

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	Documento F-AC-DBL-007	Código 30-09-2024	Fecha C
	Dependencia DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	Aprobado SUBDIRECTOR ACADEMICO	Pág. 1(1)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTOR	Melanie Lisela Pacheco Sánchez		
FACULTAD	Facultad de Ingeniería		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Civil		
DIRECTOR	Dibrey Paola Quintero Criado		
CODIRECTOR (si aplica)	No aplica		
TÍTULO DE LA TESIS	Evaluación hidráulica del sistema de acueducto del casco urbano del municipio de El Tarra, Norte de Santander, mediante la modelación con Epanet y Qgis para la optimización operativa de la distribución de agua potable		
TITULO EN INGLES	Hydraulic evaluation of the aqueduct system of the urban center of the municipality of El Tarra, Norte de Santander, through modeling with Epanet and Qgis for the operational optimization of the distribution of drinking water		
RESUMEN (70 palabras)			
La modelación hidráulica de sistemas de acueducto es fundamental para garantizar una distribución eficiente y continua del agua potable. En esta investigación se evaluó el sistema de distribución del casco urbano del municipio de El Tarra, Norte de Santander, mediante la integración de Qgis y Epanet, permitiendo analizar su comportamiento hidráulico y plantear alternativas de optimización orientadas a mejorar la operación de la red y la prestación del servicio.			
RESUMEN EN INGLES			
Hydraulic modeling of water supply systems is fundamental to ensuring the efficient and continuous distribution of drinking water. This research evaluated the distribution system of the urban area of the municipality of El Tarra, Norte de Santander, through the integration of QGIS and EPANET, allowing for the analysis of its hydraulic behavior and the proposal of optimization alternatives aimed at improving network operation and service delivery.			
PALABRAS CLAVES	Acueducto, Modelación hidráulica, Epanet, Qgis, Optimización.		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Aqueduct, Hydraulic modeling, Epanet, Qgis, Optimization.		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 109	PLANOS:	ILUSTRACIONES:22	CD-ROM:1

Evaluación hidráulica del sistema de acueducto del casco urbano del municipio de El Tarra, Norte de Santander, mediante la modelación con Epanet y Qgis para la optimización operativa de la distribución de agua potable

Melanie Lisela Pacheco Sánchez

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería Civil

director: Ing. Dibrey Paola Quintero Criado

22 agosto del 2026

Dedicatoria

A Dios, por ser mi fortaleza y guiar cada uno de mis pasos, brindarme la sabiduría, la paciencia y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa de mi vida.

A mis padres, porque detrás de cada paso que he dado han estado su amor, su apoyo incondicional y los sacrificios que hicieron para brindarme la oportunidad de construir mi futuro. Todo lo que soy y lo que hoy alcanzo lleva una parte de ustedes.

A mi familia, por acompañarme con palabras de aliento, comprensión y cariño durante este proceso, convirtiéndose en un pilar fundamental para seguir adelante.

Finalmente, me dedico este logro a mí misma, por no rendirme en los momentos de incertidumbre, por confiar en mis capacidades y por demostrarme que cada esfuerzo vale la pena cuando se persigue un sueño con determinación.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida, por brindarme fortaleza en los momentos de dificultad y por guiarme durante este camino de formación profesional.

A mis padres y a mi familia, por ser mi principal apoyo durante este proceso. Gracias por impulsarme a seguir adelante y por ser parte fundamental de este logro.

A la Universidad Francisco de Paula Santander y a los docentes que hicieron parte de mi proceso de formación, por compartir sus conocimientos y contribuir a mi crecimiento académico y profesional. De manera especial, agradezco a mi director de tesis por su orientación, disposición y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra forma, contribuyeron con sus consejos, apoyo y motivación para hacer posible la culminación de esta etapa académica.

Contenido

1	Evaluación hidráulica del sistema de acueducto del casco urbano del municipio de El Tarra, Norte de Santander, mediante la modelación con EPANET y QGIS para la optimización operativa de la distribución de agua potable.....	10
1.1	Planteamiento del problema.....	10
1.2	Formulación del problema.	12
1.3	Objetivos.....	12
1.3.1	General.....	12
1.3.2	Específicos.	12
1.4	Justificación	13
1.5	Delimitaciones.	14
1.5.1	Operativa.....	14
1.5.2	Conceptual.	15
1.5.3	Geográfica.....	15
1.5.4	Temporal.	16
2.	Marco referencial.....	16
2.1	Marco histórico.	16
2.1.1	Antecedentes.....	16
2.2	Marco contextual.	18
2.3	Marco conceptual.....	20
2.3.1	Modelación Hidráulica.....	20
2.3.2	EPANET	20
2.3.3	QGIS	21

2.3.4 Integración de EPANET y QGIS	21
2.3.5 Sistema de Distribución de Agua Potable.....	21
2.3.6 Pérdidas de Agua:	22
2.3.7 Continuidad del servicio.	22
2.3.8 Sostenibilidad y Optimización del Servicio.....	22
2.4 Marco teórico.	23
2.5 Marco legal	25
3. Diseño metodológico.	26
3.1 Tipo de investigación.....	26
3.2 Seguimiento metodológico del proyecto.	28
3.3 Población.....	29
3.4 Muestra.	30
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de información.	31
3.6 Análisis de información.	31
4. Resultados	33
4.1 Diagnóstico de población.....	33
4.2 Periodo de diseño.....	34
4.3 Población flotante	35
4.4 Comparativo de métodos	36
4.5 Población densidad de saturación	38
4.6 Estimación población de diseño.....	40
4.7 Diagnóstico de caudales.....	41
4.7.1 Dotación neta	41

4.7.2	Porcentaje de Pérdidas	42
4.7.3	Dotación Bruta	42
4.7.4	Caudal Medio Diario (qmd).....	43
4.7.5	Caudal Máximo Diario (QMD)	44
4.7.6	Caudal Máximo Horario (QMH)	44
4.8	Modelación hidráulica de la red de distribución.....	45
4.8.1	Construcción del modelo en QGIS	45
4.8.2	Asignación de parámetros hidráulicos	46
4.8.3	Modelo hidráulico en EPANET	48
4.9	Patrón de consumo	49
4.10	Presiones en la red de distribución.....	52
4.11	Análisis de escenarios hidráulicos	53
4.11.1	Modelación de la red en condición actual.....	53
4.11.2	Simulación Epanet tiempo cero	55
4.11.3	Análisis bajo patrón de consumo	57
4.11.4	Alternativa de solución	59
4.11.5	Resultados de la red actual optimizada	64
4.11.6	Análisis de la red actual optimizada	68
4.11.7	Consideraciones para la optimización del escenario	69
4.12	Propuesta de red optimizada para operación continua 24/7.....	70
4.12.1	Alternativa de solución para la red optimizada 24/7	70
4.12.2	Análisis de resultados de la propuesta de red optimizada 24/7	81
4.12.3	Consideraciones de la propuesta de red optimizada 24/7	82

4.13	Análisis del balance de caudales y del patrón de consumo	82
4.14	Modelación hidráulica con población futura proyectada al año 2051	84
4.15	Evaluación del escenario red futura con la propuesta de optimización 24/7	86
4.15.1	Resultados con la propuesta de optimización 24/7	86
4.16	Escenario de optimización de la red futura.....	88
4.16.1	Alternativa de solución de optimización de la red futura	88
4.16.2	Resultados de optimización de la red futura	89
4.16.3	Consideraciones para la optimización de la red futura	98
5	Conclusiones	99
6	Recomendaciones	101
7	Referencias.....	103
8	Apéndices.....	109

Lista de figuras

Figura 1 Proyección Población Método Aritmético	36
Figura 2 Proyección Población Método Geométrico.....	37
Figura 3 Proyección Población Método Exponencial.....	37
Figura 4 Proyección Población Métodos Matemáticos	38
Figura 5 Áreas mínimas de lote	39
Figura 6 Modelo en QGIS.....	48
Figura 7 Patron de consumo	51
Figura 8 Plano de catastro de la red de distribución existente.....	54
Figura 9 Modelación EPANET tiempo cero	56
Figura 10 Análisis en EPANET con Patron de Consumo.....	58
Figura 11 Delimitación del sistema de distribución	60
Figura 12 Resultados de la modelación hidráulica de la red optimizada.....	64
Figura 13 Grafica de presiones máximas y mínimas	69
Figura 14 Red optimizada en funcionamiento continuo 24/7	71
Figura 15 Gráfica de presiones máximas y mínimas	80
Figura 16 Gráfica de balance de caudales.....	83
Figura 17 Patron de consumo EPANET	83
Figura 18 Modelación EPANET tiempo cero.....	85
Figura 19 Modelación EPANET con patrón de consumo	85
Figura 20 Modelación de la red futura con la propuesta de optimización actual 24/7	87
Figura 21 Resultados de la modelación hidráulica de la red futura.....	89
Figura 22 Gráfica de presiones máximas y mínimas	96

Lista de tablas

Tabla 1 Normatividad Colombiana Relacionada.....	25
Tabla 2 Modelo metodológico.....	28
Tabla 3 Población total de la cabecera municipal censada	33
Tabla 4 Población de diseño	34
Tabla 5 Dotación Neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida.....	42
Tabla 6 Diámetros nominales comerciales considerados en la modelación hidráulica	47
Tabla 7 Patrón de consumo promedio en 24 horas	50
Tabla 8 Nodos con presión negativa en la simulación en tiempo cero	55
Tabla 9 Válvulas TCV propuestas para el sistema de distribución	61
Tabla 10 Modificación de diámetros en tuberías	61
Tabla 11 Sectores con presiones negativas	65
Tabla 12 Rango de presión durante el periodo de mayor demanda.....	66
Tabla 13 Comportamiento hidráulico de la modelación.....	67
Tabla 14 Resultados hidráulicos de la red optimizada 24/7 en horas pico	72
Tabla 15 Nodos críticos con presiones bajas durante el periodo de mayor demanda.....	90
Tabla 16 Sectores con presiones negativas durante el periodo de simulación	97

1 Evaluación hidráulica del sistema de acueducto del casco urbano del municipio de El Tarra, Norte de Santander, mediante la modelación con EPANET y QGIS para la optimización operativa de la distribución de agua potable

1.1 Planteamiento del problema

A nivel mundial, gestionar sosteniblemente el agua potable continúa siendo un reto complejo para los diferentes actores responsables de garantizar este suministro. Según la ONU (2022), alrededor de una de cada cuatro personas no dispone de acceso seguro a este preciado líquido. A esta situación se le adiciona el cumplimiento de la vida útil de la infraestructura y la mala gestión operativa de las pérdidas en los sistemas de abastecimiento. Estas pérdidas técnicas, relacionadas con el Índice de Agua No Contabilizada (IANC), además de generar riesgos en la sostenibilidad ambiental, provocan impactos económicos significativos para los prestadores de servicios (Banco Mundial, 2019). Este escenario general valida la importancia de integrar herramientas y metodologías sistemáticas que permitan evaluar, operar, mantener y proponer optimizaciones en los sistemas de acueducto, con el objetivo de garantizar la calidad, continuidad y cobertura del suministro de agua potable (UNESCO, 2023).

Según el informe de rendición de cuentas (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2023), gran parte de la población en Colombia no cuenta con acceso adecuado a agua potable, lo que refleja que la cobertura del servicio sigue siendo deficiente. De esta manera, la falta de herramientas técnicas, como la modelación hidráulica, hace más difícil que las empresas de

servicios identifiquen y solucionen problemas comunes, como la baja presión, las fugas y las interrupciones en el servicio. Del mismo modo, aunque hay normativas para guiar estas labores, su aplicación es aún limitada, lo que representa un desafío para garantizar la sostenibilidad del sector.

Por otra parte, en el departamento de Norte de Santander, la Gobernación de Norte de Santander (2022) señala que existen problemas operativos en la prestación del servicio de acueducto. Entre los problemas más comunes se encuentran la baja presión y la intermitencia, que afectan a varios municipios de la región (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2024). En el casco urbano del municipio de El Tarra, la empresa de servicios públicos (ESPTA) también presenta algunas limitaciones operativas relacionadas con deficiencias en el comportamiento hidráulico de la red de distribución, especialmente por la presencia de bajas presiones en ciertos puntos estratégicos de la red. Aunque estas situaciones persisten, todavía no se han incorporado herramientas de modelación hidráulica integradas como EPANET y QGIS, las cuales permiten realizar un diagnóstico más preciso del comportamiento del sistema. La capacidad de la ESPTA para organizar y gestionar de manera adecuada la distribución de agua potable está limitada por la falta de recursos técnicos, lo que dificulta el reconocimiento de los puntos críticos y el desarrollo de estrategias de optimización basadas en datos, afectando la calidad del servicio ofrecido a la comunidad (Alcaldía Municipal de El Tarra, 2024b).

1.2 Formulación del problema

¿Qué mejoras se podrían plantear para la red de distribución del sistema de acueducto en el casco urbano del municipio de El Tarra, Norte de Santander, a partir de la identificación de deficiencias operativas que orienten estrategias enfocadas en optimizar el rendimiento hidráulico y la calidad en la prestación del servicio de agua potable?

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Evaluar el comportamiento hidráulico del sistema de acueducto del casco urbano del municipio de El Tarra, Norte de Santander, mediante la modelación integrada con EPANET y QGIS, para optimizar la distribución de agua potable.

1.3.2 Específicos

- Diagnosticar el sistema de acueducto de El Tarra mediante el análisis de información técnica y geoespacial de la empresa ESPTA, para consolidar una base de datos que sustente la modelación hidráulica.
- Modelar hidráulicamente la red de distribución del sistema de acueducto mediante la integración de EPANET y QGIS, para evaluar el comportamiento hidráulico del sistema.

- Proponer estrategias de optimización en la red de distribución de agua potable, basándose en el análisis de los resultados de la modelación hidráulica, con el fin de identificar y mitigar problemáticas relacionadas al sistema.

1.4 Justificación

El acceso al agua potable es un derecho humano esencial y un pilar clave para garantizar el bienestar social y el desarrollo sostenible de las regiones (Naciones Unidas, 2010). A pesar de esto, en América Latina los sistemas de acueductos aún presentan dificultades estructurales, como la antigüedad de las redes de acueducto, la falta de inversión en tecnología moderna y las altas pérdidas de agua que afectan la eficiencia y la continuidad del servicio (Banco Mundial, 2019). Por lo tanto, es fundamental avanzar en la implementación de herramientas de modelación hidráulica y geoespacial que ayuden a reducir los niveles de agua no contabilizada y promuevan una gestión más sostenible en los sistemas de distribución (UNESCO, 2023).

En Colombia, muchas personas todavía carecen de acceso confiable al agua potable. De esta manera, se pone en evidencia que no solo hay limitaciones en la cobertura del servicio, sino que además se presentan problemas de funcionamiento en los sistemas de acueductos (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2023). A estas dificultades se suma que gran parte de los prestadores del servicio reportan niveles de agua no contabilizada superiores al 30%, un valor que compromete tanto la sostenibilidad financiera como la viabilidad técnica de la operación

(CRA, 2025). Esto se complica aún más por la ausencia de diagnósticos apoyados en herramientas de modelación hidráulica, las cuales podrían ayudar a identificar fallas estructurales y orientar estrategias de optimización más efectivas (Banco Mundial, 2019).

En el municipio de El Tarra, los diagnósticos más recientes muestran que la red de acueducto presenta limitaciones operativas que dificultan una gestión más eficiente (Alcaldía Municipal de El Tarra, 2024b). Sin embargo, no se ha realizado una evaluación de la red que integre la modelación hidráulica con el análisis geoespacial. Por lo tanto, estas herramientas ayudan a entender el funcionamiento de la red y a plantear acciones para que el servicio sea más eficiente (UNESCO, 2023). Al no contar con este tipo de herramientas, se enfrenta una dificultad importante, lo que evidencia la necesidad de fortalecer el trabajo investigativo. De este modo, se podrán atender mejor las necesidades locales y aportar información que también sea útil en lugares con problemáticas similares (SSPD, 2023).

1.5 Delimitaciones

1.5.1 Operativa

Para el desarrollo de esta investigación, se evaluó el funcionamiento del sistema de distribución de agua potable en el casco urbano del municipio de El Tarra, Norte de Santander. Para ello, se reunió información técnica y geográfica disponible, con el fin de elaborar una base de datos confiable con apoyo de herramientas como EPANET y QGIS, lo que permitió analizar aspectos como la presión del agua, los caudales y la continuidad del servicio. A partir de estos

resultados, se plantearon estrategias orientadas a identificar los puntos más críticos de la red y optimizar el funcionamiento del sistema. Cabe señalar que el desarrollo de la investigación estuvo condicionado por la disponibilidad de información técnica proporcionada por la empresa; sin embargo, la autorización para utilizar la información existente permitió llevar a cabo la modelación hidráulica y cumplir con los objetivos planteados.

1.5.2 Conceptual

Para llevar a cabo esta investigación, se tomaron en cuenta los principios básicos de hidráulica y la modelación de redes de distribución, junto con el uso de herramientas como EPANET y QGIS. Además, se consideraron los procesos de operación, los problemas identificados en la prestación del servicio y la información técnica disponible del sistema, que sirvió como base para diagnosticar y evaluar el sistema. Es importante mencionar que el estudio no abarcó aspectos relacionados con la potabilización del agua, la gestión financiera de la entidad prestadora ni el diseño estructural de la infraestructura, ya que su enfoque se centra en la evaluación técnica y en la formulación de estrategias para optimizar la red de distribución.

1.5.3 Geográfica

La investigación se desarrolló en el sistema de distribución de agua potable del casco urbano del municipio de El Tarra, Norte de Santander, el cual es administrado por la Empresa de Servicios Públicos de El Tarra (ESPTA). El área de estudio corresponde a la zona urbana

atendida por el sistema de acueducto, con un área de cobertura hidráulica de 178.13 ha y una población beneficiada estimada de 14.640 habitantes.

1.5.4 Temporal

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se estableció un plazo comprendido entre enero y julio de 2026. Durante este periodo se adelantaron las actividades definidas en el cronograma, con el propósito de cumplir de manera organizada los objetivos propuestos.

2. Marco referencial

2.1 Marco histórico

2.1.1 Antecedentes

El ser humano a lo largo de su historia se ha visto en la necesidad de buscar la manera de adquirir agua y cuando estas fuentes naturales no se encontraban cerca, era necesario ingeniárselas para transportarla hacia sus comunidades. Fue así como civilizaciones como la mesopotámica y la romana construyeron acueductos para garantizar el abastecimiento de la población (De Feo et al., 2013; Deming, 2019). En la ingeniería hidráulica, durante la Edad Media y el Renacimiento, se registraron avances que sentaron las bases de los sistemas modernos de distribución, mientras que con la Revolución Industrial se amplió la cobertura a las crecientes

ciudades europeas y americanas (Crapper et al., 2022). Ya en el siglo XX, los sistemas de acueducto alcanzaron un crecimiento a nivel urbano con la necesidad de garantizar condiciones básicas de salubridad. Asimismo, durante este periodo la Organización Mundial de la Salud empezó a incluir el agua potable dentro de las políticas globales de salud y desarrollo, consolidando el acceso al agua como un derecho humano esencial (ONU, 2010).

En el contexto nacional, el agua potable en Colombia refleja un proceso de transformación tanto por el crecimiento de las ciudades como por las políticas públicas que han buscado garantizar este servicio básico. Durante gran parte del siglo XX, los esfuerzos se concentraron en ampliar la cobertura en las principales cabeceras municipales, mientras que las zonas rurales quedaron atrasadas en inversión y calidad del servicio (DNP, 2014). Con la promulgación de la Ley 142 de 1994, el sector de agua potable y saneamiento recibió un marco legal que permitió organizar la prestación del servicio y fortalecer la planeación en los territorios (Congreso de la República de Colombia, 1994). En estos últimos años, los Planes Departamentales de Agua y las estrategias del Plan Nacional de Desarrollo han priorizado los esfuerzos para reducir la brecha de cobertura, continuidad y calidad, buscando que el acceso no solo sea más amplio, sino más equitativo (Departamento Nacional de Planeación, 2020).

En el caso del departamento de Norte de Santander, el desarrollo de los sistemas de acueducto ha tenido dificultades en la cobertura en todo el territorio por factores geográficos y sociales. Mientras que ciudades como Cúcuta han logrado avances con proyectos de integración metropolitana, los municipios de la región del Catatumbo han enfrentado interrupciones en la

continuidad y la calidad del servicio, en gran medida por la dispersión poblacional y los impactos del conflicto armado en la región (ICP, 2016). En este contexto, el municipio de El Tarra es un ejemplo representativo de los retos en la gestión del agua en el Catatumbo. Si bien la empresa prestadora (ESPTA) ha orientado esfuerzos para fortalecer la operación del sistema y promover procesos de participación comunitaria, el municipio aún mantiene limitaciones en la infraestructura y en la capacidad técnica para garantizar un servicio continuo y de calidad.

2.2 Marco contextual

El Tarra enfrenta desafíos asociados al crecimiento poblacional, la expansión urbana y las condiciones socioeconómicas. Estos factores han incrementado de manera constante la demanda del recurso hídrico y han generado dificultades en la capacidad de las instituciones locales para garantizar un servicio de agua potable continuo, eficiente y sostenible. De acuerdo con el Plan de Desarrollo Municipal 2020-2023, la cobertura de acueducto en el casco urbano alcanza el 100%, aunque la continuidad y calidad del servicio presentan limitaciones asociadas en el deterioro de las redes y a la falta de mantenimiento sistemático (Alcaldía Municipal de El Tarra, 2020). A nivel departamental, la población urbana de Norte de Santander cuenta con una cobertura de agua potable cercana al 96%; sin embargo, en las zonas rurales este porcentaje es mucho menor, lo que muestra las diferencias que aún existen en la prestación del servicio (MinVivienda, 2023). Por ello, es necesario fortalecer la planificación técnica y operativa en municipios como El Tarra.

En la región del Catatumbo, el acceso y manejo del agua están relacionados por factores como el relieve montañoso, la dispersión de la población y la falta de infraestructura adecuada. Según el Instituto de Ciencia Política Hernán Echevarría Olózaga, la poca capacidad técnica de los municipios y la baja inversión en obras hidráulicas han limitado el uso eficiente del recurso hídrico en esta zona del país (ICP, 2016). Asimismo, el Departamento Nacional de Planeación (DNP) señala que las brechas en cobertura, continuidad y calidad del servicio de acueducto en Norte de Santander siguen siendo una prioridad dentro de las políticas públicas del sector (DNP, 2014). Por ello, se hace necesario aplicar herramientas de modelación hidráulica que permitan una gestión más precisa, con base en información técnica y orientada a la sostenibilidad del sistema.

En este contexto, la empresa de servicios públicos de El Tarra (ESPTA) cumple un papel fundamental en la captación, el tratamiento y la distribución de agua potable para la población urbana. Sin embargo, enfrenta dificultades en el control de pérdidas, la planificación de redes y la optimización de la operación, principalmente por la falta de información técnica y geoespacial suficiente. Ante esto, el uso de herramientas como EPANET y QGIS surge como una alternativa que puede fortalecer la gestión del acueducto, ya que permiten simular el comportamiento del sistema y relacionar los datos espaciales con los resultados obtenidos. Estas herramientas han mostrado buenos resultados en la evaluación de redes de distribución en diferentes partes del mundo (Deb, 2023; Getnet & Abate, 2021). De este modo, esta investigación busca responder a una necesidad prioritaria del municipio de El Tarra, contribuyendo a mejorar la calidad del servicio de agua potable en su zona urbana.

2.3 Marco conceptual

El objetivo de este proyecto es evaluar el funcionamiento del sistema de acueducto en el municipio de El Tarra, Norte de Santander. Para lograrlo, se tendrán en cuenta los conceptos básicos de la modelación hidráulica y el uso de herramientas como EPANET y QGIS. De esta forma, se podrá comprender mejor el comportamiento de la red y al mismo tiempo, aplicar estos conceptos como base para la metodología que se usará durante la investigación.

2.3.1 Modelación Hidráulica

La modelación hidráulica permite analizar el movimiento del agua en la red de distribución, teniendo en cuenta factores como el caudal, la presión y las pérdidas de carga. Así, es posible entender cómo opera el sistema y, además, proponer estrategias que ayuden a mejorar su desempeño (Muller et al., 2020).

2.3.2 EPANET

EPANET es un programa creado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) diseñado para realizar simulaciones hidráulicas y de calidad del agua en redes de distribución a presión durante periodos prolongados. Esta herramienta permite analizar el comportamiento de sistemas conformados por tuberías, nodos, bombas, válvulas, tanques y embalses, evaluando variables como caudales, presiones y condiciones de calidad del agua a lo largo del tiempo (EPA, 2020).

2.3.3 QGIS

QGIS es un programa de acceso libre que sirve para organizar y analizar información geográfica. Cuando se combina con herramientas de modelación hidráulica como EPANET, permite mostrar de manera clara la red de distribución de agua y vincular los datos del sistema con mapas. De esta forma, ayuda a entender mejor el funcionamiento de la red (Deb, 2023).

2.3.4 Integración de EPANET y QGIS

Al integrar EPANET y QGIS, se permite unir el análisis del agua con la información geográfica. Por un lado, con QGIS se puede ver y analizar los datos espaciales de la red, mientras que con EPANET se simula de manera detallada como se mueve el agua. Así, al usar esta integración es más fácil revisar la red de distribución y entender mejor su funcionamiento (Deb, 2023).

2.3.5 Sistema de Distribución de Agua Potable

El sistema de distribución de agua potable está formado por todas las estructuras que permiten transportar el agua desde las fuentes de abastecimiento hasta los usuarios. Entre ellas se encuentran las tuberías, válvulas, bombas y tanques de almacenamiento. Por eso, es importante que estos elementos estén bien diseñados y funcionen correctamente para garantizar que el agua llegue de manera eficiente y segura (Serafeim, et al., 2023).

2.3.6 Pérdidas de Agua

El concepto de pérdidas de agua se refiere al volumen de agua que se pierde antes de llegar a los usuarios, ya sea por fugas o por errores administrativos. Estas pérdidas pueden presentarse por fugas en tuberías, deterioro en la infraestructura, fallas en la operación del sistema o deficiencias en el control y seguimiento del servicio. Su reducción es importante, ya que contribuye a mejorar la eficiencia operativa, disminuir desperdicios y optimizar la prestación del servicio de agua potable (Lambert & McKenzie, 2002).

2.3.7 Continuidad del servicio

La continuidad del servicio de agua potable es la capacidad del sistema para entregar agua constante durante las 24 horas del día. Para que esto sea posible, se necesita un equilibrio entre la producción, el almacenamiento, la demanda y las pérdidas de agua. Por eso, en zonas rurales o donde la infraestructura es limitada, el servicio a veces se interrumpe, lo que afecta tanto la eficiencia del sistema como la satisfacción de los usuarios (UNESCO, 2018).

2.3.8 Sostenibilidad y Optimización del Servicio

La sostenibilidad y optimización del servicio se refiere a la aplicación de prácticas y tecnologías que buscan que el sistema funcione de manera más eficiente, reduzca costos y cause menos impacto al medio ambiente. De esta manera, se promueve el uso de la energía de forma

responsable, se disminuyen las pérdidas de agua y se mejora continuamente la infraestructura y los procesos de operación (Dandy et al., 1996).

