 | 0 |
| J217 | Oriente Bajo | 2635 | 0.0335 | 0.066 |
| J218 | Oriente Bajo | 2613 | 0.0604 | 0.119 |
| J219 | Oriente Bajo | 2596 | 0.0203 | 0.04 |
| J220 | Oriente Bajo | 2586 | 0.0203 | 0.04 |
| J221 | Oriente Bajo | 2600 | 0.0538 | 0.106 |
| J222 | Oriente Bajo | 2597 | 0.0269 | 0.053 |
| J223 | Oriente Bajo | 2604 | 0.0269 | 0.053 |
| J224 | Oriente Bajo | 2606 | 0.0675 | 0.133 |
| J225 | Oriente Bajo | 2596 | 0.0269 | 0.053 |
| J226 | Oriente Bajo | 2610 | 0.0203 | 0.04 |
| J227 | Oriente Bajo | 2597 | 0.0137 | 0.027 |
| J228 | Oriente Bajo | 2617 | 0.0137 | 0.027 |
| J229 | Oriente Bajo | 2619 | 0.0538 | 0.106 |
| J230 | Oriente Bajo | 2617 | 0.0066 | 0.013 |
| J231 | Oriente Bajo | 2618 | 0 | 0 |
| J232 | Oriente Bajo | 2621 | 0 | 0 |
| J233 | Oriente Bajo | 2621 | 0 | 0 |

| | | | | |
|-------------|--------------|------|--------|-------|
| J234 | Oriente Bajo | 2598 | 0.0807 | 0.159 |
| J235 | Oriente Bajo | 2603 | 0.0335 | 0.066 |
| J236 | Oriente Bajo | 2597 | 0.0335 | 0.066 |
| J237 | Oriente Bajo | 2602 | 0.0335 | 0.066 |
| J238 | Oriente Bajo | 2621 | 0.0066 | 0.013 |
| J239 | Oriente Bajo | 2628 | 0.0538 | 0.106 |
| J240 | Oriente Bajo | 2631 | 0.0203 | 0.04 |
| J241 | Oriente Bajo | 2628 | 0.0203 | 0.04 |
| J242 | Oriente Bajo | 2628 | 0 | 0 |
| J243 | Oriente Bajo | 2660 | 0.0604 | 0.119 |
| J244 | Oriente Bajo | 2644 | 0.0335 | 0.066 |
| J245 | Oriente Bajo | 2648 | 0.0066 | 0.013 |
| J246 | Oriente Bajo | 2655 | 0.0538 | 0.106 |
| J247 | Oriente Bajo | 2684 | 0 | 0 |
| J248 | Oriente Bajo | 2660 | 0 | 0 |
| J249 | Oriente Bajo | 2681 | 0 | 0 |
| J250 | Oriente Bajo | 2660 | 0 | 0 |
| J251 | Oriente Bajo | 2628 | 0 | 0 |
| J252 | Oriente Bajo | 2645 | 0.0406 | 0.08 |
| J253 | Oriente Bajo | 2628 | 0 | 0 |
| J254 | Oriente Bajo | 2621 | 0 | 0 |
| J255 | Oriente Bajo | 2621 | 0 | 0 |
| J256 | Oriente Bajo | 2621 | 0 | 0 |
| J257 | Oriente Bajo | 2621 | 0 | 0 |
| J258 | Oriente Bajo | 2596 | 0.0203 | 0.04 |
| J259 | Oriente Bajo | 2621 | 0 | 0 |
| J260 | Oriente Bajo | 2621 | 0.0335 | 0.066 |
| J261 | Oriente Bajo | 2602 | 0.0066 | 0.013 |
| J262 | Oriente Bajo | 2596 | 0.0066 | 0.013 |
| J263 | Oriente Bajo | 2620 | 0 | 0 |
| J264 | Oriente Bajo | 2634 | 0.0269 | 0.053 |
| J265 | Oriente Bajo | 2634 | 0.0203 | 0.04 |
| J266 | Oriente Bajo | 2639 | 0.0203 | 0.04 |
| J267 | Oriente Bajo | 2635 | 0.0269 | 0.053 |
| J268 | Oriente Bajo | 2628 | 0.0604 | 0.119 |
| J269 | Oriente Bajo | 2628 | 0 | 0 |
| J270 | Oriente Bajo | 2611 | 0.0269 | 0.053 |
| J271 | Oriente Bajo | 2611 | 0.0604 | 0.119 |
| J272 | Oriente Bajo | 2629 | 0.0406 | 0.08 |
| J273 | Oriente Bajo | 2635 | 0.0203 | 0.04 |
| J274 | Oriente Bajo | 2637 | 0.0538 | 0.106 |
| J275 | Oriente Bajo | 2629 | 0.0269 | 0.053 |
| J276 | Oriente Bajo | 2620 | 0.0203 | 0.04 |
| J277 | Oriente Bajo | 2620 | 0.0203 | 0.04 |
| J278 | Oriente Bajo | 2622 | 0.0472 | 0.093 |

| | | | | |
|-------------|-----------------|------|--------|-------|
| J279 | Oriente Bajo | 2616 | 0.0137 | 0.027 |
| J280 | Oriente Bajo | 2616 | 0.0066 | 0.013 |
| J281 | Oriente Bajo | 2619 | 0.0137 | 0.027 |
| J282 | Oriente Bajo | 2621 | 0 | 0 |
| J283 | Oriente Bajo | 2621 | 0.0137 | 0.027 |
| J284 | Oriente Bajo | 2610 | 0.0335 | 0.066 |
| J285 | Oriente Bajo | 2610 | 0.0137 | 0.027 |
| J286 | Oriente Bajo | 2618 | 0.0137 | 0.027 |
| J287 | Oriente Bajo | 2614 | 0.0203 | 0.04 |
| J288 | Oriente Bajo | 2610 | 0.0137 | 0.027 |
| J289 | Oriente Bajo | 2610 | 0.0066 | 0.013 |
| J290 | Oriente Bajo | 2614 | 0.0269 | 0.053 |
| J291 | Oriente Bajo | 2602 | 0.0335 | 0.066 |
| J292 | Oriente Bajo | 2602 | 0.0066 | 0.013 |
| J293 | Oriente Bajo | 2603 | 0.0406 | 0.08 |
| J294 | Oriente Bajo | 2603 | 0.0137 | 0.027 |
| J295 | Oriente Bajo | 2607 | 0.0066 | 0.013 |
| J296 | Oriente Bajo | 2628 | 0 | 0 |
| J297 | Oriente Bajo | 2628 | 0 | 0 |
| J298 | Oriente Bajo | 2621 | 0 | 0 |
| J299 | Oriente Bajo | 2621 | 0.0066 | 0.013 |
| J300 | Oriente Bajo | 2621 | 0.0066 | 0.013 |
| J301 | Oriente Bajo | 2621 | 0 | 0 |
| J302 | Oriente Bajo | 2621 | 0 | 0 |
| J303 | Oriente Bajo | 2620 | 0.0066 | 0.013 |
| J304 | Oriente Bajo | 2620 | 0.0066 | 0.013 |
| J305 | Oriente Bajo | 2620 | 0.0335 | 0.066 |
| J306 | Oriente Bajo | 2620 | 0.0066 | 0.013 |
| J165 | Señor de Flores | 2722 | 0.0462 | 0.091 |
| J166 | Señor de Flores | 2773 | 0.0203 | 0.04 |
| J167 | Señor de Flores | 2722 | 0 | 0 |
| J168 | Señor de Flores | 2771 | 0 | 0 |
| J169 | Señor de Flores | 2757 | 0.0203 | 0.04 |
| J170 | Señor de Flores | 2735 | 0.0056 | 0.011 |
| J171 | Señor de Flores | 2755 | 0.0203 | 0.04 |
| J172 | Señor de Flores | 2752 | 0.0173 | 0.034 |
| J173 | Señor de Flores | 2742 | 0.0289 | 0.057 |
| J174 | Señor de Flores | 2737 | 0.0142 | 0.028 |
| J175 | Señor de Flores | 2770 | 0 | 0 |
| J176 | Señor de Flores | 2747 | 0.0173 | 0.034 |
| J177 | Señor de Flores | 2748 | 0.0665 | 0.131 |
| J178 | Señor de Flores | 2745 | 0.0030 | 0.006 |
| J179 | Señor de Flores | 2729 | 0.0548 | 0.108 |
| J180 | Señor de Flores | 2731 | 0 | 0 |
| J181 | Señor de Flores | 2719 | 0.0548 | 0.108 |

| | | | | |
|-------------|-----------------|------|--------|-------|
| J182 | Señor de Flores | 2727 | 0.0437 | 0.086 |
| J183 | Señor de Flores | 2722 | 0 | 0 |
| J184 | Señor de Flores | 2722 | 0.0117 | 0.023 |
| J185 | Señor de Flores | 2770 | 0 | 0 |
| J186 | Señor de Flores | 2770 | 0.0056 | 0.011 |
| J187 | Señor de Flores | 2753 | 0.0056 | 0.011 |
| J188 | Señor de Flores | 2733 | 0 | 0 |
| J189 | Señor de Flores | 2760 | 0.0056 | 0.011 |
| J190 | Señor de Flores | 2721 | 0.0056 | 0.011 |
| J191 | Señor de Flores | 2770 | 0 | 0 |
| J192 | Señor de Flores | 2770 | 0 | 0 |
| J193 | Señor de Flores | 2771 | 0 | 0 |
| J194 | Señor de Flores | 2718 | 0 | 0 |
| J195 | Señor de Flores | 2730 | 0 | 0 |
| J196 | Señor de Flores | 2730 | 0 | 0 |
| J197 | Señor de Flores | 2718 | 0.0056 | 0.011 |
| J198 | Señor de Flores | 2718 | 0 | 0 |
| J199 | Señor de Flores | 2718 | 0 | 0 |
| J324 | Zhirincay | 2698 | 0 | 0 |
| J325 | Zhirincay | 2712 | 0.0706 | 0.139 |
| J326 | Zhirincay | 2683 | 0 | 0 |
| J327 | Zhirincay | 2709 | 0.0670 | 0.132 |
| J328 | Zhirincay | 2714 | 0.0234 | 0.046 |
| J329 | Zhirincay | 2695 | 0.0203 | 0.04 |
| J330 | Zhirincay | 2720 | 0.0102 | 0.02 |
| J331 | Zhirincay | 2705 | 0.0132 | 0.026 |
| J332 | Zhirincay | 2705 | 0.0132 | 0.026 |
| J333 | Zhirincay | 2694 | 0.0132 | 0.026 |
| J334 | Zhirincay | 2731 | 0 | 0 |
| J335 | Zhirincay | 2757 | 0.0203 | 0.04 |
| J336 | Zhirincay | 2748 | 0.0203 | 0.04 |
| J337 | Zhirincay | 2745 | 0.0066 | 0.013 |
| J338 | Zhirincay | 2725 | 0.0066 | 0.013 |
| J339 | Zhirincay | 2683 | 0 | 0 |

Anexo B: Algoritmo de calibración.

