

CONSTRUCCIÓN DE MODELO HIDRÁULICO Y ANÁLISIS DE LA RED
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER.

SINDY YOJANA BECERRA PARADA
SERGIO NICOLÁS GONZÁLEZ DULCEY

DIRECTOR
CARLOS ALEXIS BONILLA GRANADOS
MAGISTER EN TECNOLOGÍAS PARA EL MANEJO DE AGUAS Y RESIDUOS

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL
PAMPLONA

2024

CONSTRUCCIÓN DE MODELO HIDRÁULICO Y ANÁLISIS DE LA RED
DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER.

SINDY YOJANA BECERRA PARADA

SERGIO NICOLÁS GONZÁLEZ DULCEY

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

DIRECTOR

CARLOS ALEXIS BONILLA GRANADOS

MAGISTER EN TECNOLOGÍAS PARA EL MANEJO DE AGUAS Y RESIDUOS

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA

PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL

PAMPLONA

2024

Agradecimientos

Quisiéramos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas y entidades que han sido fundamentales en la realización de esta tesis.

En primer lugar, agradecemos al Msc. Carlos Bonilla Granados por su orientación experta, apoyo constante y valiosos consejos a lo largo de todo el proceso de investigación. Su dedicación y conocimientos han sido cruciales para el desarrollo de este trabajo.

Agradecemos también a la Ing. Lizeth Amparo López por su valiosa contribución al proporcionar información de alta calidad sobre los elementos de la red. Su apoyo ha sido fundamental para la precisión y éxito del estudio.

Nuestro agradecimiento al señor Gerson, fontanero encargado de la supervisión de distintos elementos del sistema de acueducto. Su experiencia y dedicación en la caracterización de numerosos elementos han sido esenciales para obtener datos precisos y detallados.

A nuestra familia y amigos, por su paciencia, comprensión y aliento durante todo el tiempo que dedicamos a esta investigación. Su apoyo incondicional ha sido una fuente constante de motivación.

Finalmente, queremos expresar nuestra gratitud a todas las personas y organizaciones que, de alguna manera, contribuyeron al éxito de este proyecto, aunque no se mencionen específicamente aquí.

Tabla de Contenido

Introducción	18
1 Planteamiento del Problema y Justificación	20
1.1 Planteamiento del Problema	20
1.1.1 Pregunta problema	21
1.2 Justificación	21
2 Alcance y Limitaciones.....	23
2.1 Alcance	23
2.2 Limitaciones.....	23
3 Objetivos.....	24
3.1 Objetivo General	24
3.2 Objetivos Específicos.....	24
4 Marco Referencial	25
4.1 Marco de antecedentes o estado del arte.....	25
4.2 Marco Conceptual	31
4.3 Marco Teórico.....	37
4.4 Marco Legal	44
4.5 Marco Contextual.....	46
5 Metodología.....	48
5.1 Fase 1 – Recopilación y Análisis de Información.	48
5.1.1 Recopilación De Información Actual	48
5.1.2 Levantamiento De Información En Campo	48
5.1.3 Elaboración De Plano Base.....	50
5.2 Fase 2 – Análisis De Consumos, Demandas Y Proyección De Población	50
5.2.1 Información Sobre Censos En Pamplona	50
5.2.2 Proyección de Población.....	51
5.2.3 Cálculo De Caudales De Demandas Teóricos	53
5.2.4 Cálculo del caudal por nodos.....	55
5.2.5 Cálculo de IANC.....	57
5.3 Fase 3 – Creación de Modelo Digital de Elevación (MDE)	58
5.3.1 Modelo Digital de Elevación por Fotogrametría	58

5.3.2	Modelo Digital de Elevación por Información Satelital	60
5.4	Fase 4 - Construcción Modelo Hidráulico a Través de QGIS, Complementos GIS y EPANET.....	61
5.4.1	Creación del Modelo Hidráulico.....	61
5.4.2	Cálculo de Caudal de Demanda en Nodos.....	64
5.4.3	EPANET	65
5.5	Fase 5 – Macro calibración del Sistema y Análisis	65
5.5.1	Variación de los Coeficiente de Rugosidad	66
5.5.2	Obtención de un Coeficiente de Pérdidas Menores por Accesorios	66
5.5.3	Cálculo de Coeficiente de Pérdidas por Fugas	67
5.5.4	Calibración Mediante Código Iterativo en Python	68
6	Análisis de Documentación Y Catastro de Redes	70
6.1	Documentación Consultada	70
6.2	Descripción del Sistema de Acueducto Urbano de Pamplona, Norte de Santander	74
6.2.1	Fuentes de Abastecimiento - Captaciones	75
6.2.1.1	Captación N°1 – Quebrada Cariongo.	75
6.2.1.2	Captación N°2 – Quebrada El Rosal	76
6.2.1.3	Captación N°3 – Quebrada El Mono.....	77
6.2.2	Aducciones.....	79
6.2.2.1	Aducción No.1.....	79
6.2.2.2	Aducción No.2.....	80
6.2.2.3	Aducción No.3.....	80
6.2.2.4	Aducción No.4.....	80
6.2.3	Desarenadores	80
6.2.3.1	Desarenador No.1	80
6.2.3.2	Desarenador N°2.....	81
6.2.3.3	Desarenador N°3.....	82
6.2.3.4	Desarenador N°4.....	83
6.2.4	Conducción	84
6.2.4.1	Conducción No.1.	84

6.2.4.2	Conducción No.2.	85
6.2.4.3	Conducción No.3.	85
6.2.4.4	Conducción No.4.	85
6.2.5	Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP)	86
6.2.5.1	Planta de Tratamiento de Agua Potable No.1 – Cariongo.....	86
6.2.5.1.1	Mezcla Rápida – Dosificación.....	88
6.2.5.1.2	Floculación.	88
6.2.5.1.3	Sedimentación.	89
6.2.5.1.4	Filtración.....	90
6.2.5.1.5	Desinfección.	90
6.2.5.2	Planta de Tratamiento de Agua Potable No.2 – Monteadentro.	91
6.2.5.2.1	Mezcla Rápida.	93
6.2.5.2.2	Floculación.	94
6.2.5.2.3	Sedimentación.	95
6.2.5.2.4	Filtración.....	96
6.2.5.2.5	Desinfección.	97
6.2.6	Tanques de Almacenamiento.....	97
6.2.7	Red de Distribución	100
6.2.8	Estaciones de Bombeo	101
6.2.9	Cámaras de Quiebre	101
6.3	Análisis de Información y Recopilación de Información Faltante	102
6.3.1	Actualización Plano de Sistema de Acueducto de Pamplona	109
6.3.1.1	Trazado de Redes de Distribución Faltantes en Plano.....	109
6.3.1.2	Identificación de Nodos en Red de Distribución de Sistema de Acueducto.	110
6.4	Usuarios	114
6.5	Conclusión y Recomendación del Objetivo.....	115
7	Análisis de Consumos Y Estimación de Demandas	117
7.1	Proyección de Poblacional de Casco Urbano de Pamplona.....	117
7.2	Área Existente Urbana	122
7.3	Identificación de Áreas por Tipo de Uso	123

7.4	Cálculo de Caudales Residenciales de Años Proyectados.....	124
7.5	Cálculo de Caudal Medio Diario Teórico	130
7.6	Análisis de La Producción Horaria Mes de Mayo de las Plantas de Tratamiento	131
7.6.1	Planta de Tratamiento Cariongo	131
7.6.2	Planta de Tratamiento Monteadentro.....	135
7.7	Consumos.....	139
7.8	Caudal Medio Diario por Tipo de Usuario	142
7.9	Conclusiones y Recomendaciones del Objetivo	143
8	Modelo Digital de Elevación	144
8.1	Obtención de información.....	144
8.2	Procesamiento de datos.....	146
8.3	Modelo Digital de Elevación	152
8.4	Combinación de los Modelos Digital de Elevación.....	155
8.5	Conclusiones y Recomendaciones del Objetivo	157
9	Construcción de Modelo Hidráulico	159
9.1	Modelo Hidráulico en QWATER y QGISRED.....	159
9.1.1	Creación de Nodos.....	159
9.1.2	Trazado de tuberías	161
9.1.3	Parametrización de las Características del Sistemas.....	162
9.2	Simulación en Periodo Extendido.....	164
9.3	Comparativa Entre Modelos	165
9.4	Conclusiones y Recomendaciones del Objetivo	167
10	Calibración del Modelo Hidráulico.....	170
10.1	Variación de la Rugosidad en las Tuberías.....	170
10.2	Obtención del Coeficiente de Pérdidas Menores por Accesorios	171
10.3	Cálculo del Coeficiente de Fugas	171
10.4	Iteración del Coeficiente de Fugas.....	172
10.5	Resultados de la Calibración.....	175
10.5.1	Calibración de Caudales en el Sistema	177
10.5.2	Calibración de Presiones en el Sistema.....	178

10.6	Modelo Hidráulico Calibrado	182
10.6.1	Resumen del Proyecto	182
10.6.2	Balance de Caudales.....	183
10.6.3	Comparativa de Caudales entre Plantas	184
10.6.4	Presiones en Modelo Hidráulico Calibrado	187
10.6.5	Velocidades en el Sistema.....	192
10.7	Modelo Hidráulico en QGISRED.....	193
10.8	Conclusiones y Recomendaciones del Objetivo	195
11	Conclusiones.....	198
12	Recomendaciones.....	201
13	Actividades Derivadas del Proyecto.....	203
13.1	8vo Encuentro Interinstitucional de Semilleros de Investigación.....	203
13.2	I Encuentro Nacional de Semilleros de Investigación	204
13.3	Preparación de un Artículo Científico: Resultados y Hallazgos.....	204
Referencias		205
Apéndices.....		211

Lista de Tablas

Tabla 1	Rugosidad de Hazen-Williams para Diferentes Materiales y Edades.	42
Tabla 2.	Coeficiente para Perdidas en Accesorios y Codos.	43
Tabla 3	Modelo de Ficha Para Levantamiento de Información.....	49
Tabla 4	Dotación Neta Máxima por Habitante.	53
Tabla 5	Valores del Factor de Mayoración K.....	55
Tabla 6.	Catastro del Sistema de Acueducto.	74
Tabla 7	Descripción de Tanques de Almacenamiento.	98
Tabla 8	Descripción de Elementos del Sistema Cariongo.....	104
Tabla 9	Descripción de Elementos del Sistema Monteadentro.	105
Tabla 10	Cámaras de Quiebre.....	107
Tabla 11.	Estaciones de Bombeo.....	108
Tabla 12	Longitud de Tubería por Material y Diámetro.	112
Tabla 13	Población Histórica del Casco Urbano de Pamplona.	117
Tabla 14	Cálculo de la Tasa de Crecimiento de los Diferentes Métodos – Caso 1	118
Tabla 15	Proyecciones Poblacionales Comparativa de Distintos Métodos – Caso 1....	119
Tabla 16	Cálculo de Tasas de Crecimiento por Diferentes Métodos - Caso 2.	120
Tabla 17	Proyecciones Poblacionales Comparativa de Distintos Métodos - Caso 2. ...	121
Tabla 18	Uso del Suelo del Casco Urbano, Pamplona.	123
Tabla 19	Caudales para Caso 1.....	125
Tabla 20	Caudales para Caso 2.....	126
Tabla 21	Caudales Caso 1 con Porcentaje de Pérdidas del Sistema para el Año 2023.	128
Tabla 22	Caudales Caso 2 con Porcentaje de Pérdidas del Sistema para el Año 2023.	128

Tabla 23 Producción Mensual de las Plantas Cariongo y Monteadentro para el Año 2024.

..... 129

Tabla 24 Producción Diaria PTAP Cariongo Mes de Mayo - 2024. 132

Tabla 25 Producción Diaria PTAP Monteadentro Mes de Mayo - 2024. 136

Tabla 26 Caudal Medio Diario por Tipo de Usuario. 142

Tabla 27 Variación de la Rugosidad por Material según los Años de Uso. 170

Tabla 28 Valores Observados de Presión en el Sistema. 179

Lista de Figuras

Figura 1 Ubicación del Casco Urbano del Municipio de Pamplona.	47
Figura 2 Zona Urbana de la Ciudad de Pamplona y Uso del Suelo.	47
Figura 3 Fases para la Ejecución de la Investigación.	48
Figura 4 Plano Red de Acueducto de Pamplona 2008.	71
Figura 5 Plano Red de Acueducto de Pamplona 2016	72
Figura 6 Bocatoma No.1 Quebrada Cariongo.	76
Figura 7 Bocatoma No.2 Quebrada El Rosal.	77
Figura 8 Bocatoma No.3 Quebrada El Mono	78
Figura 9 Bocatoma No.4 Quebrada Potreritos.	79
Figura 10 Desarenador No.1.....	81
Figura 11 Desarenador No.2.....	82
Figura 12 Desarenador No.3.....	83
Figura 13 Desarenador No.4.....	84
Figura 14 Planta de Tratamiento de Agua Potable - Cariongo.....	87
Figura 15 Esquema General de PTAP- Cariongo.....	87
Figura 16 Canaleta Tipo Parshall.	88
Figura 17 Floculador Tipo Alabama.	89
Figura 18 Sedimentador.	89
Figura 19 Filtración.	90
Figura 20 Planta de Tratamiento de Agua Potable - Monteadentro.	92
Figura 21 Esquema general PTAP - Monteadentro.....	92
Figura 22 Dosificador y Vertedero.....	93

Figura 23 Cloración.....	94
Figura 24 Floculador Tipo Alabama.	95
Figura 25 Sedimentador.	96
Figura 26 Filtro.....	97
Figura 27 Ejemplo de Ficha Levantamiento de Elementos Red de Distribución.....	100
Figura 28 Esquema Básico del Sistema de Acueducto.	103
Figura 29. Ubicación Estaciones de Bombeo y Cámaras de Quiebre	106
Figura 30 Trazado de Red de Distribución Barrio Cariongo.	110
Figura 31 Ubicación de Nodos y Categorización.....	111
Figura 32 Cantidad de Tubería por Material y Diámetro.	113
Figura 33 Tubería Admitida por el RAS.	113
Figura 34 Distribución de Usuarios en el Sistema de Acueducto, Abril 2024.....	114
Figura 35 Comparativa entre Métodos de Proyección – Caso 1.	119
Figura 36 Comparativa entre Métodos de Proyección – Caso 2.	121
Figura 37 Plano Perimetral del Área Urbana de Pamplona.....	122
Figura 38 Polígonos según el uso del suelo en el casco urbano de Pamplona.	124
Figura 39 Índice De Agua No Contabilizada (IANC) Vigencias 2022 vs 2023	127
Figura 40 Curvas de Producción Diarias PTAP Cariongo.	133
Figura 41 Caudal Promedio Horario PTAP Cariongo Mes de Mayo - 2024.	134
Figura 42 Factor de Mayoración K PTAP Cariongo Mes de Mayo - 2024.	135
Figura 43 Curvas de Producción Diarias PTAP Monte dentro.....	137
Figura 44 Caudal Promedio Horario PTAP Monte dentro Mes de Mayo - 2024.....	138
Figura 45 Factor de Mayoración K PTAP Monte dentro Mes de Mayo - 2024.....	139

Figura 46 Consumo Promedio Mensual por Tipo de Usuario.....	140
Figura 47 Análisis de Consumos Promedio Mensual SUI.	141
Figura 48 Fotografía Aérea Tomada con Dron: Salida del ISER hacia la Vía al Progreso (V01, F001).	144
Figura 49 Polígono Casco Urbano Municipio de Pamplona.	145
Figura 50 Rásters del Casco Urbano Municipio de Pamplona.....	146
Figura 51 Fotografías Tomadas con Dron: Interferencia por Nubosidad (V05, F097).	147
Figura 52 Revisión de Calidad de las Fotografías Tomadas con Dron (V05, F097). ...	148
Figura 53 Nube de Puntos del Bloque 01.	149
Figura 54 Punto de Georreferenciación Parque Central, IGAC.	150
Figura 55 Nube de Puntos Georreferenciada.....	151
Figura 56 Ráster Unificado - Zona de Interés.	152
Figura 57 Clasificación del MDE por Puntos.....	153
Figura 58 Modelo Digital de Elevación por Fotogrametría Casco Urbano de Pamplona.	154
Figura 59 Modelo Digital de Elevación Satelital de la Zona Poligonal de Pamplona. .	155
Figura 60 Combinación del MDE por Fotogrametría y Satelital.	156
Figura 61 Obtención de Elevación en 04 Puntos de Muestreo.....	157
Figura 62 Creación de Nodos en la Herramienta QGIS.	160
Figura 63 Elevación en Algunos Nodos del Sistema de Acueducto.	161
Figura 64 Trazado de la Red de Tuberías en el Sistema de Acueducto.	162
Figura 65 Parametrización del Modelo Hidráulico en QWATER	163
Figura 66 Modelo Teórico (E.1) y por Consumo (E.2) en Periodo Extendido.	164