2.4 Marco teórico

La modelación hidráulica de las redes de distribución de agua potable se basa en principios de la hidráulica, como la conservación de masa y de la energía lo que permite comprender cómo varían la presión y el flujo a lo largo de las tuberías y por los distintos accesorios. De esta manera, se puede comprender mejor el funcionamiento del sistema y planificar acciones para hacerlo más eficiente. En la actualidad, EPANET se utiliza ampliamente para modelar el funcionamiento de las redes, ya que permite analizar presiones, caudales, almacenamiento y variaciones en la demanda. Además, varios estudios han demostrado su utilidad en casos reales, como el trabajo de Getnet y Abate (2021) en Etiopía, que evaluaron la confiabilidad de un sistema urbano. De igual manera, Shiu et al. (2024) señalan que, al aumentar el nivel de detalle de los modelos, se puede optimizar la precisión hidráulica sin comprometer la eficiencia computacional. Estos aportes teóricos son claves para el proyecto de investigación del municipio de El Tarra, ya que permiten sustentar el uso de EPANET como base para diagnosticar y analizar el comportamiento de la red.

El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), en particular QGIS ha ampliado las posibilidades de los modelos hidráulicos al integrar datos espaciales de topografía, uso de suelo y localización de infraestructura. Herramientas como QGISRed permiten representar, editar y

analizar redes directamente en un entorno geográfico, lo que incrementa la precisión de los modelos y facilita la gestión de información (Martínez–Solano et al., 2019). Por su parte, Muller et al. (2023) evidenciaron en Indonesia cómo la integración de EPANET y GIS optimizó la localización de reservorios y la eficiencia en la distribución del agua. Estos antecedentes muestran la importancia de incluir QGIS en el estudio de El Tarra, ya que esta herramienta permite georreferenciar la infraestructura y relacionar la información espacial con los resultados del análisis hidráulico.

Además, para mantener la continuidad y la calidad del servicio de agua potable, es importante optimizar la manera en que funcionan los sistemas de distribución. Entre las estrategias más importantes están el control de la presión mediante válvulas reguladoras, la optimización de los diámetros de las tuberías y la regulación del flujo dentro de la red. Según Mathye et al. (2022), una buena gestión de la presión puede reducir tanto los costos operativos como las pérdidas de agua. Por otra parte, la implementación de estrategias de control hidráulico permite mejorar la gestión de los caudales y presiones en cada zona, lo que facilita la operación y hace más fácil detectar problemas en el sistema. De igual manera, Creaco et al. (2019) señalan que aplicar modelos de optimización hidráulica en redes de distribución mejora el rendimiento hidráulico y promueve un uso más eficiente de los recursos.

2.5 Marco legal

En Colombia, el conjunto de leyes que regulan los sistemas de acueducto y la distribución de agua potable resalta la importancia de ofrecer un servicio público que sea eficiente, seguro y sostenible.

En la Tabla 1 se presenta un resumen de las principales normas relacionadas con los servicios públicos de acueducto, la calidad del agua y el saneamiento básico. Esta recopilación sirve como guía para orientar la evaluación hidráulica, la gestión técnica y operativa de los sistemas.

Tabla 1

Normatividad colombiana relacionada

Normativa	Descripción
Ley 142 de 1994	Régimen de los Servicios Públicos Domiciliarios: reconoce el servicio de acueducto como servicio público domiciliario, establece obligaciones de las entidades prestadoras, regulación, tarifas, medición, derechos y deberes de los usuarios.
Ley 99 de 1993	Crea el Ministerio del Medio Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Establece los fundamentos de la política ambiental colombiana y asigna responsabilidades para la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables.
Ley 373 de 1997	Establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua. Obliga a incorporar programas y proyectos para el uso eficiente del agua en los planes ambientales regionales y municipales.

Normativa	Descripción
Ley 9 de 1979	Dicta medidas sanitarias, regula el control sanitario de los usos del agua, señala algunas disposiciones generales, reglamenta lo relacionado con aguas superficiales, aguas subterráneas, aguas lluvias, así como su conducción, estaciones de bombeo y potabilización del agua.
Decreto 1575 de 2007	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
Resoluciones 330 de 2017 y 799 de 2021	Compilan normativas RAS, incluyendo requisitos técnicos para tuberías, accesorios, materiales, información de las instalaciones hidrosanitarias y alcantarillado.
Resolución 0501 2017	Regulación sobre requisitos técnicos de materiales (tuberías, ductos y accesorios) que se utilizan en redes de acueducto y alcantarillado y estándares químicos para estos materiales, asegurando la durabilidad y que no comprometan la salud pública.
Resolución 2115 de 2007	Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.
Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)	Adoptado mediante la Resolución 1096 de 2000 y revisiones posteriores: establece estándares técnicos para diseño, operación y mantenimiento de redes de acueducto y alcantarillado, calidad del agua, obras de infraestructura, entre otros.

3. Diseño metodológico

3.1 Tipo de investigación

Este proyecto se desarrolló dentro de una investigación de tipo cuantitativa con naturaleza descriptiva y explicativa, ya que buscó analizar de manera objetiva y verificable el comportamiento hidráulico del sistema de acueducto del casco urbano del municipio de El Tarra, Norte de Santander. A través del procesamiento de información técnica y geoespacial, se evaluó

el funcionamiento de la red de distribución de agua potable y se identificaron los factores que influyen en su eficiencia operativa.

El enfoque descriptivo se justificó porque la investigación permitió caracterizar las condiciones actuales del sistema de acueducto, a partir del análisis de datos técnicos, topográficos y de operación del sistema, obtenidos de la información disponible del sistema de acueducto y complementados mediante herramientas de análisis geoespacial. A su vez, la investigación adquiere un componente explicativo, ya que buscó determinar las causas y relaciones entre las variables hidráulicas observadas, a través de la simulación del sistema. Asimismo, se consideró no experimental, ya que no se manipularon las variables del sistema, sino que se analizaron con base en los datos obtenidos de la empresa prestadora del servicio y en la simulación.

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron métodos analíticos y de modelación, apoyados en herramientas como EPANET y QGIS. A través de estos programas, se integraron datos técnicos y geoespaciales para representar el comportamiento de la red de distribución, evaluar su comportamiento y proponer estrategias de optimización. Este enfoque metodológico permitió obtener resultados verificables y replicables, que contribuyen al mejoramiento de la eficiencia y la confiabilidad del servicio de agua potable del casco urbano del municipio de El Tarra, Norte de Santander.

3.2 Seguimiento metodológico del proyecto

El seguimiento metodológico del proyecto se describe paso a paso en la Tabla 2 que incluye los objetivos de la investigación, las actividades que les corresponden y el indicador para medir cada una de ellas.

Tabla 2

Modelo metodológico

Objetivo de la investigación	Actividades por objetivo	Indicador por actividad	Entregables
Diagnosticar el sistema de acueducto de El Tarra mediante el análisis de información técnica y geoespacial de la empresa ESPTA, para consolidar una base de datos que sustente la modelación hidráulica.	• Recopilación y organización de la información técnica y geoespacial del sistema de acueducto proporcionada por la ESPTA. • Revisión y organización de información suministrada por la empresa. • Estructuración de la base de datos de la red de acueducto en QGIS para la modelación.	• Número de documentos y registros técnicos recopilados (mínimo 15). • Porcentaje de información depurada e integrada en la base de datos ($\geq 90\%$). • Base de datos geoespacial consolidada y validada (Sí/No).	Base de datos técnica y geoespacial del sistema de acueducto.
Modelar hidráulicamente la red de distribución del sistema de acueducto, mediante la modelación integrada con EPANET y QGIS, para evaluar el comportamiento hidráulico del sistema.	• Modelación del comportamiento hidráulico de la red en EPANET. • Integración de EPANET y QGIS. • Revisión de los resultados obtenidos en la modelación.	• Número de escenarios de modelación analizados (mínimo 3). • Integración de resultados hidráulicos con QGIS realizada (Sí/No). • Resultados de la modelación revisados y validados (Sí/No).	Modelo hidráulico del sistema de acueducto.
Proponer estrategias de optimización en la red de distribución de agua potable, basándose en el	• Identificación de puntos críticos en la red (zonas de baja presión y deficiencias hidráulicas).	• Número de puntos críticos identificados (mínimo 5 sectores). • Número de	Informe técnico con estrategias de optimización

Objetivo de la investigación	Actividades por objetivo	Indicador por actividad	Entregables
análisis de los resultados de la modelación hidráulica, con el fin de identificar y mitigar problemáticas relacionadas al sistema.	• Evaluación de alternativas técnicas y operativas para mejorar el desempeño hidráulico del sistema. • Formulación de estrategias de optimización y acciones priorizadas orientadas a la eficiencia operativa.	alternativas de optimización evaluadas (mínimo 3). • Informe técnico de estrategias de optimización formuladas y validadas (Sí/No).	y acciones priorizadas.

3.3 Población

Para el presente proyecto, orientado a la evaluación del comportamiento hidráulico del sistema de acueducto del casco urbano del municipio de El Tarra, Norte de Santander, la población corresponde a la red de distribución de agua potable administrada por la empresa de servicios públicos (ESPTA). Esta comprende los elementos que conforman la red y que intervienen directamente en su funcionamiento. Esta población incluye el tanque de almacenamiento, los nodos, las tuberías, las válvulas y demás componentes que intervienen en la operación del sistema.

De igual manera, la población considera el conjunto de datos técnicos, geoespaciales e hidráulicos asociados a los componentes del sistema, los cuales son indispensables para la modelación del comportamiento de la red. Estos datos incluyen información sobre presiones, caudales, almacenamiento, topografía, materiales de las tuberías y nodos de consumo, integrados mediante herramientas como EPANET y QGIS. La integración de esta información permite

representar de forma precisa el comportamiento operativo del sistema y establecer una base técnica para su evaluación y optimización.

La población está delimitada en términos de espacio al casco urbano del municipio de El Tarra y temporalmente al periodo comprendido durante la ejecución del proyecto, en el cual se analizaron los datos técnicos y operativos disponibles.

3.4 Muestra

La muestra corresponde a los elementos de la red de distribución de agua potable del casco urbano del municipio de El Tarra. Esta comprende los tramos de tubería, nodos y elementos de control que fueron identificados y representados a partir de información topográfica disponible.

Para el análisis, se seleccionaron los factores y componentes de la red que cuenten con información suficiente y verificable, de manera que los datos suministrados por la empresa permitan realizar la modelación hidráulica y espacial con QGIS y EPANET, para así garantizar la calidad y la consistencia de los resultados obtenidos en el proceso de la modelación.

De esta manera, la muestra seleccionada permitirá representar con precisión el funcionamiento del sistema de acueducto y obtener resultados válidos para el diagnóstico hidráulico y la propuesta de estrategias de optimización del servicio en el casco urbano de El Tarra.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de información

En este proyecto, como instrumento se empleó el análisis de documentos como medio principal para la obtención y procesamiento de la información. Con esta técnica fue posible recopilar, analizar y organizar la información técnica y geográfica relacionada con el sistema de acueducto del casco urbano del municipio de El Tarra, Norte de Santander.

Para este fin, se realizó la revisión de la información disponible como herramienta principal. Esto permitió organizar y clasificar diferentes fuentes de información, como el catastro de la red de acueducto. A partir de esta información, se evaluó el comportamiento hidráulico del sistema, utilizando programas de modelación como EPANET y QGIS, que permitieron representar la red de distribución y analizar la eficiencia del funcionamiento del acueducto.

De esta manera, esta técnica permitió obtener información confiable, ordenada y precisa. Con estos datos, se pudo analizar, diagnosticar y modelar el sistema de acueducto, así como plantear estrategias para mejorar la prestación del servicio de agua potable.

3.6 Análisis de información

Inicialmente, se realizó la representación geográfica en QGIS versión 3.38, utilizando el complemento QWater, lo que permitió observar con mayor claridad la distribución de los componentes del sistema y detectar las áreas con posibles deficiencias hidráulicas.

Posteriormente, la información se integró con EPANET versión 2.2 con el fin de simular y analizar el comportamiento de la red de distribución.

La interoperabilidad entre ambos programas se realizó mediante la generación y exportación de archivos en formato INP, lo que permitió transferir la información del modelo hidráulico entre los entornos de modelación y análisis.

Posteriormente, se verificó el comportamiento hidráulico del modelo mediante la evaluación de parámetros como presiones en los nodos, velocidades del flujo, pérdidas de carga y continuidad del servicio, con el fin de identificar posibles deficiencias y verificar el cumplimiento de los criterios establecidos para el diseño y operación del sistema.

Finalmente, el análisis de la información se realizó de manera descriptiva, lo que permitirá identificar las principales características y condiciones del sistema de acueducto. Para ello, los datos se presentaron en tablas y gráficos utilizando Microsoft Excel, de manera que se facilitó su interpretación y la visualización del comportamiento del sistema.

4. Resultados

4.1 Diagnóstico de población

Según el censo del DANE de 2018, la población de El Tarra es de 20.093 habitantes, de los cuales 8.371 corresponden a la cabecera municipal y 11.722 al resto del municipio. De acuerdo con la información del Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT, 2024a), el casco urbano se encuentra conformado por once (11) barrios, los cuales estructuran la organización territorial de la cabecera municipal, mientras que el área rural está compuesta por 68 veredas y 7 corregimientos que integran el territorio municipal. En la Tabla 3 se presentan los datos correspondientes a los censos poblacionales del casco urbano realizados para el municipio.

Tabla 3

Población total de la cabecera municipal censada

Descripción	Unidad	Cantidad	Fuente
Censo 1993	Hab	2.551	DANE (1993)
Censo 2005	Hab	3.811	DANE (2005)
Censo 2018	Hab	8.371	DANE (2018)

Nota. Elaboración propia con base en los datos del DANE (1993, 2005 y 2018).

4.2 Periodo de diseño

El periodo de diseño está definido también como el alcance del proyecto, es el tiempo para el cual se estima que el sistema funcionaría satisfactoriamente. Para este caso de estudio, el periodo de diseño estará dado a 25 años desde la iniciación del servicio del sistema (2026), por lo tanto, la población futura de diseño corresponde a la proyectada para el año 2051.

Los métodos de proyección de la población están establecidos en el RAS Tabla B.2.1 (Métodos aritmético, geométrico y exponencial). Para la zona de estudio, en vista de la información obtenida, se proyectó la población por el método geométrico, tomando como base los parámetros anteriormente mencionados. Los resultados obtenidos para cada método se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Población de diseño

Diagnóstico De Población - Municipio El Tarra				
Censo	Población DANE	Aritmético	Geométrico	Exponencial
Censo 1993	2551	2551	2551	2551
Censo 2005	3811	3811	3811	3811
Censo 2018	8371	8371	8371	8371
Proyecciones 2019	9069	9069	9069	9069
Proyecciones 2020	9.880	8827	9198	9196
Proyecciones 2021	10.294	9055	9641	9638
Proyecciones 2022	10.731	9283	10106	10102
Proyecciones 2023	11.147	9511	10593	10588
Proyecciones 2024	11.581	9739	11104	11097
Proyecciones 2025	12.002	9967	11639	11631
Proyecciones 2026	12.368	10195	12200	12191

Diagnóstico De Población - Municipio El Tarra				
Censo	Población DANE	Aritmético	Geométrico	Exponencial
Proyecciones 2027	12.747	10422	12789	12777
Proyecciones 2028	13.117	10650	13405	13392
Proyecciones 2029	13.483	10878	14051	14037
Proyecciones 2030	13.831	11106	14729	14712
Proyecciones 2031	14.166	11334	15439	15420
Proyecciones 2032	14.509	11562	16183	16162
Proyecciones 2033	14.836	11790	16963	16939
Proyecciones 2034	15.152	12018	17781	17754
Proyecciones 2035	15.469	12246	18638	18608
Proyecciones 2036	15754	12473	19536	19503
Proyecciones 2037	16052	12701	20478	20442
Proyecciones 2038	16326	12929	21465	21425
Proyecciones 2039	16601	13157	22500	22456
Proyecciones 2040	16863	13385	23584	23536
Proyecciones 2041	17107	13613	24721	24669
Proyecciones 2042	17353	13841	25913	25856
Proyecciones 2043		14069	27162	27100
Proyecciones 2044		14296	28472	28403
Proyecciones 2045		14524	29844	29770
Proyecciones 2046		14752	31283	31202
Proyecciones 2047		14980	32791	32703
Proyecciones 2048		15208	34372	34277
Proyecciones 2049		15436	36029	35926
Proyecciones 2050		15664	37766	37654
Proyecciones 2051		15892	39586	39466

4.3 Población flotante

La población flotante corresponde al conjunto de personas que permanecen temporalmente por motivos laborales, comerciales, administrativos o de prestación de servicios, sin residir de manera permanente en el municipio. Para el presente estudio, se consideró una población flotante del 20%, de acuerdo con información suministrada por la administración municipal. Este porcentaje fue incluido en la estimación de la demanda de agua para la

modelación hidráulica del sistema, tanto para el escenario de la población actual como para el escenario de la población de diseño.

4.4 Comparativo de métodos

Figura 1

Proyección Población Método Aritmético

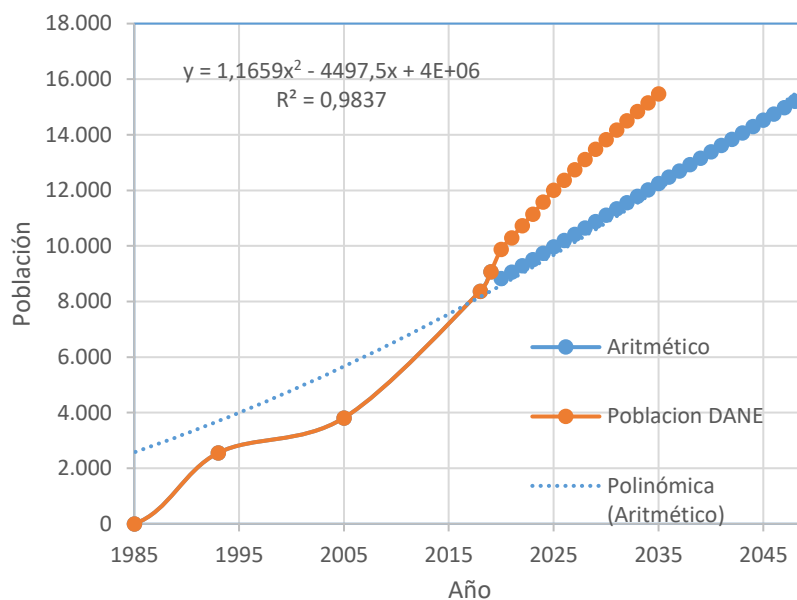


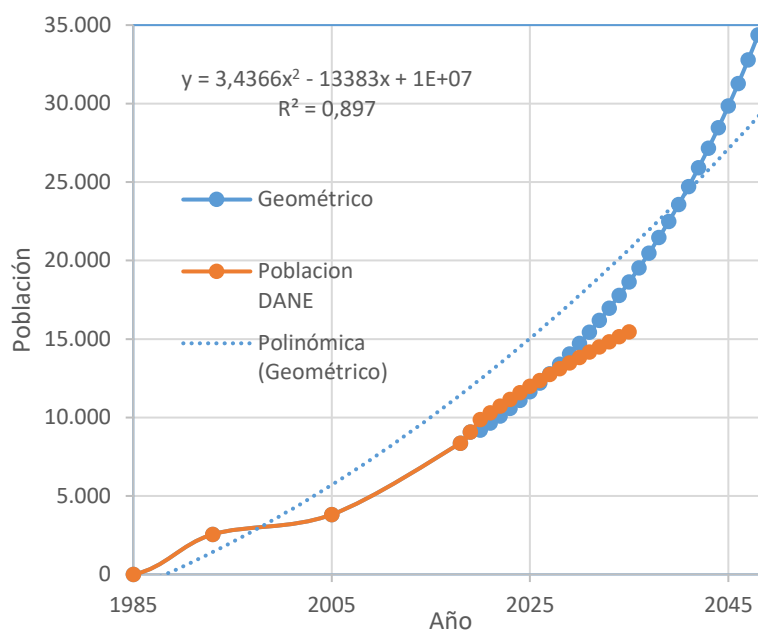
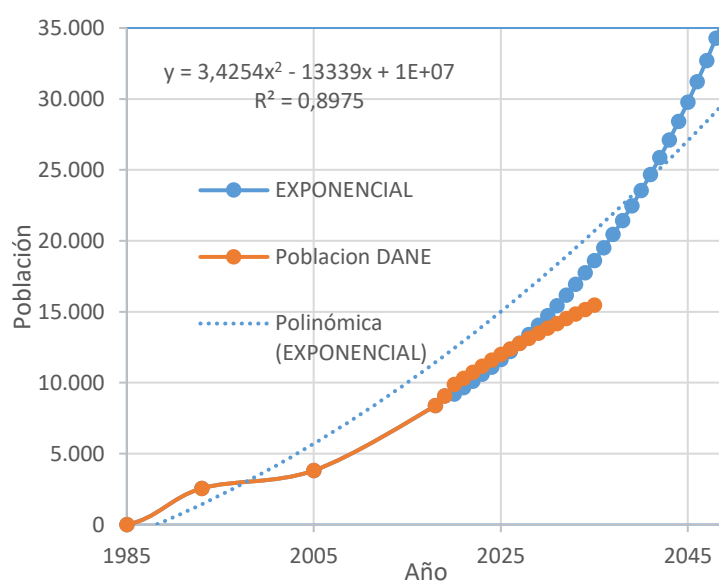
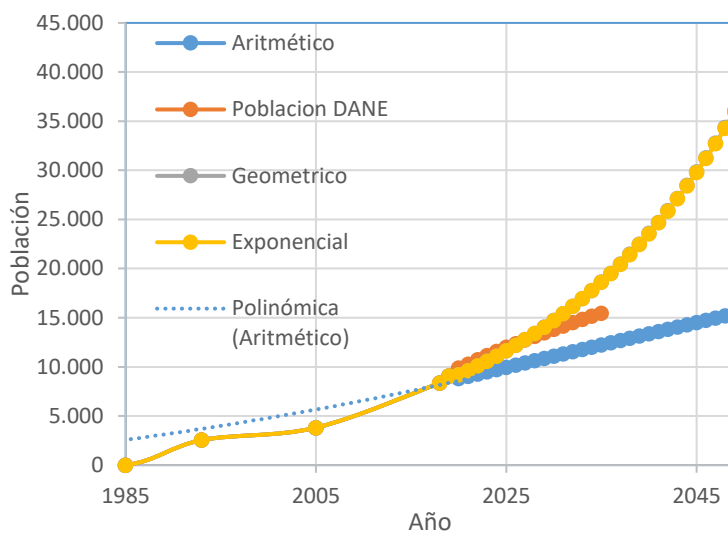
Figura 2*Proyección Población Método Geométrico***Figura 3***Proyección Población Método Exponencial*

Figura 4

Proyección Población Métodos Matemáticos



4.5 Población densidad de saturación

De acuerdo con el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT, 2024a) para el cálculo de la población por densidad de saturación se estableció un área promedio de 72 m² y una ocupación de 4 habitantes/vivienda, como se presenta en la Figura 5.

Figura 5*Áreas mínimas de lote*

Tipo de vivienda	área de lote mínimo.	Frente mínimo.	Fondo mínimo.
Vivienda de una sola alcoba	60 m ²	6 mts	10 mts
Vivienda de dos alcobas	72 m ²	6 mts	12 mts
Vivienda de tres alcobas	84 m ²	6 mts	14 mts

Nota. Tomado de EOT municipio de El Tarra.

Con base en estos parámetros se obtiene una densidad de saturación de 555.56 habitantes por hectárea, calculada mediante la siguiente expresión:

$$Densidad\ de\ saturación = \frac{10.000\ m^2}{\frac{72\ m^2}{Viv}} * \frac{4\ hab}{Viv} = \frac{555.56\ hab}{Ha}$$

El área urbana existente y el área de expansión fueron determinadas mediante información geográfica, a partir de la delimitación espacial establecida por el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT, 2024a) con lo que se obtuvieron valores de 127.09 Ha y 51.04 Ha, respectivamente.

Área urbana existente = 127.09 Ha

Área de expansión = 51.04 Ha

A partir de la densidad de saturación calculada, se estimó una población de 70.605 habitantes para el área urbana existente y de 28.355 habitantes para el área de expansión, para un total de 98.960 habitantes.

Población 1 = $555.56 * 127.09 = 70.605$

Población 2 = $555.555 * 51.04 = 28.355$

Población por densidad de saturación = 98.960 habitantes

4.6 Estimación población de diseño

Con el fin de determinar la población de diseño, se realizó el análisis comparativo de los diferentes métodos de proyección poblacional, seleccionándose el método geométrico. Este método se eligió debido a que presenta el mejor ajuste estadístico, con un coeficiente de determinación R^2 de 0.897 y una tasa de crecimiento de 4.82%, obteniéndose una población proyectada de 39.586 habitantes para el año 2051.

Adicionalmente, al considerar el 20% correspondiente a la población flotante, la población empleada para la modelación hidráulica fue de 47.503 habitantes.

Finalmente, mediante la verificación de la población de saturación establecida en la normativa RAS, se determinó que la población proyectada para el horizonte de diseño correspondiente a 39.586 habitantes no supera la población máxima de saturación calculada de 98.690 habitantes. Por lo tanto, la proyección adoptada se considera admisible, debido a que se encuentra dentro de la capacidad de crecimiento estimada para el municipio.

4.7 Diagnóstico de caudales

4.7.1 Dotación neta

La altura promedio sobre el nivel del mar de la zona atendida es de 270 m.s.n.m. Según la Tabla 5 de la Resolución 0330 del 2017 y teniendo en cuenta la altura suministrada, la dotación neta es de 140 L/Hab*día

Tabla 5

Dotación Neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida

Altura promedio sobre el nivel del mar de la zona atendida	Dotación neta máxima (L/HAB*DÍA)
> 2000 m s. n. m.	120
1000 – 2000 m s. n. m.	130
< 1000 m s. n. m.	140

Nota. Resolución 0330 de 2017.

4.7.2 Porcentaje de Pérdidas

El porcentaje de pérdidas corresponde al total de pérdidas esperadas en el sistema y no deberá superar el 25%., según lo establecido en el artículo 43 de la resolución 0330 de 2017.

4.7.3 Dotación Bruta

De acuerdo con la Resolución 0330 de 2017 expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, la dotación bruta para el diseño de cada uno de los elementos que conforman un sistema de acueducto se debe calcular teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$D_{bruta} = \frac{D_N}{(1-\%p)} \quad (\text{RAS. Ecuación B.2.4})$$

Donde:

D_{bruta} : Dotación bruta.

D_N : Dotación neta.

%p: porcentaje de pérdidas técnicas máximas para diseño.

Para el análisis se tiene que:

$$D_{bruta} = \frac{140}{(1 - 25\%)} \rightarrow D_{bruta} = 186,67 \text{ aprox.}$$

4.7.4 Caudal Medio Diario (qmd)

El caudal medio diario (qmd), corresponde al promedio de los consumos diarios de caudal en un período de un año, proyectado al horizonte de diseño, el cual debe calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$qmd = \frac{P_f * D_{bruta}}{86400} \quad (\text{RAS. Ecuación B.2.12})$$

Donde:

El 86.400 en la ecuación es la conversión para que las unidades del qmd den en L/seg.

P_f : Población futura anteriormente calculada.