Algoritmo para calibrar rugosidades.

```

#Calibracion Rugosidades
#importamos las librerias necesarias para el análisis del modelo matemático
import numpy as np
import pandas as pd
import os
from matplotlib import pyplot as plt
from epanettools.epanettools import EPANetSimulation, Node, Link,
Network, Nodes, Patterns, Pattern
import Calibración_funciones
#Cargamos la red
file= 'RED BAYAS.inp'
es= EPANetSimulation(file)
#Presiones Observadas en acampo
datos=pd.read_excel("DATOS_CAMPO.xlsx")
colum=len(datos.iloc[0])
fila=len(datos)
presion_obsID=[]
presion_obs=[]
for i in range (0, fila):
    presion_obs.append(round(datos.iloc[i,1],2))
    presion_obsID.append(datos.iloc[i,0])
#Rango de rugosidades
rugos=[110,115,120,125,130,135,140]
#Llamar Nodos y tuberias
nodos = es.network.nodes
tuberias = es.network.links
presion = Node.value_type['EN_PRESSURE']
rugosidades = Link.value_type['EN_ROUGHNESS'] #PVC
#Grafica de presiones antes de calibrar
nod1=[]
press1=[]
es.run()
print("=====Presiones antes de calibrar=====")
for k in range(0,len(presion_obs)):
    for l in range(0,len(nodos)):
        if nodos[l+1].node_type==0:
            if presion_obsID[k]==nodos[l+1].id:
                press1.append(round(es.network.nodes[l+1].results[pr
esion][0],2))
                print(nodos[l+1].id,":",round(es.network.nodes[l+1].
results[presion][0],2),"mca")
                nod1.append(nodos[l+1].id)
for i in range(0,len(tuberias)):
    if tuberias[i+1].link_type==1:

```

```

    print("Tubería
ID:",tuberias[i+1].id,"Rugosidad",es.network.links[i+1].results[rugosidades][0
])
media = np.mean(presion_obs)
sum1=0
sum2=0
for k in range(0,len(presion_obsID)):
    indice=nodos[presion_obsID[k]].index
    sum1+=(presion_obs[k]-
round(es.network.nodes[indice].results[presion][0],2))**2
    sum2+=(presion_obs[k]-media)**2
Nash1=1-sum1/sum2
print("Error antes de calibrar:",Nash1)
nuevo_r=Calibración_funciones.rugo(es,rugos,presion_obs,presion_obsID)
cont=0
for i in range(0,len(tuberias)):
    if tuberias[i+1].link_type==1:
        r=es.ENsetlinkvalue(tuberias[i+1].index,rugosidades,nuevo_r[cont])
        cont+=1
f=os.path.join('CALIBRADO1.inp')
es.ENsaveinpfile(f)
es2=EPANetSimulation(f)
es2.run()
#Grafica de presiones después de calibrar
nod=[]
press=[]
print("=====Presiones después de calibrar=====")
for k in range(0,len(presion_obs)):
    for l in range(0,len(nodos)):
        if nodos[l+1].node_type==0:
            if presion_obsID[k]==nodos[l+1].id:
                press.append(round(es2.network.nodes[l+1].results[pr
esion][0],2))
                print(nodos[l+1].id,":",round(es2.network.nodes[l+1]
.results[presion][0],2),"mca")
                nod.append(nodos[l+1].id)
#Error después de calibrar
media = np.mean(presion_obs)
sum1=0
sum2=0
for k in range(0,len(presion_obsID)):
    indice=nodos[presion_obsID[k]].index
    sum1+=(presion_obs[k]-
round(es2.network.nodes[indice].results[presion][0],2))**2
    sum2+=(presion_obs[k]-media)**2
Nash=1-sum1/sum2
print("Error después de calibrar:",Nash)

```

```
#Imprime Nuevas rugosidades
for i in range(0,len(tuberias)):
    if tuberias[i+1].link_type==1:
        print("Tubería ID:",tuberias[i+1].id,"Nueva
Rugosidad",es2.network.links[i+1].results[rugosidades][0])
print("error minimo:",Nash)
print("ANALISIS")
print("Error antes de calibrar:",Nash1)
print("Error después de calibrar:",Nash)
#=====
plt.subplot(121)
ejex=np.arange(0,len(presion_obs))
plt.grid(0.2,linestyle="--",linewidth=0.8)
plt.bar(presion_obsID,presion_obs,width=0.2,label='Presión Observada')
plt.bar(ejex+0.2,press1,width=0.2,label='Presión Calculada')
plt.title("Presión en los nodos antes de calibrar")
plt.xlabel("Nodos")
plt.ylabel("Presión(mca)")
plt.legend()
#=====
plt.subplot(122)
plt.grid(0.2,linestyle="--",linewidth=0.8)
plt.bar(presion_obsID,presion_obs,width=0.2,label='Presión Observada')
plt.bar(ejex+0.2,press,width=0.2,label='Presión Calculada')
plt.title("Presión en los nodos después de calibrar")
plt.xlabel("Nodos")
plt.ylabel("Presión(mca)")
plt.legend()
plt.show()
```

Algoritmo para calibrar cotas.

```

#calibracion cotas
#importamos las librerias necesarias para el análisis del modelo matemático
import numpy as np
import pandas as pd
import os
from matplotlib import pyplot as plt
from epanettools.epanettools import EPANetSimulation, Node, Link,
Network, Nodes, Patterns, Pattern
import Calibración_funciones
#Cargamos la red
file= 'CALIBRADO1.inp'
es= EPANetSimulation(file)
#Presiones Observadas en campo
datos=pd.read_excel("DATOS_CAMPO.xlsx")
colum=len(datos.iloc[0])
fila=len(datos)
presion_obsID=[]
presion_obs=[]
for i in range (0, fila):
    presion_obs.append(round(datos.iloc[i,1],2))
    presion_obsID.append(datos.iloc[i,0])
#Rango de coeficientes
coeficiente=[0.999575,0.9998,0.9999,1,1.0001,1.0002,1.0003,1.00034,1.00039]
#Llamar Nodos y tuberias
nodos = es.network.nodes
tuberias = es.network.links
presion = Node.value_type['EN_PRESSURE']
elevation=Node.value_type['EN_ELEVATION']
#Grafica de presiones antes de calibrar
nod1=[]
press1=[]
es.run()
print("====Presiones antes de calibrar====")
for k in range(0,len(presion_obs)):
    for l in range(0,len(nodos)):
        if nodos[l+1].node_type==0:
            if presion_obsID[k]==nodos[l+1].id:
                press1.append(round(es.network.nodes[l+1].results[presion][0],2))
                print(nodos[l+1].id,":",round(es.network.nodes[l+1].results[presion][0],2),"mca")
                nod1.append(nodos[l+1].id)
for i in range(0,len(nodos)):
    if nodos[i+1].node_type==0:

```



```

    print("nodo
ID:", nodos[i+1].id, "Cota", round(es.network.nodes[i+1].results[elevation][0], 2)
)
media = np.mean(presion_obs)
sum1=0
sum2=0
for k in range(0, len(presion_obsID)):
    indice=nodos[presion_obsID[k]].index
    sum1+=(presion_obs[k]-
round(es.network.nodes[indice].results[presion][0], 2))**2
    sum2+=(presion_obs[k]-media)**2
Nash1=1-sum1/sum2
print("Error antes de calibrar:", Nash1)
nuevo_r=Calibración_funciones.cota(es, coeficiente, presion_obs, presion_obsID)
cont=0
for i in range(0, len(nodos)):
    if nodos[i+1].node_type==0:
        r=es.ENsetnodevalue(nodos[i+1].index, elevation, nuevo_r[cont])
        cont+=1
f=os.path.join('CALIBRADO2.inp')
es.ENsaveinpfile(f)
es2=EPANetSimulation(f)
es2.run()
#Grafica de presiones después de calibrar
nod=[]
press=[]
print("=====Presiones después de calibrar=====")
for k in range(0, len(presion_obs)):
    for l in range(0, len(nodos)):
        if nodos[l+1].node_type==0:
            if presion_obsID[k]==nodos[l+1].id:
                press.append(round(es2.network.nodes[l+1].results[pr
esion][0], 2))
                print(nodos[l+1].id, ":", round(es2.network.nodes[l+1]
.results[presion][0], 2), "mca")
                nod.append(nodos[l+1].id)
#Error después de calibrar
media = np.mean(presion_obs)
sum1=0
sum2=0
for k in range(0, len(presion_obsID)):
    indice=nodos[presion_obsID[k]].index
    sum1+=(presion_obs[k]-
round(es2.network.nodes[indice].results[presion][0], 2))**2
    sum2+=(presion_obs[k]-media)**2
Nash=1-sum1/sum2
print("Error después de calibrar:", Nash)

```

```
#Imprime Nuevas rugosidades
for i in range(0,len(nodos)):
    if nodos[i+1].node_type==0:
        print("Nodo ID:",nodos[i+1].id,"Nueva
cota",round(es2.network.nodos[i+1].results[elevation][0],2))
print("error minimo:",Nash)
print("ANALISIS")
print("Error antes de calibrar:",Nash1)
print("Error después de calibrar:",Nash)
#=====
plt.subplot(121)
ejex=np.arange(0,len(presion_obs))
plt.grid(0.2,linestyle="--",linewidth=0.8)
plt.bar(presion_obsID,presion_obs,width=0.2,label='Presión Observada')
plt.bar(ejex+0.2,press1,width=0.2,label='Presión Calculada')
plt.title("Presión en los nodos antes de calibrar")
plt.xlabel("Nodos")
plt.ylabel("Presión(mca)")
plt.legend()
#=====
plt.subplot(122)
plt.grid(0.2,linestyle="--",linewidth=0.8)
plt.bar(presion_obsID,presion_obs,width=0.2,label='Presión Observada')
plt.bar(ejex+0.2,press,width=0.2,label='Presión Calculada')
plt.title("Presión en los nodos después de calibrar")
plt.xlabel("Nodos")
plt.ylabel("Presión(mca)")
plt.legend()
plt.show()
```