Figura 67 Mapas de Contorno de Presiones.	165
Figura 68 Comparativa de Balance de Caudales en los Dos Escenarios.	166
Figura 69 Resultados de la Iteración de Coeficiente Emisor.	175
Figura 70 Balance de Caudales en Modelo Hidráulico No Calibrado.	176
Figura 71 Puntos de Presión en el Sistema.	179
Figura 72 Comparativa Pre y Post Calibración de Presiones en Epanet 2.2.	180
Figura 73 Comparación de Valores Medios de Presiones Observadas vs Simuladas. ..	181
Figura 74 Diagrama de Dispersión de Presiones Observadas vs Simuladas.	182
Figura 75 Resumen del Modelo Hidráulico Calibrado.	183
Figura 76 Balance de Caudales Calibrado.	184
Figura 77 Abastecimiento de Demandas por Planta de Tratamiento.	185
Figura 78 Tuberías Matriz por Planta de Tratamiento.	186
Figura 79 Caudal Transportado por Tuberías Matriz.	187
Figura 80 Mapa de Contorno de Presiones a las 04:00 a. m y 10:00	188
Figura 81 Mapa de Frecuencia de Presiones a las 10:00 a.m.	191
Figura 82 Mapa de Frecuencia de Presiones a las 04:00 a.m.	192
Figura 83 Mapa de Frecuencia de Velocidades a las 10:00 a.m.	193
Figura 84 Modelo Hidráulico en QGISRED.	194
Figura 85 Respuesta del Comité Organizador 8vo EISI.	203

Lista de Apéndices

Apéndice A. Actualización Sistema Acueducto Pamplona 2008.	211
Apéndice B. Actualización Sistema Acueducto Pamplona 2016.	211
Apéndice C. Catastro Redes Acueducto.	211
Apéndice D. Fichas Elementos Red de Distribución.	211
Apéndice E. Actualización Sistema Acueducto Pamplona 2024. (O en .pdf).	211
Apéndice F. Caracterización por Nodos de Sistema de Acueducto.	211
Apéndice G. Proyecciones Poblacionales.	211
Apéndice H. Zonificación de Áreas por Tipo de Suelo.	211
Apéndice I. Distribución de Áreas de Pamplona. (O en .pdf).	211
Apéndice J. Datos Caudales de Producción en las Plantas.	211
Apéndice K. Resultados de Iteración Coeficiente de Fugas.	211
Apéndice L. Modelo Hidráulico Calibrado.	211
Apéndice M. Resultados de Modelo Hidráulico Calibrado.	211

Resumen

El presente proyecto describe la ejecución del trabajo de grado para la obtención del título de ingeniero civil, en modalidad de proyecto de investigación. Este se llevará a cabo en el municipio de Pamplona, Norte de Santander, y tiene como objetivo principal desarrollar la construcción de modelo hidráulico y análisis de la red distribución de agua potable de Pamplona, Norte de Santander.

El proceso de modelación se llevó a cabo después de obtener un conjunto de información pertinente para una correcta ejecución del mismo. Inicialmente, se buscó la información existente sobre la red de suministro de agua, la cual se puede encontrar en las empresas prestadoras de servicio público de acueducto y alcantarillado o entidades gubernamentales como alcaldía y/o gobernación. Esta información fue analizada y actualizada para obtener una base confiable en el desarrollo del proyecto, y, se compararon los datos de producción y demanda de los usuarios del servicio para estimar la demanda y los caudales de la red de distribución. Fue necesaria la obtención de un modelo digital de elevación (MDE) que permitió obtener la topografía de la ciudad y la altura de los elementos de la red de distribución.

El modelo hidráulico se creó en la herramienta QGIS con la ayuda del complemento QWATER y QGISRED, lo que permitió una integración eficiente de datos geoespaciales y parámetros hidráulicos. Esta combinación facilitó la construcción precisa del modelo y la posterior macro calibración de la red existente de agua. Para llevar a cabo la calibración, se utilizaron datos de presión tomados de piezómetros existentes en la red.

Palabras clave:

Red de distribución, Modelo hidráulico, Sistemas de Información Geográfica (GIS), Modelo digital de elevación (MDE), EPANET.

Abstrac

This project describes the execution of the undergraduate work for the degree of civil engineer, in the form of a research project. This will be carried out in the municipality of Pamplona, Norte de Santander, and its main objective is to develop the construction of a hydraulic model and analysis of the drinking water distribution network of Pamplona, Norte de Santander.

The modeling process was carried out after obtaining a set of pertinent information for its correct execution. Initially, the existing information on the water supply network was sought, which can be found in the public water and sewerage service providers or governmental entities such as the mayor's office and/or the governor's office. This information was analyzed and updated to obtain a reliable basis for the development of the project, and the production and demand data of the service users were compared to estimate the demand and flow rates of the distribution network. It was necessary to obtain a digital elevation model (DEM) to obtain the topography of the city and the height of the distribution network elements.

The hydraulic model was created in the QGIS tool with the help of the QWATER and QGISRED plug-in, which allowed an efficient integration of geospatial data and hydraulic parameters. This combination facilitated accurate model construction and subsequent macro-calibration of the existing water network. Pressure data taken from existing piezometers in the network were used to perform the calibration.

Keys words

Distribution network, Hydraulic model, Geographic Information Systems (GIS), Digital Elevation Model (DEM), EPANET.

Introducción

El acceso al agua potable es un derecho humano fundamental que impacta directamente en la salud, la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible de las comunidades. Sin embargo, a pesar de los avances significativos en infraestructura y tecnología, persisten desafíos en la distribución eficiente y equitativa de este recurso vital. En el contexto actual, la gestión adecuada de la red de distribución de agua se ha vuelto indispensable para garantizar su disponibilidad y calidad para todas las personas.

En el caso de Pamplona, la gestión de la red de distribución de agua enfrenta desafíos complejos, esto debido a que no se cuenta con datos, información actualizada de la red o un modelo hidráulico por ello, la gestión del sistema actual se ha hecho de manera empírica a cargo de los operadores que, aunque plantean soluciones a las necesidades pueden no llegar a ser las más eficientes o efectivas con el fin de intentar asegurar un suministro adecuado de agua a la población.

La red de distribución actual funciona con modelos matemáticos los cuales permiten la creación de un modelo hidráulico, entender cómo funcionan estos modelos hidráulicos nos da una mejor visión del estado actual del sistema real. Estos modelos no solo facilitan la comprensión del sistema, sino que también ofrecen la posibilidad de realizar modificaciones virtuales y evaluar su impacto antes de implementarlas en el sistema físico cumpliendo con las características hidráulicas y de normatividad. Sin embargo, el desarrollo y la calibración de estos modelos hidráulicos son procesos complejos que requieren la integración de diversas actividades y la aplicación de metodologías específicas.

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar una metodología integral para la construcción y calibración de un modelo hidráulico de la red de distribución de agua. Para lograr este objetivo, se llevó a cabo una serie de actividades que incluyen la búsqueda bibliográfica de

información relevante, la verificación en campo de los datos existentes, el catastro de redes, el levantamiento de información sobre los elementos de la red, la estimación de demandas y consumos, entre otros.

La implementación de esta metodología se realizó utilizando herramientas avanzadas como QGIS, incluido el complemento QWATER y QGISRED, que facilitó la visualización y análisis de los resultados obtenidos. Con la creación del modelo hidráulico se puede predecir la operación del sistema de acuerdo a diferentes escenarios como posibles interrupciones en el suministro, cortes por mantenimiento en zonas específicas, expansiones de tuberías proyectadas en nuevas zonas de cobertura, cambios de características de elementos con el cual poder hacer una verificación del comportamiento en el sistema. Se espera que esta investigación contribuya significativamente a mejorar la comprensión del funcionamiento del sistema de distribución de agua y a identificar áreas de mejora para optimizar su operación y mantenimiento.

1 Planteamiento del Problema y Justificación

1.1 Planteamiento del Problema

El municipio de Pamplona cuenta con una red de distribución de agua potable, donde las dimensiones de las tuberías en la red principal varían entre 150 mm y 400 mm, conectándose con sistemas más pequeños que tienen diámetros de 50 mm a 100 mm. Esta red incluye tuberías de diversos materiales y edades. Sin embargo, el servicio de abastecimiento presenta problemas intermitentes en ciertos barrios como es el caso del Chapinero, Simón Bolívar, Santa Marta (parte alta), entre otros, debido a bajas presiones en determinadas horas del día.

El Reglamento Técnico de Agua y Saneamiento (RAS), establece en los Artículos 31 la obligación de las empresas prestadoras de servicios de llevar a cabo un monitoreo y control de las redes para garantizar un servicio adecuado del sistema. Además, en el artículo 42 indica mantener un catastro actualizado de la red para identificar la existencia de tuberías, su ubicación y la mayor cantidad posible de anotaciones sobre accesorios en la red, el artículo 57 en el que se establece que todos los sistemas de redes de distribución deben contar con un modelo hidráulico a través del cual se puedan predecir el comportamiento frente a diferentes condiciones operativas, de mantenimiento o expansión, el artículo 58 que indica la sectorización hidráulica que se efectúa a partir de los resultados obtenidos del modelo hidráulico para la gestión del agua en el caso de estudio. La empresa de servicios públicos domiciliarios, EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P, carece actualmente del sistema mencionado en el Artículo 31 y tampoco cuenta con un catastro actualizado y completo de la red de suministro de agua potable, incumpliendo así lo establecido en el Artículo 42.

En la actualidad, la operación, mantenimiento y planificación de los sistemas se realizan de manera empírica por los administradores, lo que conduce a soluciones poco eficientes o no

rentables. La falta de herramientas de modelación adecuadas impide analizar escenarios actuales y futuros para ejecutar soluciones correctas y efectivas.

1.1.1 *Pregunta problema*

¿Existe un modelo hidráulico que permita prever y analizar cómo se comportará el sistema de acueducto en diferentes niveles de operación y tomar medidas para mejorar y optimizar su funcionamiento?

1.2 Justificación

La falta de información catastral es una problemática recurrente en muchos municipios de Colombia. Esta información es crucial para el desarrollo continuo de proyectos que requieran expandir la zona de cobertura o mantener y preservar la existente. Por tanto, se pretende analizar y caracterizar la información disponible para generar un informe catastral actualizado. Este informe servirá como estímulo para el procesamiento constante de datos y la construcción de una base de datos confiable y actualizada.

El objetivo es que la información esté organizada de manera que se reduzca el tiempo necesario para obtener datos sobre la red de distribución. Así mismo, se busca no depender exclusivamente de la información tácita proporcionada por los fontaneros de la empresa. Además, se pretende reproducir y prever el comportamiento de la red de suministro para realizar pruebas y buscar posibles soluciones que sean efectivas y eficientes.

En consecuencia, se plantea la necesidad de actualizar el catastro existente de la red de distribución de agua potable. También se propone la creación de un modelo hidráulico que contribuya a la generación de posibles soluciones contundentes para problemas en el sistema. Con esto, se busca poder cumplir la necesidad que presenta la ciudad relacionada a las normativas

vigentes que regulan estos servicios, también, se encamina a cumplir con el derecho humano al agua que sea accesible, suficiente, salubre, aceptable y asequible.

2 Alcance y Limitaciones

2.1 Alcance

El presente proyecto se desarrolló en el periodo comprendido entre los días 08 de abril del 2024 y el 04 de septiembre del 2024, en este se abarca únicamente la red de distribución de agua potable en su totalidad del casco urbano del municipio y zonas aledañas donde se sitúe la misma. No se realizaron cálculos de elementos del sistema de acueducto, sin embargo, se tuvieron en cuenta los documentos con información actual de todos los elementos para la realización de una actualización y posterior modelación hidráulica de la red de distribución de agua potable.

2.2 Limitaciones

El estudio se enfocó en el sistema de acueducto del casco urbano del municipio de Pamplona, lo que implica que los hallazgos y conclusiones se aplican específicamente a esta área. Durante la investigación, se identificó una disponibilidad limitada de datos, algunos de los cuales no contaban con la totalidad de sus registros, lo que llevó al uso de información tácita sin verificación directa. Esta situación no influye en la precisión y detalle del modelo hidráulico desarrollado. Además, el estudio se llevó a cabo en un período de tiempo relativamente corto de 5 meses, lo que limitó el alcance de las actividades de campo planificadas. Por razones de recursos, no fue posible realizar apiques que hubieran permitido una verificación más exhaustiva de la información actual del sistema, ni visitas a los elementos más distantes del acueducto, lo que podría haber proporcionado una visión más completa del sistema en su totalidad. A pesar de estas circunstancias, se utilizaron metodologías y herramientas robustas que permiten obtener resultados valiosos y confiables dentro del contexto estudiado.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Desarrollar la construcción de modelo hidráulico y análisis de la red distribución de agua potable de Pamplona, Norte de Santander.

3.2 Objetivos Específicos

- Realizar el análisis de la documentación existente sobre el catastro de las redes de agua, complementando y actualizando la información faltante con visitas de campo.
- Desarrollar un análisis de consumos y estimación de demandas en la red a partir de la información comercial de la empresa de agua, la estimación de población y el área existente.
- Crear un modelo digital de elevación (MDE) mediante el uso de imágenes obtenidas con vuelos de dron e información satelital.
- Construir un modelo hidráulico de la red de distribución de agua potable implementando el software EPANET y complementos GIS.
- Analizar los resultados obtenidos y realizar una calibración general del sistema, utilizando los datos de presión y caudal existente en la empresa de servicio público y/o con mediciones en campo.

4 Marco Referencial

4.1 Marco de antecedentes o estado del arte

- **Modelamiento hidráulico de redes de distribución de agua potable mediante sistema de información geográfica (QGIS) en Nueva Esperanza - Apurímac, 2021.**

En la tesis se desarrolla el modelamiento hidráulico de las redes de distribución de agua potable en la localidad de Nueva Esperanza en Apurímac. El autor utiliza el Sistema de Información Geográfica (QGIS) para realizar el diseño hidráulico de la red, cumpliendo con la normatividad vigente. La metodología utilizada en la investigación es de tipo aplicada con diseño no experimental transversal descriptivo. Además, se detalla que se procedió a instalar la Estación Total Topcon en un lugar donde se lograse abarcar gran área de la zona de trabajo y se georreferenciaron los puntos topográficos en el GPS en el sistema WGS-84 con coordenadas UTM. Luego se tomaron los datos de planimetría y altimetría con un total de 3500 puntos y 10 BMs en Nueva Esperanza, obtenidos del campo para determinar el relieve existente del terreno. Los datos se procesaron con software Topográfico (QGIS 3.6 y Microsoft Excel) y se procedió al dibujo de los planos. Además, se realizaron actividades como el levantamiento topográfico con estación total, los empadronamientos para conocer la cantidad de habitantes por cada vivienda habitada, la codificación de las viviendas y la identificación de instituciones públicas y sociales, Quispe Ccahuín, (2021) recomienda:

Efectuar el uso de UAV o VANT (drones) para los trabajos de levantamiento topográfico, si se va a realizar el diseño mediante herramientas SIG, ya que con dicho equipo se realiza la mejor manera la representación fisiográfica del terreno y óptimo para generar el MDT (Modelo digital del terreno) que contiene los datos de las características del terreno natural Vectorizados. (p.69)

➤ **Influencia del software de diseño en el modelamiento hidráulico del sistema de agua potable, Ucuchachas, Castilla, Arequipa – 2021**

La tesis de Brayan Alexander Poco Rodríguez, trata sobre un estudio comparativo sobre el comportamiento del software de diseño en el modelamiento hidráulico de la red de distribución de agua potable en el poblado de San José de Los Molinos en Ica. El autor utiliza metodología experimental con diseño cuasi-experimental pretest-posttest y muestra aleatoria. Se destaca la importancia del software en el diseño de las redes de agua potable y cómo afecta su elección en el proceso. La población y muestra elegidas fueron los pobladores de Ucuchachas del distrito de Choco, Castilla, Arequipa y los pobladores del sector urbano del poblado, respectivamente. Las técnicas de investigación utilizadas fueron el análisis documental y la observación. Los instrumentos de recolección de datos incluyen mediciones estadísticas y la simulación de comportamiento teórico. La variable independiente es el software de diseño, mientras que la variable dependiente es la red de distribución de agua potable. (Poco Rodríguez, 2022)

➤ **Análisis del consumo de agua potable en el centro poblado de salcedo, puno**

El estudio realizado por Huaquisto Cáceres y Chambilla Flores en la ciudad de Arequipa para analizar el consumo de agua potable en el centro de la ciudad y los factores que influyen en él. El trabajo incluye una revisión bibliográfica sobre la importancia del agua en el desarrollo de la población y los factores que influyen en su consumo, como el clima, la composición familiar y el nivel socioeconómico. También se mencionan los problemas de distribución y acceso desigual al agua potable en diferentes países de la región. El estudio se enfoca en la ciudad de Arequipa y utiliza herramientas como la observación y la revisión de registros para analizar los patrones de consumo de agua y los factores que influyen en ellos. Los resultados muestran que existen limitaciones en la dotación del servicio de agua potable y que la población se ve obligada a

almacenar agua para su consumo, lo que afecta su calidad y la salud humana. El documento destaca la importancia de la gestión estratégica y eficiente del agua para enfrentar el aumento de la demanda de este recurso vital.