D_{bruta} : Dotación bruta.

$$qmd = \frac{47.503 * 186,67}{86400} \rightarrow qmd = 102,630 \text{ Lts/seg.}$$

4.7.5 Caudal Máximo Diario (QMD)

Según el RAS, el coeficiente de consumo máximo diario k_1 , se obtiene de la relación entre el mayor consumo diario y el consumo medio diario, utilizando los datos registrados en un período mínimo de un año. En este caso el valor del coeficiente de consumo máximo diario k_1 , será 1.2 siendo este valor para un número mayor igual a 12.500 habitantes.

Teniendo en cuenta k_1 y el caudal medio diario (qmd), se tiene que el caudal máximo diario (QMD) es:

$$QMD = qmd * k_1 \text{ (RAS B.2.3)}$$

$$QMD = 102,630 * 1,2 \rightarrow QMD = 123,156 \text{ L/seg.}$$

4.7.6 Caudal Máximo Horario (QMH)

El caudal máximo horario (QMH), corresponde al consumo máximo registrado durante una hora en un período de un año. Se calcula como el caudal máximo diario multiplicado por el coeficiente de consumo máximo horario k_2 , según la siguiente ecuación:

Para este caso k_2 es igual a 1.5 igualmente para una población mayor igual a 12.500 habitantes.

$$QMH = QMD * k_2 \text{ (RAS B.2.4)}$$

$$Q_{MH} = 123,156 * 1,5 \rightarrow Q_{MH} = 184,735 \text{ L/seg}$$

4.8 Modelación hidráulica de la red de distribución

Con el fin de evaluar el comportamiento hidráulico del sistema de acueducto del casco urbano del municipio de El Tarra, se desarrolló la modelación de la red mediante la integración de herramientas geoespaciales y de simulación hidráulica, utilizando QGIS versión 3.38 junto con el complemento QWater para la estructuración y georreferenciación de la red, y EPANET versión 2.2, empleado para la simulación del comportamiento hidráulico bajo condiciones de diseño.

4.8.1 Construcción del modelo en QGIS

La elaboración inicial del modelo hidráulico se desarrolló en QGIS empleando el complemento QWater, el cual permite estructurar redes de distribución dentro de un entorno geoespacial y generar posteriormente el archivo compatible con EPANET. Posteriormente, se generaron las capas vectoriales correspondientes a nodos, tuberías y fuente de abastecimiento (embalse), definidas como archivos shapefile con geometrías de punto y línea, según correspondía. Estas capas fueron georreferenciadas bajo el sistema de referencia WGS 84/Pseudo Mercator (EPSG:3857), garantizando la consistencia espacial del modelo.

A partir de la información cartográfica y técnica disponible, se procedió a la digitalización de los elementos de la red dentro de QGIS, definiendo la ubicación de los nodos, el trazado de las tuberías y el punto de abastecimiento. En total, se ubicaron 583 nodos y se trazaron 785 tuberías dentro del modelo. A cada elemento se le asignó una tabla de atributos con parámetros hidráulicos y geométricos.

4.8.2 Asignación de parámetros hidráulicos

Mediante el complemento QWater, se asignaron los parámetros necesarios para la simulación hidráulica. Las elevaciones de los nodos se obtuvieron a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM), mientras que las demandas fueron calculadas en los nodos de acuerdo con la población correspondiente a cada escenario de análisis. Para el escenario de diseño proyectado al año 2051, se adoptó un caudal máximo horario (QMH) de 184,735 L/s, correspondiente a la población de 47.503 habitantes y a la hora de mayor consumo.

El complemento también calculó las propiedades geométricas de las tuberías, como la longitud, y permitió asignar parámetros como el diámetro y el coeficiente de rugosidad. Para el cálculo de las pérdidas de energía en las tuberías, se empleó la ecuación de Hazen-Williams, utilizando coeficientes correspondientes a tuberías de PVC. Asimismo, se definieron las condiciones de carga correspondientes al embalse, estableciendo una altura piezométrica de 260 metros como condición inicial del sistema.

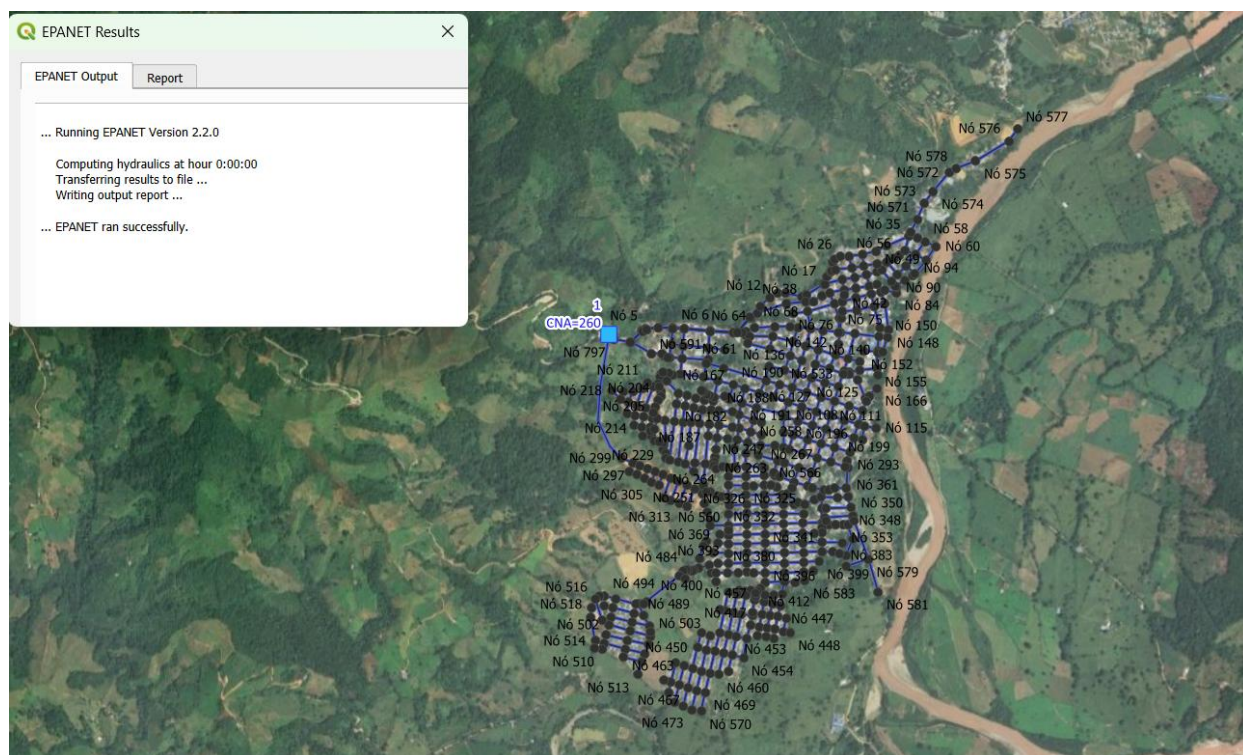
Para la modelación se consideraron tuberías de PVC de presión RDE 21 de la marca PAVCO, utilizando sus diámetros nominales comerciales, los cuales se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6

Diámetros nominales comerciales considerados en la modelación hidráulica

Diámetro nominal (pulg.)	Diámetro interior promedio (mm)
1	30,20
1 ¼	38,14
1 ½	43,68
2	54,58
2 ½	66,07
3	80,42
4	103,42
6	152,22
8	198,21
10	244,94
12	293,07
14	321,74
16	367,70
18	419,10

El modelo construido en QGIS se muestra en la Figura 6, donde se observa la distribución espacial de los nodos, las tuberías y el punto de abastecimiento.

Figura 6*Modelo en QGIS*

4.8.3 Modelo hidráulico en EPANET

Una vez definida la red, se generó el modelo hidráulico mediante la herramienta Make Model del complemento QWater, lo que permitió su exportación e integración con EPANET para la ejecución de la simulación hidráulica.

4.9 Patrón de consumo

Con el modelo ya cargado en EPANET, se procedió a la asignación del patrón de consumo para la simulación hidráulica. Debido a que la Empresa de Servicios Públicos de El Tarra (ESPTA) no cuenta con registros de macromedición ni micromedición que permitan definir un patrón de consumo propio para el municipio de El Tarra, fue necesario adoptar un patrón de consumo de referencia para la modelación.

Para ello, se tomó el patrón de consumo desarrollado para la empresa ACOSMI, correspondiente al municipio de Río de Oro, Cesar (Rincón Amaya & Quintero Claro, 2025). La selección de este patrón se basó considerando las similitudes existentes entre ambos sistemas de abastecimiento, especialmente en aspectos relacionados con el tamaño de la población y los hábitos de consumo de agua de sus usuarios.

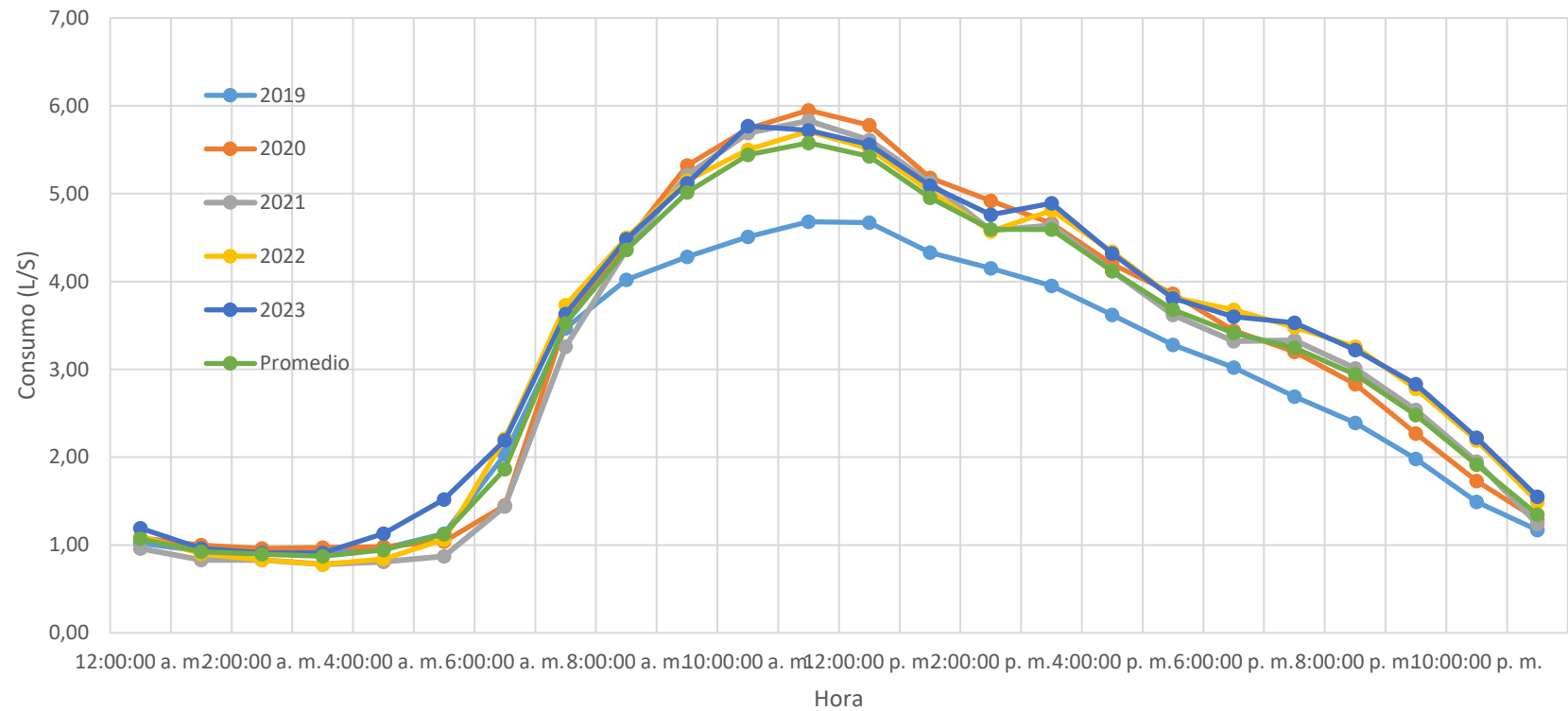
En consecuencia, el patrón de consumo obtenido a partir de las mediciones realizadas por ACOSMI fue utilizado como referencia en la modelación hidráulica desarrollada en EPANET, con el fin de representar la variación horaria de la demanda a lo largo de un periodo de 24 horas. Los valores correspondientes a este patrón de consumo se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7*Patrón de consumo promedio en 24 horas*

Hora	2019	2020	2021	2022	2023	Patrón de Consumo (L/S)
0:00	1,02	1,08	0,96	1,10	1,19	1,07
1:00	0,93	1,00	0,83	0,90	0,96	0,92
2:00	0,95	0,96	0,83	0,83	0,91	0,90
3:00	0,92	0,97	0,78	0,78	0,91	0,87
4:00	0,96	0,98	0,81	0,84	1,13	0,94
5:00	1,13	1,04	0,87	1,06	1,52	1,12
6:00	2,03	1,45	1,44	2,21	2,19	1,86
7:00	3,47	3,53	3,26	3,73	3,63	3,52
8:00	4,02	4,44	4,36	4,50	4,48	4,36
9:00	4,28	5,32	5,21	5,15	5,12	5,02
10:00	4,51	5,74	5,69	5,50	5,77	5,44
11:00	4,68	5,95	5,83	5,71	5,72	5,58
12:00	4,67	5,78	5,61	5,51	5,56	5,43
13:00	4,33	5,18	5,13	5,03	5,09	4,95
14:00	4,15	4,92	4,58	4,57	4,76	4,60
15:00	3,95	4,66	4,64	4,81	4,89	4,59
16:00	3,62	4,20	4,12	4,34	4,32	4,12
17:00	3,28	3,86	3,62	3,82	3,81	3,68
18:00	3,02	3,44	3,32	3,68	3,60	3,41
19:00	2,69	3,20	3,33	3,48	3,53	3,25
20:00	2,39	2,83	3,01	3,26	3,22	2,94
21:00	1,98	2,27	2,54	2,78	2,83	2,48
22:00	1,49	1,73	1,95	2,19	2,22	1,92
23:00	1,17	1,29	1,24	1,49	1,55	1,35

Nota. Tomado de Sectorización de las redes de distribución de agua potable de ACOSMI en el municipio de Río de Oro, Cesar, basada en patrones de consumo para la optimización del sistema, por Rincón Amaya & Quintero Claro, 2025. Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

El gráfico presentado en la Figura 7, muestra los picos máximos y mínimos de consumo promedio durante 24 horas para los cinco años registrados (2019-2023), por el macro medidor a lo largo del tiempo, permitiendo visualizar las variaciones en el flujo de manera clara.

Figura 7*Patron de consumo*

4.10 Presiones en la red de distribución

De acuerdo con la resolución 0330 de 2017 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2017), la presión estática máxima debe ser de 50 m.c.a. Para cumplir con esta condición, la red de distribución debe estar subdividida en tantas zonas de presión como se requieran y la presión dinámica mínima en la red de distribución debe ser de 10 m.c.a. en sistemas con poblaciones de diseño de hasta 12.500 habitantes. Para poblaciones de diseño de más de 12.500 habitantes la presión dinámica mínima debe ser de 15 m.c.a.

La normativa también establece que en una misma zona de presión se pueden presentar presiones estáticas mayores a la máxima definida; en este caso, el área a abastecer con una presión estática superior puede corresponder al 10% del área de la zona de presión, desde que no se sobrepase una presión de 55 m.c.a. y hasta el 5% del área de la zona de presión, desde que no sobrepase una presión de 60 m.c.a. Con base en lo anterior se realiza un análisis de la red para evaluar la solución más eficaz.

Bajo este marco normativo, se desarrolló el análisis hidráulico de la red de distribución del municipio de El Tarra mediante modelación en EPANET, evaluando su comportamiento en la condición actual, como la población futura, bajo escenarios de demanda variable.

4.11 Análisis de escenarios hidráulicos

4.11.1 Modelación de la red en condición actual

Para la modelación de la red de distribución en su condición actual, correspondiente a una población de 14.640 habitantes. En este escenario se utilizó el caudal máximo horario estimado de 57 L/s, con el fin de representar las condiciones actuales de la red de distribución. Para ello, se utilizaron los diámetros de las tuberías registrados en el catastro de redes disponible, obtenido a partir de un levantamiento topográfico realizado en el año 2018. Este catastro se empleó como información base para definir la configuración existente del sistema de acueducto, como se muestra en la Figura 8.

La red de distribución del casco urbano del municipio de El Tarra cuenta con una tubería de salida desde la fuente de abastecimiento en PVC RDE 21 de la marca Pavco, de 10 pulgadas, la cual posteriormente se reduce a 6, 4, 3, 2 y 1 pulgada, de acuerdo con la configuración existente del sistema. La mayor parte de la red de distribución está conformada por tuberías de 2 pulgadas, las cuales se encargan de suministrar el agua a los diferentes sectores del casco urbano.

Figura 8

Plano de catastro de la red de distribución existente



Nota. Tomado del catastro de redes del sistema de acueducto, levantamiento topográfico realizado en 2018.

El sistema es abastecido por un embalse ubicado a una cota aproximada de 260 metros sobre la red de distribución. El modelo hidráulico construido en EPANET representa la configuración actual del sistema, con el fin de analizar el comportamiento hidráulico de la red de distribución del casco urbano.

4.11.2 Simulación Epanet tiempo cero

Con los diámetros de la red existente se evaluó inicialmente el comportamiento hidráulico del sistema en la condición inicial (tiempo cero). Los resultados evidenciaron presiones positivas en la mayor parte de la red; sin embargo, se identificaron algunos nodos con presiones negativas, lo que indica condiciones puntuales de deficiencia hidráulica en el sistema. Los nodos que presentan esta condición se resumen en la Tabla 8.

Tabla 8

Nodos con presión negativa en la simulación en tiempo cero

Nodo	Presión (m.c.a.)
218	-12,34
317	-3,33
551	-3,11
316	-0,11
565	-3,74
474	-1,54
476	-2,03
477	-5,56
478	-3,02
520	-2,24
518	-4,24
514	-2,21
515	-0,80

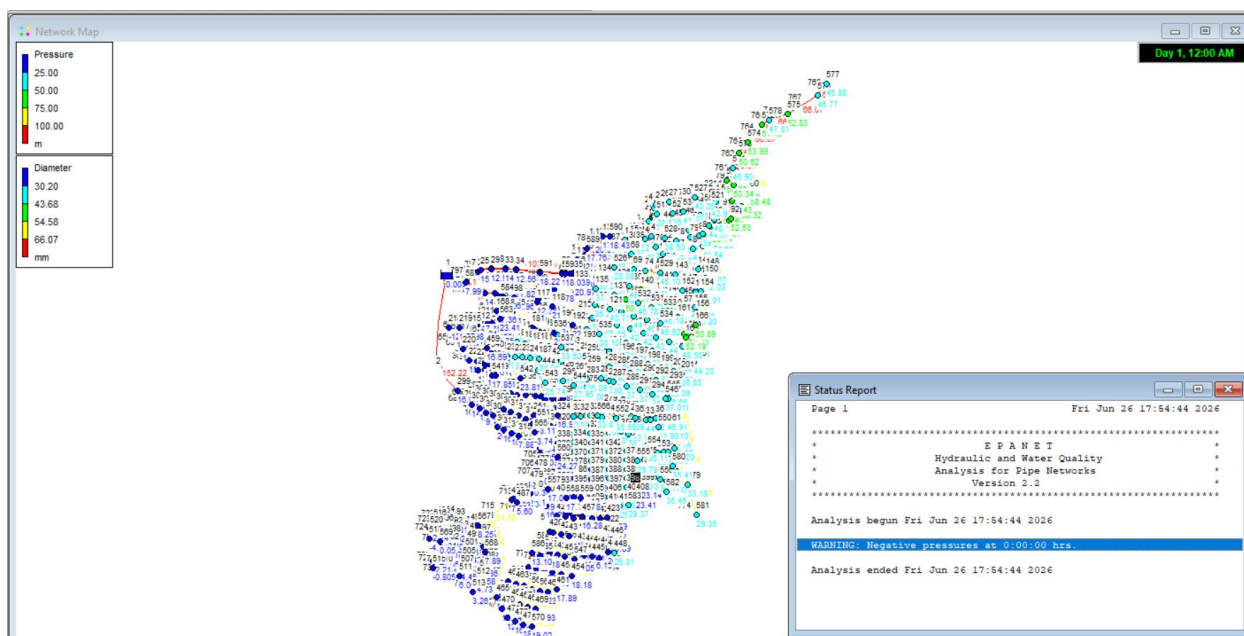
Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la simulación hidráulica en EPANET 2.2.

Los nodos más críticos corresponden al nodo 218, con la presión más baja del sistema de -12.34 m.c.a. y el nodo 477, con -5.56 m.c.a., lo que refleja los sectores con mayor afectación dentro de la red.

Asimismo, la modelación de EPANET permitió determinar la distribución de presiones en la red, como se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Modelación EPANET tiempo cero



4.11.3 Análisis bajo patrón de consumo

Posteriormente, se introdujo el patrón de consumo en el modelo hidráulico para analizar el comportamiento hidráulico bajo condiciones de demanda variable durante un periodo de 24 horas. Los resultados de esta simulación evidenciaron la presencia de presiones negativas en diferentes nodos durante el periodo completo de análisis, lo que indica que el sistema no garantiza condiciones hidráulicas adecuadas de manera continua a lo largo del día. Estos resultados se presentan en la Figura 10.

Figura 10

Análisis en EPANET con Patron de Consumo

```

Page 1                               Wed Jun 24 15:43:53 2026

*****
*                                     *
*               E P A N E T          *
*      Hydraulic and Water Quality    *
*      Analysis for Pipe Networks     *
*               Version 2.2           *
*****

Analysis begun Wed Jun 24 15:43:53 2026

WARNING: Negative pressures at 0:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 1:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 2:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 3:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 4:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 5:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 6:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 7:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 8:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 9:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 10:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 11:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 12:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 13:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 14:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 15:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 16:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 17:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 18:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 19:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 20:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 21:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 22:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 23:00:00 hrs.
WARNING: Negative pressures at 24:00:00 hrs.

Analysis ended Wed Jun 24 15:43:53 2026

```

Durante el análisis de escenarios hidráulicos, la simulación de la red en su estado actual evidenció que el sistema no es hidráulicamente apto, debido a que los diámetros de las tuberías son pequeños, lo que genera pérdidas de carga elevadas y presiones insuficientes en varios nodos, lo que impide que el agua llegue adecuadamente a todos los sectores.

Nota. Debido a que no se dispone de información sobre la localización de las válvulas existentes en la red, se plantearon válvulas en el modelo hidráulico con el fin de representar adecuadamente la operación del sistema y evaluar su comportamiento.

4.11.4 Alternativa de solución

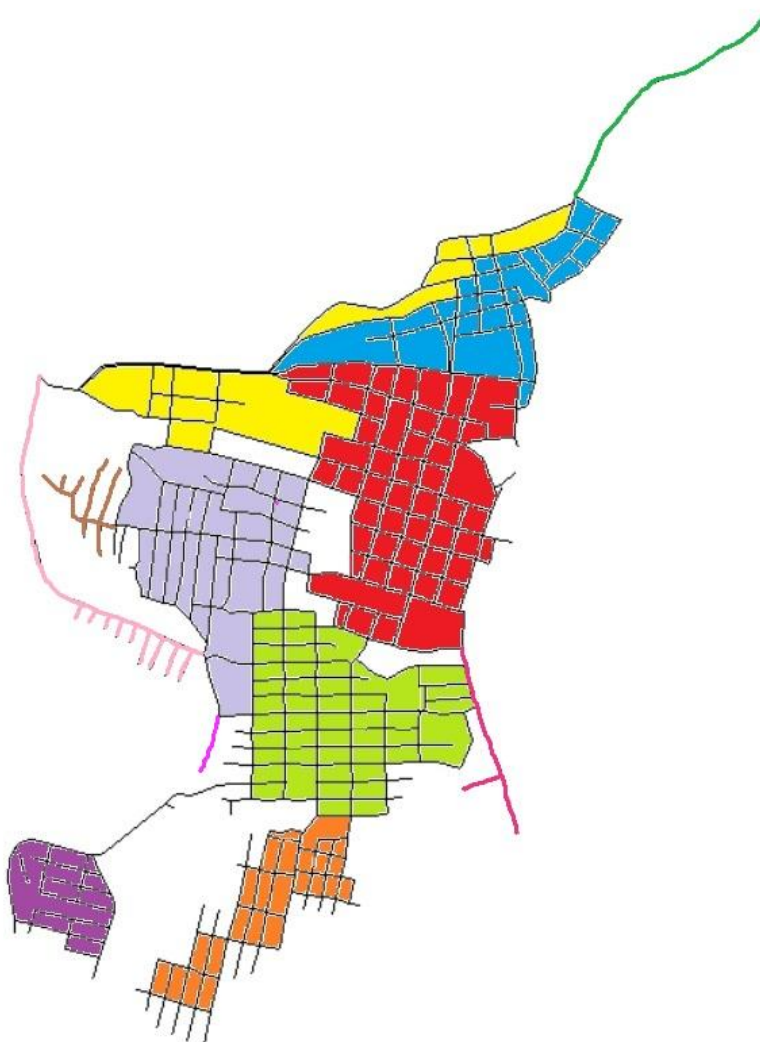
Los resultados obtenidos evidenciaron la presencia de presiones negativas en algunos sectores de la red bajo determinadas condiciones de demanda. Como alternativa de optimización se propuso la instalación de seis (6) válvulas reguladoras por estrangulación tipo TCV, ubicadas en puntos estratégicos de la red y la modificación de los diámetros de algunas tuberías principales y secundarias del sistema.

Esta alternativa buscó mejorar las condiciones de presión y distribución de caudal dentro de la red, con el propósito de aumentar la continuidad del servicio como una solución al problema de intermitencia que se presenta en el sistema y que limita la cantidad de agua que abastece a la población.

Con el fin de facilitar el análisis de la red de distribución, se realizó una delimitación de la red conformada por doce zonas independientes. La Figura 11 muestra la división de la red de estas zonas, identificadas mediante colores amarillo, azul, gris, marrón, rojo, verde claro, naranja, morado, rosado oscuro, fucsia, rosado claro y verde oscuro.

Figura 11

Delimitación del sistema de distribución



La ubicación de las válvulas propuestas para la optimización se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9

Válvulas TCV propuestas para el sistema de distribución

Válvula	Ubicación	Función	Estado en la simulación
V1	Embalse – Nodo 149	Regulación y control de flujo	Sin estado forzado
V2	Nodo 522 – Nodo 3	Regulación y control de flujo	Abierta
V3	Nodo 522 – Nodo 31	Regulación y control de flujo	Sin estado forzado
V4	Nodo 522 – Nodo 2	Regulación y control de flujo	Sin estado forzado
V5	Nodo 593 – Nodo 59	Regulación y control de flujo	Abierta
V6	Nodo 593 – Nodo 87	Regulación y control de flujo	Abierta

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la simulación hidráulica en EPANET 2.2.