Algoritmo para calibrar consigna de las VRP.

```

#calibracion consigna
#importamos las librerias necesarias para el análisis del modelo matemático
import numpy as np
import pandas as pd
import os
from matplotlib import pyplot as plt
from epanettools.epanettools import EPANetSimulation, Node, Link,
Network, Nodes, Patterns, Pattern
import Calibración_funciones
#Cargamos la red
file= ' CALIBRADO2.inp'
es= EPANetSimulation(file)
#Presiones Observadas en acampo
datos=pd.read_excel("DATOS_CAMPO.xlsx")
colum=len(datos.iloc[0])
fila=len(datos)
presion_obsID=[]
presion_obs=[]
for i in range (0, fila):
    presion_obs.append(round(datos.iloc[i,1],2))
    presion_obsID.append(datos.iloc[i,0])
#Llamar Nodos y tuberias
nodos = es.network.nodes
tuberias = es.network.links
presion = Node.value_type['EN_PRESSURE']
consigna = Link.value_type['EN_INITSETTING'] #PVC
#Grafica de presiones antes de calibrar
nod1=[]
press1=[]
es.run()
print("=====Presiones antes de calibrar=====")
for k in range(0,len(presion_obs)):
    for l in range(0,len(nodos)):
        if nodos[l+1].node_type==0:
            if presion_obsID[k]==nodos[l+1].id:
                press1.append(round(es.network.nodes[l+1].results[presion][0],2))
                print(nodos[l+1].id,":",round(es.network.nodes[l+1].results[presion][0],2),"mca")
                nod1.append(nodos[l+1].id)
for i in range(0,len(tuberias)):
    if tuberias[i+1].link_type==3:
        print("Valvula
ID:",tuberias[i+1].id,"Consigna",es.network.links[i+1].results[consigna][0])
media = np.mean(presion_obs)
sum1=0

```

```

sum2=0
for k in range(0,len(presion_obsID)):
    indice=nodos[presion_obsID[k]].index
    sum1+=(presion_obs[k]-
round(es.network.nodes[indice].results[presion][0],2))**2
    sum2+=(presion_obs[k]-media)**2
Nash1=1-sum1/sum2
print("Error antes de calibrar:",Nash1)
nuevo_r=Calibración_funciones.consig(es,presion_obs,presion_obsID)
cont=0
for i in range(0,len(tuberias)):
    if tuberias[i+1].link_type==3:
        r=es.ENsetlinkvalue(tuberias[i+1].index,consigna,nuevo_r[cont])
        cont+=1
f=os.path.join('CALIBRADO3.inp')
es.ENsaveinpfile(f)
es2=EPANetSimulation(f)
es2.run()
#Grafica de presiones después de calibrar
nod=[]
press=[]
print("=====Presiones después de calibrar=====")
for k in range(0,len(presion_obs)):
    for l in range(0,len(nodos)):
        if nodos[l+1].node_type==0:
            if presion_obsID[k]==nodos[l+1].id:
                press.append(round(es2.network.nodes[l+1].results[pr
esion][0],2))
                print(nodos[l+1].id,":",round(es2.network.nodes[l+1]
.results[presion][0],2),"mca")
                nod.append(nodos[l+1].id)
#Error después de calibrar
media = np.mean(presion_obs)
sum1=0
sum2=0
for k in range(0,len(presion_obsID)):
    indice=nodos[presion_obsID[k]].index
    sum1+=(presion_obs[k]-
round(es2.network.nodes[indice].results[presion][0],2))**2
    sum2+=(presion_obs[k]-media)**2
Nash=1-sum1/sum2
print("Error después de calibrar:",Nash)
#Imprime Nuevas rugosidades
for i in range(0,len(tuberias)):
    if tuberias[i+1].link_type==3:
        print("VALVULA ID:",tuberias[i+1].id,"Nueva
consigna",es2.network.links[i+1].results[consigna][0])

```

```
print("error mínimo:",Nash)
print("ANALISIS")
print("Error antes de calibrar:",Nash1)
print("Error después de calibrar:",Nash)
#=====
plt.subplot(121)
ejex=np.arange(0,len(presion_obs))
plt.grid(0.2,linestyle="--",linewidth=0.8)
plt.bar(presion_obsID,presion_obs,width=0.2,label='Presión Observada')
plt.bar(ejex+0.2,press1,width=0.2,label='Presión Calculada')
plt.title("Presión en los nodos antes de calibrar")
plt.xlabel("Nodos")
plt.ylabel("Presión(mca)")
plt.legend()
#=====
plt.subplot(122)
plt.grid(0.2,linestyle="--",linewidth=0.8)
plt.bar(presion_obsID,presion_obs,width=0.2,label='Presión Observada')
plt.bar(ejex+0.2,press,width=0.2,label='Presión Calculada')
plt.title("Presión en los nodos después de calibrar")
plt.xlabel("Nodos")
plt.ylabel("Presión(mca)")
plt.legend()
plt.show()
```

Algoritmo para calibrar demandas.

```

#calibracion demandas
#importamos las librerias necesarias para el análisis del modelo matemático
import numpy as np
import pandas as pd
import os
from matplotlib import pyplot as plt
from epanettools.epanettools import EPANetSimulation, Node, Link,
Network, Nodes, Patterns, Pattern
import Calibración_funciones
#Cargamos la red
file= 'CALIBRADO3.inp'
es= EPANetSimulation(file)
#Presiones Observadas en acampo
datos=pd.read_excel("DATOS_CAMPO.xlsx")
colum=len(datos.iloc[0])
fila=len(datos)
presion_obsID=[]
presion_obs=[]
for i in range (0, fila):
    presion_obs.append(round(datos.iloc[i,1],2))
    presion_obsID.append(datos.iloc[i,0])
#Rango de coeficientes
coeficiente=[0.9,0.91,0.92,0.93,0.94,0.95,0.96,0.97,0.98,0.99,1,1.01,
            1.02,1.03,1.04,1.05,1.06,1.07,1.08,1.09,1.1,1.2]
#Llamar Nodos y tuberias
nodos = es.network.nodes
tuberias = es.network.links
presion = Node.value_type['EN_PRESSURE']
demanda=Node.value_type['EN_BASEDEMAND']
#Grafica de presiones antes de calibrar
nod1=[]
press1=[]
es.run()
print("=====Presiones antes de calibrar=====")
for k in range(0,len(presion_obs)):
    for l in range(0,len(nodos)):
        if nodos[l+1].node_type==0:
            if presion_obsID[k]==nodos[l+1].id:
                press1.append(round(es.network.nodes[l+1].results[presion][0],2))
                print(nodos[l+1].id,":",round(es.network.nodes[l+1].results[presion][0],2),"mca")
                nod1.append(nodos[l+1].id)
for i in range(0,len(nodos)):
    if nodos[i+1].node_type==0:

```

```

    print("nodo
ID:", nodos[i+1].id, "Demanda", round(es.network.nodes[i+1].results[demanda][0], 5
))
media = np.mean(presion_obs)
sum1=0
sum2=0
for k in range(0, len(presion_obsID)):
    indice=nodos[presion_obsID[k]].index
    sum1+=(presion_obs[k]-
round(es.network.nodes[indice].results[presion][0], 2))**2
    sum2+=(presion_obs[k]-media)**2
Nash1=1-sum1/sum2
print("Error antes de calibrar:", Nash1)
nuevo_r=Calibración_funciones.demand(es, coeficiente, presion_obs, presion_obsID)
cont=0
for i in range(0, len(nodos)):
    if nodos[i+1].node_type==0:
        r=es.ENsetnodevalue(nodos[i+1].index, demanda, nuevo_r[cont])
        cont+=1
f=os.path.join('CALIBRADO4.inp')
es.ENsaveinpfile(f)
es2=EPANetSimulation(f)
es2.run()
#Grafica de presiones después de calibrar
nod=[]
press=[]
print("=====Presiones después de calibrar=====")
for k in range(0, len(presion_obs)):
    for l in range(0, len(nodos)):
        if nodos[l+1].node_type==0:
            if presion_obsID[k]==nodos[l+1].id:
                press.append(round(es2.network.nodes[l+1].results[pr
esion][0], 2))
                print(nodos[l+1].id, ":", round(es2.network.nodes[l+1]
.results[presion][0], 2), "mca")
                nod.append(nodos[l+1].id)
#Error después de calibrar
media = np.mean(presion_obs)
sum1=0
sum2=0
for k in range(0, len(presion_obsID)):
    indice=nodos[presion_obsID[k]].index
    sum1+=(presion_obs[k]-
round(es2.network.nodes[indice].results[presion][0], 2))**2
    sum2+=(presion_obs[k]-media)**2
Nash=1-sum1/sum2
print("Error después de calibrar:", Nash)

```

```
#Imprime Nuevas rugosidades
for i in range(0,len(nodos)):
    if nodos[i+1].node_type==0:
        print("Nodo ID:",nodos[i+1].id,"Nueva
demanda",round(es2.network.nodos[i+1].results[demanda][0],5))
print("error minimo:",Nash)
print("ANALISIS")
print("Error antes de calibrar:",Nash1)
print("Error después de calibrar:",Nash)
#=====
plt.subplot(121)
ejex=np.arange(0,len(presion_obs))
plt.grid(0.2,linestyle="--",linewidth=0.8)
plt.bar(presion_obsID,presion_obs,width=0.2,label='Presión Observada')
plt.bar(ejex+0.2,press1,width=0.2,label='Presión Calculada')
plt.title("Presión en los nodos antes de calibrar")
plt.xlabel("Nodos")
plt.ylabel("Presión(mca)")
plt.legend()
#=====
plt.subplot(122)
plt.grid(0.2,linestyle="--",linewidth=0.8)
plt.bar(presion_obsID,presion_obs,width=0.2,label='Presión Observada')
plt.bar(ejex+0.2,press,width=0.2,label='Presión Calculada')
plt.title("Presión en los nodos después de calibrar")
plt.xlabel("Nodos")
plt.ylabel("Presión(mca)")
plt.legend()
plt.show()
```