La urbanización y el crecimiento poblacional pueden tener un impacto significativo en el consumo de agua potable, a medida que las áreas urbanas crecen, la demanda de agua potable tiende a aumentar debido al aumento en la población y a la expansión de la infraestructura urbana (Huaquisto Cáceres & Chambilla Flores, 2019).

➤ **Elaboración del catastro de la red de distribución de agua potable del municipio de Susacón en el departamento de Boyacá**

Se describe el proceso de elaboración del catastro de la red de distribución de agua potable en un municipio Susacón en el departamento de Boyacá de Colombia. El trabajo incluye una revisión bibliográfica sobre la importancia del catastro en la gestión eficiente del agua y la detección de pérdidas. El estudio se realizó a través de una metodología que incluye la etapa de inspección y levantamiento topográfico y la etapa de edición y modelación del sistema. La información obtenida se utilizó para generar mapas, planos y una base de datos de la red de distribución existente, así como para detectar fallas y mejorar la eficiencia del sistema. Según Neira & Sebastian,(2021):

Cuando se construye y opera un sistema de distribución es necesario realizar un monitoreo que permita hacer un análisis o evaluación de su funcionamiento, sumado a esto, la construcción de nuevas viviendas, hace que estas redes se vuelvan insuficientes para suministrar el agua al 100% de la comunidad obligando a la entidad de control a mejorar la red ya instalada o implementar nuevos tramos. Allí toma valor el catastro técnico de la red, ya que contar con

información precisa de sus componentes brinda la facilidad de un mejor control alrededor del estado físico del sistema y del recurso hídrico. (p, 2)

➤ **Elaboración del modelo hidráulico para la red de distribución de agua potable de Funza Cundinamarca utilizando el software EPANET.**

Se escribe el proceso de elaboración de un modelo hidráulico para la red de distribución de agua potable en el municipio de Funza, Cundinamarca, Colombia. El estudio se realizó utilizando la metodología de EPANET, con el objetivo de analizar la eficiencia del sistema de distribución de agua potable en el sector industrial de Funza. El trabajo incluye una revisión bibliográfica de estudios previos sobre modelos hidráulicos en redes hídricas, lo que permitió a los autores tener una apropiación del conocimiento y el manejo del programa EPANET. Se recopiló información sobre la red de distribución, los diámetros, longitudes, materiales y accesorios de la red, y se realizó un análisis hidráulico para identificar los puntos críticos del sistema y proponer soluciones para optimizar la distribución de agua potable. Los resultados del modelo hidráulico permitieron identificar problemas en la red, como bajos caudales y bajas presiones en ciertas áreas. De esta manera, la herramienta EPANET se convierte en una herramienta útil para la gestión y el monitoreo de sistemas de distribución de agua potable.

El software posibilita la ejecución de análisis hidráulicos en redes de tuberías con el objetivo de detectar de manera sencilla áreas con presiones demasiado bajas o altas, así como puntos muertos en la red. Esto facilita el diagnóstico para que las entidades gubernamentales puedan identificar de manera eficiente las zonas que requieren inversiones para la renovación de las redes y la optimización del sistema de distribución de agua potable (Bohórquez, 2020).

➤ **Identificación y diagnóstico de puntos críticos en la red primaria de abastecimiento de Yopal mediante modelación hidráulica en EPANET.**

Se realiza un diagnóstico del sistema actual de distribución de agua potable en la ciudad de Yopal, en Colombia, con el objetivo de identificar y analizar los puntos críticos que generan inconvenientes en el servicio de agua potable y proponer soluciones para su optimización.

Esta tesis investigó el comportamiento de variables como presión y flujo en el contexto de crecimiento poblacional y densificación de áreas urbanas. Para lograr este objetivo se modelaron dos escenarios de red de distribución mediante el software EPANET 2.2 con la situación actual y la situación futura en el año 2045. Los elementos de la red se obtuvieron a partir de los datos primarios proporcionados por la empresa de Acueducto y Alcantarillado de Yopal. Como resultado se concluyó que, en el escenario futuro del acueducto, la red no garantiza presiones para uso doméstico en ningún punto, donde se propuso reducir las pérdidas del sistema de 47.8 por ciento a 17 por ciento. Incremento porcentual en el diámetro de tuberías superiores a 6 pulgadas y nueva red de 654 metros de 8 pulgadas de diámetro que conecta el sector 8-A con la vía Matepantano y alcanzando la presión que cumple con la normativa colombiana. (Cainaba Mojica & Mora, 2021)

➤ **Elaboración del modelo hidráulico de la red de distribución de agua potable y del sistema de alcantarillado sanitario del casco urbano del Municipio de Pamplonita - Norte de Santander.**

Este documento realizó un diagnóstico de la red de acueducto y alcantarillado del área urbana del municipio de Pamplonita, en Colombia, con el objetivo de identificar y analizar los puntos críticos que generan inconvenientes en los servicios de agua potable y saneamiento básico, y proponer soluciones para su optimización. El estudio se llevó a cabo mediante el mapeo de la

red, la inspección de las estructuras de la red, el levantamiento topográfico con dron y la aplicación de modelos hidráulicos en el software EPANET para evaluar los problemas en la red. Finalmente, se propusieron soluciones para mejorar el servicio y se estableció la necesidad de seguir monitoreando el sistema y realizar mantenimiento preventivo para evitar problemas futuros.

Con el avance de la tecnología hoy en día se puede tener un mejor y eficiente manejo de los sistemas de acueducto y alcantarillado, con la ayuda de software específicos para este tipo de trabajos en cuanto a saneamiento básico se refiere mediante los cuales se pueden realizar procesos de modelación del comportamiento real de estos sistemas en los que se pueda realizar un análisis exacto de su funcionamiento para identificar posibles problemas que puedan afectar la adecuada operación y desempeño. (Peñaloza Suarez, 2023)

➤ **SIG aplicado a la optimización del tiempo de diseño en redes de distribución de agua potable.**

Describe la implementación de una metodología basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la optimización de tiempo en el diseño y construcción de redes de distribución de agua potable como objeto de estudio se diseñó una red de tipo ampliación de un sistema existente en la ciudad de Cúcuta-Norte de Santander, teniendo en consideración datos de topografía y población de la tesis “Diseño implementado con herramientas tecnológicas de las redes de acueducto y alcantarillado sanitario del asentamiento José Bernal, municipio de Cúcuta Norte de Santander” realizada por el ingeniero Diego Iván Sánchez Tapiero. Para ello, se utiliza información obtenida a partir de modelos hidráulicos en software de simulación como EPANET y se incorpora en el SIG mediante la exportación de datos en formato DXF. Posteriormente, se utiliza el método de los polígonos de Thiessen para obtener el área de influencia de cada punto de conexión y, de esta manera, calcular la demanda base de cada uno. El trabajo demuestra la utilidad

de los SIG en la optimización de tiempo en el diseño y construcción de redes de distribución de agua potable y como herramienta en la toma de decisiones en cuanto a mantenimiento, operación, control, diseño y renovaciones de la tubería y accesorios. Según Sánchez Tapiero et al. (2021):

Para plantear el diseño de una red de distribución de agua potable se consideran factores indispensables como la población actual y futura que se va a servir, la normativa y legislación vigente, la topografía de la zona de estudio, el trazado de la red teniendo en cuenta calles y aceras, puntos de alimentación de la red (depósitos, embalses), caudales y puntos de consumo; así mismo se debe establecer el tipo de red a diseñar con la finalidad de determinar sectores de abastecimiento que permitan una gestión optimizada, existe la red ramificada y mallada, por lo general la más utilizada es la de tipo malla, ya que tiene como ventaja principal crear rutas alternas ante posibles rupturas de la tubería por medio de las mallas que conforman la red, favoreciendo la población que pudiese estar afectada por falta del servicio. (p,69)

4.2 Marco Conceptual

➤ Sistema de acueducto

El sistema de suministro de agua es una serie de estructuras físicas esenciales para proveer agua cruda y tratarla. Está conformado por redes principales y secundarias que se encargan de distribuir el agua en toda el área. Un sistema de abastecimiento de agua incluye varios elementos: la fuente de donde se obtiene el agua, la línea que la conduce, equipos para remover arena, estructuras para conducirla, instalaciones para su tratamiento, un depósito para almacenarla, sistemas para su distribución y conexiones a los hogares. (PLINCO S.A., 2022)

➤ Catastro de redes

Un registro catastral de redes constituye un enfoque para recopilar registros y archivos que albergan datos relacionados con las especificaciones técnicas y la ubicación de diversas

infraestructuras. Estos datos, junto con aplicaciones y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilitan la detección de problemas, la gestión de soluciones, el seguimiento de cambios y la determinación de prioridades al desarrollar nuevos proyectos. (Giraldo Bueno, 2021)

➤ **Prestación del servicio público de acueducto**

Es responsabilidad de los municipios garantizar que los servicios públicos domiciliarios, como el suministro de agua, el alcantarillado, la recolección de residuos, la energía eléctrica y la telefonía pública básica conmutada, sean proporcionados de manera eficaz a sus habitantes. Estos servicios pueden ser administrados por empresas de servicios públicos oficiales, privadas o mixtas, o gestionados directamente por la administración central del municipio correspondiente. (Ley 142 Servicios públicos domiciliarios, 1994)

➤ **Continuidad**

La persistencia de los servicios representa un principio fundamental que guía la administración pública, y cobra una importancia aún mayor durante situaciones de emergencia, como la que atraviesa el país. Para asegurar este principio de manera sostenible y adaptable, es imprescindible implementar una gestión de continuidad institucional o empresarial. Esta gestión garantiza la prestación oportuna y la calidad de los servicios públicos, especialmente en el caso de servicios críticos, los cuales tienen un impacto significativo en el desarrollo social, económico y ambiental del país, así como en el funcionamiento eficaz del Gobierno. (Contraloría General de la República de Costa Rica, 2020)

➤ **Demanda hídrica**

Según el IDEAM “la demanda de agua estimada corresponde a la cantidad o volumen de agua usado por los sectores económicos y la población. Considera el volumen de agua extraído o que se almacena de los sistemas hídricos y que limita otros usos; contempla el volumen utilizado

como materia prima, como insumo y el retornado a los sistemas hídricos”. (IDEAM, 2014, párr. 1)

➤ **Consumo hídrico**

El cargo por consumo se refiere al pago que los usuarios realizan a la empresa de servicios públicos por la cantidad de metros cúbicos de agua consumidos. Este pago permite a la empresa cubrir los gastos asociados con la distribución de cada metro cúbico de agua al usuario. Estos gastos suelen incluir los costos operativos y de mantenimiento, las inversiones necesarias para mejorar la cobertura, la calidad y la continuidad del servicio, así como los costos relacionados con tasas ambientales. (Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2024)

➤ **Ortofotografía**

Las ortofotos son imágenes capturadas desde el aire o satélites que han sido ajustadas geométricamente, un proceso conocido como "ortorrectificación", para eliminar las distorsiones causadas por el relieve del terreno y la inclinación de la cámara. Esto asegura que la escala sea consistente en toda la imagen, lo que facilita la medición precisa de distancias y áreas. Las ortofotos son ampliamente utilizadas en aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica (SIG), cartografía y topografía. (Ochoa, 2023)

➤ **LiDAR Y RADAR**

Light Detection and Ranging (LiDAR) es una tecnología de teledetección basada en la luz. En el caso de Yellowscan, la idea del LiDAR es bastante sencilla: apuntar un pequeño rayo láser infrarrojo a una superficie y medir el tiempo que tarda el láser en volver a su fuente. Si se dispone de un LiDAR con un ángulo de visión de 360° (utilizando un espejo giratorio, por ejemplo), es posible obtener una nube de puntos del entorno. A continuación, un software específico realiza

una imagen en 3D que reproduce la forma alrededor del LiDAR con una posición precisa en el espacio.

El sistema RADAR funciona de forma muy parecida al LiDAR, con la gran diferencia de que utiliza ondas de radio en lugar de luz láser o LED. Transmite ondas de radio desde una antena giratoria o fija y mide el tiempo de vuelo de la señal reflejada. (Moussy, 2020)

➤ **Ráster**

Estructura fundamental de datos que consta de una matriz de celdas de igual tamaño, o píxeles, dispuestas en filas y columnas, y compuestas por una o varias bandas. Cada celda representa una ubicación en la superficie terrestre y contiene un valor numérico que representa un fenómeno o atributo particular, como la temperatura a una altura o profundidad determinadas, la elevación o el valor de brillo de la imagen. Los grupos de celdas que comparten el mismo valor de coordenadas representan la misma entidad geográfica. (ESRI, 2024)

➤ **Modelo digital de elevación (MDE)**

Un Modelo Digital de Elevación (MDE), según sus siglas en inglés, es una representación tridimensional digital que captura la complejidad del relieve en una región específica. Este modelo abarca tanto las variaciones de altura de los elementos sobre la superficie terrestre como la topografía y la curvatura natural del planeta, dependiendo de la fuente de información. La obtención de un DEM puede realizarse mediante diferentes métodos de medición, algunos de los cuales son directos, como el LiDAR y el RADAR, mientras que otros implican cálculos fotogramétricos a partir de fotos aéreas o imágenes satelitales, ya sean ópticas o de radar. Los equipos topográficos, como las estaciones totales, suelen emplearse para medir áreas pequeñas y pueden ignorar la curvatura de la Tierra. Sin embargo, estas mediciones, aunque útiles para

proyectos de ingeniería civil, no se recomiendan para la generación de DEMs. (Díaz Bocanegra, 2021)

➤ **Modelo hidráulico**

Un modelo hidráulico se utiliza para diversas tareas, como calcular las dimensiones de equipos como bombas, tuberías o tanques, ajustar y detectar posibles fugas, evaluar la calidad del agua, analizar los gastos energéticos, y simular el comportamiento de la red durante periodos de horas o días, entre otras funciones. La fiabilidad de los resultados obtenidos a través de un modelo hidráulico se ve afectada por dos factores principales: la certeza de la información de base empleada para crear el modelo y el dominio adecuado del software empleado para llevar a cabo la modelización. (González Ramírez & Bejarano Salazar, 2019)

➤ **EPANET**

Un software de uso extendido a nivel mundial, es utilizado para modelar sistemas de distribución de agua. Inicialmente diseñado para analizar el flujo y la distribución del agua potable en estos sistemas, su flexibilidad le permite aplicarse a diferentes aspectos del análisis de infraestructuras hídricas. Ingenieros y consultores recurren a EPANET para diversas tareas, como diseñar y dimensionar nuevas infraestructuras, actualizar las existentes, optimizar operaciones de tanques y bombas, reducir consumo energético, investigar problemas de calidad del agua y prepararse para situaciones de emergencia. Asimismo, su capacidad para modelar contaminación y evaluar la resiliencia frente a amenazas y desastres naturales lo convierte en una herramienta integral para la gestión del agua. (US EPA, 2023)

➤ **QGISRED (QGIS)**

QGISRed es un plugin gratuito para QGIS diseñado para facilitar la creación y análisis de modelos hidráulicos de redes de distribución de agua, sin importar su complejidad, incluso hasta

el nivel de detalle requerido por los "Digital Twins". Este plugin se integra perfectamente con QGIS, permitiendo al usuario georreferenciar todos los elementos de la red, utilizar capas de fondo geográfico, editar datos gráficos y alfanuméricos, aprovechar herramientas de geoprocetamiento, visualizar datos en capas, personalizar la simbología, entre otras funcionalidades. QGISRed se apoya en una base de datos relacional fácilmente manejable, utilizando archivos SHP y DBF, basados en el modelo de datos EPANET, el cual ha sido extendido para incorporar nuevas capacidades. La adopción del modelo de datos EPANET reduce considerablemente la curva de aprendizaje para los usuarios. (QGIS Org, 2022)

➤ **QWATER (QGIS)**

QWater es un complemento que utiliza el complemento GHydraulics (integrado, no es necesario instalarlo) de Steffen Macke. Permite diseñar y analizar redes de abastecimiento de agua mediante EPANET (sin necesidad de instalarlo). Permite escribir archivos EPANET INP, así como ejecutar una simulación EPANET desde QGIS completa con la carga de los datos del resultado. QWater contiene una función para calcular diámetros económicos en función de diámetros dados y la pérdida de carga por fricción máxima. Se puede acceder a las funciones desde el menú y las barras de herramientas del complemento Quantum GIS. (Sousa Moreira, 2018a)

➤ **Python**

Python es un lenguaje de programación poderoso y sencillo de aprender. Ofrece estructuras de datos de alto nivel eficientes y un sistema de programación orientado a objetos simple pero efectivo. Su sintaxis clara y su tipado dinámico, combinados con su carácter interpretado, lo hacen ideal para scripting y desarrollo rápido de aplicaciones en diversas áreas y en la mayoría de las plataformas.