Adicionalmente, fue necesario modificar los diámetros de algunas tuberías con el fin de optimizar las condiciones hidráulicas de la red. Los cambios realizados se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10

Modificación de diámetros en tuberías

Tubería	Diámetro existente (pulg)	Diámetro propuesto (pulg)
798	4	10
51	4	10
52	4	10
53	4	10
143	4	10
144	4	10
145	4	10
666	4	10
22	2	10

Tubería	Diámetro existente (pulg)	Diámetro propuesto (pulg)
668	2	10
669	2	10
670	2	10
671	2	10
672	2	10
673	2	10
674	2	10
675	2	10
676	2	10
677	2	10
678	2	10
679	2	10
325	2	8
326	2	8
307	2	8
308	2	8
309	2	8
310	2	8
339	2	8
341	2	6
342	2	6
354	2	6
355	2	6
682	2	6
683	2	6
684	2	6
685	2	6
686	2	6
687	2	6
688	2	6
689	2	6
690	2	6
691	2	6
438	2	6
439	2	6
440	2	6
441	2	6
442	2	6
443	2	6
444	2	6
445	2	6
460	2	6
468	2	6
478	2	6
547	2	6
548	2	6
549	2	6

Tubería	Diámetro existente (pulg)	Diámetro propuesto (pulg)
550	2	6
551	2	6
566	2	6
568	2	6
574	2	6
523	2	6
796	2	6
521	2	6
520	2	6
519	2	6
708	2	6
709	2	6
710	2	6
711	2	6
712	2	6
713	2	6
715	2	6
716	2	6
717	2	6

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la simulación hidráulica en EPANET 2.2.

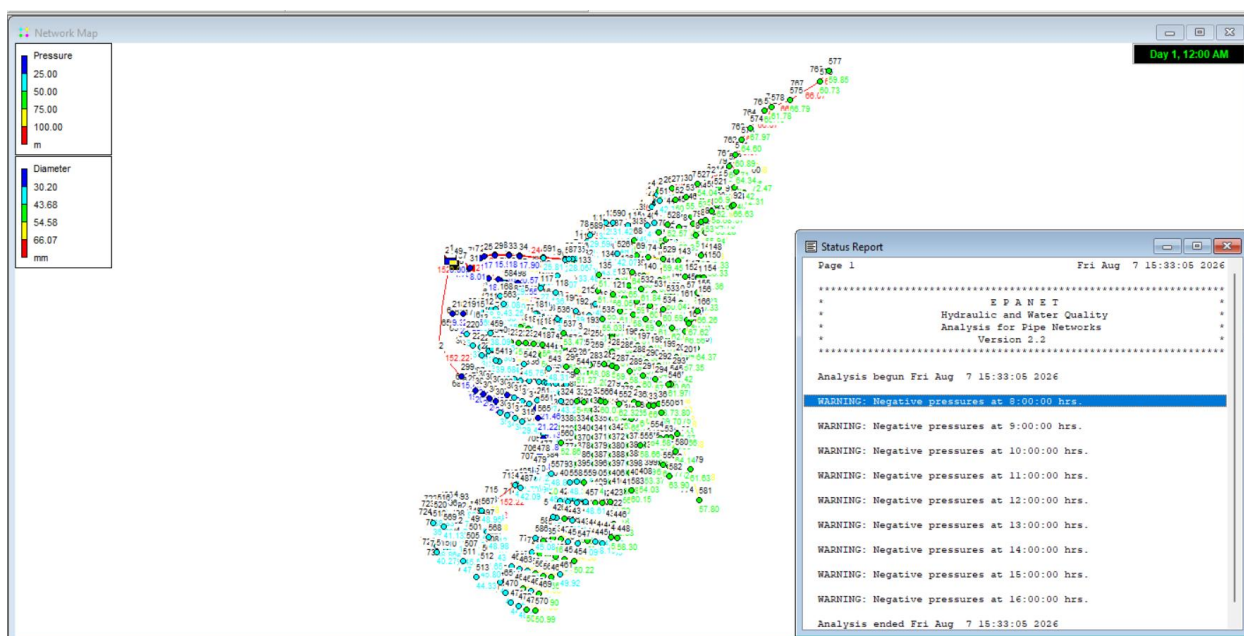
Los ajustes propuestos se concentraron principalmente en los tramos de la red que tienen mayor importancia en la distribución del agua, especialmente en la red principal. Estas tuberías presentan condiciones que afectan el funcionamiento del sistema, debido a que sus diámetros actuales no permiten transportar adecuadamente el caudal requerido. Por esta razón, las modificaciones propuestas se centraron inicialmente en estos tramos principales y, posteriormente, en las tuberías secundarias que presenten mayores dificultades de operación.

4.11.5 Resultados de la red actual optimizada

Los resultados obtenidos a partir de la implementación de la propuesta de optimización se presentan en la Figura 12.

Figura 12

Resultados de la modelación hidráulica de la red optimizada



Una vez implementada la propuesta, se evaluó nuevamente el comportamiento hidráulico de la red. Los resultados permitieron analizar el comportamiento de las diferentes zonas de la red durante las horas críticas de operación especialmente entre las 8:00 y las 16:00 horas. Los sectores que presentaron presiones negativas se resumen en la Tabla 11.

Tabla 11*Sectores con presiones negativas*

Hora	Sectores con presiones negativas	Observación
8:00	Sector amarillo, morado, naranja, fucsia y marrón	Se presentan deficiencias de abastecimiento en algunos nodos
9:00	Sector amarillo, morado, naranja, fucsia y marrón	Se presentan deficiencias de abastecimiento en algunos nodos.
10:00	Sector amarillo, verde oscuro, verde claro, morado, naranja, rojo, fucsia, azul, rosado y marrón	Se presentan deficiencias de abastecimiento en algunos nodos.
11:00	Sector amarillo, verde oscuro, verde claro, morado, naranja, rojo, fucsia, azul, rosado y marrón	Se presentan deficiencias de abastecimiento en algunos nodos.
12:00	Sector amarillo, verde oscuro, verde claro, morado, naranja, rojo, fucsia, azul, rosado y marrón	Se presentan deficiencias de abastecimiento en algunos nodos.
13:00	Sector amarillo, verde oscuro, morado, naranja, azul y marrón	Se presentan deficiencias de abastecimiento en algunos nodos.
14:00	Sector amarillo, morado, naranja, fucsia y marrón	Se presentan deficiencias de abastecimiento en algunos nodos.
15:00	Sector amarillo, morado, naranja, fucsia y marrón	Se presentan deficiencias de abastecimiento en algunos nodos.
16:00	Sector amarillo, morado, naranja, fucsia y marrón	Se presentan deficiencias de abastecimiento en algunos nodos

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la simulación hidráulica en EPANET 2.2

De acuerdo con los resultados obtenidos, los sectores amarillo, morado, naranja y marrón, ubicados principalmente en las zonas noroccidental, occidental y sur del casco urbano, presentaron las mayores deficiencias hidráulicas, registrando presiones negativas de manera continua entre las 8:00 y las 14:00, lo que evidencia un comportamiento crítico durante el periodo de mayor demanda del sistema.

Asimismo, entre las 10:00 y las 12:00 se identificaron condiciones desfavorables adicionales en los sectores verde oscuro, verde claro, rojo, fucsia, azul y rosado, evidenciando que estas horas corresponden al periodo con mayor exigencia hidráulica del sistema. La Tabla 12 presenta la clasificación horaria de los sectores durante el periodo de mayor demanda, permitiendo identificar aquellas zonas que presentan condiciones de presión insuficiente y aquellas que mantienen un comportamiento adecuado.

Tabla 12

Rango de presión durante el periodo de mayor demanda

Hora	Sectores con presión (0-15 m.c.a.)	Sectores con presión adecuada (15-60 m.c.a.)
8:00	marrón, rosado claro, verde claro, amarillo, rojo	gris
9:00	marrón, rosado claro y oscuro, verde claro, amarillo, rojo	gris
10:00	marrón, verde claro, amarillo, rojo	gris
11:00	marrón, verde claro, amarillo, rojo	gris
12:00	marrón, verde claro, amarillo, rojo	gris
13:00	marrón, rosado claro y oscuro, verde claro, amarillo, rojo	gris
14:00	marrón, rosado claro y oscuro, verde claro, amarillo, rojo y azul	gris, rojo
15:00	marrón, rosado claro y oscuro, verde claro, amarillo, rojo y azul	gris, rojo
16:00	marrón, rosado claro, verde claro, morado, naranja, amarillo, rojo y azul	gris, rojo, azul

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la simulación hidráulica en EPANET 2.2.

Posteriormente, se evaluó el comportamiento hidráulico de la red durante las 24 horas, con el propósito de identificar las variaciones de presión. En este análisis se evidenció que, durante las horas de menor consumo, algunos puntos presentaron incrementos de presión superiores al límite recomendado, mientras que durante las horas de mayor demanda predominaron las presiones bajas. La Tabla 13 resume el comportamiento de la red durante las 24 horas.

Tabla 13

Comportamiento hidráulico de la modelación

Periodo horario	Comportamiento observado
0:00 – 7:00	Se presentan condiciones hidráulicas variables, con sectores que mantienen presiones dentro del rango adecuado (15–60 m.c.a.); sin embargo, algunos puntos registran valores superiores a 60 m.c.a., asociados a la disminución de la demanda durante las horas de menor consumo.
8:00 – 16:00	Se observa una reducción de las presiones debido al incremento de la demanda, presentándose principalmente sectores con valores negativos e inferiores a 15 m.c.a., y algunos sectores dentro del rango adecuado de operación.
17:00 – 24:00	Se evidencia una recuperación progresiva de las presiones, con sectores que operan dentro del rango adecuado; no obstante, algunos puntos presentan valores superiores a 60 m.c.a. durante las horas de menor consumo.

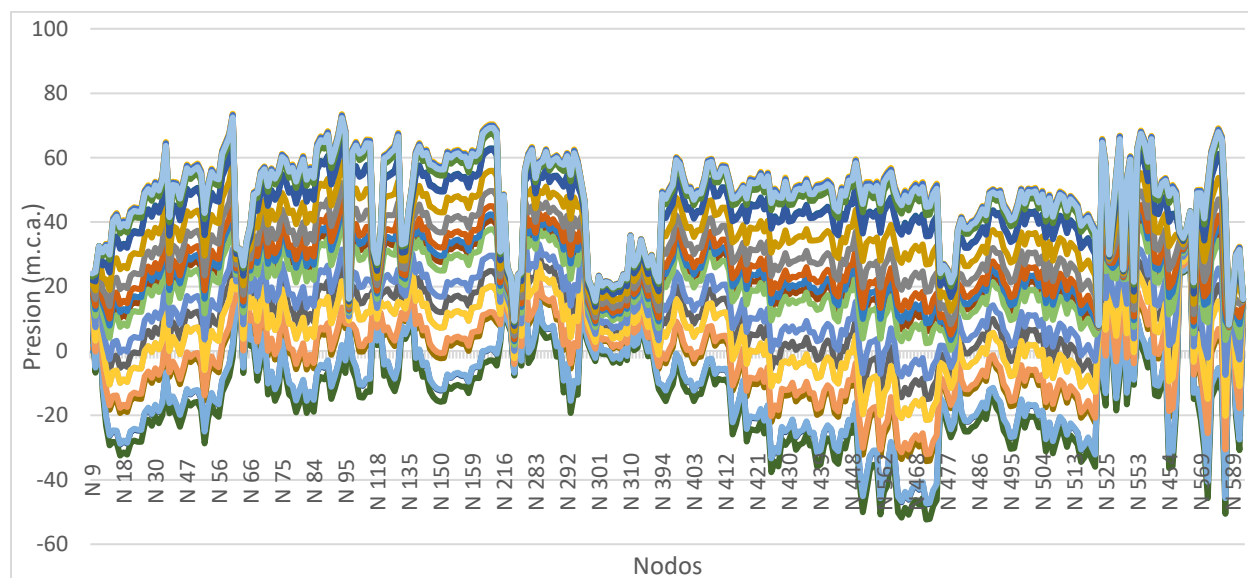
Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la simulación hidráulica en EPANET 2.2.

4.11.6 Análisis de la red actual optimizada

La implementación de la propuesta de optimización permitió mejorar la distribución hidráulica de la red respecto a la condición inicial; sin embargo, los resultados evidencian que el sistema aún presenta deficiencias que impiden el cumplimiento de los criterios establecidos en la Resolución 0330 de 2017.

Durante el periodo de mayor demanda, comprendido entre las 8:00 y las 16:00, se identificaron sectores con presiones inferiores a la presión dinámica mínima de 15 m.c.a. Adicionalmente, durante los periodos de menor consumo se registraron presiones superiores a 60 m.c.a. Estos resultados muestran que, aunque la optimización mejora las condiciones de operación de la red, aún persisten sectores que requieren ajustes para garantizar un comportamiento hidráulico acorde con los criterios establecidos por la normativa vigente.

En la Figura 13 se puede observar gráficamente el comportamiento de las presiones.

Figura 13*Grafica de presiones máximas y mínimas*

4.11.7 Consideraciones para la optimización del escenario

Con base en los resultados obtenidos, se identifican algunos aspectos que pueden contribuir a mejorar el comportamiento hidráulico de la red.

En primer lugar, es necesario disponer de información detallada sobre la ubicación, el estado y las condiciones de operación de las válvulas existentes, ya que esta información no fue suministrada y permitiría representar con mayor precisión el funcionamiento del sistema.

Asimismo, en las zonas donde se presentaron presiones inferiores a 15 m.c.a. se recomienda optimizar los diámetros de las tuberías en los tramos críticos, con el fin de reducir las pérdidas de carga y mejorar las condiciones de abastecimiento. Por otra parte, los nodos que registran presiones mayores a 60 m.c.a. requieren la implementación de medidas como la instalación de válvulas reguladoras de presión o ajustes en la configuración hidráulica de la red, con el fin de disminuir los esfuerzos de las tuberías y reducir el riesgo de fugas y daños en la infraestructura.

4.12 Propuesta de red optimizada para operación continua 24/7

Los resultados obtenidos en la primera propuesta de optimización evidenciaron una mejora en el comportamiento hidráulico del sistema; sin embargo, aún persistían presiones negativas en algunas zonas de la red durante las horas de mayor demanda. Con el fin de corregir estas condiciones y garantizar la operación continua del sistema, se desarrolló una propuesta de optimización de la red de distribución.

4.12.1 Alternativa de solución para la red optimizada 24/7

La propuesta consistió en la modificación de la mayoría de los diámetros de las tuberías, manteniendo la misma disposición de válvulas previamente establecida. Esta optimización permitió reducir las pérdidas de carga, mejorar la distribución de las presiones y garantizar un

suministro continuo de agua durante 24 horas al día, asegurando que el agua llegue a todas las zonas del casco urbano.

La Figura 14 presenta la red optimizada, mientras que la Tabla 14 resume los resultados obtenidos para los nodos representativos durante el periodo de mayor demanda.

Figura 14

Red optimizada en funcionamiento continuo 24/7

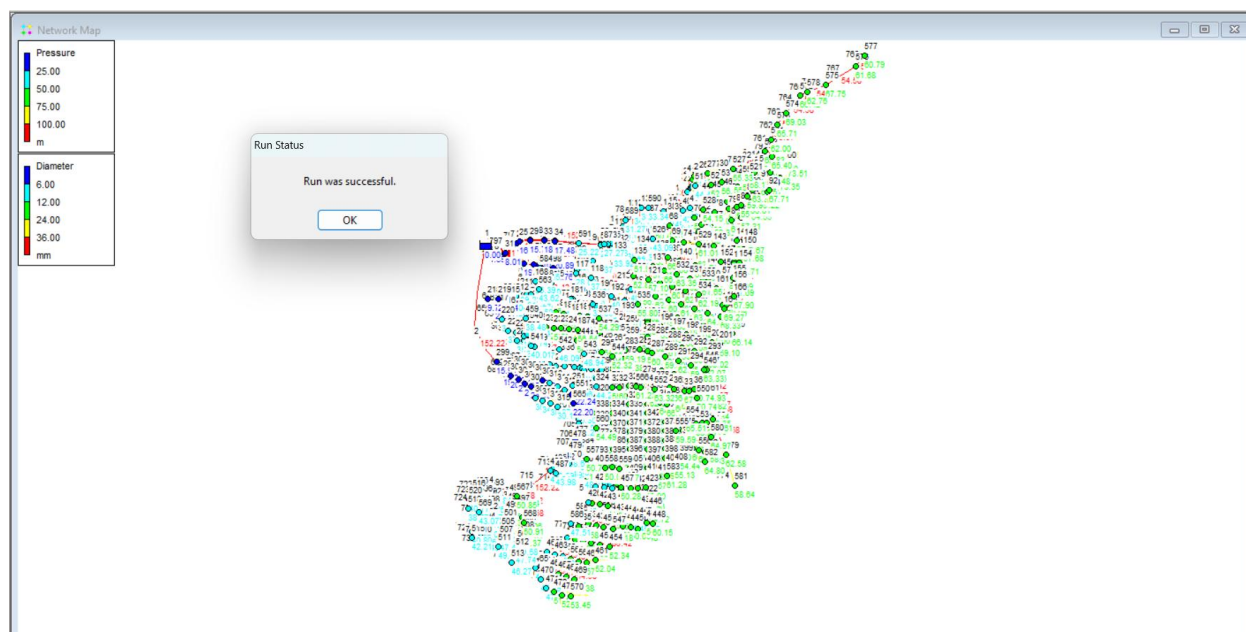


Tabla 14*Resultados hidráulicos de la red optimizada 24/7 en horas pico*

Nodos	Hora								
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
N 797	3.78	3.49	3.28	3.21	3.29	3.52	3.68	3.68	3.88
N 4	14.53	13.95	13.53	13.39	13.54	14.01	14.34	14.34	14.73
N 5	15.02	14.41	13.98	13.83	13.99	14.48	14.82	14.82	15.23
N 6	16.02	15.26	14.72	14.53	14.73	15.34	15.77	15.77	16.28
N 7	15.24	14.42	13.85	13.65	13.87	14.51	14.96	14.96	15.51
N 8	20.33	18.64	17.46	17.04	17.48	18.83	19.76	19.76	20.89
N 9	19.75	17.85	16.52	16.05	16.55	18.06	19.11	19.11	20.38
N 10	18.18	13.82	10.77	9.71	10.84	14.30	16.72	16.72	19.64
N 11	25.11	22.84	21.26	20.70	21.29	23.09	24.35	24.35	25.86
N 12	22.51	18.75	16.12	15.21	16.19	19.17	21.25	21.25	23.77
N 13	18.70	14.49	11.55	10.53	11.62	14.96	17.29	17.29	20.11
N 14	25.47	20.07	16.30	14.99	16.40	20.68	23.66	23.66	27.27
N 15	26.29	20.65	16.72	15.35	16.82	21.28	24.40	24.40	28.17
N 16	19.86	13.29	8.71	7.11	8.82	14.03	17.66	17.66	22.05
N 17	20.70	14.05	9.42	7.80	9.53	14.80	18.47	18.47	22.91
N 18	19.95	13.33	8.71	7.09	8.82	14.07	17.74	17.74	22.16
N 19	22.74	15.75	10.88	9.18	11.00	16.53	20.40	20.40	25.07
N 20	22.63	15.34	10.25	8.48	10.38	16.16	20.19	20.19	25.06
N 21	22.20	14.87	9.75	7.97	9.88	15.69	19.74	19.74	24.64
N 22	22.20	14.88	9.76	7.98	9.89	15.70	19.75	19.75	24.65
N 23	26.77	19.15	13.83	11.98	13.96	20.00	24.22	24.22	29.31
N 24	27.82	20.07	14.65	12.76	14.78	20.93	25.23	25.23	30.41
N 26	25.27	17.30	11.74	9.80	11.88	18.19	22.60	22.60	27.93
N 27	27.40	19.17	13.42	11.41	13.56	20.09	24.64	24.64	30.15
N 30	24.18	15.49	9.42	7.30	9.57	16.46	21.27	21.27	27.08
N 32	24.83	15.30	8.66	6.34	8.82	16.37	21.64	21.64	28.00
N 35	33.29	23.14	16.05	13.58	16.23	24.27	29.89	29.89	36.68
N 36	16.76	12.16	8.95	7.83	9.03	12.68	15.22	15.22	18.30
N 37	27.76	22.48	18.80	17.51	18.89	23.07	25.99	25.99	29.52
N 38	30.92	25.27	21.32	19.95	21.42	25.90	29.02	29.02	32.80
N 39	30.99	25.15	21.06	19.64	21.16	25.80	29.04	29.04	32.95
N 40	23.06	16.96	12.69	11.21	12.80	17.64	21.02	21.02	25.10
N 41	23.48	17.20	12.82	11.30	12.93	17.91	21.38	21.38	25.57
N 42	30.26	22.90	17.77	15.98	17.89	23.72	27.79	27.79	32.71
N 43	28.88	21.17	15.78	13.90	15.91	22.03	26.30	26.30	31.46
N 44	26.51	19.28	14.23	12.47	14.35	20.09	24.09	24.09	28.93
N 45	29.55	21.87	16.52	14.65	16.65	22.73	26.98	26.98	32.11
N 46	32.46	24.15	18.35	16.33	18.49	25.08	29.68	29.68	35.23
N 47	30.60	22.19	16.31	14.27	16.46	23.13	27.79	27.79	33.41
N 48	30.97	22.34	16.32	14.22	16.47	23.31	28.08	28.08	33.85
N 49	31.10	22.28	16.13	13.98	16.28	23.27	28.15	28.15	34.04
N 50	28.22	19.21	12.93	10.74	13.08	20.22	25.20	25.20	31.22
N 51	21.41	13.98	8.80	6.99	8.93	14.81	18.92	18.92	23.89
N 52	28.03	20.15	14.64	12.72	14.78	21.03	25.39	25.39	30.66
N 53	30.59	22.10	16.18	14.11	16.32	23.05	27.75	27.75	33.43
N 54	27.08	18.08	11.80	9.60	11.95	19.09	24.07	24.07	30.09
N 55	25.60	16.28	9.76	7.49	9.92	17.32	22.48	22.48	28.71
N 56	31.89	22.08	15.23	12.84	15.40	23.18	28.60	28.60	35.16
N 57	33.56	23.48	16.44	13.99	16.61	24.61	30.19	30.19	36.93
N 58	34.71	24.18	16.83	14.26	17.01	25.36	31.19	31.19	38.23
N 60	40.71	30.15	22.77	20.20	22.95	31.33	37.17	37.17	44.24
N 61	19.65	15.71	12.96	12.00	13.03	16.15	18.33	18.33	20.96
N 62	18.91	14.95	12.19	11.23	12.26	15.39	17.58	17.58	20.23
N 63	21.07	18.96	17.48	16.97	17.52	19.19	20.36	20.36	21.78
N 64	21.54	17.47	14.63	13.64	14.70	17.93	20.17	20.17	22.89
N 65	26.17	21.89	18.90	17.86	18.97	22.37	24.74	24.74	27.60
N 66	34.85	30.06	26.72	25.55	26.80	30.60	33.25	33.25	36.45
N 67	32.56	26.78	22.75	21.34	22.85	27.43	30.63	30.63	34.49
N 68	38.69	32.95	28.95	27.55	29.05	33.60	36.77	36.77	40.61
N 69	41.44	36.18	32.51	31.23	32.60	36.77	39.68	39.68	43.20
N 70	32.24	25.67	21.07	19.47	21.19	26.40	30.04	30.04	34.44
N 71	36.43	29.72	25.03	23.40	25.15	30.47	34.18	34.18	38.67
N 72	32.16	24.79	19.64	17.85	19.77	25.61	29.69	29.69	34.62
N 73	34.60	27.37	22.31	20.55	22.44	28.17	32.18	32.18	37.02
N 74	44.55	38.99	35.11	33.76	35.21	39.62	42.69	42.69	46.41
N 75	39.54	32.73	27.97	26.31	28.09	33.49	37.26	37.26	41.81

Nodos	Hora								
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
N 76	34.27	26.90	21.75	19.95	21.87	27.72	31.80	31.80	36.73
N 77	33.15	25.04	19.38	17.41	19.52	25.95	30.43	30.43	35.85
N 78	29.47	21.55	16.02	14.10	16.16	22.44	26.82	26.82	32.12
N 79	31.18	22.64	16.67	14.59	16.82	23.59	28.32	28.32	34.03
N 80	34.17	25.57	19.57	17.47	19.71	26.53	31.29	31.29	37.04
N 81	27.24	18.46	12.32	10.19	12.47	19.44	24.30	24.30	30.17
N 82	29.98	21.18	15.03	12.89	15.18	22.16	27.04	27.04	32.92
N 83	27.08	18.05	11.74	9.54	11.89	19.06	24.06	24.06	30.10
N 84	35.37	25.96	19.40	17.11	19.56	27.01	32.22	32.22	38.50
N 85	37.26	27.77	21.14	18.83	21.30	28.83	34.08	34.08	40.43
N 86	36.49	26.98	20.34	18.02	20.50	28.04	33.31	33.31	39.66
N 88	37.11	27.09	20.09	17.65	20.26	28.21	33.75	33.75	40.45
N 89	30.65	21.20	14.61	12.31	14.77	22.26	27.49	27.49	33.80
N 90	33.12	23.38	16.58	14.21	16.75	24.47	29.86	29.86	36.37
N 91	35.93	25.76	18.65	16.18	18.83	26.89	32.53	32.53	39.33
N 93	40.67	30.14	22.79	20.22	22.97	31.32	37.14	37.14	44.18
N 94	36.03	25.58	18.28	15.74	18.46	26.75	32.53	32.53	39.52
N 95	14.08	13.30	12.75	12.56	12.77	13.39	13.82	13.82	14.34
N 96	22.26	21.54	21.04	20.87	21.06	21.63	22.02	22.02	22.50
N 97	18.41	17.62	17.06	16.87	17.08	17.71	18.15	18.15	18.68
N 98	20.35	19.57	19.03	18.82	19.03	19.65	20.08	20.08	20.60
N 99	21.87	20.48	19.51	19.17	19.53	20.63	21.40	21.40	22.33
N 100	25.90	24.45	23.45	23.09	23.47	24.61	25.41	25.41	26.38
N 101	25.27	23.89	22.93	22.59	22.95	24.04	24.81	24.81	25.73
N 102	19.72	19.03	18.55	18.39	18.57	19.11	19.49	19.49	19.95
N 103	17.60	16.93	16.47	16.30	16.48	17.01	17.38	17.38	17.83
N 104	17.09	16.48	16.05	15.90	16.06	16.54	16.88	16.88	17.30
N 105	27.94	27.10	26.50	26.28	26.50	27.18	27.65	27.65	28.21
N 106	24.25	22.37	21.06	20.60	21.09	22.58	23.62	23.62	24.88
N 107	38.22	34.57	32.02	31.13	32.08	34.98	37.00	37.00	39.44
N 108	44.71	39.13	35.23	33.87	35.33	39.75	42.84	42.84	46.58
N 109	43.57	37.18	32.71	31.16	32.82	37.89	41.43	41.43	45.71
N 110	42.18	35.36	30.60	28.94	30.72	36.12	39.89	39.89	44.45
N 111	43.29	36.11	31.09	29.34	31.21	36.91	40.89	40.89	45.69
N 112	38.63	30.80	25.34	23.43	25.47	31.68	36.01	36.01	41.24
N 113	38.83	30.79	25.17	23.21	25.31	31.68	36.13	36.13	41.51
N 114	40.95	32.81	27.12	25.14	27.26	33.72	38.22	38.22	43.67
N 115	40.81	32.64	26.94	24.96	27.08	33.56	38.07	38.07	43.53
N 116	26.95	25.30	24.15	23.75	24.18	25.48	26.39	26.39	27.50
N 117	21.69	19.66	18.23	17.74	18.27	19.88	21.01	21.01	22.37
N 118	29.62	27.12	25.38	24.77	25.42	27.40	28.78	28.78	30.45
N 119	38.16	34.59	32.09	31.22	32.16	34.99	36.97	36.97	39.35
N 120	42.44	37.95	34.82	33.73	34.90	38.45	40.93	40.93	43.93
N 122	39.23	34.85	31.79	30.72	31.86	35.34	37.76	37.76	40.69
N 123	45.56	40.11	36.31	34.98	36.40	40.72	43.74	43.74	47.38
N 124	44.53	39.25	35.56	34.27	35.65	39.84	42.76	42.76	46.29
N 125	40.70	34.39	29.98	28.44	30.09	35.09	38.58	38.58	42.80
N 126	42.03	36.00	31.80	30.33	31.90	36.68	40.01	40.01	44.04
N 127	40.52	33.78	29.07	27.43	29.19	34.53	38.26	38.26	42.76
N 128	41.63	35.03	30.43	28.82	30.54	35.77	39.42	39.42	43.83
N 129	40.94	33.72	28.68	26.93	28.81	34.53	38.52	38.52	43.34
N 130	40.38	32.64	27.24	25.36	27.37	33.50	37.79	37.79	42.96
N 131	44.25	36.50	31.08	29.19	31.21	37.36	41.66	41.66	46.84
N 132	21.01	17.03	14.25	13.28	14.32	17.48	19.68	19.68	22.34
N 133	21.14	17.02	14.15	13.15	14.22	17.48	19.76	19.76	22.52
N 134	30.67	26.27	23.20	22.13	23.28	26.77	29.20	29.20	32.14
N 135	37.95	33.46	30.32	29.22	30.39	33.96	36.45	36.45	39.45
N 136	38.28	33.45	30.08	28.90	30.16	33.99	36.66	36.66	39.89
N 137	42.20	37.36	33.98	32.80	34.06	37.90	40.57	40.57	43.81
N 138	50.61	45.54	42.00	40.77	42.09	46.11	48.91	48.91	52.30
N 139	50.28	45.20	41.66	40.42	41.75	45.77	48.58	48.58	51.97
N 140	50.19	44.43	40.40	39.00	40.50	45.07	48.26	48.26	52.12
N 141	41.60	34.87	30.18	28.54	30.29	35.63	39.35	39.35	43.84
N 142	45.16	38.72	34.22	32.66	34.33	39.44	43.01	43.01	47.31
N 143	40.56	33.53	28.62	26.91	28.74	34.32	38.21	38.21	42.91
N 144	41.62	34.69	29.84	28.16	29.96	35.46	39.30	39.30	43.93
N 145	37.10	29.86	24.80	23.04	24.93	30.67	34.67	34.67	39.51
N 146	32.07	23.42	17.38	15.27	17.53	24.38	29.17	29.17	34.96
N 147	31.14	22.49	16.45	14.34	16.60	23.46	28.24	28.24	34.03
N 148	30.15	21.29	15.09	12.94	15.25	22.28	27.18	27.18	33.11
N 150	30.29	21.46	15.30	13.15	15.45	22.45	27.33	27.33	33.23
N 151	35.05	26.28	20.16	18.02	20.31	27.26	32.11	32.11	37.97
N 152	34.06	25.25	19.10	16.96	19.26	26.24	31.11	31.11	36.99