Funciones utilizadas para la calibración.

```
#Funciones utilizadas para calibrar
import numpy as np
import os
from epanettools.epanettools import EPANetSimulation, Node, Link,
Network, Nodes, Patterns, Pattern
from epanettools.examples import simple
from os import remove

def rugo(es, rugos, presion_obs, presion_obsID):
    presiones=Node.value_type['EN_PRESSURE']
    rugosidades = Link.value_type['EN_ROUGHNESS'] #PVC
    #Llamar Nodos y tuberias
    nodos = es.network.nodes
    tuberias = es.network.links
    presion_cal=[]
    rugosidad_nuevo=[]
    Error_min=-1
    for i in range(0,len(tuberias)):
        Error_min=-1
        if tuberias[i+1].link_type==1:
            for j in range(0,len(rugos)):
                r=(es.ENsetlinkvalue(i+1,rugosidades,rugos[j]))
                f=os.path.join('parcial_modificada.inp')
                es.ENSolveH();
                for k in range(0,len(presion_obs)):
                    for l in range(0,len(nodos)):
                        if nodos[l+1].node_type==0:
                            if presion_obsID[k]==nodos[l+1].id:
                                presion_cal.append(es.ENgetnodevalue(l+1,presiones)[
1])

                media = np.mean(presion_obs)
                sum1=0
                sum2=0
                for k in range(0,len(presion_obs)):
                    indice=nodos[presion_obsID[k]].index
                    sum1+=(presion_obs[k]-
round(es.ENgetnodevalue(indice,presiones)[1],2))**2
                    sum2+=(presion_obs[k]-media)**2
                Nash=1-sum1/sum2
                if Nash>Error_min:
                    Error_min=Nash
                    aux=rugos[j]
                print("Tubería ID:",tuberias[i+1].id,"NASH=",round(Error_min,5),"Nueva
Rugosidad(aux):",aux)
                rugosidad_nuevo.append(aux)
                r=(es.ENsetlinkvalue(i+1,rugosidades,aux))
                f=os.path.join('parcial_modificada.inp')
```

```

        es.ENsolveH();
    return rugosidad_nuevo
    remove('parcial_modificada.inp')
def cota(es,rugos,presion_obs,presion_obsID):
    cotas=Node.value_type['EN_ELEVATION']
    presiones=Node.value_type['EN_PRESSURE']
    #Llamar Nodos y tuberias
    nodos = es.network.nodes
    tuberias = es.network.links
    presion_cal=[]
    cotas_nuevo=[]
    Error_min=-1
    for i in range(0,len(nodos)):
        Error_min=-1
        if nodos[i+1].node_type==0:
            for j in range(0,len(rugos)):
                nuevo=es.ENgetnodevalue(i+1,cotas)[1]*rugos[j]
                r=(es.ENsetnodevalue(i+1,cotas,nuevo))
                f=os.path.join('parcial_modificada.inp')
                es.ENsolveH();
                for k in range(0,len(presion_obs)):
                    for l in range(0,len(nodos)):
                        if nodos[l+1].node_type==0:
                            if presion_obsID[k]==nodos[l+1].id:
                                presion_cal.append(es.ENgetnodevalue(l+1,presiones)[
1])

                media = np.mean(presion_obs)
                sum1=0
                sum2=0
                for k in range(0,len(presion_obs)):
                    indice=nodos[presion_obsID[k]].index
                    sum1+=(presion_obs[k]-
round(es.ENgetnodevalue(indice,presiones)[1],2))**2
                    sum2+=(presion_obs[k]-media)**2
                Nash=(1-sum1/sum2)
                if Nash>Error_min:
                    Error_min=Nash
                    aux=round(rugos[j]*es.ENgetnodevalue(i+1,cotas)[1],2)
                    print("Nodo ID:",nodos[i+1].id,"NASH=",round(Error_min,5),"Nueva
Cota:",aux)
                    cotas_nuevo.append(aux)
                    r=(es.ENsetnodevalue(i+1,cotas,aux))
                    f=os.path.join('parcial_modificada.inp')
                    es.ENsolveH();
    return cotas_nuevo
    remove('parcial_modificada.inp')
def consig(es,presion_obs,presion_obsID):

```

```

presiones=Node.value_type['EN_PRESSURE']
consigna = Link.value_type['EN_INITSETTING'] #PVC
#Llamar Nodos y tuberias
nodos = es.network.nodes
tuberias = es.network.links
presion_cal=[]
consigna_nuevo=[]
Error_min=-1
for i in range(0,len(tuberias)):
    Error_min=-1
    if tuberias[i+1].link_type==3:
        for j in range(30,60):
            r=(es.ENsetlinkvalue(i+1,consigna,j))
            f=os.path.join('parcial_modificada.inp')
            es.ENsolveH();
            for k in range(0,len(presion_obs)):
                for l in range(0,len(nodos)):
                    if nodos[l+1].node_type==0:
                        if presion_obsID[k]==nodos[l+1].id:
                            presion_cal.append(es.ENgetnodevalue(l+1,presiones)[
1])

                    media = np.mean(presion_obs)
                    sum1=0
                    sum2=0
                    for k in range(0,len(presion_obs)):
                        indice=nodos[presion_obsID[k]].index
                        sum1+=(presion_obs[k]-
round(es.ENgetnodevalue(indice,presiones)[1],2))**2
                        sum2+=(presion_obs[k]-media)**2
                    Nash=1-sum1/sum2
                    if Nash>Error_min:
                        Error_min=Nash
                        aux=j
                    print("VALVULA ID:",tuberias[i+1].id,"NASH=",round(Error_min,5),"Nueva
Consigna:",aux)
                    consigna_nuevo.append(aux)
                    r=(es.ENsetlinkvalue(i+1,consigna,aux))
                    f=os.path.join('parcial_modificada.inp')
                    es.ENsolveH();
return consigna_nuevo
remove('parcial_modificada.inp')
def demand(es,coeficiente,presion_obs,presion_obsID):
    demanda=Node.value_type['EN_BASEDEMAND']
    presiones=Node.value_type['EN_PRESSURE']
    #Llamar Nodos y tuberias
    nodos = es.network.nodes
    tuberias = es.network.links

```

```

presion_cal=[]
demanda_nuevo=[]
Error_min=-1
for i in range(0,len(nodos)):
    Error_min=-1
    if nodos[i+1].node_type==0:
        for j in range(0,len(coeficiente)):
            nuevo=es.ENgetnodevalue(i+1,demanda)[1]*coeficiente[j]
            r=(es.ENsetnodevalue(i+1,demanda,nuevo))
            f=os.path.join('parcial_modificada.inp')
            es.ENSolveH();
            for k in range(0,len(presion_obs)):
                for l in range(0,len(nodos)):
                    if nodos[l+1].node_type==0:
                        if presion_obsID[k]==nodos[l+1].id:
                            presion_cal.append(es.ENgetnodevalue(l+1,presiones)[
1])

            media = np.mean(presion_obs)
            sum1=0
            sum2=0
            for k in range(0,len(presion_obs)):
                indice=nodos[presion_obsID[k]].index
                sum1+=(presion_obs[k]-
round(es.ENgetnodevalue(indice,presiones)[1],2))**2
                sum2+=(presion_obs[k]-media)**2
            Nash=(1-sum1/sum2)
            if Nash>Error_min:
                Error_min=Nash
                aux=round(coeficiente[j]*es.ENgetnodevalue(i+1,demanda)[1],4)
            print("Nodo ID:",nodos[i+1].id,"NASH=",round(Error_min,5),"Nueva
Demanda:",aux)
            demanda_nuevo.append(aux)
            r=(es.ENsetnodevalue(i+1,demanda,aux))
            f=os.path.join('parcial_modificada.inp')
            es.ENSolveH();
        return demanda_nuevo
    remove('parcial_modificada.inp')

```

Anexo C: Presiones medidas en campo para calibración y validación.