El intérprete de Python y su amplia biblioteca estándar están disponibles de manera gratuita en formato de código fuente y binario para la mayoría de las plataformas desde el sitio web oficial de Python, y se pueden distribuir libremente. En dicho sitio también se encuentran distribuciones, así como enlaces a numerosos módulos de terceros, programas, herramientas y documentación adicional de Python de uso libre (Python, 2024).

➤ **Water Network Tool for Resilience (WNTR)**

La herramienta Water Network Tool for Resilience (WNTR, que se pronuncia winter) es un paquete de Python diseñado para simular y analizar la resiliencia de las redes de distribución de agua. Aquí, una red se refiere al conjunto de tuberías, bombas, nodos y válvulas que conforman un sistema de distribución de agua. WNTR tiene una interfaz de programación de aplicaciones (API) que es flexible y permite cambios en la estructura y las operaciones de la red, junto con la simulación de incidentes disruptivos y acciones de recuperación. WNTR se puede instalar a través de la organización GitHub de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA). (Klise et al., 2017).

4.3 Marco Teórico

➤ **Ley de la conservación de la masa**

La ley de conservación de la masa es un principio fundamental en física que establece que la masa no puede ser creada ni destruida en un sistema cerrado. En el contexto de la mecánica de fluidos, esta ley implica que la masa de fluido en un volumen de control debe permanecer constante a menos que haya una transferencia de masa hacia o desde el volumen. (Çenge, 2019)

Matemáticamente, para cualquier proceso que involucre el paso o transferencia de un fluido por un volumen de control, la ley de conservación de la masa se puede expresar como:

$$\sum m_{entrada} = \sum m_{salida} \quad (1)$$

Donde:

m = representa la masa de cada flujo involucrado.

➤ **Teoría de la continuidad**

La teoría de la continuidad se refiere a la ecuación de continuidad, que en términos de mecánica de fluidos establece que la cantidad de masa de un fluido que entra en un volumen controlado es igual a la cantidad de masa que sale de ese volumen, más cualquier acumulación de masa dentro del volumen en cuestión. (Çenge, 2019) Matemáticamente, para un fluido incompresible, la ecuación de continuidad en su forma más básica es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

Donde:

ρ es la densidad del fluido,

t = tiempo,

∇ = la divergencia,

v = campo de velocidad del flujo.

Para un fluido incompresible, donde la densidad ρ es constante, esta ecuación se simplifica:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (3)$$

➤ **Ley de la conservación de la energía**

La ley de la conservación de la energía mecánica en fluidos es una aplicación específica de la ley de conservación de la energía al campo de la mecánica de fluidos. En este contexto, se utiliza principalmente la ecuación de Bernoulli, que describe cómo la energía se conserva a lo

largo de una línea de corriente en un fluido ideal (incompresible y sin viscosidad) en régimen estacionario.(Çenge, 2019)

Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli se puede enunciar como:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = Cte. \quad (4)$$

Donde:

P es la presión del fluido,

ρ es la densidad del fluido,

v es la velocidad del fluido,

g es la aceleración debida a la gravedad,

z es la altura en el campo gravitacional

Interpretación de los Términos

La ecuación de Bernoulli expresa la conservación de la energía mecánica del fluido en términos de tres tipos de energía por unidad de volumen:

1. Energía de presión: $\frac{P}{\rho}$
2. Energía cinética: $\frac{v^2}{2}$
3. Energía potencial: gz

➤ Ley de gradiente hidráulico

La ley del gradiente hidráulico es un principio fundamental en la mecánica de fluidos y la hidrogeología que describe cómo la presión o la altura del fluido cambia a lo largo de una

trayectoria en el flujo de un fluido. Este concepto es especialmente importante en el estudio del flujo de agua a través de medios porosos, como suelos y acuíferos.(Saldarriaga, 2007)

El gradiente hidráulico se define como la variación de la carga hidráulica por unidad de distancia en la dirección del flujo. Matemáticamente, se expresa como:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (5)$$

Donde:

i = el gradiente hidráulico,

Δh = es la diferencia de carga hidráulica entre dos puntos,

ΔL = es la distancia entre esos dos puntos.

Carga hidráulica

La carga hidráulica (h) en un punto se compone de la carga de presión y la carga de elevación y se define como:

$$h = z + \frac{P}{\gamma} \quad (6)$$

Donde:

z = la altura del punto sobre un datum de referencia (carga de elevación),

P = la presión en el punto,

γ = el peso específico del fluido (densidad del fluido multiplicada por la aceleración debida a la gravedad).

➤ **Ecuación de Hazen-Williams**

La ecuación de Hazen-Williams es una fórmula empírica (independientes del análisis de Darcy) ampliamente utilizada para estimar la pérdida de carga en tuberías que transportan agua. Según (Saldarriaga, 2007) en su obra "Hidráulica de Tuberías", esta ecuación es especialmente

útil para líquidos que se desplazan a bajas presiones y velocidades moderadas. La ecuación para la velocidad del flujo se presenta en el documento de la siguiente manera:

$$v = 0.849 C_{HW} R^{0.63} S^{0.54} \quad (7)$$

Donde:

v = velocidad media de la tubería

R = Radio hidráulico en m

S = Pérdida de energía por unidad de peso (altura) de longitud $\frac{h_f}{l}$

C_{HW} = Coeficiente de rugosidad de la tubería

La ecuación utilizada para calcular la pérdida de carga en función de la velocidad y las características de la tubería es:

$$h_f = \frac{6,8241 * l * v^{1.851}}{C_{HW}^{1.851} * d^{1,167}} \quad (8)$$

Donde:

h_f = Es la pérdida de carga en metros.

l = Es la longitud de la tubería en metros.

d = diámetro interno de la tubería en metros.

v = velocidad media de la tubería en metros por segundo

C_{HW} = Coeficiente de rugosidad de la tubería.

Es importante tener en cuenta las condiciones bajo las cuales la ecuación de Hazen-Williams es aplicable de manera efectiva. Según el documento, estas condiciones son: el fluido debe ser agua a temperaturas normales, el diámetro de la tubería debe ser superior o igual a 75 mm (3 pulgadas), la velocidad en las tuberías debe ser inferior a 3 m/s (10 pies/seg).

Tabla 1*Rugosidad de Hazen-Williams para Diferentes Materiales y Edades.*

Material	Coefficiente	Material	Coefficiente
Aluminio	130 - 150	Acero corrugado	60
Asbesto cemento	120 - 150	Tuberías viejas deterioradas	60 - 80
Hierro o acero asfáltico	140	Hierro dúctil	120 - 145
Latón	130	Fibra de vidrio	150
Hierro fundido, revestido de cemento	140	Hierro galvanizado	100 - 120
Hierro fundido, revestido	110 - 140	Vidrio	130
Hierro fundido, nuevo sin revestimiento	130	Plomo	130
Hierro fundido antiguo sin revestimiento	40 - 120	Polietileno	140
Hierro fundido, sin revestimiento	100 - 140	PVC, PE, GRP	120 - 150
Hierro fundido, 10 años	107 - 113	Acero, nuevo sin revestimiento	120
Hierro fundido, 20 años	89 - 100	Acero, 15 años	200
Hierro fundido, 30 años	75 - 90	Acero, uniones remachadas	95 - 110
Hierro fundido, 40 años	64 - 83	Acero, juntas soldadas	100 - 140
Revestimiento de cemento	140	Acero, uniones soldadas, revestido	110 - 140
Hormigón	100 - 140	Acero, soldado o sin revestimiento	100 - 120
Hormigón, viejo	100 - 110	Estaño	130
Cobre	130 - 140	Duela de madera	110
Tubería de metal corrugado	60		

Nota. Obtenida de Piping Designer, (2019)

➤ Ecuación de pérdidas menores por accesorios

La ecuación de pérdidas menores deriva de la ecuación de Darcy-Weisbach, adaptada para incluir un coeficiente empírico que caracteriza la pérdida de energía en accesorios específicos de los sistemas de tuberías.

La ecuación para calcular las pérdidas menores por accesorios en sistemas hidráulicos se basa en el concepto de pérdidas de carga, que son ocasionadas por la fricción y las perturbaciones del flujo al pasar por elementos como válvulas, codos y tees. En el libro Hidráulica de Tuberías

de (Saldarriaga, 2007), la ecuación que se utiliza comúnmente para estimar estas pérdidas se expresa de la siguiente manera:

$$h_f = K_m * \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

Donde:

h_f = Es la pérdida de carga en metros.

K_m = Coeficiente de pérdida de carga del accesorio (adimensional).

v = velocidad de la tubería en metros por segundo

g = Aceleración debida a la gravedad (aproximadamente 9.81 m/s²)

El coeficiente K_m varía según el tipo de accesorio y su diseño. Saldarriaga proporciona tablas y valores experimentales que permiten determinar K_m para diferentes accesorios en función de su geometría y el diámetro de la tubería como se muestra en la siguiente tabla

Tabla 2.
Coeficiente para Perdidas en Accesorios y Codos.

Accesorio	Km	Accesorio	Km
Válvula de globo, completamente abierta	10,0	Retorno (curva en U)	2,2
Válvula de ángulo, completamente abierta	2,5	Tee en sentido recto	0,3
Válvula de cheque, completamente abierta	2,5	Tee a través de una salida lateral	1,8
Válvula de compuerta, completamente abierta	0,2	Unión	0,3
Válvula de compuerta, con ¾ de apertura	1,00 – 1,15	Ye de 45°, en sentido recto	0,3
Válvula de compuerta, con ½ de apertura	5,6	Ye de 45°, salida lateral	0,8
Válvula de compuerta, con ¼ de apertura	24,0	Entrada recta a tope	0,5
Codo de radio corto (r/d ± 5 6 1)	0,9	Entrada con boca acampanada	0,1
Codo de radio mediano	0,75 – 0,80	Entrada con tubo reentrante	0,9
Codo de gran radio (r/d ± 5 6 1,5)	0,6	Salida	1,0
Codo 45°	0,4 – 0,42		

Nota. Obtenida de Saldarriaga, (2007, p. 141)

4.4 Marco Legal

➤ Artículo 49 de la Constitución Política de Colombia de 1991

El agua y el saneamiento básico son derechos fundamentales. El Estado garantizará su acceso sin discriminación alguna, de acuerdo con los principios de universalidad, solidaridad y calidad. (Constitución Política de Colombia, 1991, Art 49)

➤ Ley 142 de 1994

Esta ley establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios en Colombia, incluyendo disposiciones relacionadas con la prestación, regulación y control de los servicios de acueducto (Ley 142 Servicios públicos domiciliarios, 1994).

➤ Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son un conjunto de 17 amplios objetivos sociales, económicos y ambientales que fueron acordados por 193 países con el fin de mejorar las condiciones de vida en todo el mundo. Para lograr su cumplimiento, es necesario coordinar acciones conjuntas entre organizaciones gubernamentales, empresas, la sociedad civil y la academia, tanto a nivel nacional como internacional. En este contexto, la ciencia, la tecnología y la innovación (CTI) pueden desempeñar un papel crucial dentro de estas iniciativas.

Objetivo de desarrollo sostenible N°6, Agua limpia y saneamiento: Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos

Objetivo de desarrollo sostenible N°11, Ciudades y comunidades sostenibles: Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.

➤ Resolución 0330 de 2017

Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de

2005 y 2320 de 2009. Artículo 31 el cual fija que se deberá implementar sistemas de instrumentación, monitoreo y control, que permitan un adecuado y permanente control de la calidad del servicio de los sistemas de acueducto, alcantarillado y/o aseo, el artículo 42 fija que se debe contarse con un catastro de la red actualizado que incluya un registro de los conductos existentes, su ubicación y el mayor número de anotaciones posible para cada accesorio considerado estratégico en la operación, este catastro incluye válvulas e hidrantes, artículo 57 por el cual todos los sistemas de acueducto en su red de distribución deben tener un modelo hidráulico para poder predecir su comportamiento a diferentes condiciones de operación y el artículo 58 que indica la sectorización hidráulica que se efectúa a partir de los resultados obtenidos del modelo hidráulico para la gestión del agua en el caso de estudio (RAS, 2017, Art. 31, 42, 57, 58)

➤ **Resolución 0799 de 2021**

La Resolución 799 de 2021 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia introduce cambios a la Resolución 0330 de 2017, la cual establece el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS). Esta nueva resolución aborda aspectos relacionados con la "política de crecimiento verde" y la "economía circular en la gestión de los servicios de agua potable y manejo de aguas residuales".

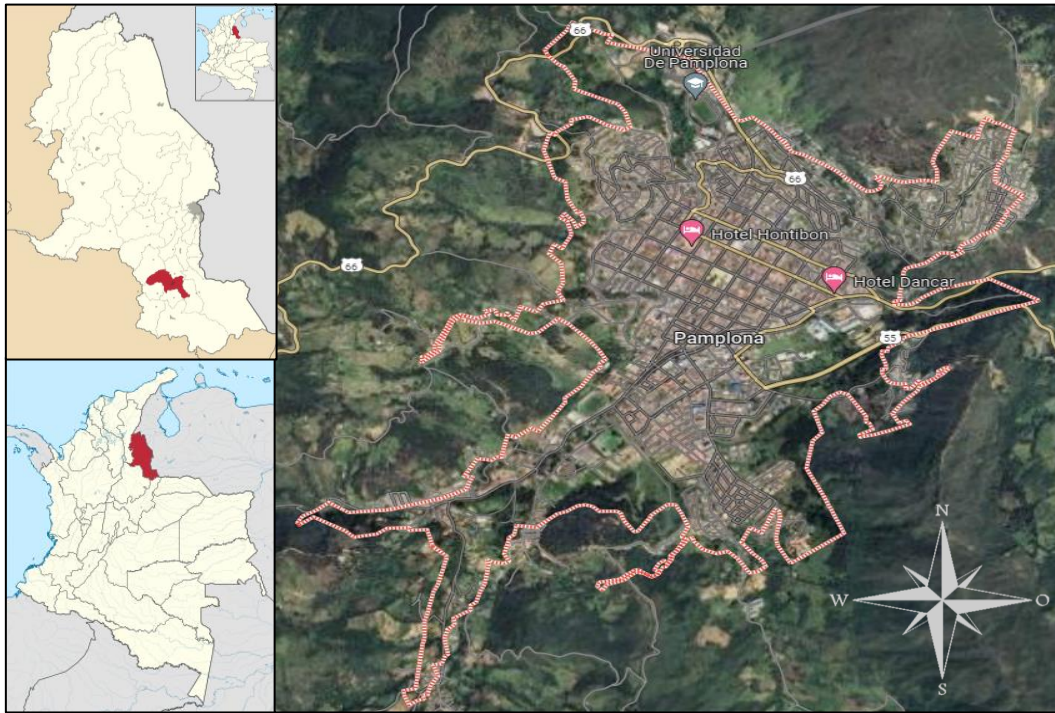
Entre los cambios realizados, la Resolución 799 de 2021 modifica el artículo 6, que se refiere a la coordinación de los proyectos de acueducto, alcantarillado y aseo con los Planes de Ordenamiento Territorial (POTs). Asimismo, se ajusta el artículo 10 para incluir la Evaluación del Impacto Social como parte de los estudios básicos mínimos requeridos para los proyectos de acueducto, alcantarillado y aseo (Resolución 0799, 2021, Art. 6, 10).