Nodos	Hora								
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
N 153	35.18	26.41	20.29	18.16	20.44	27.39	32.25	32.25	38.11
N 154	35.35	26.54	20.38	18.23	20.53	27.52	32.40	32.40	38.29
N 155	34.72	26.07	20.02	17.92	20.17	27.03	31.83	31.83	37.61
N 156	34.81	26.15	20.10	18.00	20.25	27.12	31.91	31.91	37.70
N 157	36.07	28.69	23.54	21.74	23.67	29.52	33.60	33.60	38.53
N 158	40.35	33.08	28.01	26.24	28.13	33.89	37.91	37.91	42.77
N 159	40.08	32.97	28.01	26.28	28.13	33.76	37.70	37.70	42.45
N 160	40.78	33.54	28.48	26.72	28.60	34.35	38.35	38.35	43.19
N 161	45.98	38.57	33.39	31.59	33.52	39.40	43.50	43.50	48.45
N 162	46.40	38.74	33.39	31.52	33.52	39.59	43.83	43.83	48.95
N 163	46.98	39.29	33.92	32.05	34.05	40.15	44.41	44.41	49.55
N 164	46.98	39.29	33.92	32.05	34.05	40.15	44.41	44.41	49.55
N 165	45.40	37.71	32.34	30.47	32.47	38.57	42.82	42.82	47.97
N 166	43.97	36.26	30.88	29.00	31.01	37.12	41.39	41.39	46.54
N 167	36.38	35.52	34.92	34.71	34.93	35.62	36.09	36.09	36.67
N 169	33.53	32.65	32.04	31.82	32.05	32.75	33.24	33.24	33.83
N 170	36.55	35.66	35.04	34.83	35.06	35.76	36.25	36.25	36.84
N 171	39.14	38.23	37.59	37.37	37.61	38.33	38.84	38.84	39.45
N 172	48.35	47.01	46.07	45.75	46.09	47.16	47.90	47.90	48.80
N 173	46.69	45.09	43.97	43.58	43.99	45.27	46.15	46.15	47.22
N 174	42.54	40.65	39.33	38.87	39.36	40.86	41.91	41.91	43.17
N 175	39.58	37.44	35.94	35.42	35.98	37.67	38.86	38.86	40.29
N 176	37.88	35.63	34.06	33.52	34.10	35.89	37.13	37.13	38.63
N 177	34.30	32.10	30.56	30.03	30.60	32.34	33.56	33.56	35.03
N 178	34.34	32.11	30.55	30.01	30.59	32.36	33.60	33.60	35.09
N 179	34.28	32.04	30.48	29.93	30.51	32.29	33.53	33.53	35.03
N 180	33.49	31.25	29.68	29.14	29.72	31.50	32.74	32.74	34.24
N 181	33.04	30.79	29.22	28.68	29.26	31.04	32.28	32.28	33.79
N 182	48.15	46.66	45.61	45.25	45.64	46.82	47.65	47.65	48.65
N 183	48.91	47.17	45.95	45.53	45.98	47.36	48.32	48.32	49.49
N 184	48.41	46.40	45.01	44.52	45.04	46.63	47.74	47.74	49.07
N 185	46.56	44.32	42.76	42.21	42.80	44.57	45.81	45.81	47.30
N 186	47.02	44.64	42.98	42.40	43.02	44.90	46.22	46.22	47.81
N 188	46.35	43.85	42.11	41.50	42.15	44.13	45.51	45.51	47.18
N 189	35.67	32.83	30.85	30.16	30.90	33.15	34.72	34.72	36.61
N 190	23.80	21.30	19.55	18.94	19.59	21.58	22.96	22.96	24.63
N 191	39.61	36.58	34.47	33.73	34.52	36.92	38.60	38.60	40.62
N 192	31.59	28.83	26.90	26.23	26.95	29.14	30.66	30.66	32.51
N 193	41.28	37.56	34.96	34.06	35.03	37.97	40.03	40.03	42.52
N 194	42.69	36.95	32.94	31.54	33.04	37.59	40.77	40.77	44.60
N 195	42.60	36.81	32.78	31.37	32.87	37.46	40.66	40.66	44.53
N 196	43.62	37.10	32.55	30.96	32.66	37.83	41.44	41.44	45.80
N 197	43.73	36.87	32.07	30.40	32.19	37.63	41.43	41.43	46.02
N 198	38.12	30.94	25.92	24.17	26.04	31.74	35.72	35.72	40.52
N 199	34.95	27.03	21.50	19.57	21.64	27.92	32.30	32.30	37.60
N 200	33.70	25.51	19.79	17.79	19.93	26.42	30.96	30.96	36.44
N 201	33.69	25.50	19.79	17.79	19.93	26.42	30.95	30.95	36.42
N 202	39.05	38.11	37.45	37.22	37.47	38.22	38.74	38.74	39.37
N 203	38.52	37.56	36.89	36.66	36.91	37.67	38.20	38.20	38.84
N 204	37.57	36.59	35.90	35.67	35.92	36.70	37.24	37.24	37.89
N 205	36.29	35.28	34.58	34.34	34.60	35.40	35.95	35.95	36.63
N 206	35.69	34.64	33.90	33.65	33.92	34.75	35.34	35.34	36.04
N 207	36.93	35.40	34.33	33.96	34.36	35.57	36.42	36.42	37.44
N 208	30.28	28.76	27.70	27.33	27.73	28.93	29.77	29.77	30.79
N 209	39.38	38.45	37.81	37.59	37.83	38.56	39.07	39.07	39.69
N 210	30.99	29.49	28.44	28.08	28.47	29.66	30.49	30.49	31.49
N 211	33.88	32.15	30.95	30.53	30.98	32.35	33.30	33.30	34.45
N 212	27.96	26.23	25.03	24.61	25.06	26.43	27.38	27.38	28.53
N 213	27.19	25.48	24.28	23.87	24.31	25.67	26.62	26.62	27.76
N 214	31.72	30.03	28.85	28.44	28.88	30.22	31.15	31.15	32.28
N 215	21.47	19.67	18.42	17.98	18.45	19.87	20.87	20.87	22.07
N 216	20.70	18.91	17.65	17.22	17.68	19.11	20.10	20.10	21.30
N 217	17.77	15.96	14.70	14.26	14.73	16.16	17.16	17.16	18.37
N 218	4.12	2.31	1.05	0.61	1.08	2.51	3.51	3.51	4.72
N 219	18.23	16.42	15.16	14.72	15.19	16.63	17.63	17.63	18.83
N 220	27.93	26.19	24.97	24.54	25.00	26.38	27.35	27.35	28.51
N 221	32.47	30.78	29.60	29.18	29.63	30.97	31.90	31.90	33.04
N 222	31.78	30.27	29.22	28.85	29.24	30.44	31.27	31.27	32.28
N 223	30.85	29.34	28.29	27.92	28.31	29.51	30.34	30.34	31.35
N 224	35.23	34.18	33.44	33.18	33.46	34.29	34.88	34.88	35.58
N 225	33.15	32.10	31.36	31.10	31.38	32.22	32.80	32.80	33.51
N 226	33.74	32.51	31.65	31.36	31.68	32.65	33.33	33.33	34.15
N 227	44.81	43.34	42.32	41.96	42.34	43.51	44.32	44.32	45.30

Nodos	Hora								
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
N 228	41.38	39.48	38.15	37.69	38.18	39.69	40.75	40.75	42.02
N 230	34.92	32.88	31.45	30.95	31.49	33.10	34.23	34.23	35.60
N 231	30.69	28.56	27.07	26.55	27.10	28.79	29.97	29.97	31.40
N 232	47.32	45.61	44.42	44.01	44.45	45.80	46.75	46.75	47.89
N 233	27.69	25.46	23.91	23.36	23.94	25.71	26.95	26.95	28.44
N 234	23.43	21.12	19.50	18.94	19.54	21.38	22.66	22.66	24.20
N 235	47.57	45.65	44.32	43.85	44.35	45.87	46.93	46.93	48.21
N 236	28.20	25.71	23.97	23.36	24.01	25.99	27.36	27.36	29.03
N 237	24.87	22.49	20.83	20.25	20.87	22.76	24.07	24.07	25.66
N 238	47.17	45.05	43.57	43.06	43.61	45.29	46.46	46.46	47.88
N 239	27.89	25.26	23.42	22.78	23.47	25.55	27.01	27.01	28.76
N 240	47.78	45.46	43.83	43.27	43.87	45.72	47.00	47.00	48.56
N 241	27.49	24.78	22.88	22.22	22.93	25.08	26.59	26.59	28.40
N 242	49.23	46.59	44.75	44.10	44.79	46.89	48.35	48.35	50.12
N 243	45.02	42.14	40.13	39.43	40.18	42.46	44.05	44.05	45.98
N 244	46.32	43.71	41.89	41.26	41.94	44.00	45.45	45.45	47.19
N 245	44.84	41.60	39.33	38.54	39.39	41.96	43.76	43.76	45.93
N 246	37.97	34.87	32.71	31.96	32.76	35.22	36.93	36.93	39.00
N 247	34.02	30.80	28.55	27.76	28.60	31.16	32.94	32.94	35.10
N 248	29.44	26.11	23.79	22.98	23.85	26.48	28.33	28.33	30.55
N 249	31.31	28.55	26.62	25.95	26.67	28.86	30.39	30.39	32.23
N 250	33.42	30.70	28.80	28.14	28.85	31.00	32.51	32.51	34.32
N 252	16.26	13.40	11.40	10.71	11.45	13.72	15.30	15.30	17.21
N 253	46.49	43.19	40.89	40.09	40.94	43.56	45.38	45.38	47.59
N 254	42.97	39.17	36.51	35.58	36.57	39.59	41.70	41.70	44.24
N 255	43.93	40.12	37.45	36.52	37.52	40.54	42.65	42.65	45.20
N 256	46.53	42.98	40.49	39.63	40.55	43.38	45.34	45.34	47.72
N 257	48.32	45.13	42.90	42.12	42.95	45.49	47.25	47.25	49.39
N 258	43.94	40.03	37.31	36.36	37.37	40.47	42.63	42.63	45.24
N 259	45.05	40.84	37.90	36.87	37.97	41.31	43.64	43.64	46.46
N 260	43.11	39.35	36.72	35.80	36.78	39.77	41.85	41.85	44.37
N 261	41.41	37.43	34.65	33.68	34.71	37.87	40.07	40.07	42.74
N 262	29.50	26.10	23.72	22.90	23.78	26.48	28.36	28.36	30.63
N 263	27.80	24.34	21.92	21.08	21.98	24.72	26.64	26.64	28.95
N 264	33.32	29.70	27.18	26.30	27.24	30.11	32.11	32.11	34.53
N 265	33.70	29.95	27.34	26.42	27.40	30.37	32.44	32.44	34.95
N 266	39.47	35.20	32.22	31.18	32.29	35.68	38.04	38.04	40.89
N 267	45.76	41.13	37.90	36.77	37.98	41.65	44.21	44.21	47.31
N 268	32.03	28.12	25.39	24.44	25.46	28.56	30.72	30.72	33.34
N 269	41.37	37.01	33.97	32.91	34.04	37.50	39.91	39.91	42.83
N 270	45.62	40.95	37.70	36.56	37.78	41.48	44.06	44.06	47.18
N 271	44.51	39.70	36.34	35.17	36.42	40.23	42.89	42.89	46.11
N 272	42.50	37.61	34.19	33.00	34.28	38.15	40.86	40.86	44.13
N 273	42.48	37.59	34.17	32.98	34.26	38.14	40.84	40.84	44.11
N 274	46.32	41.42	38.01	36.82	38.09	41.97	44.68	44.68	47.95
N 275	45.92	41.27	38.01	36.88	38.09	41.79	44.36	44.36	47.48
N 276	43.90	38.47	34.67	33.35	34.77	39.08	42.08	42.08	45.72
N 277	39.48	32.48	27.60	25.90	27.72	33.27	37.13	37.13	41.81
N 278	40.53	33.57	28.72	27.03	28.84	34.35	38.20	38.20	42.85
N 279	40.90	34.98	30.85	29.42	30.96	35.65	38.92	38.92	42.87
N 280	39.83	32.76	27.82	26.10	27.94	33.55	37.47	37.47	42.19
N 281	41.77	34.69	29.75	28.03	29.87	35.48	39.40	39.40	44.14
N 282	37.21	31.57	27.63	26.26	27.73	32.20	35.32	35.32	39.10
N 283	45.14	40.62	37.46	36.36	37.54	41.12	43.63	43.63	46.65
N 284	41.72	35.87	31.78	30.36	31.88	36.52	39.76	39.76	43.67
N 285	42.61	36.06	31.48	29.88	31.59	36.79	40.42	40.42	44.80
N 286	40.48	34.65	30.58	29.17	30.68	35.31	38.53	38.53	42.43
N 287	39.55	32.92	28.29	26.68	28.40	33.66	37.33	37.33	41.76
N 288	39.62	32.67	27.82	26.13	27.94	33.44	37.29	37.29	41.93
N 289	37.66	30.66	25.77	24.07	25.89	31.45	35.32	35.32	40.00
N 290	37.24	30.11	25.13	23.39	25.25	30.91	34.86	34.86	39.62
N 291	40.06	32.97	28.02	26.30	28.15	33.76	37.69	37.69	42.42
N 292	31.30	23.25	17.63	15.67	17.77	24.15	28.61	28.61	33.99
N 293	37.10	28.75	22.92	20.88	23.06	29.68	34.30	34.30	39.89
N 294	33.82	25.57	19.82	17.81	19.96	26.49	31.06	31.06	36.57
N 295	40.86	36.97	34.26	33.31	34.33	37.41	39.56	39.56	42.16
N 296	34.06	29.95	27.09	26.09	27.16	30.41	32.68	32.68	35.42
N 297	16.34	14.29	12.86	12.37	12.90	14.52	15.65	15.65	17.02
N 298	13.56	11.51	10.07	9.57	10.11	11.74	12.88	12.88	14.25
N 299	10.07	8.18	6.86	6.40	6.89	8.39	9.44	9.44	10.70
N 300	16.92	14.78	13.27	12.75	13.31	15.02	16.21	16.21	17.64
N 301	14.12	11.96	10.45	9.92	10.49	12.20	13.39	13.39	14.84
N 302	14.94	12.68	11.11	10.57	11.15	12.94	14.18	14.18	15.69

Nodos	Hora								
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
N 303	14.51	12.25	10.67	10.12	10.71	12.50	13.75	13.75	15.27
N 304	12.94	10.59	8.95	8.38	8.99	10.85	12.15	12.15	13.72
N 305	13.74	11.37	9.72	9.15	9.76	11.64	12.95	12.95	14.53
N 306	13.61	11.17	9.47	8.88	9.51	11.44	12.79	12.79	14.42
N 307	16.52	14.06	12.35	11.75	12.39	14.34	15.70	15.70	17.34
N 308	15.24	12.71	10.94	10.33	10.98	12.99	14.39	14.39	16.08
N 309	28.02	25.40	23.56	22.92	23.61	25.69	27.14	27.14	28.90
N 310	19.05	16.42	14.59	13.95	14.64	16.72	18.17	18.17	19.92
N 311	20.53	17.82	15.92	15.26	15.97	18.12	19.62	19.62	21.44
N 312	26.53	23.80	21.90	21.24	21.95	24.11	25.61	25.61	27.43
N 313	22.16	19.35	17.39	16.71	17.44	19.67	21.22	21.22	23.10
N 314	18.59	15.79	13.84	13.16	13.89	16.10	17.65	17.65	19.52
N 315	21.13	18.24	16.23	15.52	16.28	18.57	20.17	20.17	22.10
N 316	15.46	12.48	10.39	9.67	10.44	12.81	14.46	14.46	16.46
N 317	12.03	8.69	6.35	5.54	6.41	9.06	10.91	10.91	13.15
N 318	22.53	18.86	16.30	15.41	16.36	19.27	21.30	21.30	23.76
N 319	32.02	28.15	25.46	24.52	25.52	28.59	30.72	30.72	33.31
N 320	37.35	33.20	30.30	29.29	30.37	33.66	35.96	35.96	38.74
N 321	39.49	34.96	31.81	30.71	31.88	35.47	37.97	37.97	40.99
N 322	39.30	35.05	32.08	31.04	32.15	35.52	37.88	37.88	40.72
N 323	39.37	34.68	31.40	30.26	31.48	35.20	37.80	37.80	40.94
N 324	31.78	27.74	24.93	23.94	24.99	28.19	30.42	30.42	33.12
N 325	41.63	37.19	34.09	33.00	34.16	37.68	40.14	40.14	43.11
N 326	46.11	41.44	38.18	37.04	38.26	41.96	44.55	44.55	47.67
N 327	45.52	40.71	37.35	36.18	37.43	41.25	43.91	43.91	47.13
N 328	46.96	42.14	38.78	37.61	38.86	42.68	45.35	45.35	48.56
N 329	43.70	38.16	34.29	32.95	34.39	38.78	41.85	41.85	45.55
N 330	42.00	35.65	31.22	29.67	31.33	36.36	39.88	39.88	44.12
N 331	39.81	32.86	28.00	26.31	28.12	33.64	37.48	37.48	42.13
N 332	38.31	31.31	26.43	24.73	26.55	32.10	35.96	35.96	40.64
N 333	41.89	34.88	29.99	28.29	30.11	35.67	39.54	39.54	44.23
N 334	40.44	35.47	32.00	30.80	32.09	36.03	38.78	38.78	42.10
N 335	45.24	39.57	35.61	34.23	35.70	40.20	43.34	43.34	47.13
N 336	38.92	31.86	26.94	25.22	27.06	32.65	36.56	36.56	41.27
N 337	41.60	33.82	28.39	26.49	28.52	34.69	38.99	38.99	44.20
N 338	39.47	35.12	32.09	31.03	32.17	35.61	38.01	38.01	40.92
N 339	39.51	35.06	31.96	30.88	32.04	35.56	38.02	38.02	40.99
N 340	41.38	36.28	32.72	31.48	32.81	36.85	39.67	39.67	43.08
N 341	42.34	36.55	32.51	31.10	32.61	37.19	40.40	40.40	44.27
N 342	36.77	29.62	24.63	22.89	24.76	30.42	34.38	34.38	39.16
N 343	35.26	27.20	21.57	19.61	21.71	28.10	32.56	32.56	37.95
N 344	35.47	26.30	19.89	17.66	20.05	27.32	32.40	32.40	38.53
N 345	36.45	27.22	20.78	18.53	20.93	28.25	33.36	33.36	39.53
N 346	39.91	30.81	24.44	22.23	24.60	31.82	36.86	36.86	42.95
N 347	39.85	30.66	24.25	22.01	24.40	31.69	36.77	36.77	42.91
N 348	42.06	32.95	26.59	24.37	26.75	33.97	39.01	39.01	45.10
N 349	37.55	28.32	21.87	19.62	22.03	29.35	34.45	34.45	40.63
N 350	39.89	30.66	24.21	21.96	24.37	31.69	36.80	36.80	42.97
N 351	35.98	26.78	20.35	18.11	20.51	27.81	32.90	32.90	39.06
N 352	37.48	28.13	21.61	19.33	21.77	29.18	34.35	34.35	40.60
N 353	39.18	29.64	22.98	20.65	23.14	30.70	35.98	35.98	42.36
N 354	40.15	30.59	23.92	21.60	24.09	31.66	36.95	36.95	43.33
N 355	39.48	30.10	23.54	21.26	23.70	31.14	36.34	36.34	42.61
N 356	41.35	34.39	29.53	27.83	29.65	35.16	39.02	39.02	43.67
N 357	40.45	32.73	27.34	25.46	27.48	33.59	37.87	37.87	43.03
N 358	41.69	33.63	28.00	26.04	28.14	34.53	38.99	38.99	44.38
N 359	40.36	31.89	25.97	23.90	26.11	32.83	37.52	37.52	43.19
N 360	40.54	31.64	25.43	23.26	25.58	32.63	37.56	37.56	43.51
N 361	45.32	36.46	30.27	28.12	30.42	37.45	42.35	42.35	48.28
N 362	43.78	36.46	31.34	29.56	31.47	37.28	41.33	41.33	46.23
N 363	45.17	37.45	32.05	30.17	32.18	38.31	42.58	42.58	47.75
N 364	46.79	38.92	33.42	31.51	33.56	39.80	44.15	44.15	49.41
N 365	44.52	36.26	30.49	28.48	30.63	37.18	41.75	41.75	47.28
N 366	47.75	38.99	32.88	30.75	33.03	39.97	44.82	44.82	50.67
N 368	41.64	37.11	33.94	32.84	34.02	37.62	40.12	40.12	43.15
N 369	35.84	31.30	28.13	27.02	28.20	31.80	34.32	34.32	37.35
N 370	41.80	36.61	32.99	31.72	33.08	37.19	40.07	40.07	43.54
N 371	40.02	34.12	30.00	28.57	30.10	34.78	38.05	38.05	41.99
N 372	35.42	28.09	22.96	21.17	23.09	28.91	32.97	32.97	37.87
N 373	31.25	23.02	17.27	15.27	17.41	23.94	28.49	28.49	34.00
N 374	35.36	26.16	19.73	17.49	19.89	27.19	32.28	32.28	38.44
N 375	35.04	25.84	19.41	17.17	19.57	26.87	31.96	31.96	38.11
N 376	27.82	23.20	19.98	18.85	20.06	23.72	26.28	26.28	29.37