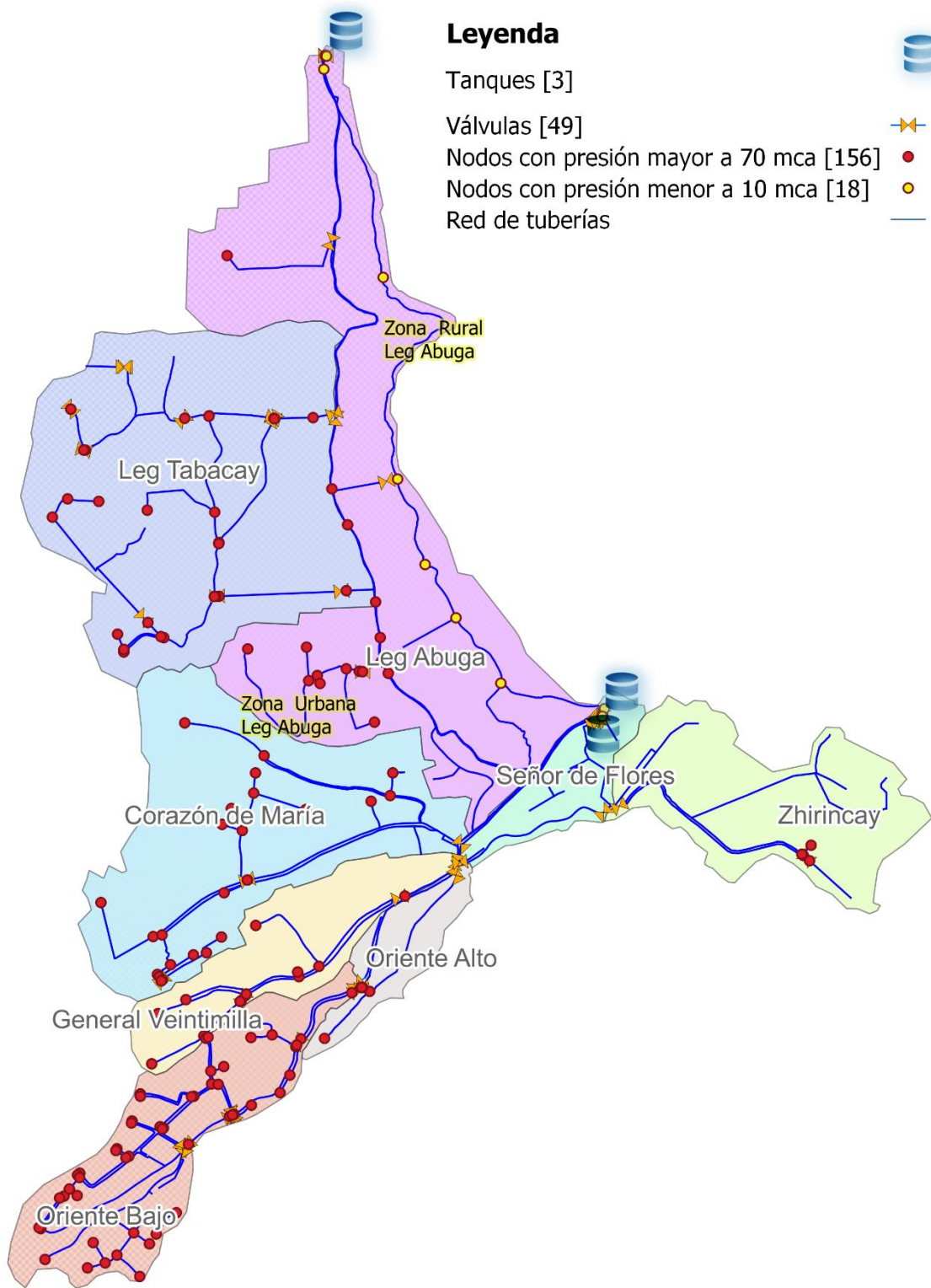
Calibración

| Nodo | Intervalo de medición | Presión (psi) | Presión (mca) | Sector |
|-------------|------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| J339 | 13:00 - 14:00 | 125.8 | 88.56 | Zhirincay |
| J179 | 14:00 - 15:00 | 55 | 38.72 | Señor de Flores |
| J60 | 10:00 - 11:00 | 15 | 10.56 | Leg Abuga |
| J61 | 10:00 - 11:00 | 70 | 49.28 | Leg Abuga |
| J21 | 10:00 - 11:00 | 110 | 77.44 | Leg Abuga |
| J92 | 11:00 - 12:00 | 60 | 42.24 | Leg Tabacay |
| J89 | 12:00 - 13:00 | 95 | 66.88 | Leg Tabacay |
| J143 | 11:00 - 12:00 | 144.9 | 102 | Corazón de María |
| J102 | 11:00 - 12:00 | 110 | 77.44 | Leg Tabacay |
| J85 | 11:00 - 12:00 | 110 | 77.44 | Leg Tabacay |
| J128 | 12:00 - 13:00 | 155 | 109.12 | Corazón de María |
| J28 | 12:00 - 13:00 | 130 | 91.52 | Leg Abuga |
| J30 | 12:00 - 13:00 | 75 | 52.8 | Leg Abuga |
| J11 | 13:00 - 14:00 | 65 | 45.76 | Leg Abuga |
| J6 | 13:00 - 14:00 | 10 | 7.04 | Leg Abuga |
| J166 | 09:00 - 11:00 | 14 | 9.856 | Leg Abuga |
| J169 | 13:00 - 14:00 | 25 | 17.6 | Señor de Flores |
| J325 | 13:00 - 14:00 | 85 | 59.84 | Zhirincay |
| J333 | 13:00 - 14:00 | 100 | 70.4 | Zhirincay |
| J211 | 14:00 - 15:00 | 80 | 56.32 | Oriente Alto |
| J247 | 14:00 - 15:00 | 95 | 66.88 | Oriente Bajo |
| J242 | 14:00 - 15:00 | 160.5 | 113 | Oriente Bajo |
| J218 | 14:00 - 15:00 | 97 | 68.288 | Oriente Bajo |
| J234 | 15:00 - 16:00 | 112.4 | 79.16 | Oriente Bajo |
| J294 | 15:00 - 16:00 | 115 | 80.96 | Oriente Bajo |
| J289 | 15:00 - 16:00 | 105 | 73.92 | Oriente Bajo |
| J141 | 11:00 - 12:00 | 114 | 80.256 | Corazón de María |
| J149 | 12:00 - 13:00 | 142 | 99.968 | Corazón de María |
| J312 | 11:00 - 12:00 | 119 | 83.776 | General Veintimilla |
| J322 | 11:00 - 12:00 | 128 | 90.112 | General Veintimilla |

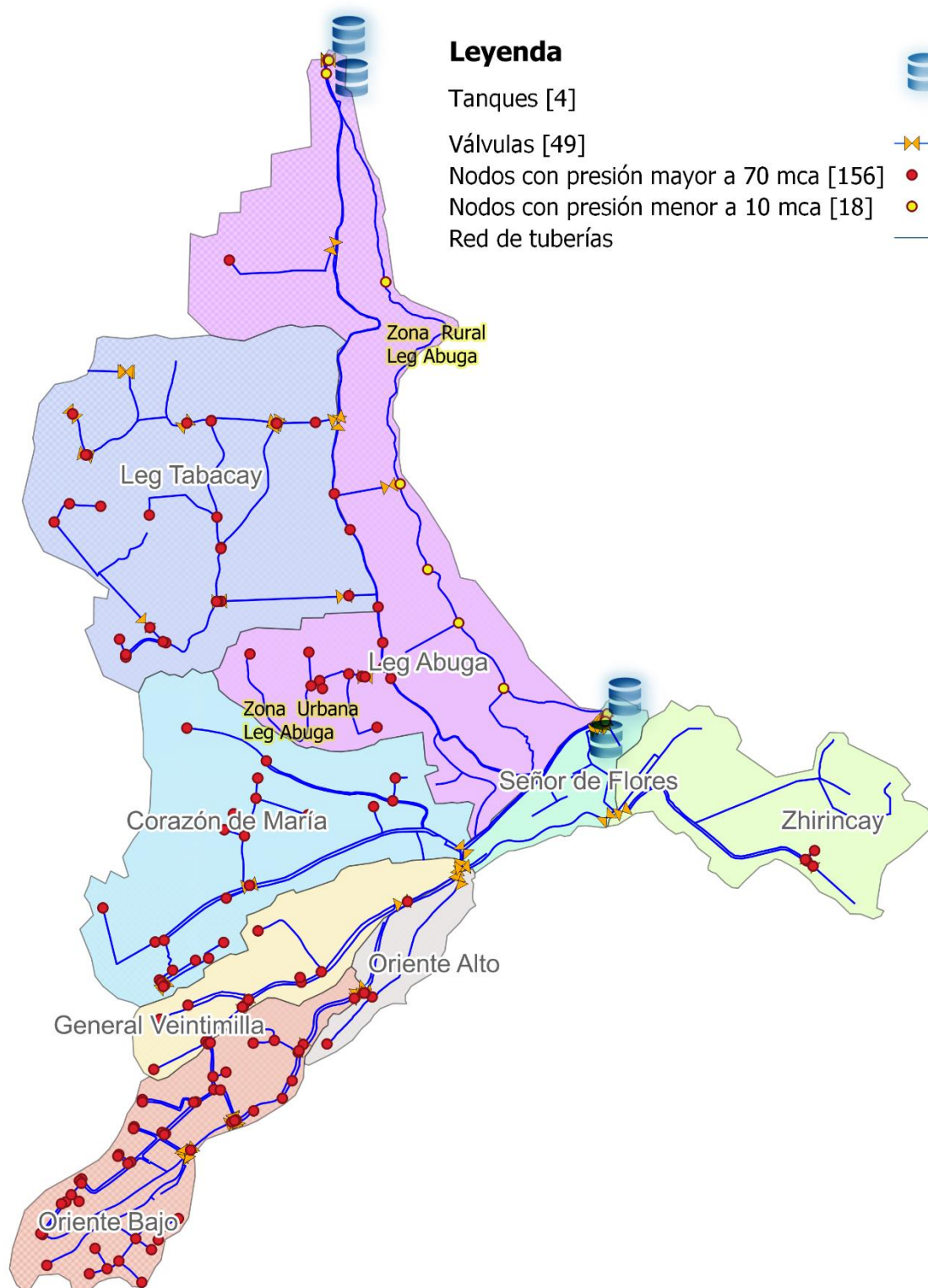
Validación

| Nodo | Intervalo de medición | Presión (psi) | Presión (mca) | Sector |
|-------------|------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| J110 | 11:00 - 12:00 | 95 | 66.88 | Leg Tabacay |
| J116 | 11:00 - 12:00 | 138.5 | 97.48 | Leg Tabacay |
| J119 | 12:00 - 13:00 | 145 | 102.08 | Leg Tabacay |
| J14 | 12:00 - 13:00 | 165 | 116.16 | Leg Abuga |
| J74 | 13:00 - 14:00 | 47 | 33.12 | Leg Abuga |
| J19 | 13:00 - 14:00 | 15 | 10.56 | Leg Abuga |
| J336 | 09:00 - 11:00 | 30 | 21.12 | Zhirincay |
| J188 | 13:00 - 14:00 | 60 | 42 | Señor de Flores |
| J326 | 13:00 - 14:00 | 110 | 77.44 | Zhirincay |
| J217 | 14:00 - 15:00 | 156 | 109.824 | Oriente Bajo |
| J261 | 15:00 - 16:00 | 105 | 73.92 | Oriente Bajo |
| J278 | 15:00 - 16:00 | 86 | 60.76 | Oriente Bajo |
| J286 | 15:00 - 16:00 | 103 | 72.2 | Oriente Bajo |
| J310 | 16:00 - 17:00 | 160 | 112.64 | General Veintimilla |
| J314 | 10:00 - 11:00 | 122 | 85.888 | General Veintimilla |
| J163 | 12:00 - 13:00 | 87 | 61.2 | Corazón de María |
| J145 | 13:00 - 14:00 | 135 | 95.04 | Corazón de María |

Anexo D: Mapa de nodos con presión fuera de los límites permisibles en la red sin el funcionamiento del nuevo tanque (01:00 pm).



Anexo E: Mapa de nodos con presión fuera de los límites permisibles en la red con el funcionamiento del nuevo tanque (01:00 pm).



Anexo F: Algoritmo de optimización y funciones.