4.5 Marco Contextual

El municipio de Pamplona, Norte de Santander, se encuentra ubicado en la región noreste de Colombia, en el departamento de Norte de Santander, en las coordenadas 72°39' de longitud al oeste de Greenwich y a 7°23' de latitud norte (Figura 1). Se encuentra situada a 2.200 metros sobre el nivel del mar. Pamplona, limita al norte con Pamplonita y Cucutilla, al sur con los municipios de Cácuta y Mutiscua, al oriente con Labateca y al occidente con Cucutilla, Las actividades económicas predominantes incluyen la educación, el turismo y la agricultura. (Alcaldía Municipal de Pamplona, 2024).

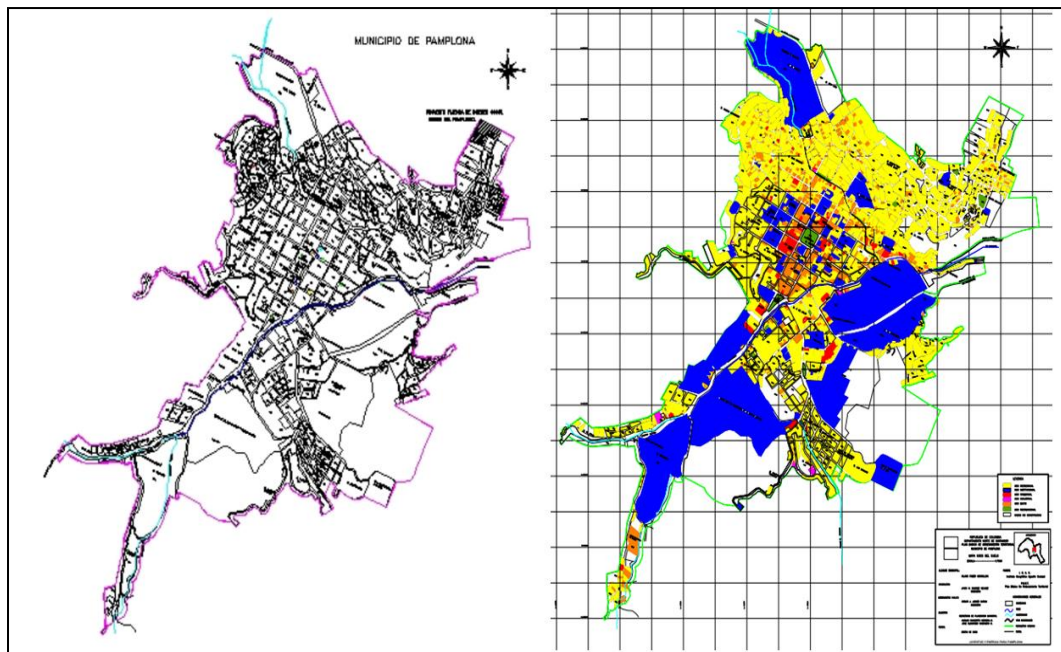
El proyecto se desarrollará en el sector urbano de la ciudad de Pamplona, un área diversa que abarca una amplia gama de usos del suelo, entre los que se incluyen zonas residenciales, comerciales, gubernamentales, institucionales, industriales y recreacionales, como se muestra en la Figura 2. Cada uno de estos sectores presenta características particulares en cuanto a demanda de agua y patrones de consumo, lo que requiere un análisis detallado y específico para cada uso. Además, se extiende a ciertas áreas de la vereda Monteadentro, donde una parte de la red de suministro de agua potable está instalada. Esta vereda, aunque de carácter rural, juega un papel importante en el sistema de distribución, ya que conecta con la infraestructura del casco urbano y contribuye a la cobertura del servicio en zonas periféricas. Por lo tanto, el estudio deberá considerar tanto las necesidades de los distintos sectores urbanos como la infraestructura en las áreas rurales cercanas, para asegurar una distribución eficiente y sostenible del recurso hídrico en toda la región.

Figura 1
Ubicación del Casco Urbano del Municipio de Pamplona.



Nota. Obtenido de la herramienta digital Google Maps.

Figura 2
Zona Urbana de la Ciudad de Pamplona y Uso del Suelo.

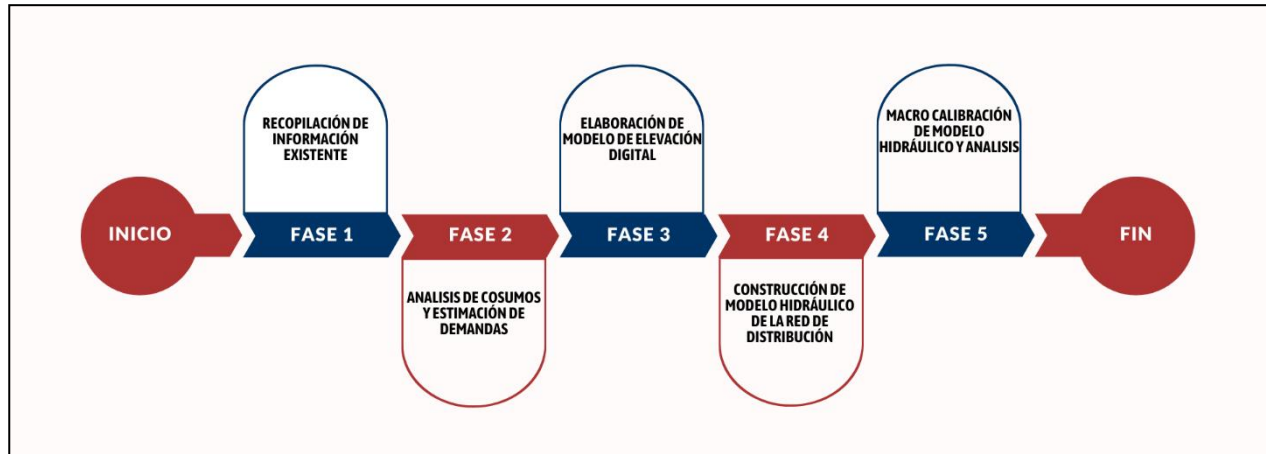


Nota. Obtenido de POBT de Pamplona, Norte de Santander.

5 Metodología

Figura 3

Fases para la Ejecución de la Investigación.



5.1 Fase 1 – Recopilación y Análisis de Información.

5.1.1 Recopilación De Información Actual

Se buscaron los archivos físicos y digitales obtenidos a través de entidades gubernamentales y de la empresa proveedora del servicio EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P, además de estudios anteriormente realizados con relación a la red de acueducto del municipio de Pamplona y que pudieran contener información relevante.

Se realizaron investigaciones en bases de datos disponibles, a su vez, recopilar la experiencia de los fontaneros y funcionarios de la empresa prestadora de servicios públicos EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P, con conocimientos que no están necesariamente documentados.

5.1.2 Levantamiento De Información En Campo

En compañía de los fontaneros encargados del mantenimiento y supervisión de los elementos del sistema de distribución se realizaron una serie de recorridos en campo para verificar la información que se encuentra presente en los documentos los cuales fueron facilitados por la empresa de servicios públicos.

Se documentó la información obtenida de los empleados encargados del mantenimiento de la red en la herramienta Excel, en la cual se creó un modelo de fichas que permitió facilitar el manejo de dicha información, la ficha se puede apreciar en la Tabla 3.

Tabla 3

Modelo de Ficha Para Levantamiento de Información.





Levantamiento del Catastro de Redes de Acueducto del Municipio de Pamplona, Norte de Santander								
Elemento			Dirección		Fecha		Hora	
N°								
Dimensiones			Volumen De Almacenamiento	Material	Coordenadas		Estado	Observaciones
Largo [m]	Ancho [m]	Altura [m]			Latitud	Longitud		

"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"

Universidad de Pamplona | Pamplona - Norte de Santander - Colombia

Tels: (+57) 3153429495 - 3160244475

www.unipamplona.edu.co

La información se recolectó en esta ficha la cual cuenta con los siguientes encabezados: Elemento, Número, Dirección, Fecha, Hora, Dimensiones, Volumen de almacenamiento, Material, Coordenadas, Estado y Observaciones, estas características son las más esenciales y básicas para dejar una información sustancial de los elementos que conforman el Sistema de Acueducto.

Al momento de evaluar el estado de los elementos se seleccionaron 3 estados para describir la situación actual de las mismas, tal que, los estados que se pueden presentar son Bueno, Regular o Malo, teniendo en cuenta que Bueno indica: no presenta agrietamiento, no presenta despacivación, cuenta con todos sus elementos, tiene buen funcionamiento, no presenta patologías. El estado Regular hace alusión a: presencia de patologías físicas, mecánicas, biológicas, realiza su funcionamiento adecuadamente, necesita mantenimiento. El estado Malo hace alusión a: no cumple su funcionamiento, presenta gran deterioro en los elementos estructurales, falta de elementos.

5.1.3 *Elaboración De Plano Base*

Se examinó la documentación relacionada con la red de agua potable, como: planos, informes previos, registros de mantenimiento, etc. Dicha información se compara con los datos recopilados en campo a través de las fichas que catalogan las características de las principales estructuras y accesorios de la red de acueducto, para identificar discrepancias o inconsistencias.

Gracias a la información obtenida y la recopilada en campo se actualizó el plano de la red a través del software de AutoCAD, asegurándose de reflejar con precisión la ubicación de tuberías, nodos y otros elementos dando como resultado un plano base, además se realizó un análisis por tramos de las tuberías dónde se pudieron contabilizar los diámetros, longitudes, material y accesorios presentes en los mismos.

5.2 Fase 2 – Análisis De Consumos, Demandas Y Proyección De Población

5.2.1 *Información Sobre Censos En Pamplona*

Inicialmente se realizó una búsqueda tanto física como digital sobre los censos realizados en el municipio de Pamplona, en la oficina de Desarrollo Municipal de la Alcaldía Pamplona y en

la página oficial de Departamento Administrativo Nacional de Estadística, los cuales cuentan con registros poblacionales actualizados.

5.2.2 Proyección de Población

Se realizó la proyección poblacional de área urbana del municipio de Pamplona, esta se llevó a cabo por 4 métodos: Aritmético, Geométrico, Exponencial y Wappus.

Se empleó el método aritmético debido a que supone el crecimiento o cambio de una variable, como la población o la demanda de un recurso, y esta se asume constante en cada intervalo de tiempo. Es decir, se añade una cantidad fija en cada periodo, lo que implica un crecimiento lineal. La ecuación para calcular la población proyectada es la siguiente:

$$P_f = P_{uc} + \frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{uc} - T_{ci}} * (T_f - T_{uc}) \quad (10)$$

Donde:

P_f = Población correspondiente al año para el que se quiere realizar la proyección (habitantes).

P_{uc} = Población correspondiente a la proyección del DANE (habitantes),

P_{ci} = Población correspondiente al censo inicial con información (habitantes),

T_{uc} = Año correspondiente al último año proyectado por el DANE,

T_{ci} = Año correspondiente al censo inicial con información,

T_f = Año al cual se quiere proyectar la información.

El método geométrico es útil en poblaciones que muestren una importante actividad económica, que genera un apreciable desarrollo y que poseen importantes áreas de expansión las cuales pueden ser dotadas de servicios públicos sin mayores dificultades. La ecuación que se emplea es:

$$P_f = P_{uc}(1 + r)^{T_f - T_{uc}} \quad (11)$$

$$r = \left(\frac{P_{uc}}{P_{ci}}\right)^{\frac{1}{(T_{uc} - T_{ci})}} - 1 \quad (12)$$

Donde:

r = Tasa de crecimiento anual en forma decimal,

Pf = Población correspondiente al año para el que se quiere realizar la proyección (habitantes),

Puc = Población correspondiente a la proyección del DANE (habitantes),

Pci = Población correspondiente al censo inicial con información (habitantes),

Tuc = Año correspondiente al último año proyectado por el DANE,

Tf = Año al cual se quiere proyectar la información.

El método exponencial requiere conocer por lo menos tres censos para poder determinar el promedio de la tasa de crecimiento de la población, en donde el último censo corresponde a la proyección del DANE. Se recomienda su aplicación a poblaciones que muestren apreciable desarrollo y posean abundantes áreas de expansión. La ecuación empleada por este método es la siguiente:

$$P_f = P_{ci} * e^{kx(T_f - T_{ci})} \quad (13)$$

$$k = \frac{\ln P_{cp} - \ln P_{ca}}{T_{cp} - T_{ca}} \quad (14)$$

Donde:

Pcp = Población del censo posterior (proyección del DANE),

Pca = Población del censo anterior (habitantes),

Tcp = Año correspondiente al censo posterior,

Tca = Año correspondiente al censo anterior,

Ln = Logaritmo natural o neperiano.

Finalmente, se aplicó el método Wappus que se basa en función de la tasa de decrecimiento anual y el periodo de diseño, este método está dado por la siguiente expresión:

$$P_f = P_o * \frac{(200 + i * t)}{(200 - i * t)} \quad (15)$$

$$i = \frac{200 * (P_{uc} - P_{ci})}{(T_{uc} - T_{ci}) * (P_{uc} + P_{ci})} \quad (16)$$

Donde:

Pf = Población futura (Habitantes),

Po = Población inicial de referencia (habitantes),

i = Índice de crecimiento anual (%),

t = periodo de diseño, a partir del año dato para la población inicial (años).

Con la realización de las proyecciones se realizó un promedio de las mismas para la continuación del análisis.

5.2.3 Cálculo De Caudales De Demandas Teóricos

Con el valor obtenido de las proyecciones de población se realizó un cálculo de estimación de caudal de demanda para un periodo de 25 años para el área urbana del municipio de Pamplona, se utilizó la dotación neta para la zona del estudio y las ecuaciones que están establecidas por el RAS. Para la estimación de la dotación neta se analizó la tabla que se presenta a continuación:

Tabla 4
Dotación Neta Máxima por Habitante.

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. Obtenida del RAS, art 43.

Con el valor de la dotación neta máxima se procedió a calcular el valor de la dotación bruta la cual se puede obtener usando la siguiente expresión:

$$D_{bruta} = \frac{d_{neta}}{(1 - \%p)} \quad (17)$$

Donde:

Dbruta: Dotación bruta,

dneta: Dotación neta,

%p: Porcentaje de pérdidas técnicas máximas para diseño.

Por consiguiente, se realizó el cálculo del caudal medio diario (Qmd) el cual es el caudal promedio de consumos diarios en un periodo de un año, este puede ser obtenido usando la siguiente expresión:

$$Q_{md} = \frac{Población * D_{bruta}}{86400} \quad (18)$$

Luego se calculó el caudal máximo diario (QMD) el cual corresponde al consumo máximo registrado durante 24 horas en un periodo de un año, este se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$Q_{MD} = Q_{md} * K1 \quad (19)$$

Donde:

K1 = Factor de mayoración

Por último, se realizó el cálculo del caudal máximo horario (QMH) el cual corresponde al consumo máximo registrado durante 1 hora en un periodo de un año, este caudal se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$Q_{MH} = Q_{MD} * K2 \quad (20)$$

Donde:

K2 = Factor de mayoración

Para las ecuaciones de QMD y QMH se deben de tener en consideración la población al momento de evaluar los factores K de mayoración si no se tiene valores históricos de consumos.

Tabla 5
Valores del Factor de Mayoración K.

Población	K1	K2
< 12500 Hab	<= 1.2	<= 1.5
>= 12500 Hab	<= 1.3	<= 1.6

5.2.4 Cálculo del caudal por nodos

Antes de iniciar la modelación de la red de distribución, es necesario determinar la demanda en cada uno de los nodos de la red mediante una distribución espacial del caudal de diseño.

Método de las áreas

Utiliza el concepto de caudal unitario que se calcula teniendo el caudal máximo horario y el área total de la zona a proyectar, tal que, este último depende del tipo de uso de suelo que se presente, teniendo 4 en total, residencial, institucional, comercial e industrial.

$$Q_{NODOi} = Q_{unitario} * \text{Área}_{NODOi} \quad (21)$$

Donde:

Q_{NODOi} = Caudal de consumo en el nodo i (l/s),

$Q_{unitario}$ = Caudal específico por unidad de superficie (l/s/ha),

Área_{NODOi} = Área de influencia o área abastecida por el nodo i (ha).