Nodos	Hora								
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
N 377	39.77	35.17	31.95	30.83	32.03	35.68	38.23	38.23	41.31
N 378	37.44	32.19	28.52	27.25	28.61	32.78	35.69	35.69	39.20
N 379	36.14	30.15	25.96	24.50	26.06	30.82	34.13	34.13	38.14
N 380	34.09	26.60	21.36	19.54	21.49	27.43	31.58	31.58	36.59
N 381	32.36	24.04	18.23	16.20	18.37	24.97	29.57	29.57	35.13
N 382	35.56	26.34	19.90	17.66	20.06	27.37	32.47	32.47	38.64
N 383	39.19	29.87	23.37	21.10	23.53	30.91	36.07	36.07	42.29
N 384	22.79	18.07	14.78	13.63	14.86	18.60	21.21	21.21	24.37
N 385	35.77	31.10	27.84	26.70	27.92	31.62	34.21	34.21	37.33
N 386	35.27	29.91	26.16	24.86	26.25	30.51	33.47	33.47	37.06
N 387	34.83	28.74	24.49	23.01	24.59	29.42	32.79	32.79	36.86
N 388	34.93	27.31	21.98	20.13	22.11	28.16	32.38	32.38	37.48
N 389	33.85	25.50	19.67	17.64	19.82	26.44	31.05	31.05	36.64
N 390	31.68	22.40	15.93	13.67	16.09	23.44	28.57	28.57	34.78
N 391	36.71	27.13	20.43	18.10	20.60	28.20	33.50	33.50	39.91
N 392	35.08	25.33	18.53	16.15	18.69	26.42	31.82	31.82	38.33
N 393	35.83	31.10	27.79	26.64	27.87	31.63	34.25	34.25	37.41
N 394	34.12	29.31	25.96	24.79	26.04	29.85	32.51	32.51	35.72
N 395	34.35	28.91	25.12	23.79	25.21	29.52	32.53	32.53	36.16
N 396	33.77	27.60	23.29	21.78	23.39	28.29	31.71	31.71	35.83
N 397	36.44	28.70	23.30	21.42	23.43	29.57	33.85	33.85	39.02
N 398	33.12	24.77	18.95	16.91	19.09	25.71	30.33	30.33	35.91
N 399	28.38	19.98	14.11	12.07	14.26	20.92	25.56	25.56	31.18
N 400	35.74	30.66	27.11	25.88	27.20	31.23	34.04	34.04	37.44
N 401	36.13	31.05	27.51	26.27	27.59	31.62	34.43	34.43	37.83
N 402	32.94	27.86	24.31	23.08	24.40	28.43	31.24	31.24	34.64
N 403	35.08	30.01	26.47	25.23	26.55	30.57	33.38	33.38	36.77
N 404	33.61	28.14	24.32	22.99	24.41	28.75	31.78	31.78	35.44
N 405	34.85	28.59	24.22	22.70	24.33	29.29	32.75	32.75	36.93
N 406	35.22	27.40	21.93	20.03	22.07	28.27	32.60	32.60	37.84
N 407	33.92	25.57	19.74	17.71	19.89	26.50	31.12	31.12	36.70
N 408	29.18	20.82	14.99	12.95	15.13	21.76	26.38	26.38	31.97
N 409	35.85	29.50	25.07	23.52	25.18	30.21	33.72	33.72	37.96
N 410	33.43	25.53	20.02	18.09	20.15	26.41	30.79	30.79	36.07
N 411	32.23	24.01	18.28	16.28	18.42	24.93	29.48	29.48	34.97
N 412	33.96	27.55	23.07	21.51	23.18	28.27	31.81	31.81	36.10
N 413	26.48	19.25	14.19	12.43	14.32	20.05	24.06	24.06	28.90
N 414	27.47	20.47	15.58	13.87	15.70	21.25	25.13	25.13	29.81
N 415	29.54	22.81	18.11	16.47	18.22	23.56	27.28	27.28	31.78
N 416	32.13	25.68	21.18	19.61	21.29	26.40	29.97	29.97	34.28
N 417	26.76	19.52	14.47	12.71	14.60	20.33	24.33	24.33	29.17
N 418	29.40	21.39	15.80	13.85	15.93	22.29	26.72	26.72	32.08
N 419	28.92	20.91	15.31	13.36	15.45	21.80	26.24	26.24	31.60
N 420	28.95	20.91	15.29	13.33	15.43	21.81	26.26	26.26	31.64
N 421	31.29	23.27	17.68	15.73	17.81	24.17	28.60	28.60	33.96
N 422	28.00	19.96	14.35	12.39	14.49	20.86	25.31	25.31	30.69
N 423	31.10	23.11	17.53	15.59	17.67	24.00	28.43	28.43	33.77
N 424	21.33	12.77	6.80	4.72	6.95	13.73	18.46	18.46	24.18
N 425	24.85	16.37	10.45	8.38	10.59	17.32	22.01	22.01	27.68
N 426	23.39	14.91	8.99	6.93	9.14	15.86	20.55	20.55	26.22
N 427	26.47	19.08	13.93	12.13	14.05	19.91	23.99	23.99	28.93
N 428	29.54	21.48	15.85	13.89	15.99	22.38	26.84	26.84	32.23
N 429	26.21	18.83	13.67	11.87	13.80	19.65	23.74	23.74	28.67
N 430	27.52	20.56	15.69	14.00	15.81	21.34	25.19	25.19	29.85
N 431	27.11	19.11	13.53	11.59	13.67	20.01	24.43	24.43	29.78
N 432	27.73	19.81	14.28	12.35	14.42	20.70	25.08	25.08	30.38
N 433	27.44	19.61	14.14	12.23	14.27	20.48	24.82	24.82	30.06
N 434	29.19	21.15	15.53	13.58	15.67	22.05	26.50	26.50	31.87
N 435	25.39	17.30	11.66	9.69	11.80	18.21	22.68	22.68	28.09
N 436	25.40	17.30	11.64	9.67	11.78	18.20	22.68	22.68	28.10
N 437	25.81	17.23	11.23	9.15	11.38	18.19	22.93	22.93	28.67
N 438	26.24	17.76	11.83	9.77	11.98	18.71	23.40	23.40	29.07
N 439	27.70	19.61	13.96	11.99	14.10	20.51	24.99	24.99	30.40
N 440	28.53	20.43	14.78	12.81	14.92	21.34	25.82	25.82	31.23
N 441	27.35	19.24	13.58	11.61	13.72	20.15	24.63	24.63	30.05
N 442	21.26	13.16	7.50	5.53	7.64	14.07	18.55	18.55	23.96
N 443	19.98	11.88	6.22	4.24	6.36	12.78	17.27	17.27	22.69
N 444	26.29	18.17	12.50	10.53	12.64	19.08	23.57	23.57	28.99
N 445	24.87	16.76	11.10	9.12	11.24	17.67	22.16	22.16	27.58
N 446	29.56	21.45	15.79	13.82	15.93	22.36	26.85	26.85	32.27
N 447	29.65	21.54	15.88	13.90	16.02	22.45	26.93	26.93	32.35
N 448	34.97	26.86	21.19	19.22	21.33	27.76	32.25	32.25	37.68
N 449	26.44	17.70	11.60	9.47	11.75	18.68	23.52	23.52	29.36

Nodos	Hora								
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
N 450	19.71	10.60	4.23	2.01	4.39	11.61	16.66	16.66	22.76
N 451	25.33	16.30	10.00	7.80	10.16	17.31	22.31	22.31	28.35
N 452	26.42	17.77	11.74	9.63	11.89	18.74	23.52	23.52	29.30
N 453	25.65	17.24	11.36	9.32	11.51	18.18	22.83	22.83	28.45
N 455	26.83	18.27	12.29	10.21	12.44	19.23	23.96	23.96	29.69
N 456	19.79	10.60	4.18	1.95	4.34	11.63	16.72	16.72	22.86
N 561	26.69	17.62	11.28	9.07	11.44	18.63	23.65	23.65	29.71
N 562	28.63	19.60	13.30	11.10	13.46	20.61	25.61	25.61	31.64
N 460	30.39	21.62	15.50	13.37	15.65	22.60	27.45	27.45	33.31
N 461	25.29	16.68	10.66	8.56	10.81	17.64	22.41	22.41	28.17
N 462	20.55	11.28	4.81	2.55	4.96	12.31	17.44	17.44	23.64
N 463	18.97	9.72	3.25	1.00	3.41	10.75	15.87	15.87	22.06
N 464	22.01	12.73	6.25	3.99	6.41	13.77	18.90	18.90	25.10
N 465	19.83	10.55	4.07	1.81	4.23	11.59	16.72	16.72	22.93
N 466	22.85	13.58	7.11	4.85	7.27	14.62	19.74	19.74	25.94
N 467	24.35	15.11	8.66	6.41	8.82	16.14	21.25	21.25	27.43
N 468	22.86	13.67	7.25	5.01	7.40	14.69	19.78	19.78	25.93
N 469	24.90	15.72	9.31	7.08	9.47	16.74	21.82	21.82	27.96
N 470	18.35	9.06	2.58	0.32	2.74	10.10	15.24	15.24	21.46
N 471	18.36	9.03	2.51	0.24	2.67	10.07	15.24	15.24	21.48
N 472	22.24	12.92	6.42	4.15	6.58	13.96	19.12	19.12	25.34
N 473	24.03	14.75	8.26	6.00	8.42	15.78	20.92	20.92	27.13
N 474	14.89	11.54	9.19	8.38	9.25	11.91	13.77	13.77	16.01
N 475	16.98	13.50	11.06	10.21	11.12	13.89	15.82	15.82	18.15
N 476	15.24	11.69	9.21	8.34	9.27	12.09	14.05	14.05	16.43
N 477	11.64	8.05	5.55	4.68	5.61	8.45	10.44	10.44	12.83
N 478	14.16	10.58	8.07	7.20	8.13	10.98	12.96	12.96	15.36
N 479	27.56	23.98	21.47	20.60	21.53	24.38	26.36	26.36	28.76
N 480	27.65	22.81	19.43	18.25	19.51	23.35	26.03	26.03	29.27
N 481	24.80	19.94	16.54	15.36	16.63	20.48	23.17	23.17	26.42
N 482	24.78	19.91	16.51	15.33	16.60	20.46	23.15	23.15	26.41
N 483	26.09	21.21	17.80	16.61	17.88	21.75	24.45	24.45	27.72
N 484	26.57	21.69	18.27	17.08	18.36	22.23	24.94	24.94	28.20
N 485	28.39	23.49	20.07	18.88	20.16	24.04	26.75	26.75	30.03
N 486	30.68	25.76	22.33	21.13	22.41	26.31	29.03	29.03	32.32
N 487	28.71	23.79	20.35	19.16	20.44	24.34	27.06	27.06	30.35
N 488	34.80	29.76	26.24	25.01	26.33	30.32	33.11	33.11	36.48
N 489	35.49	30.43	26.90	25.67	26.99	31.00	33.80	33.80	37.18
N 490	34.00	28.75	25.09	23.81	25.18	29.34	32.24	32.24	35.75
N 491	33.05	27.30	23.29	21.89	23.39	27.94	31.12	31.12	34.96
N 492	28.13	22.16	18.00	16.55	18.10	22.83	26.13	26.13	30.12
N 493	26.32	20.36	16.19	14.74	16.29	21.02	24.33	24.33	28.31
N 494	23.02	16.77	12.40	10.88	12.51	17.46	20.92	20.92	25.10
N 495	23.43	17.06	12.62	11.07	12.73	17.78	21.30	21.30	25.55
N 496	28.24	22.27	18.10	16.65	18.21	22.94	26.24	26.24	30.23
N 497	33.64	27.93	23.94	22.56	24.04	28.57	31.73	31.73	35.54
N 498	29.09	23.09	18.89	17.43	19.00	23.76	27.08	27.08	31.10
N 499	32.74	26.75	22.56	21.10	22.66	27.41	30.73	30.73	34.74
N 500	32.43	26.42	22.23	20.77	22.33	27.09	30.42	30.42	34.43
N 501	32.64	26.58	22.34	20.87	22.45	27.25	30.61	30.61	34.66
N 502	29.28	23.24	19.03	17.56	19.14	23.92	27.26	27.26	31.29
N 503	31.19	24.95	20.60	19.08	20.70	25.65	29.10	29.10	33.27
N 504	23.13	16.38	11.67	10.03	11.79	17.14	20.87	20.87	25.38
N 505	28.43	21.70	16.99	15.35	17.11	22.45	26.18	26.18	30.68
N 506	22.58	15.84	11.13	9.49	11.24	16.59	20.32	20.32	24.83
N 507	26.53	19.79	15.09	13.44	15.20	20.55	24.28	24.28	28.78
N 508	29.89	23.29	18.69	17.08	18.80	24.03	27.68	27.68	32.09
N 509	28.74	22.03	17.34	15.70	17.45	22.78	26.49	26.49	30.98
N 510	24.52	17.78	13.07	11.42	13.18	18.53	22.26	22.26	26.77
N 511	28.08	21.34	16.63	14.99	16.74	22.09	25.82	25.82	30.33
N 512	26.82	20.08	15.38	13.74	15.49	20.84	24.57	24.57	29.07
N 513	25.35	18.61	13.90	12.26	14.02	19.36	23.09	23.09	27.60
N 514	19.90	13.17	8.47	6.83	8.58	13.92	17.65	17.65	22.15
N 515	21.31	14.58	9.87	8.24	9.99	15.33	19.05	19.05	23.56
N 516	23.26	16.81	12.30	10.73	12.41	17.53	21.10	21.10	25.42
N 520	20.45	13.91	9.34	7.74	9.45	14.64	18.26	18.26	22.64
N 518	18.21	11.59	6.96	5.35	7.08	12.33	16.00	16.00	20.42
N 522	6.47	5.98	5.63	5.51	5.64	6.03	6.31	6.31	6.64
N 523	34.03	23.78	16.63	14.14	16.81	24.93	30.60	30.60	37.45
N 521	28.55	19.01	12.34	10.02	12.51	20.07	25.35	25.35	31.73
N 525	17.28	13.38	10.66	9.71	10.73	13.82	15.97	15.97	18.58
N 526	28.75	24.13	20.91	19.78	20.99	24.65	27.21	27.21	30.29
N 527	26.89	17.73	11.33	9.10	11.49	18.75	23.82	23.82	29.95

Nodos	Hora								
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
N 524	35.00	24.75	17.59	15.09	17.76	25.89	31.57	31.57	38.43
N 584	23.25	22.54	22.05	21.88	22.06	22.62	23.02	23.02	23.49
N 528	31.30	23.94	18.80	17.01	18.93	24.76	28.84	28.84	33.76
N 529	39.91	33.11	28.36	26.70	28.47	33.87	37.63	37.63	42.18
N 530	32.97	22.52	15.22	12.68	15.40	23.69	29.47	29.47	36.45
N 92	35.76	25.47	18.28	15.78	18.46	26.62	32.32	32.32	39.20
N 531	42.50	35.96	31.39	29.80	31.51	36.69	40.31	40.31	44.68
N 532	44.64	38.62	34.41	32.94	34.51	39.29	42.62	42.62	46.65
N 533	39.82	32.78	27.87	26.16	27.99	33.57	37.46	37.46	42.17
N 534	40.24	33.17	28.23	26.51	28.35	33.96	37.88	37.88	42.60
N 121	41.49	36.46	32.95	31.72	33.03	37.02	39.80	39.80	43.17
N 535	40.56	35.64	32.21	31.02	32.30	36.19	38.91	38.91	42.20
N 536	31.73	29.08	27.23	26.58	27.27	29.37	30.84	30.84	32.61
N 537	44.77	41.71	39.56	38.82	39.62	42.05	43.75	43.75	45.80
N 538	34.45	33.40	32.66	32.40	32.68	33.51	34.10	34.10	34.80
N 539	37.93	36.71	35.85	35.55	35.87	36.84	37.52	37.52	38.34
N 540	39.95	38.74	37.89	37.59	37.91	38.87	39.55	39.55	40.36
N 229	35.35	33.35	31.95	31.46	31.98	33.57	34.68	34.68	36.02
N 541	33.79	31.79	30.39	29.90	30.42	32.01	33.12	33.12	34.46
N 542	38.48	36.02	34.31	33.71	34.35	36.30	37.65	37.65	39.30
N 187	48.67	46.13	44.36	43.74	44.40	46.41	47.82	47.82	49.51
N 543	39.59	36.57	34.47	33.73	34.52	36.91	38.58	38.58	40.59
N 251	18.17	15.35	13.37	12.68	13.42	15.66	17.23	17.23	19.12
N 544	39.56	35.44	32.57	31.57	32.64	35.90	38.18	38.18	40.93
N 545	35.84	27.39	21.49	19.43	21.63	28.33	33.01	33.01	38.66
N 367	40.55	32.01	26.05	23.97	26.19	32.96	37.69	37.69	43.40
N 546	36.93	28.43	22.49	20.42	22.63	29.38	34.08	34.08	39.77
N 564	47.19	42.35	38.97	37.80	39.06	42.90	45.57	45.57	48.81
N 566	46.21	41.38	38.00	36.82	38.08	41.92	44.59	44.59	47.83
N 550	43.13	34.23	28.02	25.85	28.17	35.23	40.15	40.15	46.10
N 551	12.34	9.15	6.92	6.14	6.97	9.50	11.27	11.27	13.40
N 552	41.73	34.77	29.92	28.22	30.04	35.55	39.40	39.40	44.05
N 553	38.86	29.38	22.76	20.45	22.92	30.44	35.69	35.69	42.02
N 554	36.86	27.63	21.18	18.93	21.34	28.66	33.77	33.77	39.94
N 555	31.93	23.02	16.80	14.63	16.95	24.01	28.95	28.95	34.90
N 556	36.48	26.78	20.01	17.65	20.18	27.87	33.23	33.23	39.72
N 557	35.96	31.19	27.85	26.69	27.94	31.72	34.36	34.36	37.55
N 558	33.57	28.26	24.55	23.26	24.64	28.85	31.79	31.79	35.34
N 559	35.59	29.80	25.75	24.34	25.85	30.44	33.65	33.65	37.52
N 560	40.57	36.08	32.94	31.85	33.02	36.58	39.06	39.06	42.06
N 547	24.32	16.00	10.18	8.15	10.32	16.93	21.54	21.54	27.10
N 454	26.01	17.53	11.61	9.54	11.75	18.48	23.17	23.17	28.84
N 457	29.46	22.75	18.06	16.43	18.18	23.50	27.21	27.21	31.69
N 458	34.70	33.83	33.23	33.01	33.24	33.93	34.41	34.41	34.99
N 168	32.67	31.79	31.18	30.96	31.19	31.89	32.37	32.37	32.96
N 459	35.28	34.25	33.53	33.28	33.55	34.36	34.93	34.93	35.62
N 563	40.41	39.38	38.66	38.41	38.68	39.50	40.07	40.07	40.76
N 565	12.27	9.06	6.83	6.05	6.88	9.42	11.19	11.19	13.33
N 567	35.18	30.13	26.61	25.38	26.69	30.69	33.49	33.49	36.86
N 568	31.87	25.73	21.45	19.95	21.55	26.42	29.81	29.81	33.92
N 569	23.02	16.56	12.04	10.47	12.15	17.28	20.85	20.85	25.17
N 570	24.71	15.45	8.98	6.73	9.14	16.49	21.61	21.61	27.80
N 571	29.52	19.05	11.74	9.20	11.92	20.22	26.01	26.01	33.01
N 573	32.57	21.90	14.44	11.84	14.63	23.09	29.00	29.00	36.14
N 574	34.78	23.75	16.05	13.36	16.24	24.98	31.09	31.09	38.47
N 572	30.88	19.42	11.42	8.64	11.62	20.70	27.04	27.04	34.70
N 575	31.36	19.63	11.44	8.59	11.64	20.94	27.43	27.43	35.27
N 576	24.97	13.14	4.88	2.00	5.08	14.46	21.00	21.00	28.91
N 577	24.07	12.24	3.98	1.10	4.18	13.56	20.11	20.11	28.02
N 578	26.90	15.35	7.28	4.47	7.48	16.64	23.03	23.03	30.76
N 579	31.93	22.05	15.16	12.75	15.33	23.16	28.62	28.62	35.22
N 580	34.71	24.97	18.16	15.79	18.33	26.05	31.45	31.45	37.97
N 581	26.65	16.34	9.14	6.63	9.32	17.49	23.20	23.20	30.09
N 582	33.67	23.63	16.63	14.19	16.80	24.75	30.31	30.31	37.01
N 583	35.44	27.12	21.30	19.28	21.45	28.05	32.65	32.65	38.22
N 585	24.43	15.36	9.03	6.82	9.19	16.38	21.40	21.40	27.46
N 586	19.07	9.91	3.51	1.28	3.66	10.93	16.00	16.00	22.13
N 587	6.61	6.13	5.80	5.68	5.81	6.18	6.45	6.45	6.77
N 588	13.77	13.08	12.61	12.44	12.62	13.16	13.54	13.54	14.00
N 589	21.68	18.59	16.43	15.67	16.48	18.93	20.64	20.64	22.71
N 590	19.10	14.51	11.31	10.19	11.39	15.02	17.56	17.56	20.63
N 28	12.90	11.91	11.22	10.98	11.24	12.02	12.57	12.57	13.23
N 25	13.44	12.33	11.56	11.29	11.58	12.46	13.07	13.07	13.81

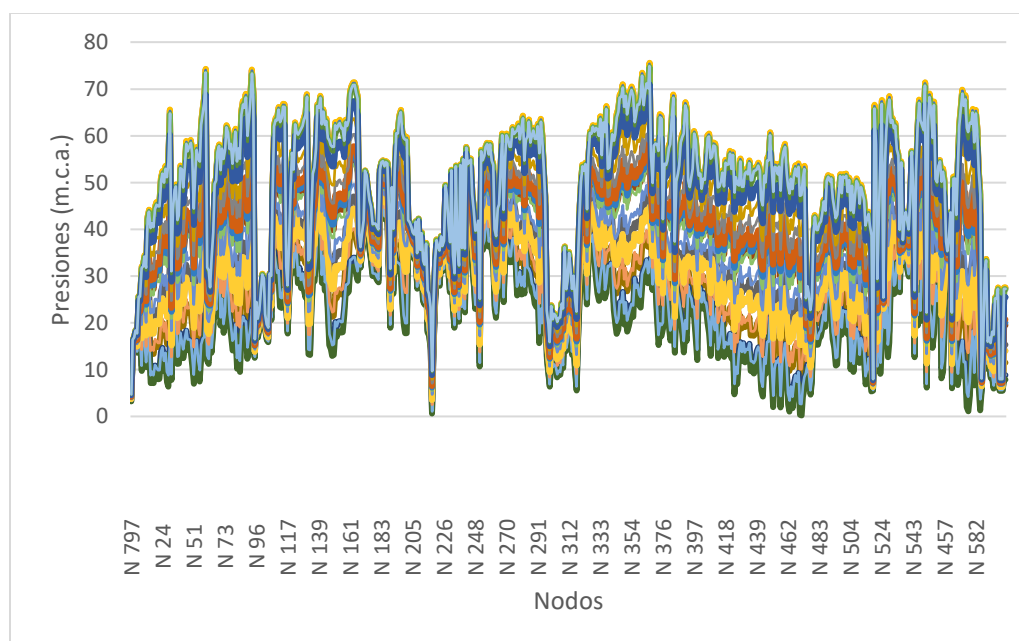
Nodos	Hora								
	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
N 29	11.11	9.63	8.60	8.24	8.63	9.80	10.62	10.62	11.60
N 33	12.12	10.18	8.83	8.36	8.86	10.40	11.47	11.47	12.76
N 34	10.41	8.14	6.54	5.99	6.58	8.39	9.65	9.65	11.17
N 591	15.79	12.75	10.63	9.89	10.68	13.09	14.77	14.77	16.81
N 592	13.60	9.86	7.25	6.34	7.32	10.28	12.35	12.35	14.84
N 593	15.33	11.48	8.80	7.86	8.86	11.91	14.04	14.04	16.62
N 2	6.47	5.98	5.63	5.51	5.64	6.03	6.31	6.31	6.64
N 3	6.47	5.98	5.63	5.51	5.64	6.03	6.31	6.31	6.64
N 31	6.47	5.98	5.63	5.51	5.64	6.03	6.31	6.31	6.64
N 59	15.33	11.48	8.80	7.86	8.86	11.91	14.04	14.04	16.62
N 87	15.33	11.48	8.80	7.86	8.86	11.91	14.04	14.04	16.62
E 1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la simulación hidráulica en EPANET 2.2.

En la Figura 15 se puede observar gráficamente el comportamiento de las presiones.

Figura 15

Gráfica de presiones máximas y mínimas



4.12.2 Análisis de resultados de la propuesta de red optimizada 24/7

Durante las horas de mayor demanda, entre las 8:00 y las 16:00, la red presenta un funcionamiento estable. Sin embargo, en algunos nodos se registran presiones inferiores a 15 m.c.a., lo que evidencia puntos específicos con condiciones de baja presión. En las horas de menor consumo, principalmente en la madrugada, se presentan incrementos de presión en ciertas zonas, alcanzando valores superiores a 60 m.c.a. Este comportamiento está relacionado con la baja demanda y el aumento de la carga hidráulica en la red.

Aunque no todos los nodos cumplen el rango recomendado por la Resolución 0330 de 2017, los resultados muestran una mejora en el sistema, especialmente porque se eliminan las presiones negativas y se asegura la continuidad del servicio.

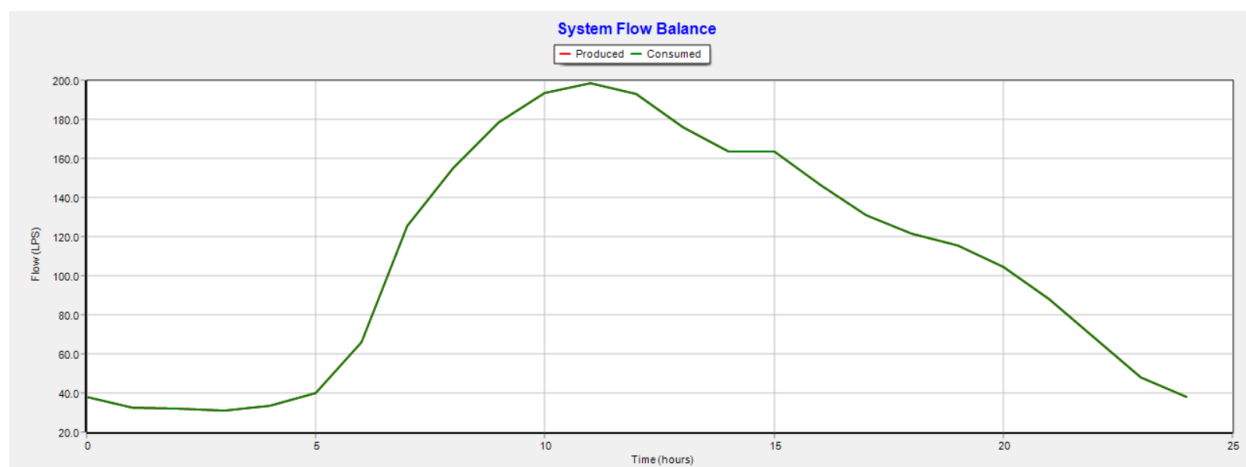
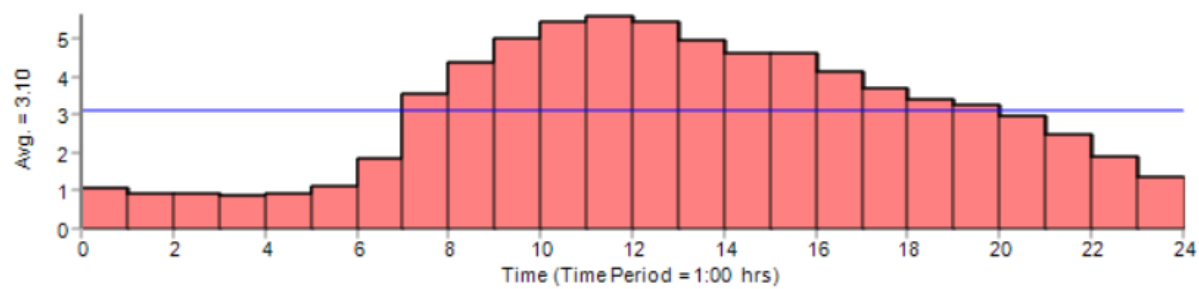
Los resultados obtenidos evidencian una mejora significativa en el comportamiento hidráulico de la red respecto a los escenarios evaluados. La optimización de los diámetros permitió eliminar las presiones negativas y reducir las pérdidas de carga, favoreciendo una distribución más uniforme de las presiones a lo largo del sistema.

4.12.3 Consideraciones de la propuesta de red optimizada 24/7

Se recomienda realizar ajustes en las zonas donde se presentan valores de presión fuera del rango recomendado, con el fin de mejorar la distribución de presiones en el sistema bajo las condiciones actuales de operación.

4.13 Análisis del balance de caudales y del patrón de consumo

El balance de caudales (Figura 16) permite observar la variación horaria del comportamiento del sistema, evidenciando la dinámica del flujo a lo largo del periodo de 24 horas. Por su parte, el patrón de consumo (Figura 17) presenta los valores absolutos de caudal durante el mismo periodo de 24 horas. Aunque ambas gráficas representan la variación del caudal en el tiempo, lo hacen desde perspectivas complementarias: una enfatiza la tendencia general del comportamiento hidráulico, mientras la otra destaca los valores numéricos específicos. En conjunto, permiten comprender tanto la dinámica del sistema como su desempeño cuantitativo en condiciones reales de operación.

Figura 16*Gráfica de balance de caudales***Figura 17***Patron de consumo EPANET*

4.14 Modelación hidráulica con población futura proyectada al año 2051

Con el fin de evaluar el comportamiento futuro del sistema de distribución y determinar si la red podrá atender adecuadamente la demanda en el horizonte de diseño, se realizó una modelación considerando la población proyectada al año 2051. Para esta modelación, el sistema fue actualizado en QGIS y EPANET, incorporando la población futura de 47.503 habitantes, lo que permitió recalcular las demandas en los nodos a partir de los parámetros ya definidos en el modelo base. De esta manera se mantuvo el mismo patrón de consumo horario utilizado en el escenario actual.