Función para calcular el IRT.

```
def IRTp(pres,demanda,pmin,pmax):
    fila=len(pres)
    sum1=0
    sum2=0
    deman=[]
    for i in range (0, fila):
        if pres[i]<pmin:
            pres[i]=0
        if pmin<=pres[i]<=pmax:
            pres[i]=1
        if pmax<pres[i]<=100:
            pres[i]=1-(pres[i]-pmax)/(pmax-pmin)
        if pres[i]>100:
            pres[i]=0
    for i in range (0, fila):
        deman.append(demanda[i])
    for i in range (0, fila):
        sum1+=deman[i]*pres[i]
        sum2+=deman[i]
    return round((sum1/sum2)*100,5)
def IRTv(velocidad,caudal,vmin,vmax):
    fila=len(velocidad)
    vmean=(vmin+vmax)/2
    sum3=0
    sum4=0
    vel=[]
    cau=[]
    for i in range (0, fila):
        vel.append(velocidad[i])
    for i in range (0, len(vel)):
        if vel[i]<vmin:
            vel[i]=0
        if vmin<vel[i]<=vmean:
            vel[i]=(vel[i]-vmin)/(vmean-vmin)
        if vmean<vel[i]<=vmax:
            vel[i]=(vel[i]-vmax)/(vmean-vmax)
        if vel[i]>vmax:
            vel[i]=0
    for i in range (0, fila):
        cau.append(caudal[i])
    for i in range (0, fila):
        sum3+=cau[i]*vel[i]
        sum4+=cau[i]
    return round((sum3/sum4)*100,5)
```

Función de penalizaciones.

```

#importamos las librerias necesarias para el análisis
import numpy as np
import os
from epanettools.epanettools import Node, Link
from os import remove

def evaluate1(features,es,pmin,pmax,vmin,vmax,b,e):
    diametros=Link.value_type['EN_DIAMETER']
    longitudes=Link.value_type['EN_LENGTH']
    velocidades=Link.value_type['EN_VELOCITY']
    presiones=Node.value_type['EN_PRESSURE']
    cant_link=es.network.links #cantidad de tubos
    cant_node=es.network.nodes #cantidad de nodos
    VA=[]
    PEN1=[]
    PEN2=[]
    for id in range (len(cant_link)):
        r=(es.ENsetlinkvalue((id+1),diametros,features[id]))
        f=os.path.join('parcial_modificada.inp')
        a=((es.ENgetlinkvalue(id+1,longitudes)[1])*(b*(es.ENgetlinkvalue(id+1,dia
metros)[1])**e))
        VA.append(a)
    cost = np.sum(VA)
    es.ENsolveH();
    for id in range (1,len(cant_node)+1):
        if cant_node[id].node_type==0:
            if (es.ENgetnodevalue(id,presiones)[1]) < pmin:
                pen_pre = (pmin-(es.ENgetnodevalue(id,presiones)[1]))*100000000
            elif (es.ENgetnodevalue(id,presiones)[1]) > pmax:
                pen_pre = ((es.ENgetnodevalue(id,presiones)[1])-pmax)*100000000
            else:
                pen_pre = 0
            PEN1.append(pen_pre)
    PP=np.sum(PEN1)
    for id in range (1,len(cant_link)+1):
        if (es.ENgetlinkvalue(id,velocidades)[1]) < vmin:
            pen_vel = (vmin-(es.ENgetlinkvalue(id,velocidades)[1]))*100000000
        elif (es.ENgetlinkvalue(id,velocidades)[1]) > vmax:
            pen_vel = ((es.ENgetlinkvalue(id,velocidades)[1])-vmax)*100000000
        else:
            pen_vel = 0
        PEN2.append(pen_vel)
    PV=np.sum(PEN2)
    costo1=round(cost+PP+PV)
    return costo1
    remove('parcial_modificada.inp')

```

Función para la selección del diámetro óptimo.

```
#FUNCION SELECCIÓN DE DIAMETRO OPTIMO
#importamos las librerías necesarias para el análisis
import os
from epanettools.epanettools import Link
from os import remove
import EC_EVAL
def func(es,dims,inicio,fin,pmin,pmax,vmin,vmax,b,e):
    diametros=Link.value_type['EN_DIAMETER']
    #Llamar Nodos y tuberías
    tuberias = es.network.links
    dim_nuevo=[]
    tubos=[]
    for i in range (inicio-1,fin):
        tubos.append('P'+str(i+1))
    cont=0
    for i in range(inicio-1,fin):
        costo_min=10**120
        for j in range(0,len(dims)):
            r=(es.ENsetlinkvalue(tuberias[tubos[cont]].index,diametros,dims[j]))
            f=os.path.join('parcial_modificada.inp')
            es.ENSolveH();
            D=[]
            for id in range (len(tuberias)):
                a=es.ENgetlinkvalue(id+1,diametros)[1]
                D.append(a)
            costo=EC_EVAL.evaluate1(D,es,pmin,pmax,vmin,vmax,b,e)
            if costo<costo_min:
                costo_min=costo
                aux=dims[j]
            print("costo min:",round(costo_min,2),"Tubería
ID:",tuberias[tuberias[tubos[cont]].index].id,"Nueva DIM(aux):",aux)
            dim_nuevo.append(aux)
            r=(es.ENsetlinkvalue(tuberias[tubos[cont]].index,diametros,aux))
            f=os.path.join('parcial_modificada.inp')
            es.ENSolveH();
            cont+=1
    return dim_nuevo
remove('parcial_modificada.inp')
```

Código AI.

```
#Código AI
#importamos las librerías necesarias para el análisis
import pandas as pd
import numpy as np
import os
from matplotlib import pyplot as plt
from epanettools.epanettools import EPANetSimulation, Node, Link
from os import remove
import Optimizacion_presiones
import IRTfuntion
#Cargamos la red de Bayas
file='RED BAYAS.inp'
es= EPANetSimulation(file)
#DATOS DE ENTRADA
inicio=1
fin=100
pmin=10
pmax=70
vmin=0.3
vmax=2
b=0.0189 # Coeficientes a de la regresión potencial
e=1.3032 # Coeficientes b de la regresión potencial
dims=[25,32,40,50,63,110,160] #Diámetros comerciales
coef=1.37 # Coeficiente del patrón de demanda
#Características de la red
rugosidades = Link.value_type['EN_ROUGHNESS'] #PVC
longitudes=Link.value_type['EN_LENGTH']
diametros = Link.value_type['EN_DIAMETER'] #mm
elevaciones = Node.value_type['EN_ELEVATION'] #m
presion = Node.value_type['EN_PRESSURE']
demanda=Node.value_type['EN_DEMAND']
dem=Node.value_type['EN_BASEDEMAND']
velocidades=Link.value_type['EN_VELOCITY']
caudales=Link.value_type['EN_FLOW']
#Llamar Nodos y tuberías
nodos = es.network.nodes
tuberias = es.network.links
#Run Epanet
for i in range(0,len(nodos)):
    if nodos[i+1].node_type==0:
        r=es.ENsetnodevalue(nodos[i+1].index,dem,(coef)*(es.ENgetnodevalue(i+1,
dem)[1]))
f=os.path.join('MAXIMAHORA.inp')
es.ENsaveinpfile(f)
es0=EPANetSimulation(f)
es0.run()
```

```

tubos=[]
for i in range (inicio-1,fin):
    tubos.append('T'+str(i+1))
print("Presiones antes de la optimizacion")
for l in range(0,len(nodos)):
    if nodos[l+1].node_type==0:
        print(nodos[l+1].id,":",round(es0.network.nodos[l+1].results[presion][0],
2),"mca")
presion_cal1=[]
demanda_cal1=[]
vel_cal1=[]
caudal_cal1=[]
VA=[]
D=[]
for l in range(0,len(nodos)):
    if nodos[l+1].node_type==0:
        presion_cal1.append(round(es0.network.nodos[l+1].results[presion][0],2))
        demanda_cal1.append(round(es0.network.nodos[l+1].results[demanda][0],2))
IRT1=IRTfuntion.IRTp(presion_cal1,demanda_cal1,pmin,pmax)
for l in range(0,len(tuberias)):
    if tuberias[l+1].link_type==1:
        vel_cal1.append(round(es0.network.links[l+1].results[velocidades][0],2))
        caudal_cal1.append(round(es0.network.links[l+1].results[caudales][0],2))
IRT1v=IRTfuntion.IRTv(vel_cal1,caudal_cal1,vmin,vmax)
for id in range (1,len(tuberias)+1):
    D.append(es0.ENgetlinkvalue(id,diametros)[1])
    a=round((es0.ENgetlinkvalue(id,longitudes)[1])*(b*(es0.ENgetlinkvalue(id,dia
metros)[1])**e),2)
    VA.append(a)
salida=round(np.sum(VA),2)
# Resultados Iniciales
cont=0
D=[]
VA=[]
for i in range(inicio-1,fin):
    D.append(es0.ENgetlinkvalue(tuberias[tubos[cont]].index,diametros)[1])
    a=round((es0.ENgetlinkvalue(tuberias[tubos[cont]].index,longitudes)[1])*(b*(
es0.ENgetlinkvalue(tuberias[tubos[cont]].index,diametros)[1])**e),2)
    VA.append(a)
    cont+=1
tabla_d= pd.DataFrame(np.array(D).reshape(len(tubos),1), columns = ['Diametro
Inicial'])
tabla_va= pd.DataFrame(np.array(VA).reshape(len(tubos),1), columns = ['Valor
inicial'])
nuevo_dims=Optimizacion_presiones.func(es0,dims,inicio,fin,pmin,pmax,vmin,vmax
,b,e)