Para el caso de contar con usos de tipo residencial, institucional, comercial e industrial, se debe discriminar por cada uso el caudal, así:

➤ **Tipo de suelo Residencial**

$$Q_{RES-NODOi} = \frac{Población * D_{bruta}}{86400} \quad (22)$$

Donde:

$Q_{RES-NODOi}$ = Caudal residencial en el nodo i (l/s).

$Población$ = Población abastecida por el nodo i (Densidad * Área) (hab),

D_{bruta} = Dotación bruta (l/hab/día)

➤ **Tipo de suelo Institucional**

$$Q_{INST-NODOi} = Q_{unitario-INST} * Área_{INST-NODOi} \quad (23)$$

Dónde:

$Q_{INST-NODOi}$ = Caudal institucional en el nodo i (l/s),

$Q_{unitario-INST}$ = Caudal unitario específico de tipo institucional, 0,5 l/s/ha,

$Área_{INST-NODOi}$ = Área de tipo institucional abastecida por el nodo i (ha).

➤ **Tipo de suelo Comercial**

$$Q_{COM-NODOi} = Q_{unitario-COM} * Área_{COM-NODOi} \quad (24)$$

Dónde:

$Q_{COM-NODOi}$ = Caudal comercial en el nodo i (l/s),

$Q_{unitario-COM}$ = Caudal unitario específico de tipo comercial, 0,5 l/s/ha,

$Área_{COM-NODOi}$ = Área de tipo comercial abastecida por el nodo i (ha).

➤ **Tipo de suelo Industrial**

$$Q_{IND-NODOi} = Q_{unitario-IND} * Área_{IND-NODOi} \quad (25)$$

Dónde:

$Q_{IND-NODOi}$ = Caudal industrial en el nodo i (l/s),

$Q_{unitario-IND}$ = Caudal unitario específico de tipo industrial, 1,5 l/s/ha,

$\text{Área}_{IND-NODOi}$ = Área de tipo industrial abastecida por el nodo i (ha).

Posteriormente se procedió a hacer el cálculo del caudal medio diario mediante el uso de la siguiente expresión la cual involucra los valores de caudal calculados anteriormente dependiendo del tipo del uso del suelo.

$$Q_{md} = Q_{res} + Q_{inst} + Q_{com} + Q_{ind} \quad (26)$$

Donde:

Q_{md} = Caudal media diario (l/s),

Q_{res} = Caudal residencial (l/s),

Q_{inst} = Caudal institucional (l/s),

Q_{com} = Caudal comercial (l/s).

Q_{ind} = Caudal industrial (l/s).

Valor con el cual se pudo realizar la asignación de un valor de caudal a los distintos nodos que componen la red de distribución del municipio de Pamplona.

5.2.5 Cálculo de IANC

Se inició con la recopilación de los registros mensuales facturados facilitados por EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P, identificando y analizando patrones de consumo y posibles fluctuaciones a lo largo del tiempo, subsiguiente a ello se realizó una comparación con los datos de producción, evaluando las demandas actuales y calculando el IANC.

Para la realización el Índice de Agua No Contabilizada se utilizó la siguiente expresión:

$$IANC = \frac{(\text{Vol. producido} - \text{Vol. facturado})}{\text{Vol. producido}} * 100 \quad (27)$$

Donde:

IANC = Índice de Agua No Contabilizada,

Vol. Producido = Volumen producido por las dos plantas para el periodo de estudio,

Vol. Facturado = Volumen facturado por la empresa en el periodo de estudio.

Posteriormente, se comparó el caudal de producción de los registros obtenidos de la empresa de servicios públicos con los calculados a partir del porcentaje de pérdidas (%p) que registró la empresa para el periodo 2022 – 2023 y se evaluó el incremento del mismo hasta la fecha del periodo 2024.

5.3 Fase 3 – Creación de Modelo Digital de Elevación (MDE)

Para la creación del modelo digital de elevación, se tuvieron en cuenta dos metodologías muy empleadas. En primera instancia, tenemos la creación del MDE por medio de fotogrametría a partir de vuelos con dron. En segunda, la creación de un MDE por medio de fotografía satelital. Dichas metodologías se emplearon para la creación de un solo MDE que contribuya a la realización del proyecto.

5.3.1 *Modelo Digital de Elevación por Fotogrametría*

Para la creación del MDE por fotogrametría se siguió una metodología descrita por Ramos, 2021 en su documento el cual se nos presenta un proceso por etapas en las que se describen los parámetros para los vuelos y para el procesamiento de imágenes obtenidas.

➤ Zona de estudio o interés

Como etapa inicial se tuvo una visión clara de la zona de interés de la cual se desea tener parte en la creación del MDE, para ello se delimitó la zona perimetral de la cual se desea obtener la información, para la asignación de las áreas en los vuelos asignados se usaron aplicaciones móviles. Es de importancia señalar que el vuelo se realizó en días soleados y no es recomendable la realización de vuelos en días lluviosos o nublados debido a que se ve afectada la recepción del dron y la calidad de las imágenes.

➤ **Asignación de parámetros**

Como segunda etapa se estudiaron las características más relevantes en el vuelo del dron, con ello se establecieron parámetros como el tiempo de vuelo, la altura del dron con respecto al suelo, la conexión de una red estable y el traslape de las imágenes tanto verticalmente como horizontalmente, todas estas características fueron de gran importancia para poder tener misiones eficaces y completas a la hora de la realización de la toma de información.

➤ **Referenciación con puntos de control**

Posterior planificación de vuelos y la sectorización por zonas se buscaron puntos de control, estos deben ser referenciados con puntos de control locales o propios, estos puntos deben estar ubicados dentro del área de vuelo y contar con al menos parámetros como la altura y coordenadas según la red geodésica nacional. Si no es así, se necesita un GPS de alta precisión para obtener estos parámetros, ya que un buen control de estos datos ayuda a minimizar errores en la recolección de información y mejora la calidad del Modelo Digital de Elevación (MDE).

➤ **Obtención de datos**

La información obtenida de los vuelos con dron con la ayuda de la aplicación DJI GO 4 se verifica inicialmente mediante la revisión de las imágenes capturadas. Este proceso asegura la calidad de la información, identificando y descartando imágenes borrosas o con deficiencias debidas a condiciones climáticas adversas o interferencias de frecuencia. Si se encuentran problemas, se planifica un nuevo vuelo para obtener mejores datos. Una vez obtenidos los datos, las imágenes se procesan para generar puntos que se orientan y clasifican según su información geográfica y de elevación, proporcionando una visión completa de la zona. Para este procesamiento, se utilizó el software Agisoft Metashape.

➤ **Creación de nubes de puntos**

Tras clasificar los datos, se generó una nube de puntos en Agisoft Metashape. Esta nube es una representación tridimensional de datos, formada por puntos que previamente han sido clasificados y referenciados, y que indican la elevación de puntos individuales en la superficie terrestre. Luego, se creó una malla, que es una representación poligonal 3D de la superficie basada en la nube de puntos. Esta malla permite crear y analizar la topografía para desarrollar el modelo digital de elevación (MDE).

➤ **Modelo digital de elevación (MDE)**

Finalmente, tras procesar las imágenes obtenidas con los vuelos del dron en Agisoft Metashape, se exportó el modelo digital de elevación de la zona de estudio. Además, se extrajeron la ortofoto y las curvas de nivel.

5.3.2 Modelo Digital de Elevación por Información Satelital

Para la obtención del modelo digital de elevación (MDE) por medio del procesamiento de imágenes satelitales se realizó la siguiente metodología:

➤ **Datos iniciales**

Inicialmente se realizó la elaboración de un polígono que encierra toda el área de estudio del proyecto, este se generó en el software Google Earth Pro del cual se extrajo el documento como archivo *.KML*, este documento fue necesario para demarcar la zona de estudio en las siguientes actividades.

➤ **Descarga de rásters**

Posteriormente se ingresó en la página web EOSDA, 2024, en la cual al introducir el polígono de la zona de estudio y configurar parámetros para la muestra de las teselas de terreno

se nos presentaron diferentes rásters que conformaron la zona de estudio, los cuales se descargaron y se llevaron a un software para su implementación.

➤ **Construcción de ráster virtual**

Con la información obtenida de los ráster se implementó el software QGIS para su unificación, se utilizó la opción de “construir ráster virtual”, dándonos como resultado un modelo digital de elevación de la zona de interés.

➤ **Verificación de coordenadas**

Se realizó la verificación de las coordenadas del modelo digital de elevación para, de ser necesario hacer su respectiva transformación a coordenadas CTM-12 mediante la opción “Combar (reproyectar)”.

5.4 Fase 4 - Construcción Modelo Hidráulico a Través de QGIS, Complementos GIS y EPANET

5.4.1 Creación del Modelo Hidráulico

Para la creación del modelo hidráulico se siguieron una serie de pasos enumerados a continuación, estos fueron obtenidos de la guía de usuarios proporcionada por QWATER (Sousa Moreira, 2018b) con la cual se logró la obtención de un modelo hidráulico inicial.

➤ **Paso 1. Crear un nuevo proyecto QGIS**

- Abrir QGIS y seleccionar "Nuevo Proyecto".

➤ **Paso 2. Ajustar el sistema de coordenadas del proyecto**

- Configurar el sistema de coordenadas del proyecto a Sirgas 2000 (por ejemplo, para Salvador usar EPSG: 31984).

- Ir a `Proyecto > Propiedades del Proyecto > SRC` y seleccionar el sistema de coordenadas adecuado.

➤ **Paso 3. Crear formas para los tipos de elementos de la red**

➤ **Puntos:**

- Crear capas de puntos para Nodos, Reservorios y Tanques.
- Ir a `Capa > Crear Capa > Nueva Capa de Forma...` y seleccionar "Punto" como tipo de geometría.
- Asignar el sistema de coordenadas del proyecto (EPSG: 31984).

➤ **Líneas:**

- Crear capas de líneas para extractos.
- Ir a `Capa > Crear Capa > Nueva Capa de Forma...` y seleccionar "Línea" como tipo de geometría.
- Asignar el sistema de coordenadas del proyecto (EPSG: 31984).

➤ **Paso 4. Guardar el proyecto**

- Ir a `Proyecto > Guardar Como` y guardar el proyecto en una ubicación deseada.

➤ **Paso 5. Importar la base planimétrica a utilizar**

- Importar la base planimétrica desde `Capa > Añadir Capa > Añadir Capa Vectorial...`.

➤ **Paso 6. Relacionar las formas creadas con los tipos de información de Epanet**

- Ir a `Complementos > Qwater > Configuración`.
- Asignar las capas creadas:
 - Uniones = Nodos
 - Tuberías = Segmentos
 - Embalses = Embalses
- Ingresar la población inicial y final de la red a analizar.

➤ **Paso 7. Configurar propiedades de las tuberías**

- Ir a la pestaña "Tuberías" y configurar las propiedades relevantes para los diámetros y materiales de las tuberías.

➤ **Paso 8. Configurar opciones de cálculo**

- Ir a la pestaña "Opciones de cálculo" y configurar:
- Velocidad máxima permitida (predeterminada = 5 m/s).
- Marcar la opción "Calcular longitud de tubería".
- Seleccionar la configuración de cálculo "template_d-w_lps.inp".

➤ **Paso 9. Crear el modelo Qwater**

- Ir a `Complementos > Qwater > Crear modelo` y aceptar todos los mensajes.
- Guardar y salir del modo de edición para todas las formas.

➤ **Paso 10. Habilitar ajuste del proyecto**

- Ir a `Proyecto > Opciones de ajuste` y hacer clic en el ícono del imán para habilitar el ajuste.

➤ **Paso 11. Reservorio**

- Seleccionar la forma de los reservorios y hacer clic en el botón editar.
- Habilitar la etiqueta de capa para mostrar el campo "DC_ID".
- Localizar todos los reservorios completando el campo "HEAD" con la Elevación del agua (Elevación del suelo + Altura del reservorio).
- Cambiar la visualización de la etiqueta a: `Nodo: || "DC\_ID" || '\n Elevation =' || "HEAD"`.
- Guardar la forma y salir del modo de edición.

➤ **Paso 12. Nodos**

- Seleccionar la forma del nodo y hacer clic en el botón editar.

- Habilitar la etiqueta de capa para mostrar el campo "DC_ID".
- Localizar todos los nodos y completar el campo "ELEVACIÓN" con la elevación del terreno.
- Cambiar la visualización de la etiqueta a: `Nodo:' || "DC\_ID" || '\n Elevation =' || "ELEVATION"`.
- Guardar la forma y salir del modo de edición.

➤ **Paso 13. Segmentos**

- Seleccionar las formas de los segmentos y hacer clic en el botón editar.
- Habilitar la etiqueta de capa para mostrar el campo "DC_ID".
- Rastrear todos los segmentos según la dirección del flujo previsto (de aguas arriba a aguas abajo).
- Completar las tablas de atributos con los valores predeterminados haciendo clic en `Plugins > Qwater > Rellenar campos`.
- Guardar la forma y salir del modo de edición.

➤ **Paso 14. Calcular la demanda**

- Hacer clic en `Plugins > Qwater > Calc Flow` para calcular el caudal unitario a partir de la demanda distribuida.
- Ejecutar `Plugins > Qwater > Make model` y aceptar todos los mensajes.
- Hacer clic en `Complementos > Qwater > Calc Flow`.

➤ **Paso 15. Guardar la forma del nodo y salir del modo de edición**

- Guardar y finalizar el proceso.

5.4.2 *Cálculo de Caudal de Demanda en Nodos*

Método de la repartición media

Mediante este método se definen en principio los caudales de consumo en cada uno de los tramos de toda la red de distribución (tuberías principales, tuberías secundarias y ramales abiertos) y se asignan los caudales de las tuberías y ramales abiertos de acuerdo con una distribución lógica de flujo. Dichos caudales se reparten por mitades a cada uno de los nodos extremos de los tramos respectivos. Para esa definición inicial de los caudales por tramo se puede seguir un procedimiento como el siguiente, dependiendo del tipo de información disponible: se determina un caudal unitario en $L/s \cdot km$ y de acuerdo con la longitud de cada tramo se puede establecer el caudal aproximado correspondiente.

5.4.3 EPANET

Con la ayuda de los complementos GIS QWATER y QGISRED se definieron propiedades de los elementos de la red, como diámetros de tubería, rugosidad, elevación de nodos y capacidad de los tanques posteriormente se registraron los datos digitalizados y configurados en QGIS hacia la herramienta EPANET para poder hacer una simulación en periodo extendido y así crear una mejor representación del modelo hidráulico.

Así mismo, se cargaron los nodos con un valor correspondiente de acuerdo a datos de consumo obtenidos del SUI.

5.5 Fase 5 – Macro calibración del Sistema y Análisis

El proceso de calibración es iterativo y consiste en ajustar cambios en ciertos parámetros. Estos parámetros incluyen la rugosidad de las tuberías, el patrón de consumo del sistema, la adición de un coeficiente de pérdidas de longitud de tubería y accesorios, y un valor correspondiente a las fugas totales del sistema.

Al asignar e iterar estos parámetros, se logra estabilizar el modelo hidráulico. Esto significa que al comparar los valores de presión simulados son similares a los valores de presión observados

en campo. Como resultado, se obtiene un modelo hidráulico más confiable y preciso que puede utilizarse para realizar cambios y predicciones en el sistema.

5.5.1 Variación de los Coeficiente de Rugosidad

Es esencial realizar el proceso de calibración para considerar las diferencias en la rugosidad de las tuberías instaladas en el sistema, ya que esto puede variar dependiendo de su antigüedad. En general, las tuberías más antiguas tienden a tener una rugosidad mayor en comparación con las tuberías recién instaladas. Por lo tanto, al llevar a cabo el proceso de calibración.

5.5.2 Obtención de un Coeficiente de Pérdidas Menores por Accesorios

En este estudio, se identificaron los elementos del sistema que generaban pérdidas menores, tales como codos, válvulas, tees, expansiones y reducciones, mediante la revisión detallada de los planos del sistema. Esta identificación fue clave para asegurar que todas las fuentes de pérdidas menores fueran incluidas en el análisis. Posteriormente, se asignaron valores correspondientes de Km para cada elemento, tomando en cuenta sus características específicas, según se detalla en la Tabla 2. La ecuación 9 fue utilizada como referencia para el cálculo de las pérdidas menores, proporcionando una base teórica sólida para el análisis.