Al actualizar el modelo con la población proyectada, tanto la simulación en tiempo cero como la realizada con el patrón de consumo mostraron un comportamiento muy similar al observado en el escenario actual. En este caso las presiones negativas se presentan en toda la red, lo cual era de esperarse, ya que la red en su configuración actual ya presentaba limitaciones hidráulicas y, al incrementarse la demanda, estas condiciones se mantienen a lo largo de las 24 horas de operación. La Figura 18 y la Figura 19 muestran este comportamiento, evidenciando que la red existente no logra responder adecuadamente a la demanda futura.

Figura 18

Modelación EPANET tiempo cero

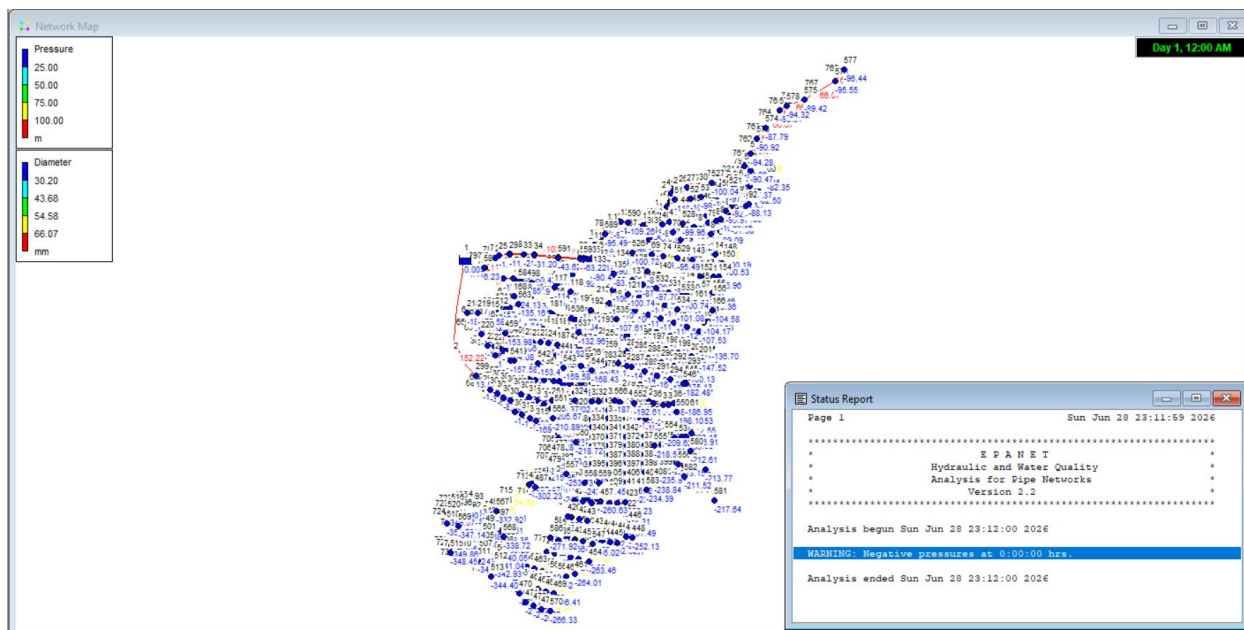
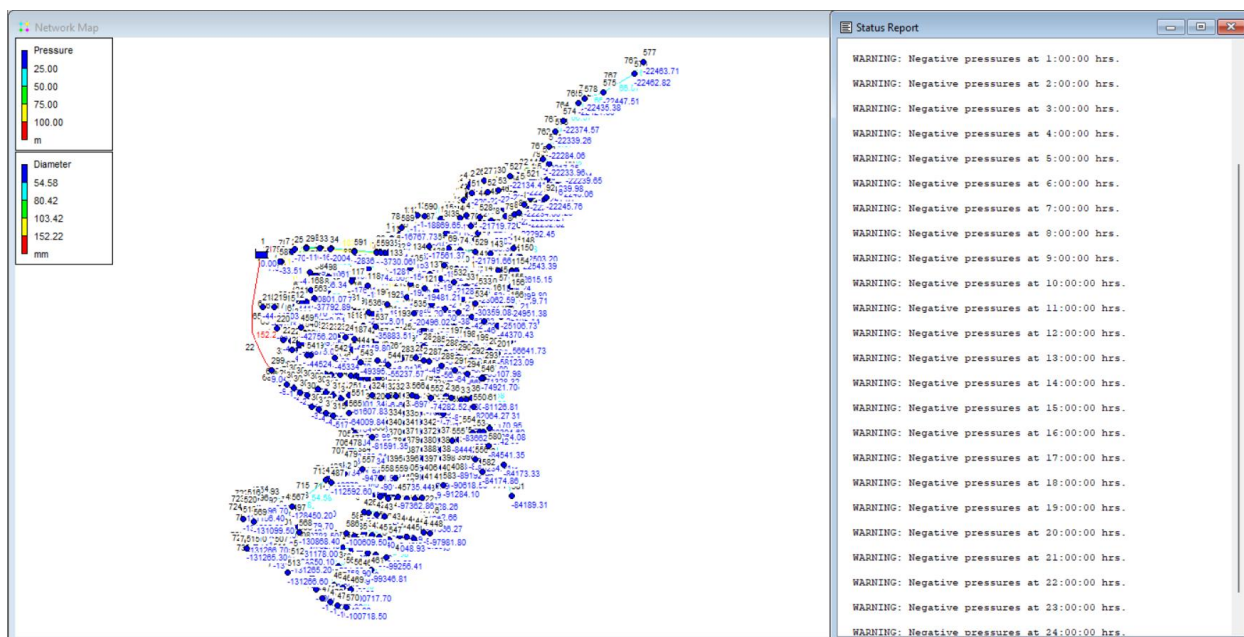


Figura 19

Modelación EPANET con patrón de consumo



4.15 Evaluación del escenario red futura con la propuesta de optimización 24/7

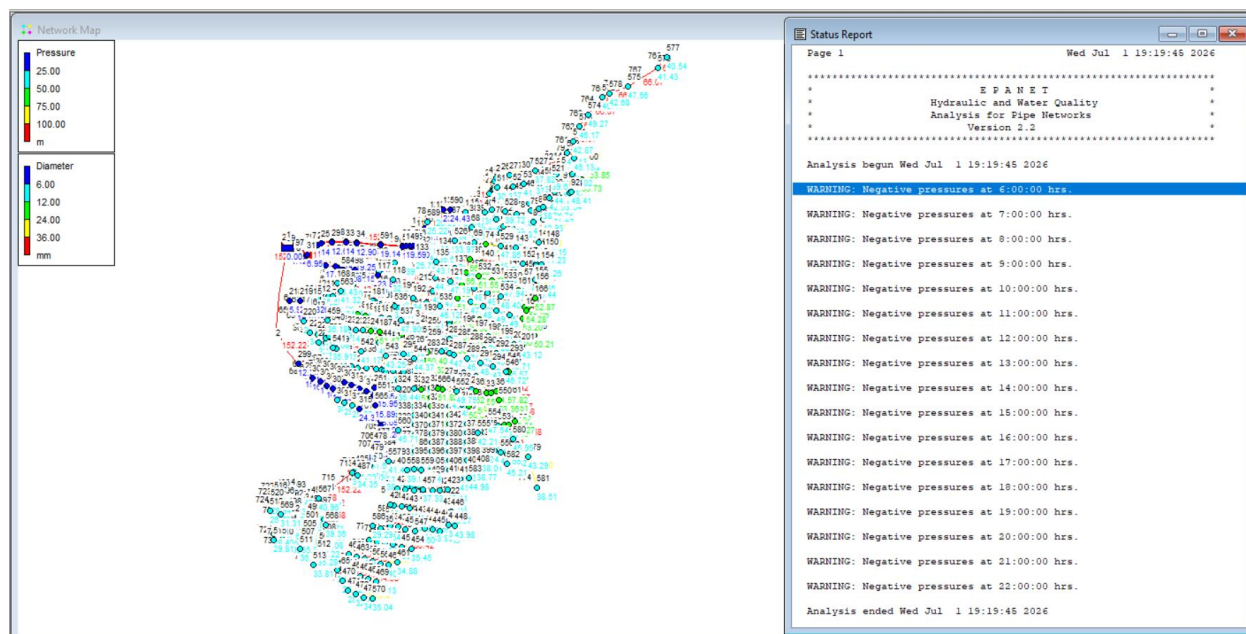
Con el fin de evaluar el comportamiento del sistema bajo el horizonte de diseño, se aplicó la propuesta de red optimizada para operación continua 24/7 desarrollada para la red actual. Se mantuvieron los mismos diámetros de las tuberías y la ubicación de las válvulas definidas en dicha optimización, aplicándolos a la red con población proyectada para el año 2051.

4.15.1 Resultados con la propuesta de optimización 24/7

Al actualizar el modelo con la demanda futura, se evidenció que la red presenta presiones negativas en diferentes zonas entre las 6:00 y las 10:00, lo que indica que la configuración optimizada para la condición actual no es suficiente para atender las condiciones de demanda futura, debido al incremento significativo de la población proyectada, como se muestra en la Figura 20.

Figura 20

Modelación de la red futura con la propuesta de optimización actual 24/7



El análisis del escenario de la red futura evidenció que la propuesta de optimización desarrollada para la condición actual no es suficiente para garantizar el adecuado funcionamiento del sistema bajo el horizonte de diseño. Aunque la configuración mejora el comportamiento hidráulico, persisten presiones negativas durante las horas de mayor demanda, lo que indica que el incremento de la población proyectada supera la capacidad de la red en su estado actual.

Se recomienda realizar una nueva optimización de la red, ajustada al horizonte de diseño y considerando el incremento de la demanda, con el fin de mejorar su comportamiento y garantizar su adecuado funcionamiento bajo escenarios futuros de operación.

4.16 Escenario de optimización de la red futura

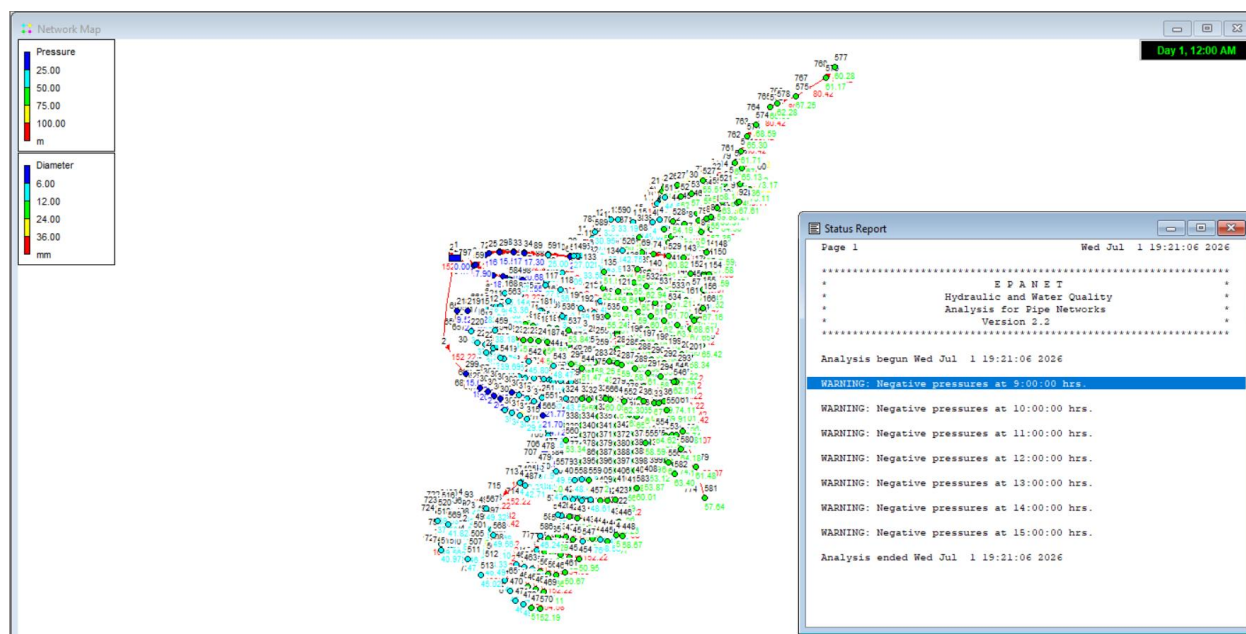
Dado que la propuesta de optimización inicial aplicada a la red futura no garantiza la continuidad del servicio, se identificó la necesidad de mejorar el comportamiento hidráulico del sistema bajo las condiciones de demanda proyectadas, especialmente durante las horas de mayor consumo.

4.16.1 Alternativa de solución de optimización de la red futura

Con el propósito de mejorar el desempeño hidráulico del sistema bajo las condiciones proyectadas para el año 2051, se evaluó una alternativa de optimización basada en la instalación de las seis válvulas tipo TCV propuestas para la red actual. Adicionalmente, fue necesario redimensionar gran parte de las tuberías principales y secundarias de la red, incrementando sus diámetros para atender el aumento de la demanda asociado al crecimiento poblacional proyectado, que pasa de 14.640 habitantes a aproximadamente 47.503 habitantes en el horizonte de diseño.

Figura 21

Resultados de la modelación hidráulica de la red futura



4.16.2 Resultados de optimización de la red futura

Los resultados muestran una mejora en el comportamiento hidráulico de la red; sin embargo, aún se presentan presiones negativas entre las 9:00 y las 15:00, lo que indica que, aunque la red responde mejor con estos ajustes, todavía no alcanza condiciones completamente óptimas bajo la demanda futura. La Tabla 15 presenta las presiones registradas en los nodos críticos durante el periodo de mayor demanda, así como aquellos valores inferiores a 15 m.c.a., que corresponden a las condiciones hidráulicas más desfavorables del sistema.

Tabla 15*Nodos críticos con presiones bajas durante el periodo de mayor demanda*

Nodos	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
N 797	3,79	3,63	3,58	3,64	3,82	3,94	3,94
N 4	11,73	10,96	10,69	10,98	11,85	12,46	12,46
N 5	12,10	11,30	11,03	11,32	12,23	12,86	12,86
N 6	12,37	11,37	11,02	11,39	12,53	13,32	13,32
N 7	10,95	9,83	9,43	9,85	11,13	12,03	12,03
N 8	14,43	12,57	11,92	12,62	14,72	16,20	16,20
N 9	11,48	9,14	8,32	9,19	11,86	13,72	13,72
N 10	10,09	6,44	5,17	6,53	10,67	13,56	13,56
N 11	15,34	12,55	11,58	12,62	15,79	18,00	18,00
N 12	14,38	11,05	9,89	11,13	14,91	17,55	17,55
N 13	11,05	7,56	6,34	7,64	11,61	14,37	14,37
N 36	8,76	5,01	3,70	5,10	9,37	12,34	12,34
N 95	9,79	8,68	8,29	8,71	9,96	10,84	10,84
N 117	13,70	11,32	10,50	11,38	14,08	15,97	15,97
N 132	11,38	7,69	6,41	7,78	11,97	14,89	14,89
N 133	10,97	7,12	5,78	7,21	11,58	14,63	14,63
N 199	14,82	7,33	4,72	7,51	16,02	21,95	21,95
N 200	11,79	3,87	1,11	4,06	13,06	19,34	19,34
N 201	12,22	4,37	1,64	4,57	13,48	19,70	19,70
N 215	15,81	13,94	13,29	13,99	16,11	17,60	17,60
N 216	15,09	13,22	12,57	13,27	15,38	16,86	16,86
N 217	12,12	10,24	9,59	10,29	12,42	13,91	13,91
N 218	-1,57	-3,46	-4,12	-3,41	-1,27	0,22	0,22
N 219	12,57	10,69	10,03	10,73	12,87	14,36	14,36
N 297	8,46	6,09	5,27	6,15	8,84	10,71	10,71
N 298	5,29	2,86	2,01	2,92	5,68	7,61	7,61
N 299	2,61	0,40	-0,37	0,46	2,97	4,72	4,72
N 300	8,79	6,33	5,48	6,39	9,19	11,14	11,14
N 301	5,68	3,17	2,29	3,23	6,08	8,07	8,07
N 302	6,59	4,04	3,15	4,10	7,00	9,02	9,02
N 303	5,78	3,16	2,25	3,23	6,20	8,27	8,27
N 304	4,41	1,78	0,86	1,84	4,83	6,92	6,92
N 305	4,61	1,87	0,92	1,94	5,05	7,21	7,21
N 306	4,94	2,24	1,30	2,31	5,38	7,52	7,52
N 307	7,29	4,49	3,52	4,56	7,74	9,96	9,96
N 308	6,46	3,69	2,72	3,76	6,90	9,10	9,10
N 309	15,96	12,62	11,45	12,70	16,50	19,15	19,15
N 310	10,20	7,36	6,38	7,43	10,65	12,89	12,89
N 311	11,65	8,77	7,76	8,84	12,12	14,40	14,40
N 312	14,24	10,80	9,60	10,89	14,79	17,51	17,51
N 313	10,01	6,55	5,34	6,63	10,56	13,30	13,30
N 314	9,72	6,80	5,78	6,87	10,19	12,51	12,51
N 315	9,06	5,57	4,35	5,66	9,62	12,39	12,39
N 316	5,45	2,24	1,12	2,31	5,96	8,51	8,51
N 317	-0,67	-4,51	-5,84	-4,41	-0,06	2,99	2,99
N 318	7,43	3,04	1,51	3,15	8,14	11,62	11,62
N 319	15,50	10,77	9,12	10,89	16,25	20,00	20,00
N 330	15,40	7,72	5,04	7,91	16,63	22,72	22,72
N 331	14,27	6,44	3,70	6,63	15,53	21,74	21,74
N 332	12,49	4,59	1,84	4,79	13,76	20,02	20,02
N 333	15,52	7,52	4,73	7,72	16,80	23,14	23,14

Nodos	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
N 334	17,17	10,76	8,53	10,92	18,19	23,27	23,27
N 335	19,10	11,86	9,33	12,03	20,26	26,00	26,00
N 336	12,67	4,66	1,87	4,86	13,95	20,29	20,29
N 337	15,61	7,26	4,34	7,46	16,95	23,57	23,57
N 338	16,94	10,99	8,92	11,14	17,90	22,61	22,61
N 339	14,93	8,60	6,39	8,75	15,95	20,97	20,97
N 340	17,52	10,95	8,66	11,11	18,57	23,78	23,78
N 341	14,76	7,23	4,60	7,41	15,97	21,94	21,94
N 342	10,35	2,27	-0,55	2,47	11,65	18,05	18,05
N 343	7,20	-1,64	-4,72	-1,42	8,61	15,62	15,62
N 344	10,64	1,73	-1,38	1,95	12,07	19,14	19,14
N 345	11,70	2,77	-0,35	2,99	13,13	20,21	20,21
N 346	15,50	6,68	3,61	6,90	16,91	23,89	23,89
N 347	15,47	6,62	3,54	6,84	16,89	23,90	23,90
N 348	19,41	10,87	7,90	11,08	20,77	27,54	27,54
N 349	12,96	4,05	0,94	4,27	14,38	21,44	21,44
N 350	16,60	7,90	4,87	8,11	17,99	24,89	24,89
N 351	11,12	2,18	-0,93	2,40	12,55	19,64	19,64
N 352	12,90	3,92	0,80	4,14	14,33	21,44	21,44
N 353	15,52	6,60	3,49	6,82	16,95	24,03	24,03
N 354	16,99	8,14	5,05	8,35	18,40	25,42	25,42
N 355	16,22	7,44	4,38	7,66	17,63	24,58	24,58
N 356	16,30	8,54	5,84	8,73	17,55	23,70	23,70
N 357	15,74	7,62	4,80	7,82	17,04	23,47	23,47
N 358	17,09	8,81	5,92	9,01	18,42	24,98	24,98
N 359	15,83	7,34	4,38	7,55	17,19	23,93	23,93
N 360	16,69	8,08	5,07	8,29	18,07	24,89	24,89
N 368	16,72	10,28	8,04	10,44	17,75	22,85	22,85
N 369	10,59	4,10	1,84	4,26	11,63	16,78	16,78
N 370	17,50	10,81	8,48	10,97	18,57	23,87	23,87
N 371	11,03	3,20	0,48	3,40	12,28	18,48	18,48
N 372	9,22	1,06	-1,78	1,26	10,52	16,98	16,98
N 373	2,90	-6,08	-9,20	-5,85	4,34	11,45	11,45
N 374	10,39	1,43	-1,69	1,65	11,82	18,92	18,92
N 375	9,69	0,67	-2,47	0,89	11,13	18,28	18,28
N 376	2,02	-4,61	-6,91	-4,44	3,08	8,33	8,33
N 377	14,55	8,03	5,75	8,19	15,59	20,76	20,76
N 378	12,77	5,99	3,62	6,15	13,86	19,23	19,23
N 379	5,88	-2,20	-5,01	-2,00	7,17	13,58	13,58
N 380	6,07	-2,45	-5,42	-2,24	7,44	14,19	14,19
N 381	3,57	-5,53	-8,70	-5,31	5,02	12,23	12,23
N 382	9,75	0,65	-2,52	0,88	11,21	18,42	18,42
N 383	10,12	0,45	-2,92	0,69	11,67	19,34	19,34
N 384	-4,35	-11,24	-13,65	-11,07	-3,25	2,21	2,21
N 385	10,26	3,65	1,35	3,81	11,31	16,55	16,55
N 386	7,79	0,50	-2,04	0,68	8,96	14,74	14,74
N 387	3,29	-5,04	-7,94	-4,83	4,63	11,23	11,23
N 388	5,37	-3,48	-6,56	-3,26	6,79	13,80	13,80
N 389	4,63	-4,55	-7,75	-4,32	6,10	13,37	13,37
N 390	5,74	-3,41	-6,60	-3,19	7,20	14,46	14,46
N 391	11,82	2,67	-0,52	2,89	13,28	20,54	20,54
N 392	10,98	1,87	-1,30	2,10	12,44	19,66	19,66
N 393	10,03	3,34	1,01	3,50	11,10	16,40	16,40
N 394	7,79	0,98	-1,39	1,15	8,88	14,27	14,27
N 395	4,25	-3,50	-6,21	-3,31	5,49	11,63	11,63
N 396	1,07	-7,50	-10,49	-7,29	2,44	9,23	9,23
N 397	5,61	-3,50	-6,67	-3,27	7,07	14,28	14,28

Nodos	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
N 398	3,39	-5,87	-9,10	-5,64	4,87	12,21	12,21
N 399	-3,10	-12,67	-16,00	-12,43	-1,57	6,01	6,01
N 400	1,22	-7,05	-9,93	-6,84	2,55	9,10	9,10
N 401	1,69	-6,57	-9,45	-6,37	3,01	9,55	9,55
N 402	-1,83	-10,14	-13,04	-9,94	-0,50	6,09	6,09
N 403	2,75	-5,16	-7,92	-4,96	4,02	10,29	10,29
N 404	1,29	-6,85	-9,68	-6,65	2,59	9,03	9,03
N 405	1,01	-7,78	-10,85	-7,57	2,42	9,39	9,39
N 406	3,35	-5,97	-9,22	-5,75	4,84	12,23	12,23
N 407	3,89	-5,42	-8,67	-5,19	5,37	12,75	12,75
N 408	-1,28	-10,66	-13,93	-10,43	0,22	7,66	7,66
N 409	-0,19	-9,38	-12,59	-9,16	1,28	8,57	8,57
N 410	0,77	-8,72	-12,03	-8,49	2,28	9,80	9,80
N 411	0,92	-8,53	-11,82	-8,29	2,43	9,91	9,91
N 412	-2,37	-11,65	-14,88	-11,42	-0,89	6,47	6,47
N 413	-8,71	-18,25	-21,58	-18,02	-7,18	0,38	0,38
N 414	-8,12	-17,60	-20,90	-17,37	-6,61	0,91	0,91
N 415	-6,51	-15,91	-19,19	-15,68	-5,00	2,45	2,45
N 416	-4,37	-13,69	-16,94	-13,46	-2,88	4,51	4,51
N 417	-8,31	-17,83	-21,14	-17,59	-6,79	0,75	0,75
N 418	-3,95	-13,61	-16,97	-13,37	-2,40	5,25	5,25
N 419	-4,27	-13,90	-17,26	-13,67	-2,72	4,91	4,91
N 420	-4,13	-13,77	-17,13	-13,53	-2,59	5,05	5,05
N 421	-1,53	-11,10	-14,44	-10,87	0,01	7,59	7,59
N 422	-4,57	-14,12	-17,45	-13,89	-3,04	4,53	4,53
N 423	-1,56	-11,10	-14,42	-10,86	-0,03	7,53	7,53
N 424	-11,28	-21,12	-24,54	-20,87	-9,71	-1,92	-1,92
N 425	-7,85	-17,66	-21,07	-17,41	-6,28	1,49	1,49
N 426	-9,30	-19,11	-22,53	-18,87	-7,73	0,04	0,04
N 427	-8,48	-18,05	-21,39	-17,82	-6,94	0,65	0,65
N 428	-4,30	-14,07	-17,47	-13,83	-2,74	5,00	5,00
N 429	-8,73	-18,31	-21,64	-18,07	-7,20	0,39	0,39
N 430	-8,04	-17,49	-20,79	-17,26	-6,53	0,96	0,96
N 431	-6,81	-16,55	-19,94	-16,31	-5,25	2,47	2,47
N 432	-6,27	-15,99	-19,37	-15,75	-4,72	2,98	2,98
N 433	-6,62	-16,30	-19,67	-16,06	-5,07	2,60	2,60
N 434	-4,37	-14,07	-17,46	-13,84	-2,81	4,88	4,88
N 435	-7,97	-17,67	-21,05	-17,43	-6,41	1,27	1,27
N 436	-7,88	-17,58	-20,96	-17,34	-6,33	1,35	1,35
N 437	-6,82	-16,67	-20,10	-16,43	-5,25	2,56	2,56
N 438	-6,61	-16,45	-19,87	-16,20	-5,04	2,76	2,76
N 439	-5,96	-15,72	-19,12	-15,48	-4,40	3,33	3,33
N 440	-5,13	-14,89	-18,29	-14,65	-3,57	4,16	4,16
N 441	-6,69	-16,51	-19,93	-16,27	-5,12	2,67	2,67
N 442	-12,22	-21,95	-25,34	-21,71	-10,66	-2,95	-2,95
N 443	-13,45	-23,18	-26,57	-22,94	-11,90	-4,19	-4,19
N 444	-7,49	-17,28	-20,69	-17,03	-5,93	1,83	1,83
N 445	-8,96	-18,75	-22,16	-18,51	-7,39	0,37	0,37
N 446	-4,12	-13,88	-17,28	-13,64	-2,56	5,18	5,18
N 447	-4,23	-14,03	-17,45	-13,79	-2,67	5,10	5,10
N 448	0,95	-8,87	-12,30	-8,63	2,52	10,30	10,30
N 449	-6,15	-16,08	-19,54	-15,83	-4,56	3,31	3,31
N 450	-11,86	-21,83	-25,30	-21,58	-10,26	-2,36	-2,36
N 451	-6,47	-16,42	-19,89	-16,18	-4,87	3,02	3,02
N 452	-6,18	-16,05	-19,50	-15,81	-4,60	3,23	3,23
N 453	-7,39	-17,22	-20,64	-16,97	-5,82	1,97	1,97
N 455	-5,92	-15,78	-19,22	-15,54	-4,35	3,47	3,47