```

```

result=[]
cont=0
for id in range (inicio-1,fin):
    r=es0.ENsetlinkvalue(tuberias[tubos[cont]].index,diametros,nuevo_dims[cont
])
    cont+=1
f=os.path.join('OptimizacionP.inp')
es0.ENsaveinpfile(f)
es2=EPANetSimulation(f)
es2.run()
print("Best dims:")
print(nuevo_dims)
print("Presiones despues de la optimizacion")
neg=0
for l in range(0,len(nodos)):
    if nodos[l+1].node_type==0:
        print(nodos[l+1].id,":",round(es2.network.nodes[l+1].results[presion][0],
2),"mca")
        if es2.network.nodes[l+1].results[presion][0]<0:
            neg=1
presion_cal2=[]
demanda_cal2=[]
vel_cal2=[]
caudal_cal2=[]
VA2=[]
for l in range(0,len(nodos)):
    if nodos[l+1].node_type==0:
        presion_cal2.append(es2.network.nodes[l+1].results[presion][0])
        demanda_cal2.append(es2.network.nodes[l+1].results[demanda][0])
IRT2=IRTfuntion.IRTp(presion_cal2,demanda_cal2,pmin,pmax)
for l in range(0,len(tuberias)):
    if tuberias[l+1].link_type==1:
        vel_cal2.append(round(es2.network.links[l+1].results[velocidades][0],2))
        caudal_cal2.append(round(es2.network.links[l+1].results[caudales][0],2))
IRT2v=IRTfuntion.IRTv(vel_cal2,caudal_cal2,vmin,vmax)
for id in range (1,len(tuberias)+1):
    a=((es2.ENgetlinkvalue(id,longitudes)[1])*(b*(es2.ENgetlinkvalue(id,diametro
s)[1])**e))
    VA2.append(a)
salida2=round(np.sum(VA2),2)
#Comparar las presiones
p1=[]
p2=[]
ID=[]
for l in range(0,len(nodos)):
    if nodos[l+1].node_type==0:

```

```

    if abs(round(es2.network.nodes[l+1].results[presion][0],2)-
round(es0.network.nodes[l+1].results[presion][0],2))>0.1:
        p1.append(round(es0.network.nodes[l+1].results[presion][0],2))
        p2.append(round(es2.network.nodes[l+1].results[presion][0],2))
        ID.append(nodos[l+1].id)
print(" ")
print("")
print("=====ANALISIS=====")
print("IRTp antes de optimizar",IRT1)
print("IRTv antes de optimizar",IRT1v)
print("Costo antes de optimizar",salida)
print(" ")
print("IRTp OPTIMIZADO",IRT2)
print("IRTv OPTIMIZADO",IRT2v)
print("Costo OPTIMIZADO",salida2)
if neg==0:
    print("No existen presiones negativos")
else:
    print("Existen presiones negativos")
print(" ")
porcentaje=(((salida-salida2)/salida)*100)
print(' ')
print("El costo se redujo en: ", "%.2f" %porcentaje, "%")
Q2=[] #caudal transportado
V2=[] #velocidad del flujo
VA2=[] #valor
P2=[] #Presiones
D_new=[]
L=[]# Longitud
cont=0
for id in range (inicio-1,fin):
    D_new.append(es2.ENgetlinkvalue(tuberias[tubos[cont]].index,diametros)[1
])
    L.append(es2.network.links[tuberias[tubos[cont]].index].results[longitud
es][0])
    Q2.append(es2.network.links[tuberias[tubos[cont]].index].results[caudales
s][0])
    V2.append(es2.network.links[tuberias[tubos[cont]].index].results[velocid
ades][0])
    a2=round((es2.ENgetlinkvalue(tuberias[tubos[cont]].index,longitudes)[1])
*(b*(es2.ENgetlinkvalue(tuberias[tubos[cont]].index,diametros)[1])**e),2)
    VA2.append(a2)
    cont+=1
# Resultados Nuevos
tabla_id_tuberia=pd.DataFrame(np.array(tubos).reshape(len(tubos),1),columns=
['Id'])

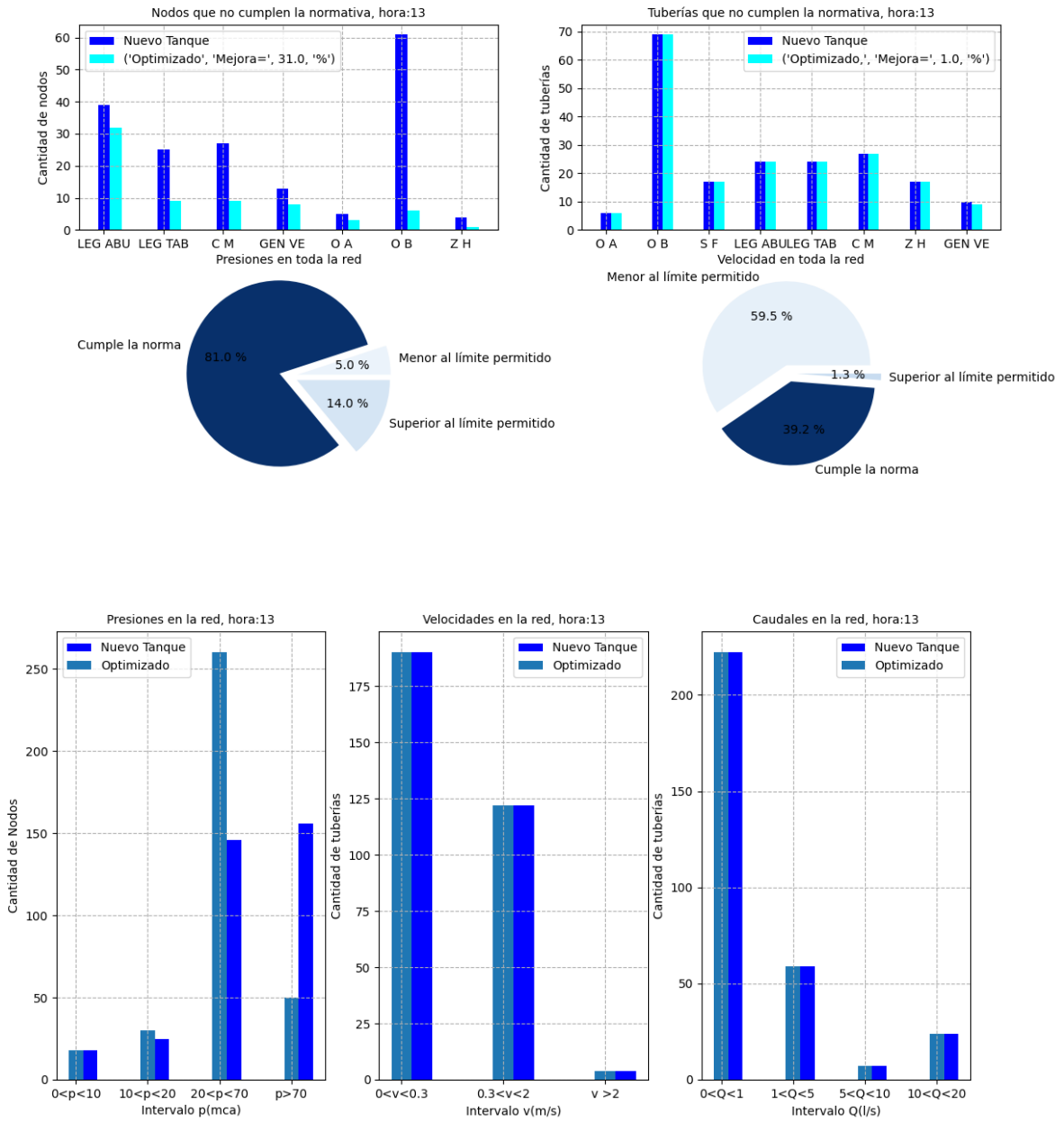
```

```

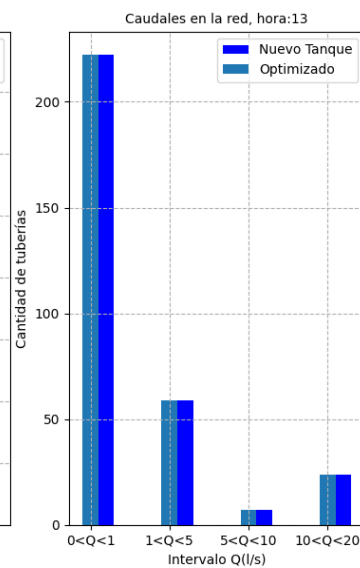
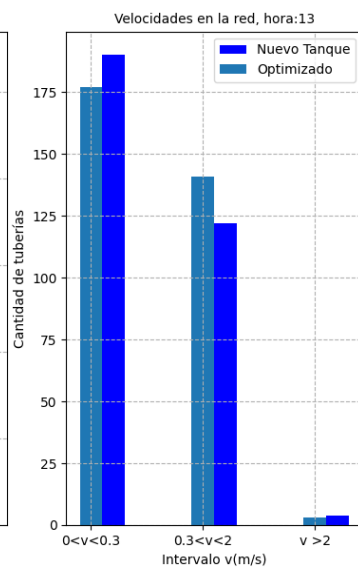
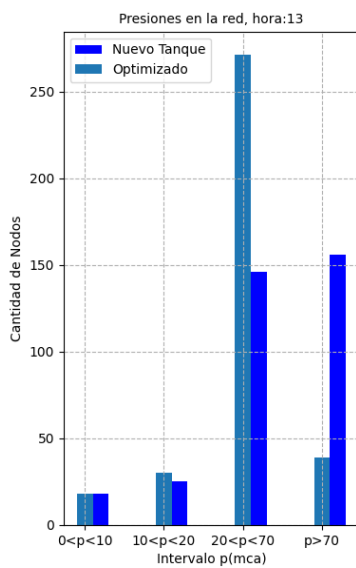
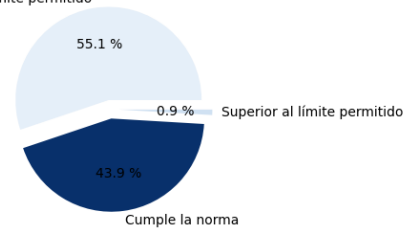
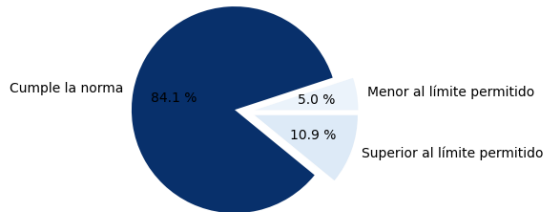
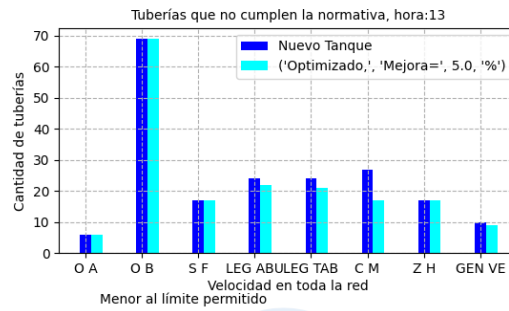
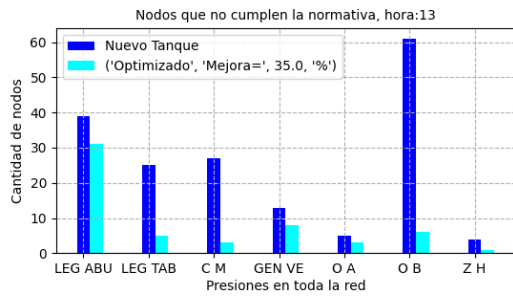
tabla_l= pd.DataFrame(np.array(L).reshape(len(tubos),1), columns =
['Longitud(m)'])
tabla_d_new= pd.DataFrame(np.array(D_new).reshape(len(tubos),1), columns =
['Diametro nuevo'])
tabla_va2= pd.DataFrame(np.array(VA2).reshape(len(tubos),1), columns = ['Valor
modificado'])
tabla_diametros=pd.concat([tabla_id_tuberia,tabla_l, tabla_d,
tabla_d_new],axis=1).ffill() #concatenar
tabla_costos=pd.concat([tabla_id_tuberia, tabla_va, tabla_va2],axis=1).ffill()
#concatenar
print('')
print(tabla_diametros)
print('')
print(tabla_costos)
#GRAFICAS
plt.grid(0.2,linestyle="--",linewidth=0.8)
plt.plot(ID,p1,marker ="o",color='RED',label='Sin Optimizar')
plt.plot(ID,p2,marker ="o",color='green',label='Optimizado')
plt.title("Gráfica de presiones AI")
plt.xlabel("Nudos ID")
plt.ylabel("Presión (mca)")
plt.legend()
plt.show()
ejex=np.arange(0,len(ID))
plt.grid(0.2,linestyle="--",linewidth=0.8)
plt.bar(ID,p1,color='red',width=0.2,label='Sin Optimizar')
plt.bar(ejex+0.2,p2,color='GREEN',width=0.2,label='Optimizado')
plt.title("Gráfica de presiones AI")
plt.xlabel("Nudos ID")
plt.ylabel("Presión(mca)")
plt.legend()
plt.show()
for i in range(0,len(nodos)):
    if nodos[i+1].node_type==0:
        r=es2.ENsetnodevalue(nodos[i+1].index,dem,(1/coef)*(es2.ENgetnodevalue(
i+1,dem)[1]))
f=os.path.join('RED BAYAS OPTIMIZADO.inp')#Guarda la red con nuevos diámetros
y demandas en la hora cero
es2.ENsaveinpfile(f)
es3=EPANetSimulation(f)
es3.run()