A continuación, se realizó la sumatoria de los coeficientes Km de todos los elementos presentes en la red, obteniendo así el valor total de pérdidas menores. Este valor se dividió entre la longitud total de las tuberías del proyecto, permitiendo calcular un coeficiente promedio por metro (ver apéndice F). Este coeficiente fue luego asignado a cada tramo de tubería en función de su longitud y finalmente registrado en EPANET, en el campo "Minor Loss Coefficient" (Coeficiente de Pérdidas Menores), garantizando una distribución adecuada y precisa de las pérdidas menores a lo largo del sistema.

5.5.3 Cálculo de Coeficiente de Pérdidas por Fugas

El cálculo de un coeficiente de fugas es fundamental en la calibración, ya que es una de las variables más relevantes al analizar el coeficiente de pérdidas global del sistema. Este valor, que corresponde a las pérdidas, puede calcularse siguiendo la metodología propuesta por Molina Arce, (2014). Según esta metodología, primero se debe calcular un coeficiente global de pérdidas por fugas en todo el sistema. Si el emisor de fugas es igual para todos los nodos del modelo (o para un sector del modelo), se puede definir un emisor global de fugas, distribuyéndolo equitativamente entre los nodos de demanda (ND):

$$C_{e,i} = \frac{C_{e,global}}{ND} \quad (28)$$

De manera similar, podemos utilizar un único coeficiente de consumo $C_c(t)$ para todos los nodos del modelo hidráulico:

$$C_c(t) = C_{c,i}(t) \quad (29)$$

Finalmente, se puede efectuar el balance tomando en cuenta todos los instantes de la simulación, lo que nos daría:

$$\bar{Q}_{T,sim} = Q_c + C_{e,global} \bar{P}^{0.5} \quad (30)$$

Donde:

$\bar{Q}_{T,sim}$ = es el caudal promedio total simulado,

Q_c = es el caudal consumido por todos los nudos del modelo,

$C_{e,global}$ = es el emisor global de fugas,

P = es la presión promedio en la red para todos los instantes de simulación.

Despejando la ecuación 31 obtenemos:

$$C_{e,global} = \frac{Q_{ANR}}{(\bar{P})^{0.5}} \quad (31)$$

Donde:

Q_{ANR} = es el caudal medio de agua no registrada.

Por otra parte, es posible obtener el balance hídrico del sistema en términos del caudal mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{Q}_{T,sim}(t) = C_c(t)Q_c + C_{e,global}[\bar{P}(t)]^{0.5} \quad (32)$$

Las variables Q_c y $C_{e,global}$ tienen la misma definición que las ecuaciones anteriores.

Donde:

$\bar{Q}_{T,sim}(t)$ = es el caudal promedio total simulado en un instante t,

$C_c(t)$ = es el coeficiente de consumo para el instante t,

$\bar{P}(t)$ = es la presión promedio para toda la red en el instante t.

5.5.4 Calibración Mediante Código Iterativo en Python

Posterior a la obtención de los valores anteriormente calculados se realizó una codificación en Python con la librería WNTR para la calibración del modelo hidráulico, este proceso consistió en la iteración de los datos de rugosidad y coeficiente de emisor de tal forma que con esto se logre la estabilización de las presiones y caudales simulados con las observadas.

➤ Creación de Función Objetivo

Se realizó la codificación de una función objetivo basada en el cálculo de error medio cuadrático (RMSE), que mide la discrepancia entre los valores simulados (como presiones y caudales en los nodos) y los valores observados.

$$RMSE_Q = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (Q_{mon_j} - Q_{sim_j})^2}{m}} \quad (33)$$

$$RMSE_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{mon_i} - P_{sim_i})^2}{n}} \quad (34)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (\hat{Y}_t - \bar{Y})^2}{\sum_{t=1}^T (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (35)$$

En las ecuaciones (33) y (34), n indica el número de nodos y m el número de tuberías en la red; P_{mon_i} se refiere a la presión registrada y P_{sim_i} a la presión simulada; Q_{mon_j} es el caudal monitoreado y Q_{sim_j} el caudal simulado.

➤ Variación de la Rugosidad

Se ha desarrollado una función que itera en función de dos rangos de rugosidad. El primer rango representa la rugosidad del material en estado nuevo, mientras que el segundo rango considera una corrección en base al desgaste causado por el tiempo de uso.

➤ Variación del Coeficiente Emisor

Con el cálculo del valor correspondiente a las pérdidas menores por accesorios y con el coeficiente de fugas calculado para el sistema se obtuvo un valor final el cual será el valor máximo posible permitido para iteración, este proceso se realizará mediante una función que itere el valor del coeficiente emisor, esto con el fin de minimizar el RMSE y alcanzar la convergencia de las presiones y caudales simulados y calculados.

Posteriormente, se realizó el análisis hidráulico a partir de los resultados obtenidos de la modelación hidráulica para identificar problemas de operación y diseño en la red de acueducto. Estos resultados se compararon con criterios de diseño y estándares de calidad para evaluar el desempeño del sistema.

6 Análisis de Documentación Y Catastro de Redes

6.1 Documentación Consultada

En la búsqueda de información se encontraron algunos documentos que indicaban el estado tanto de la red acueducto como de algunos de los elementos más importantes, por ello son considerados como rastros históricos y que nos permiten plantear una visión previa al análisis y actualización de la misma.

Los estudios y documentos encontrados se describen a continuación:

➤ Informe diagnóstico municipio de Pamplona

Este documento nos muestra una evaluación de los diferentes elementos que se encuentran en el sistema de acueducto y alcantarillado del municipio de Pamplona, analiza el estado del sistema de distribución de agua en Pamplona, en el cual realiza una revisión incluyendo evaluaciones de la infraestructura existente, problemas identificados y cálculos de los componentes de acuerdo a unas proyecciones poblacionales, el documento es realizado para la gobernación de Norte Santander - secretaria de agua potable y saneamiento básico en el año 2014 (este documento es citado como IDSAAP - 2014).

➤ Plano general de red de distribución de acueducto de Pamplona 2008

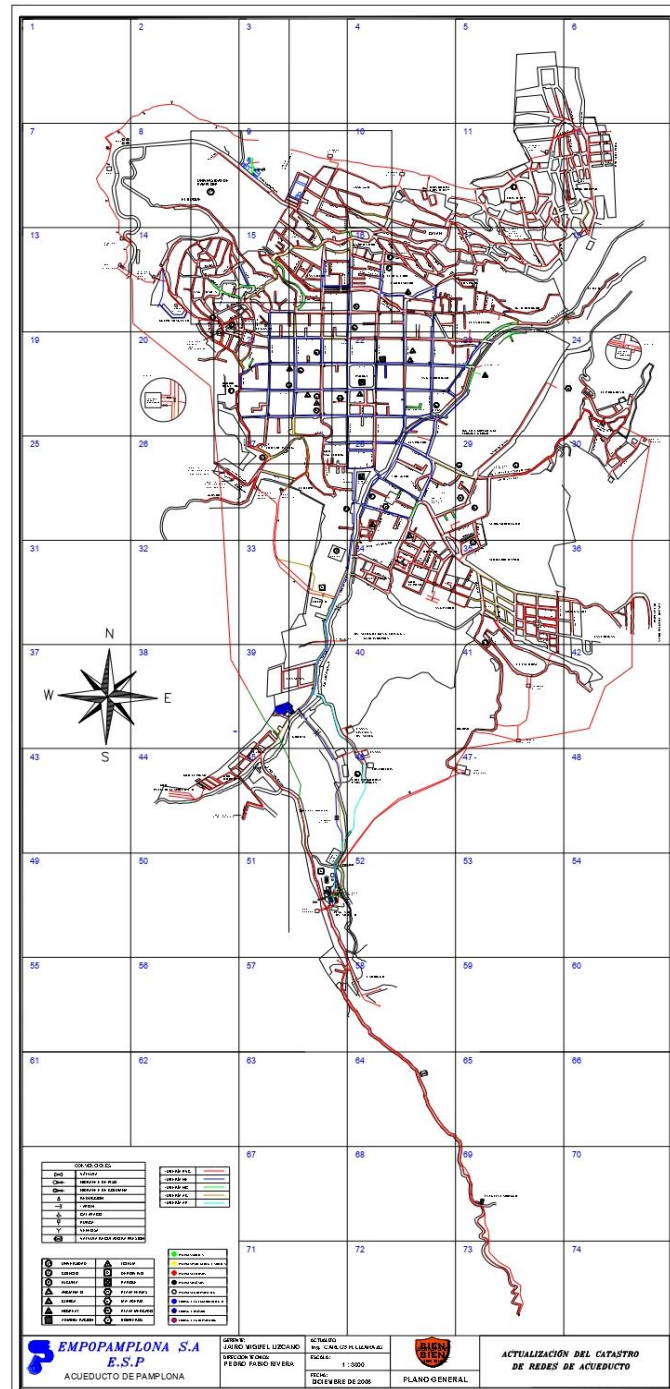
Un plano que muestra el sistema de distribución de agua de la ciudad de Pamplona en el año 2008 (Figura 4), con detalles sobre la red como el material de tuberías, ubicación de elementos y accesorios, este documento fue actualizado por el ing. Carlos H. Lizarazo para la empresa de EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P, (véase apéndice A).

➤ Plano general de red de distribución de acueducto de Pamplona 2016

Un plano que muestra el sistema de distribución de agua de la ciudad de Pamplona en el año 2016 (Figura 5), con detalles sobre la red como el material, longitud y diámetro de algunas

tuberías, ubicación de elementos y accesorios, este documento fue actualizado por la entidad Obra Ambiente S.A.S. para la empresa de EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P, (véase apéndice B).

Figura 4
Plano Red de Acueducto de Pamplona 2008.



Nota. Obtenido de la documentación proporcionada pública EMPOPAMPLONA S.A E.S.P. (2008).

Nota. Obtenido de la documentación proporcionada pública EMPOPAMPLONA S.A E.S.P. (2016)



➤ **Descripción Planta Cariongo**

Detalles sobre la Planta de Tratamiento de Agua Potable Cariongo, incluyendo información sobre el proceso de tratamiento del agua, capacidad de producción, un diagnóstico general la planta e información de los diferente componentes y elementos que contiene el sistema hasta llegar a la planta de tratamiento, este documento fue elaborado por la empresa de EMPOPAMPLONA S.A. E.P.S. no se tiene fecha de elaboración.

➤ **Descripción Planta Monteadentro:**

Detalles sobre la Planta de Tratamiento de Agua Potable Monteadentro, incluyendo información sobre el proceso de tratamiento del agua, capacidad de producción, un diagnóstico general la planta e información de los diferente componentes y elementos que contiene el sistema hasta llegar a la planta de tratamiento, este documento fue elaborado por la empresa de EMPOPAMPLONA S.A. E.P.S. no se tiene fecha de elaboración.

➤ **Catastro redes de acueducto:**

En este documento se describe las tuberías presentes en el sistema de distribución de agua de Pamplona por procesos, este documento (véase apéndice C) tiene en consideración los siguientes encabezados los cuales tienen por nombre proceso, clase de ducto, sección transversal. diámetro nominal, área o sección transversal, longitud, material, tipo de instalación, fecha de instalación, vida útil estándar y vida útil remanente. Este documento no cuenta con la fecha de elaboración, pero cuenta con información de relevancia sobre los elementos del sistema de acueducto. Fue elaborado por la empresa de servicios públicos domiciliarios EMPOPAMPLONA S.A. E.P.S. (Tabla 6)

Tabla 6.
Catastro del Sistema de Acueducto.

CATASTRO DE REDES DE ACUEDUCTO										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
PROCESO	CLASE DE DUCTO	SECCION TRANSVERSAL	DIAMETRO NOMINAL (Pulg)	AREA O SECCION TRANSVERSAL (m2)	LONGITUD (ml)	MATERIAL	TIPO DE INSTALACION	FECHA DE INSTALACION	VIDA UTIL ESTANDAR	VIDA UTIL REMANENTE
Aducción cariongo	Canal	Rectangular		0,35	102,000	concreto		mayor a 50 años	35	15
Aducción rosal	Tubería	Circular	10"	0,05	300,000	PVC		1980	30	6
Aducción potreritos	Tubería	Circular	8"	0,032	286,000	AC-HF		1985	30	20
Aducción mono	Canal	Rectangular		0,35	36,000	concreto		1985	35	15
					724,000					
Conducción cariongo	Canal	Rectangular		0,35	129,500	concreto		1985	35	1
Conducción rosal	Tubería	Circular	10"	0,05	3.252,000	HF	ZANJA	mayor a 50 años	45	
Conducción potreritos	Tubería	Circular	10"	0,05	3.499,000	PVC	ZANJA	1980	45	1
Conducción mono	Tubería	Circular	10"	0,05	2.597,360	AC	ZANJA	1960-1980	45	11
					9.348,360					
Red Matriz o primaria	Tubería	Circular	8"	0,032	10.918,650	PVC	ZANJA	1980	45 años	
	Tubería	Circular	8"	0,032	520,000	HF	ZANJA	antes de 1980	45 años	mas de 50 años
	Tubería	Circular	8"	0,032	1.597,360	AC	ZANJA	1970	45	1
	Tubería	Circular	6"	0,018	887,490	AC	ZANJA	1960	45 años	11 años
	Tubería	Circular	6"	0,018	8.734,910	PVC	ZANJA	1980	45 años	
	Tubería	Circular	6"	0,018	959,000	HF	ZANJA	antes de 1980		mas de 50 años
	Tubería	Circular	4"	0,008	5.721,690	PVC	ZANJA	1980	45 años	
	Tubería	Circular	4"	0,008	161,000	AC	ZANJA	1960	45 años	11 años
	Tubería	Circular	4"	0,008	548,000	HF	ZANJA	antes de 1980		mas de 50 años
Red menor	Tubería	Circular	3"	0,0045	22.755,590	PVC	ZANJA	1980	45 años	
	Tubería	Circular	3"	0,0045	1.264,880	AC	ZANJA	1960	45 años	11 años
	Tubería	Circular	3"	0,0045	2.318,000	HF	ZANJA	antes de 1980		mas de 50 años
	Tubería	Circular	3"	0,0045	775,000	ACERO	ZANJA	2002	45 años	
	Tubería	Circular	2"	0,002	36.335,940	PVC	ZANJA	1980	45 años	
	Tubería	Circular	1 1/2"	0,0011	1.404,530	PVC	ZANJA	1980	45 años	
	Tubería	Circular	1"	0,0005	521,680	PVC	ZANJA	1980	45 años	
					95.423,720					
TOTAL TUBERIA					105.496,080					
VALVULAS										
	Tubería	Circular	2"	0,002	37 U			1980	45	
	Tubería	Circular	3"	0,0045	52 U			1980	45	
	Tubería	Circular	4"	0,008	18 U			1980	45	
	Tubería	Circular	6"	0,018	12 U			1980	45	
	Tubería	Circular	8"	0,032	15 U			1980	45	
	Tubería	Circular	10"	0,05	9 U			1980	45	
	Tubería	Circular	12"	0,0729	2 U			1980	45	
HIDRANTES										
	Tubería	Circular	2"	0,002	1 U			1980	45	
	Tubería	Circular	3"	0,0045	31 U			1980	45	
	Tubería	Circular	6"	0,018	1 U			1980	45	
SE RECOMIENDA EMPEZAR A CAMBIAR TODAS LAS TUBERIAS Y ACCESORIOS QUE CORRESPONDAN AL SISTEMA DE ACUEDUCTO, Y QUE SEGÚN ESTE CUADRO YA HAYAN CUMPLIDO SU VIDA UTIL										

Nota. Obtenido de la documentación proporcionada pública EMPOPAMPLONA S.A E.S.P. (s. f.)

6.2 Descripción del Sistema de Acueducto Urbano de Pamplona, Norte de Santander

El suministro de agua del Sistema de Acueducto del Municipio de Pamplona se realiza a través de 04 puntos de captación: la Quebrada Cariongo que junto a la Quebrada El Rosal abastecen a la PTAP No.1 y la Quebrada El Mono que en conjunto con la Quebrada Potreritos

abastecen la PTAP No.2, todas ellas equipadas con una o más rejillas de fondo para poder captar el agua.

El agua captada en la Quebrada Cariongo es dirigida primero hacia un desarenador, luego opcionalmente hacia otro y finalmente hacia la PTAP No.1, la cual fue construida para tratar un flujo de 180,0 l/s. En el caso de la Quebrada El Rosal, el agua pasa por el desarenador No.2 antes de ser transportada a la PTAP No.1 mediante una tubería PVC de diámetro 8". La captación No.3 de la Quebrada El Mono lleva el agua a través de un conducto tipo canal hasta el desarenador No.3 y luego hacia la PTAP No.2, diseñada para tratar 80,0 l/s. Por último, el agua captada en la Quebrada Potreritos es dirigida al desarenador No.4 antes de pasar a la PTAP No.2.