Nodos	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
N 456	-11,64	-21,63	-25,11	-21,39	-10,05	-2,13	-2,13
N 561	-5,11	-15,09	-18,56	-14,84	-3,51	4,40	4,40
N 562	-3,24	-13,21	-16,68	-12,96	-1,64	6,26	6,26
N 460	-2,06	-11,98	-15,44	-11,74	-0,48	7,39	7,39
N 461	-7,39	-17,27	-20,72	-17,03	-5,81	2,02	2,02
N 462	-10,74	-20,74	-24,23	-20,50	-9,14	-1,21	-1,21
N 463	-12,34	-22,34	-25,82	-22,09	-10,74	-2,81	-2,81
N 464	-9,26	-19,27	-22,76	-19,02	-7,66	0,27	0,27
N 465	-11,43	-21,44	-24,93	-21,19	-9,83	-1,90	-1,90
N 466	-8,43	-18,44	-21,92	-18,19	-6,83	1,10	1,10
N 467	-6,97	-16,96	-20,45	-16,72	-5,37	2,55	2,55
N 468	-8,56	-18,55	-22,03	-18,30	-6,96	0,95	0,95
N 469	-6,52	-16,50	-19,98	-16,25	-4,93	2,98	2,98
N 470	-12,90	-22,91	-26,40	-22,66	-11,30	-3,36	-3,36
N 471	-12,84	-22,87	-26,36	-22,62	-11,24	-3,29	-3,29
N 472	-8,99	-19,01	-22,50	-18,76	-7,39	0,55	0,55
N 473	-7,28	-17,30	-20,79	-17,05	-5,67	2,27	2,27
N 474	1,21	-2,79	-4,18	-2,69	1,85	5,02	5,02
N 475	1,81	-2,50	-4,00	-2,40	2,50	5,91	5,91
N 476	-0,78	-5,27	-6,83	-5,16	-0,06	3,49	3,49
N 477	-4,45	-8,96	-10,53	-8,85	-3,73	-0,16	-0,16
N 478	-1,94	-6,45	-8,02	-6,34	-1,21	2,36	2,36
N 479	11,46	6,95	5,38	7,06	12,18	15,76	15,76
N 480	1,06	-5,81	-8,20	-5,64	2,16	7,61	7,61
N 481	-1,93	-8,83	-11,23	-8,66	-0,82	4,65	4,65
N 482	-2,00	-8,91	-11,32	-8,74	-0,89	4,59	4,59
N 483	-0,79	-7,73	-10,14	-7,56	0,32	5,82	5,82
N 484	-0,35	-7,30	-9,72	-7,13	0,76	6,27	6,27
N 485	1,39	-5,58	-8,00	-5,40	2,51	8,03	8,03
N 486	3,54	-3,46	-5,90	-3,29	4,66	10,20	10,20
N 487	1,45	-5,57	-8,02	-5,40	2,57	8,13	8,13
N 488	3,39	-4,36	-7,06	-4,17	4,63	10,77	10,77
N 489	3,29	-4,60	-7,35	-4,40	4,55	10,81	10,81
N 490	2,32	-5,59	-8,34	-5,39	3,58	9,85	9,85
N 491	2,58	-5,40	-8,18	-5,20	3,86	10,18	10,18
N 492	-1,82	-9,83	-12,62	-9,63	-0,53	5,82	5,82
N 493	-3,37	-11,34	-14,12	-11,15	-2,10	4,22	4,22
N 494	-5,84	-13,83	-16,61	-13,63	-4,56	1,77	1,77
N 495	-5,09	-13,09	-15,88	-12,90	-3,81	2,53	2,53
N 496	-1,71	-9,72	-12,52	-9,53	-0,43	5,92	5,92
N 497	3,36	-4,56	-7,33	-4,37	4,63	10,92	10,92
N 498	-0,95	-9,00	-11,81	-8,80	0,34	6,72	6,72
N 499	2,66	-5,39	-8,19	-5,19	3,95	10,33	10,33
N 500	2,40	-5,64	-8,45	-5,44	3,69	10,07	10,07
N 501	2,63	-5,44	-8,26	-5,24	3,92	10,32	10,32
N 502	-0,77	-8,83	-11,64	-8,63	0,52	6,91	6,91
N 503	1,53	-6,58	-9,41	-6,38	2,83	9,26	9,26
N 504	-5,37	-13,56	-16,42	-13,36	-4,05	2,44	2,44
N 505	-0,10	-8,30	-11,16	-8,10	1,21	7,71	7,71
N 506	-5,89	-14,09	-16,95	-13,89	-4,58	1,91	1,91
N 507	-2,00	-10,20	-13,06	-10,00	-0,69	5,82	5,82
N 508	1,04	-7,13	-9,98	-6,93	2,35	8,83	8,83
N 509	0,17	-8,03	-10,89	-7,83	1,48	7,97	7,97
N 510	-3,96	-12,15	-15,01	-11,95	-2,64	3,85	3,85
N 511	-0,45	-8,66	-11,52	-8,45	0,86	7,36	7,36
N 512	-1,72	-9,92	-12,78	-9,72	-0,40	6,10	6,10
N 513	-3,19	-11,39	-14,25	-11,19	-1,87	4,63	4,63

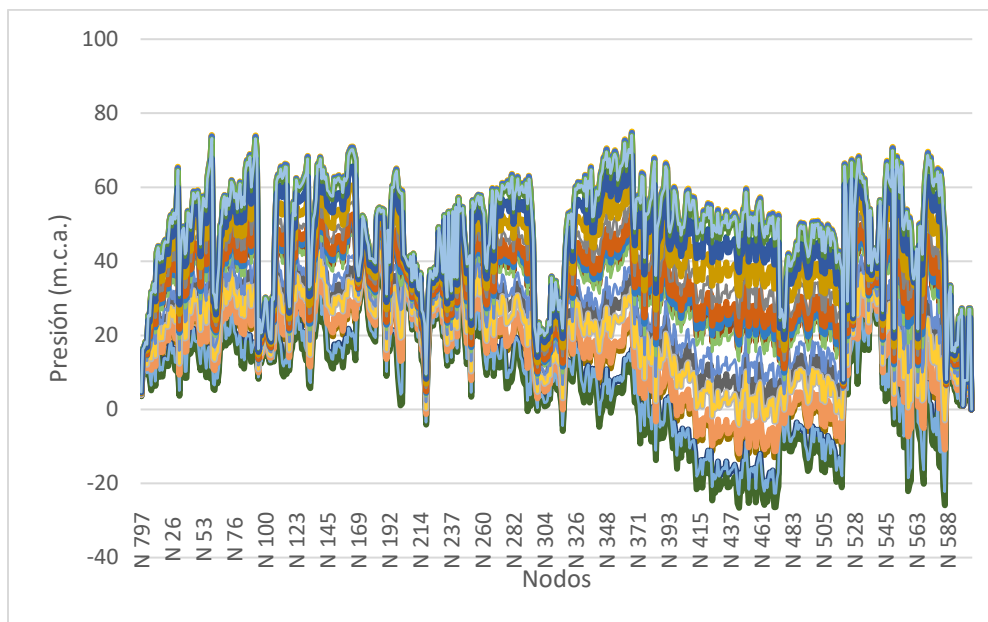
Nodos	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
N 514	-8,51	-16,69	-19,55	-16,49	-7,21	-0,72	-0,72
N 515	-7,11	-15,29	-18,14	-15,09	-5,80	0,69	0,69
N 516	-5,00	-13,01	-15,80	-12,81	-3,72	2,62	2,62
N 520	-7,81	-15,87	-18,67	-15,67	-6,52	-0,14	-0,14
N 518	-10,07	-18,18	-21,00	-17,98	-8,78	-2,36	-2,36
N 522	4,10	3,45	3,23	3,47	4,20	4,72	4,72
N 523	21,10	13,52	10,87	13,70	22,32	28,33	28,33
N 521	19,28	12,66	10,35	12,82	20,34	25,59	25,59
N 525	8,68	5,21	4,00	5,29	9,24	11,99	11,99
N 526	18,19	14,01	12,55	14,11	18,86	22,17	22,17
N 530	17,76	9,69	6,88	9,89	19,05	25,43	25,43
N 251	9,51	6,59	5,58	6,67	9,97	12,28	12,28
N 551	0,79	-2,78	-4,03	-2,70	1,36	4,19	4,19
N 552	16,99	9,28	6,60	9,47	18,23	24,34	24,34
N 553	14,73	5,76	2,63	5,98	16,16	23,27	23,27
N 554	12,17	3,25	0,14	3,47	13,60	20,67	20,67
N 555	5,46	-3,58	-6,73	-3,35	6,91	14,07	14,07
N 556	12,02	2,88	-0,30	3,11	13,49	20,73	20,73
N 557	9,88	3,13	0,78	3,30	10,96	16,31	16,31
N 558	0,70	-7,43	-10,27	-7,23	2,00	8,44	8,44
N 559	2,69	-5,70	-8,63	-5,49	4,04	10,69	10,69
N 560	15,82	9,44	7,21	9,59	16,84	21,90	21,90
N 547	-8,88	-18,69	-22,11	-18,45	-7,31	0,46	0,46
N 454	-6,90	-16,74	-20,17	-16,50	-5,32	2,48	2,48
N 457	-6,57	-15,96	-19,23	-15,73	-5,07	2,37	2,37
N 565	0,18	-3,48	-4,76	-3,39	0,76	3,67	3,67
N 567	3,43	-4,38	-7,10	-4,18	4,68	10,87	10,87
N 568	2,05	-6,03	-8,85	-5,83	3,35	9,75	9,75
N 569	-5,27	-13,28	-16,07	-13,08	-3,98	2,37	2,37
N 570	-6,61	-16,61	-20,10	-16,37	-5,01	2,92	2,92
N 571	14,07	5,96	3,13	6,16	15,36	21,79	21,79
N 573	14,72	6,11	3,11	6,32	16,10	22,92	22,92
N 574	16,05	7,10	3,99	7,32	17,48	24,56	24,56
N 572	11,10	1,76	-1,49	1,99	12,59	19,99	19,99
N 575	10,90	1,31	-2,03	1,55	12,44	20,03	20,03
N 576	4,26	-5,42	-8,80	-5,19	5,81	13,48	13,48
N 577	3,36	-6,33	-9,70	-6,09	4,91	12,59	12,59
N 578	6,88	-2,55	-5,84	-2,32	8,38	15,86	15,86
N 579	2,86	-7,11	-10,59	-6,87	4,46	12,36	12,36
N 580	11,13	2,10	-1,05	2,32	12,57	19,73	19,73
N 581	-1,33	-11,37	-14,86	-11,12	0,27	8,23	8,23
N 582	-0,93	-11,88	-15,69	-11,61	0,82	9,50	9,50
N 583	4,88	-4,50	-7,77	-4,27	6,38	13,82	13,82
N 585	-7,32	-17,29	-20,76	-17,04	-5,72	2,18	2,18
N 586	-12,45	-22,43	-25,91	-22,19	-10,85	-2,94	-2,94
N 587	4,93	4,40	4,22	4,41	5,01	5,43	5,43
N 588	10,51	9,62	9,31	9,65	10,66	11,36	11,36
N 589	12,82	9,73	8,66	9,81	13,31	15,75	15,75
N 590	11,85	8,22	6,96	8,31	12,43	15,31	15,31
N 28	9,67	8,62	8,26	8,65	9,84	10,67	10,67
N 25	10,00	8,85	8,45	8,88	10,19	11,10	11,10
N 29	7,02	5,57	5,07	5,61	7,26	8,41	8,41
N 33	7,22	5,40	4,76	5,44	7,52	8,96	8,96
N 34	4,91	2,80	2,07	2,86	5,25	6,92	6,92
N 591	8,93	6,20	5,25	6,27	9,37	11,54	11,54
N 592	5,48	2,17	1,01	2,25	6,01	8,63	8,63
N 593	7,01	3,61	2,42	3,69	7,56	10,25	10,25

Nodos	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00
N 3	4,10	3,45	3,23	3,47	4,20	4,72	4,72
N 31	4,10	3,45	3,23	3,47	4,20	4,72	4,72
N 59	4,10	3,45	3,23	3,47	4,20	4,72	4,72
N 87	7,01	3,61	2,42	3,69	7,56	10,25	10,25
N 149	7,01	3,61	2,42	3,69	7,56	10,25	10,25
E 1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la simulación hidráulica en EPANET 2.2.

La Tabla 16 presenta las zonas que registran presiones negativas durante las horas de mayor demanda. Se observa que las condiciones más críticas se presentan entre las 9:00 y las 12:00, periodo en el que cinco zonas de la red presentan presiones por debajo de los valores requeridos para una adecuada prestación del servicio. Posteriormente, entre las 13:00 y las 15:00, el número de zonas afectadas disminuye, evidenciando una recuperación gradual de las condiciones hidráulicas del sistema.

En la Figura 22 se puede observar gráficamente el comportamiento de las presiones.

Figura 22*Gráfica de presiones máximas y mínimas*

Estos resultados muestran que, aunque la optimización propuesta y el incremento de los diámetros permiten mejorar la distribución del caudal dentro de la red, las condiciones hidráulicas continúan siendo insuficientes para atender de manera adecuada la demanda proyectada para el año 2051. En consecuencia, durante las horas de mayor consumo se presentan restricciones en el suministro de agua en varias zonas, lo que evidencia la necesidad de implementar medidas para garantizar la continuidad y calidad del servicio en el horizonte de diseño.

Tabla 16*Sectores con presiones negativas durante el periodo de simulación*

Hora	Sectores con presión negativa
9:00	Naranja, Morado, Fucsia, Marrón y Rosado oscuro
10:00	Naranja, Morado, Fucsia, Marrón, Rosado y Verde oscuro
11:00	Naranja, Morado, Fucsia, Marrón, Rosado y Verde oscuro
12:00	Naranja, Morado, Fucsia, Marrón, Rosado y Verde oscuro
13:00	Naranja, Morado, Fucsia y Marrón
14:00	Naranja, Morado y Fucsia
15:00	Naranja, Morado y Fucsia

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de la simulación hidráulica en EPANET 2.2.

El escenario de optimización de la red futura permitió mejorar el comportamiento hidráulico del sistema bajo las condiciones de demanda proyectadas al año 2051. La incorporación de válvulas tipo TCV (válvula reguladora por estrangulación) y el incremento de los diámetros en las tuberías contribuyeron a una mejor distribución del flujo y al desempeño hidráulico del sistema.

Sin embargo, los resultados muestran que el flujo no se distribuye de manera uniforme en la red, lo que limita la capacidad del sistema para abastecer adecuadamente todos los sectores durante los periodos de mayor demanda, especialmente entre las 9:00 y las 15:00, reflejando limitaciones en la capacidad hidráulica bajo la condición de diseño.

4.16.3 Consideraciones para la optimización de la red futura

Se sugiere considerar en futuros estudios la evaluación de otras estrategias de operación del sistema que permitan mejorar el desempeño hidráulico bajo condiciones de alta demanda, garantizando la continuidad y eficiencia en la prestación del servicio.

Se recomienda profundizar en el análisis de configuraciones de la red que permitan alcanzar una mayor uniformidad en la distribución de presiones a lo largo del sistema, especialmente en los sectores que presentan condiciones críticas en el escenario de diseño.

5 Conclusiones

Se consolidó una base de datos técnica y geoespacial del sistema de acueducto del casco urbano del municipio de El Tarra a partir de la información disponible, lo que permitió organizar y estructurar los datos necesarios para la representación y el análisis del sistema mediante herramientas de modelación hidráulica. Esta información constituye una base para futuras actualizaciones y estudios del sistema.

Mediante la integración de QGIS y EPANET se desarrolló el modelo hidráulico de la red de distribución, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema tanto en las condiciones actuales de operación como bajo el escenario de demanda proyectado al horizonte de diseño. La modelación facilitó el análisis de variables como presión, caudal y continuidad del servicio, permitiendo identificar las condiciones hidráulicas de la red y su respuesta frente al crecimiento futuro de la demanda.

La evaluación hidráulica evidenció la existencia de sectores críticos dentro de la red de distribución, donde las condiciones de presión resultan insuficientes para atender adecuadamente la demanda proyectada. Estos resultados indican que la capacidad hidráulica de la infraestructura actual es limitada frente a los requerimientos futuros del sistema.

Como estrategia de optimización, se planteó la incorporación de válvulas de control y la modificación de diámetros en tuberías específicas. Estas medidas contribuyeron a mejorar la distribución de caudales y el control operativo del sistema, facilitando la gestión de la red y la priorización de futuras intervenciones.

La integración de herramientas de modelación hidráulica y análisis geoespacial demostró ser una metodología efectiva para el diagnóstico del sistema de acueducto del municipio de El Tarra, permitiendo identificar problemáticas operativas, proponer alternativas de optimización y generar información técnica que apoye la toma de decisiones para el mejoramiento de la prestación del servicio de agua potable.

En respuesta a la pregunta de investigación, las mejoras planteadas para la red de distribución corresponden a la instalación de seis válvulas tipo TCV y al redimensionamiento de tuberías principales y secundarias. Estas medidas permitieron mejorar el comportamiento hidráulico del escenario optimizado y eliminar las presiones negativas identificadas inicialmente. Al evaluar esta configuración para el horizonte de diseño, se evidenció que el incremento de la demanda genera nuevamente deficiencias hidráulicas en algunos puntos de la red, por lo que las condiciones futuras requieren ajustes adicionales en la infraestructura.

6 Recomendaciones

Se recomienda a la Empresa de Servicios Públicos de El Tarra (ESPTA) evaluar la implementación de las estrategias de optimización propuestas en el presente estudio, incluyendo la incorporación de válvulas de control y las modificaciones de diámetros planteadas, como alternativas para mejorar el comportamiento de la red de distribución.

Se recomienda a la empresa ESPTA fortalecer los sistemas de medición mediante la instalación y el mantenimiento de equipos de macromedición y micromedición, permitiendo obtener información confiable sobre los consumos y desarrollar patrones de demanda propios para el municipio (CONAGUA, 2019).

Se recomienda a la Alcaldía Municipal y a la ESPTA considerar la realización de estudios complementarios que evalúen alternativas de ampliación o mejoramiento de la infraestructura existente, con el propósito de garantizar condiciones adecuadas de presión y continuidad del servicio frente al crecimiento proyectado de la demanda en el municipio de El Tarra.

Se recomienda complementar y actualizar el modelo hidráulico con registros de caudal, presión y consumo, así como con la verificación en campo de la ubicación y las condiciones de

operación de los elementos de control existentes, con el fin de fortalecer la representación del comportamiento real de la red.

La propuesta de optimización desarrollada sirve como base técnica para apoyar la toma de decisiones por parte de la empresa de Servicios Públicos de El Tarra (ESPTA). En caso de considerarse su implementación, se recomienda que la empresa ajuste la propuesta de acuerdo con sus necesidades operativas, disponibilidad de recursos y fases de ejecución que establezca para el mejoramiento del sistema de acueducto.

7 Referencias

Alcaldía Municipal de El Tarra. (2020). *Plan de desarrollo municipal “Con amor por El Tarra”*. 2020-2023.

<https://es.scribd.com/document/790562237/Plan-desarrollo-ElTarra>

Alcaldía Municipal de El Tarra. (2024a). *Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de El Tarra, Norte de Santander*.

Alcaldía Municipal de El Tarra. (2024b). *Plan de desarrollo municipal El Tarra 2024-2027*.

https://eltarranortedesantander.micolombiadigital.gov.co/sites/eltarranortedesantander/content/files/001425/71218_66590_10712_pdmeltarra202420273-1.pdf

Banco Mundial. (2019). *El deterioro de la calidad del agua reduce en un tercio el crecimiento económico en algunos países*.

<https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2019/08/20/worsening-water-quality-reducing-economic-growth-by-a-third-in-some-countries>

Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento (CRA). (2025). *Infografía estudio de señales sobre pérdidas y demanda de agua*.

<https://www.cra.gov.co/sites/default/files/documents/2025-03/Infografi%CC%81a%20Estudio%20Pe%CC%81rdidas%20y%20Demanda%20de%20Agua.pdf>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Sistemas de medición del agua. Producción, operación y consumo*.

<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro9.pdf>

Congreso de la República de Colombia. (1994, 11 de julio). *Ley 142 de 1994: Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.*

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>

Crapper, M., Motta, D., Keenan-Jones, D., & Monteleone, M. (2022). *Hydraulic engineering analysis of Roman water infrastructure: A review of practice and possibilities.* *Water History*, 14(1), 5–19.

<https://doi.org/10.1007/s12685-021-00285-5>

Creaco, E., & Haidar, H. (2019). *Multiobjective Optimization of Control Valve Installation and DMA Creation for Reducing Leakage in Water Distribution Networks*, 145(10)

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001114](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001114)

Dandy, G. C., Simpson, A. R., & Murphy, L. J. (1996). *An improved genetic algorithm for pipe network optimization.* *Water Resources Research*, 32(2), 449–458.

<https://doi.org/10.1029/95WR02917>

De Feo, G., Angelakis, A. N., Antoniou, G. P., El-Gohary, F., Haut, B., Passchier, C. W., & Zheng, X. Y. (2013). *Historical and technical notes on aqueducts from prehistoric to medieval times.* *Water*, 5(4), 1996–2025.

<https://www.mdpi.com/2073-4441/5/4/1996>

Deb, A., Das, S., Gupta, R., & Mukherjee, A. (2023). *Water Distribution System Design using QGIS and EPANET.* *Environmental Industry Letters*, 1(2), 101–110.

<https://doi.org/10.15157/eil.2023.1.2.101-110>

Deming, D. (2019). *The aqueducts and water supply of ancient Rome*. *Groundwater*, 58(1), 152–161.

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7004096/>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (1993). *XVI Censo Nacional de Población y V de Vivienda 1993*.

https://biblioteca.dane.gov.co/media/libros/LB_800_1993.PDF

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2005). *Censo General 2005: Colombia. Resultados nacionales*.

<https://www.dane.gov.co/files/censos/libroCenso2005nacional.pdf>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2018). *Censo Nacional de Población y Vivienda 2018: Perfil municipal El Tarra, Norte de Santander*.

https://sitios.dane.gov.co/cnpv/app/views/informacion/perfiles/54250_infografia.pdf

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2014). *Producto 4: Informe de resultados de la evaluación, análisis costo beneficio y tercera entrega de documentación bases de datos*.

https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Sinergia/Documentos/135_InformeFinal.pdf

Getnet, M., & Abate, M. (2021). *Hydraulic modeling and performance evaluation of urban water distribution system using EPANET: The case of Debre Tabor town, Ethiopia*. *Journal of Water Resource and Protection*, 13(8), 660–675.

<https://doi.org/10.4236/jwarp.2021.138037>

Gobernación de Norte de Santander, Secretaría de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2022). *Informe de gestión: 31 de diciembre de 2022*.

<https://administrador.nortedesantander.gov.co/wp-content/uploads/2023/02/INFORME-DE-GESTION-4to-TRIMESTRE-2022-SECRETARIA-DE-AGUA-POTABLE-Y-SANEAMIENTO-BASICO.pdf>

Instituto de Ciencia Política Hernán Echavarría Olózaga. (2016). *Competitividad en el Catatumbo: diagnóstico y propuestas de política pública*.

<https://icpcolombia.org/dev/wp-content/uploads/2016/05/Competitividad-en-el-Catatumbo.pdf>

Lambert, A. O., & McKenzie, R. D. (2002). *Practical experience in using the IWA water balance and performance indicators*. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(4), 1–12.

<https://doi.org/10.2166/ws.2002.0113>

Martínez-Solano, F. J., Iglesias-Rey, P. L., & Mora-Meliá, D. (2019). *QGISRed: An open-source tool for water distribution network analysis and management*. *Water*, 11(11), 2312.

<https://doi.org/10.3390/w11112312>

Mathye, R. P., Scholz, M., & Nyende-Byakika, S. (2022). *Optimal pressure management in water distribution systems: Efficiency indexes for volumetric cost performance, consumption and linear leakage measurements*. *Water*, 14(5), 805.

<https://doi.org/10.3390/w14050805>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). *Resolución 0330 de 2017: Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS)*.

<https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/0330%20-%202017.pdf>

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2023). *Informe de rendición de cuentas 2023*.

<https://www.minvivienda.gov.co/rendicion-de-cuentas/informe-de-rendicion-de-cuentas-2023>

Muller, A. L., Gericke, O. J., & Pietersen, J. P. J. (2020). *Methodological approach for the compilation of a water distribution network model using QGIS and EPANET*. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 62(4), 32-43.

<https://doi.org/10.17159/2309-8775/2020/v62n4a4>

Naciones Unidas. (2010). *El derecho al agua y el saneamiento* (Resolución 64/292).

<https://docs.un.org/es/A/RES/64/292>

Naciones Unidas. (2022). *Objetivo 6: Agua limpia y Saneamiento*.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/>

Rincón Amaya, A. Y., & Quintero Claro, J. P. (2025). *Sectorización de las redes de distribución de agua potable de Acosmi en el municipio de Río de Oro, Cesar, basada en patrones de consumo, para la optimización del sistema*. [Tesis de grado, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña]. Repositorio Institucional UFPSO.

<https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/xmlui/handle/20.500.14167/6294>

Serafeim, A. V., Kokosalakis, G., Deidda, R., Fourniotis, N. T., Karathanasi, I., & Langousis, A. (2023). *Probabilistic modelling of water distribution networks and resilient reduction of leakages: Large scale application to the city of Patras in western Greece*. EGU General Assembly 2023, EGU23-5551.

<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-5551>

Shiu, C.-C., Chung, C.-C., & Chiang, T. (2024). *Enhancing the EPANET Hydraulic Model through Genetic Algorithm Optimization of Pipe Roughness Coefficients*. 38, 223-341
<https://doi.org/10.1007/s11269-023-03672-0>

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2024). *Informe de gestión con enfoque en responsabilidad social*.

<https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Informe-de-gestion-SSPD-2024.pdf>

U.S. Environmental Protection Agency. (2020). *EPANET 2.2 User Manual*. (EPA/600/R-20/133).

<https://www.epa.gov/water-research/epanet>

UNESCO. (2018). *Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza*.

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424>

UNESCO. (2023). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2023: alianzas y cooperación por el agua*.

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386807>

8 Apéndices

Apéndice A. Modelo QGIS

Apéndice B. Plano de catastro de la red de distribución existente

Apéndice C. Cálculo del diagnóstico de población y caudales Tarra

Apéndice D. Modelo hidráulico en EPNET Tarra población actual tiempo cero

Apéndice E. Modelo hidráulico en EPNET Tarra población actual con patrón de consumo

Apéndice F. Modelo hidráulico en EPNET Tarra población actual optimizada

Apéndice G. Modelo hidráulico en EPNET Tarra población actual 24h optimizada

Apéndice H. Modelo hidráulico en EPNET Tarra población futura tiempo cero

Apéndice I. Modelo hidráulico en EPNET Tarra población futura con patrón de consumo

Apéndice J. Modelo hidráulico en EPNET Tarra población futura con la propuesta actual optimización 24h

Apéndice K. Modelo hidráulico en EPNET Tarra población futura optimización

Apéndice L. Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de El Tarra, Norte de Santander

Nota. El archivo digital correspondiente a los apéndices se encuentra en el siguiente enlace de Google Drive:

https://drive.google.com/drive/folders/1OpLL469ZAnSsHyD74ZsW7b8rshbSAbTK?usp=drive_link