```

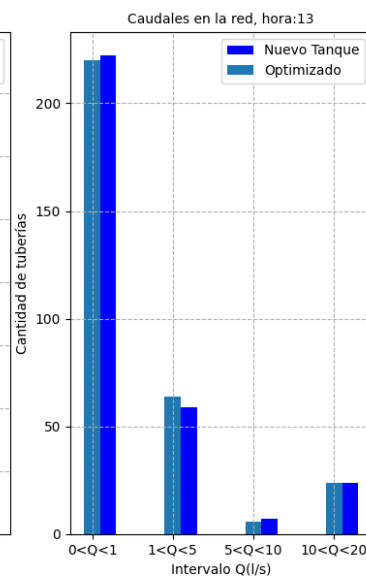
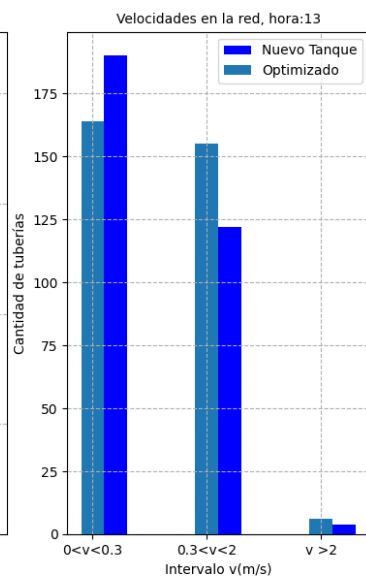
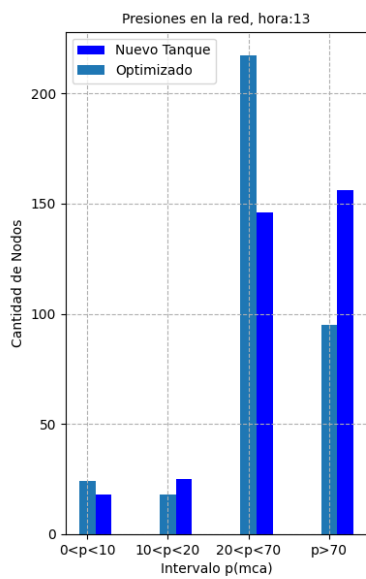
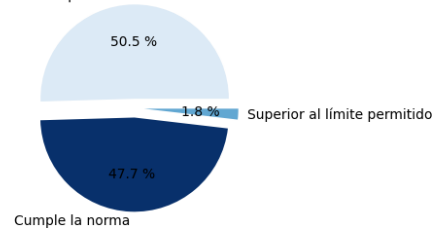
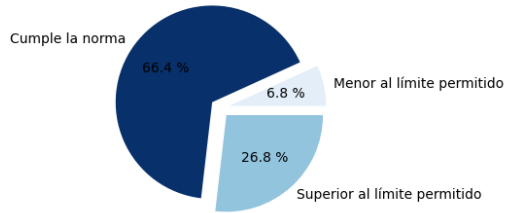
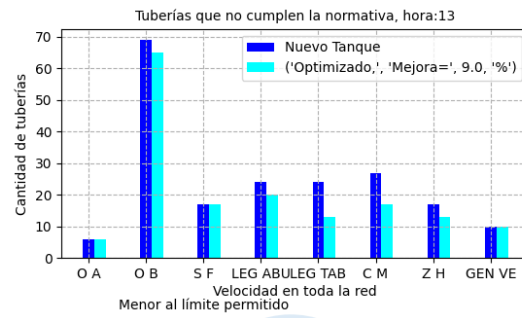
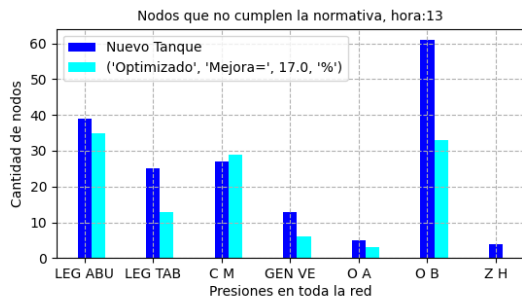

Anexo G: Presiones y velocidades con la primera propuesta a la 01:00 pm.



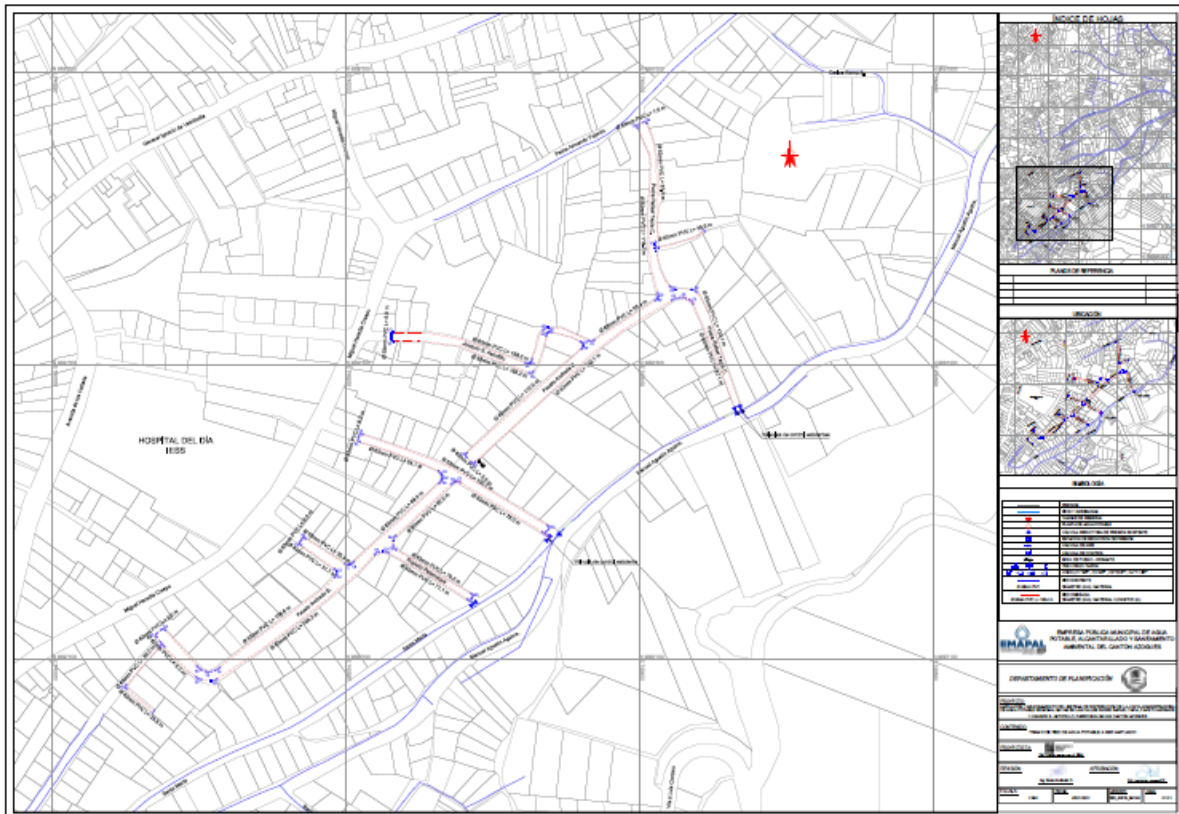
Anexo H: Presiones y velocidades con la segunda propuesta a las 01:00 pm.



Anexo I: Presiones y velocidades con la tercera propuesta a las 01:00 pm.



Anexo J: Plano de las modificaciones realizadas en el sector Oriente Bajo por EMAPAL EP.



Anexo K: Campaña de medición de presiones.