Una vez tratada, el agua se almacena en 13 tanques de almacenamiento de concreto, que distribuyen el agua por toda la red del casco urbano del Municipio de Pamplona. Las estructuras de captación y desarenado fueron construidas en diferentes años, con las más antiguas datando del año 1.963 y las más recientes del año 1.985.(DAG Ingeniería S.A.S., 2014)

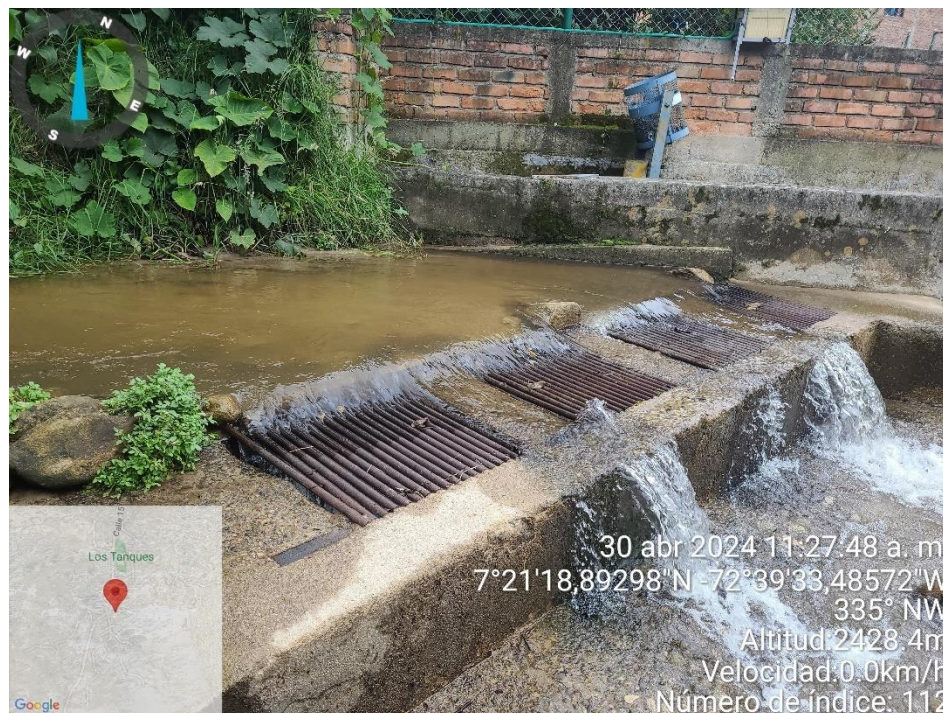
6.2.1 Fuentes de Abastecimiento - Captaciones

6.2.1.1 Captación N°1 – Quebrada Cariongo. La bocatoma es de tipo fondo se encuentra ubicada en la quebrada Cariongo, cuenta con 4 rejillas en mal estado, presentan un poco de taponamiento con hojas y ramas que son arrastradas por la quebrada es de fácil acceso y paso restringido.

La estructura cuenta con adecuada capacidad y estabilidad, es decir, las dimensiones de la estructura son aptas para captar el flujo para el cual fueron diseñadas. Esta captación se encuentra en buen estado en general y no cuenta con cámara de recolección.

Figura 6

Bocatoma No.1 Quebrada Cariongo.



Según cálculos en el documento Informe Diagnostico Municipio Pamplona de la Gobernación de Norte de Santander 2013, la capacidad de la bocatoma en la captación No.1 es un caudal de 77,26 l/s, esta estructura es capaz de abastecer en condiciones máximas a una población de 34.120 habitantes es decir al 42 % de la población total del municipio (Valores tomados de DAG Ingeniería S.A.S., 2014).

6.2.1.2 Captación N°2 – Quebrada El Rosal. La bocatoma es de tipo fondo se encuentra ubicada en la quebrada El Rosal, cuenta con una rejilla de 1,55 metros de largo y 0,5 m de ancho, presentan un poco de taponamiento con hojas y ramas que son arrastradas por la quebrada, es de acceso limitado para personal autorizado, aunque animales y personas del sector pueden ingresar al lugar.

La estructura cuenta con adecuada capacidad y estabilidad, es decir, las dimensiones de la estructura son aptas para captar el flujo para el cual fueron diseñadas. esta captación se encuentra en buen estado en general.

Figura 7

Bocatoma No.2 Quebrada El Rosal.



Según cálculos en el documento Informe Diagnostico Municipio Pamplona de la Gobernación de Norte de Santander 2013, la capacidad de la bocatoma en la captación No.2 es un caudal de 55,88 l/s, esta estructura es capaz de abastecer en condiciones máximas a una población de 50.520 habitantes es decir al 62 % de la población total del municipio (Valores tomados de DAG Ingeniería S.A.S., 2014).

6.2.1.3 Captación N°3 – Quebrada El Mono. La bocatoma es de tipo fondo se encuentra ubicada en la quebrada El Mono (ver figura 8), cuenta con una rejilla de 1,55 m de largo y 0,5 m de ancho, presentan un poco de taponamiento con hojas y ramas que son arrastradas por la quebrada, es de difícil acceso.

Figura 8

Bocatoma No.3 Quebrada El Mono



Nota 1. Obtenido de información suministrada por funcionarios de EMPOPAMPLONA S.A E.S.P.

Nota 2. No se pudo acceder al sitio pues la zona es de difícil acceso.

La estructura cuenta con adecuada capacidad y estabilidad, según cálculos en el documento Informe Diagnostico Municipio Pamplona de la Gobernación de Norte de Santander 2013, la capacidad de la bocatoma en la captación No.1 es un caudal de 30,15 l/s, esta estructura es capaz de abastecer en condiciones máximas a una población de 38.287 habitantes es decir al 47% de la población total del municipio (Valores tomados de DAG Ingeniería S.A.S., 2014).

.6.2.1.4 Captación N°4 – Quebrada Potreritos. La bocatoma es de tipo fondo se encuentra ubicada en la quebrada Potreritos (ver figura 9), cuenta con una rejilla de 1,55 m de largo y 0,45m de ancho, presentan un poco de taponamiento con hojas y ramas que son arrastradas por la quebrada, es de difícil acceso.

Figura 9

Bocatoma No.4 Quebrada Potreritos.



Nota. Obtenido de información suministrada por funcionarios de EMPOPAMPLONA S.A E.S.P.

Nota 2. No se pudo acceder al sitio pues la zona es de difícil acceso.

La estructura cuenta con adecuada capacidad y estabilidad, según cálculos en el documento Informe Diagnostico Municipio Pamplona de la Gobernación de Norte de Santander 2013, la capacidad de la bocatoma en la captación No.1 es un caudal de 30,15 l/s, esta estructura es capaz de abastecer en condiciones máximas a una población de 13.302 habitantes es decir al 16% de la población total del municipio (Valores tomados de DAG Ingeniería S.A.S., 2014).

6.2.2 Aducciones

6.2.2.1Aducción No.1. Va desde la captación No.1 en la Quebrada Cariongo y se lleva a cabo a través de un canal de flujo libre que tiene una sección de concreto de 0,5 metros de ancho por 0,42 metros de alto. Este canal carece de protección contra cualquier forma de contaminación ambiental y está expuesto a diversos riesgos. A pesar de contar con cámaras de inspección, se observa una obstrucción frecuente del flujo de agua, lo que genera dificultades en la operatividad y mantenimiento del sistema.

6.2.2.2 Aducción No.2. Va desde la captación No.2 en la Quebrada El Rosal se realiza a través de una tubería de PVC que opera por gravedad, aunque se desconoce el diámetro exacto de la misma. Esta tubería está adecuadamente protegida y se encuentra en buen estado, sin daños aparentes. No se han identificado problemas de capacidad ni de seguridad en la tubería, y no hay riesgo de contaminación del agua. Sin embargo, ocasionalmente se presentan derrumbes en las áreas por donde atraviesa la tubería.

6.2.2.3 Aducción No.3. La Aducción de la captación No.3 en la Quebrada El Mono se lleva a cabo a través de un canal de flujo libre con una sección de concreto de 0,30 m x 0,30 m y una longitud de 12,90 m. El canal está protegido con tapas de concreto que se pueden quitar fácilmente. Aunque no tiene cámaras de inspección, se han detectado daños y problemas de capacidad en el canal, pero el flujo de agua no se bloquea con frecuencia.

6.2.2.4 Aducción No.4. La Aducción de la captación No.4 en la Quebrada Potreritos se lleva a cabo mediante una tubería fabricada con PVC y H.F que opera por gravedad. Actualmente, se han identificado daños en la tubería y sus accesorios. En ciertos tramos, la tubería se encuentra expuesta, lo que aumenta el riesgo de deterioro. A pesar de la ausencia de cámaras de inspección, el sistema no experimenta problemas de capacidad. Además, se han observado algunas fugas en la tubería que requieren atención para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema.

6.2.3 Desarenadores

El sistema de suministro de agua dispone de un total de 5 desarenadores, distribuidos de manera equitativa en cada sistema de captación, a excepción del sistema No.1 que cuenta con la particularidad de tener asignados 2 desarenadores.

6.2.3.1 Desarenador No.1. El desarenador construido en 1985 en el sistema No.1 es de concreto reforzado y tipo convencional, con compuertas y válvulas de desagüe (ver figura). Se

mantiene mensualmente y no presenta problemas de operación, mantenimiento o estabilidad. La zona de desarenado está protegida y aislada del paso de personas y animales. Sin embargo, debido a su tamaño, el tiempo de retención hidráulico es inferior al ideal, lo que afecta la retención de sólidos sedimentables. Se determina que el desarenador no puede satisfacer las necesidades de la población proyectada para 2038, lo que lleva a un ajuste del porcentaje de aporte del caudal máximo diario al 41%, con un valor calculado de 77,26 l/s (Valores tomados de DAG Ingeniería S.A.S., 2014).

Figura 10
Desarenador No.1.



6.2.3.2 Desarenador N°2. Es el desarenador adicional construido en 1963 del sistema No.1 es de concreto reforzado y tipo convencional, con compuertas y válvulas de desagüe. A diferencia del primer desarenador, no está protegido ni aislado del paso de personas y animales. Se realiza mantenimiento cada 2 meses y se enfrenta a problemas de operación y mantenimiento. Este desarenador no está en uso regular, siendo solo para emergencias. Ubicado en una ladera, requirió la construcción de un muro de contención. Presenta problemas de estabilidad y vegetación

en los muros. El tiempo de retención hidráulico es de aproximadamente 36 minutos, lo que es demasiado alto y puede causar problemas sépticos. Se calcula que puede abastecer a una población de 46,588 habitantes en condiciones máximas, equivalente al 57% de la población proyectada para 2038 (Valores tomados de DAG Ingeniería S.A.S., 2014).

Figura 11
Desarenador No.2.



Nota 1. Obtenido del documento IDSAAP-2014.

Nota 2. No se pudo acceder al sitio pues la zona es de difícil acceso.

6.2.3.3 Desarenador N°3. El desarenador No.3 es de tipo convencional, con compuertas y válvulas de desagüe, sin protección contra personas o animales. Aunque no tiene fugas ni problemas de capacidad, muestra signos de deterioro con musgo en los muros y tapas en mal estado con grietas. Se verificó su capacidad para el futuro, aportando el 16% del caudal máximo diario proyectado para 2038, lo que da un valor de 30,15 l/s. El tiempo de retención hidráulico es de aproximadamente 43 minutos, demasiado alto, lo que podría causar problemas sépticos. Se estima que puede abastecer a una población de 9,986 habitantes en condiciones máximas,

equivalente al 22% de la población proyectada para 2038 (Valores tomados de DAG Ingeniería S.A.S., 2014).

Figura 12
Desarenador No.3.



Nota 1. Obtenido del documento IDSAAP-2014.

Nota 2. No se pudo acceder al sitio pues la zona es de difícil acceso.

6.2.3.4 Desarenador N°4. Es de concreto reforzado y tipo convencional, con compuertas y válvulas de desagüe, sin contar con un sistema de paso directo. Está protegido y aislado de personas y animales, con una cerca de alambre para protección adicional. No presenta problemas de capacidad ni funcionamiento. Aunque no está protegido de hojas y ramas, el área está resguardada por la cerca. Se verificó su capacidad para el futuro, aportando el 16% del caudal máximo diario proyectado para 2038, lo que da un valor de 30,15 l/s. El tiempo de retención hidráulico es de aproximadamente 28 minutos, lo que puede causar problemas sépticos al retener sólidos sedimentables. Se estima que puede abastecer a una población de 21,346 habitantes en

condiciones máximas, equivalente al 26% de la población proyectada (Valores tomados de DAG Ingeniería S.A.S., 2014).

Figura 13
Desarenador No.4.



Nota 1. Obtenido de información suministrada por funcionarios de EMPOPAMPLONA S.A E.S.P.

Nota 2. No se pudo acceder al sitio pues la zona es de difícil acceso.

6.2.4 Conducción

La aducción funciona por gravedad desde los desarenadores hasta las plantas de tratamiento, y está distribuida por 4 líneas de conducción repartidas de la siguiente manera:

6.2.4.1 Conducción No.1. El sistema de transporte de agua se extiende desde el Desarenador No.1 hasta la PTAP No.1 y carece de dispositivos como ventosas, purgas o cámaras de inspección. Hay tramos donde las tuberías están expuestas, lo que aumenta el riesgo de contaminación del agua. Además, el sistema enfrenta dificultades en términos de capacidad y seguridad. Por otra parte, debido a la falta de información no se encontraron registros de caudal de diseño, tampoco hay registros de la velocidad del fluido en la tubería.

6.2.4.2 Conducción No.2. La tubería de conducción parte desde el Desarenador No.2 hacia la Planta de Tratamiento No.1, igual que la tubería de conducción No.1 trabaja por gravedad y es de diámetro 8" y dispone de ventosas instaladas en el sistema. La tubería está asegurada y no enfrenta problemas en términos de capacidad, seguridad o estabilidad. Sin embargo, hay daños en la tubería y sus accesorios, con tramos donde la tubería queda expuesta.

La tubería cuenta con una verificación hidráulica con base en un caudal de diseño del 27% del QMD de la cabecera municipal para el año 2.038 que corresponde a 76,3 l/s. Se calculó que el caudal que transportará la tubería de 8" es de 0.21 l/s presentando una velocidad media menor a 1 m/s.

6.2.4.3 Conducción No.3. Dado que la tubería de conducción No.3 que parte desde el Desarenador No.3 hacia la PTAP No.2 se encuentra en su totalidad enterrada no se pudo llevar a cabo la verificación del estado y las características de esta. Por otra parte, debido a la falta de información no se encontraron registros de caudal de diseño, tampoco hay registros de la velocidad del fluido en la tubería.

6.2.4.4 Conducción No.4. La tubería de conducción No.4 va desde el Desarenador No.4 hacia la PTAP No.2, esta conducción se realiza por medio de una tubería que opera mediante gravedad y dispone de ventosas instaladas en el sistema. La tubería no está vulnerable ni tiene problemas de capacidad o seguridad. Hay áreas donde la tubería atraviesa zonas propensas a derrumbes o deslizamientos, pero el sistema cuenta con herramientas y equipos adecuados para operar y mantenerlo. Por otra parte, debido a la falta de información no se encontraron registros de caudal de diseño, tampoco hay registros de la velocidad del fluido en la tubería.

6.2.5 Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP)

El gobierno local de Pamplona posee dos instalaciones para el tratamiento de agua potable. La primera planta, Planta de Tratamiento de Agua Potable No.1 (PTAP Cariongo), obtiene agua de la Captación No.1 en la Quebrada Cariongo y de la Captación No.2 en la Quebrada El Rosal. Mientras tanto, la Planta de Tratamiento de Agua Potable No.2 (PTAP Monteadentro) obtiene agua de la Captación No.3 en la Quebrada El Mono y de la Captación No.4 en la Quebrada Potreritos.

6.2.5.1 Planta de Tratamiento de Agua Potable No.1 – Cariongo. La Planta de Tratamiento Cariongo (Esquema Figura 3) se encuentra ubicada en el Barrio Cariongo, al sur de la ciudad, en la zona conocida como Los Tanques, a una altitud de 2416 metros sobre el nivel del mar. Dispone de una vía principal que conecta el centro del municipio con el sur.

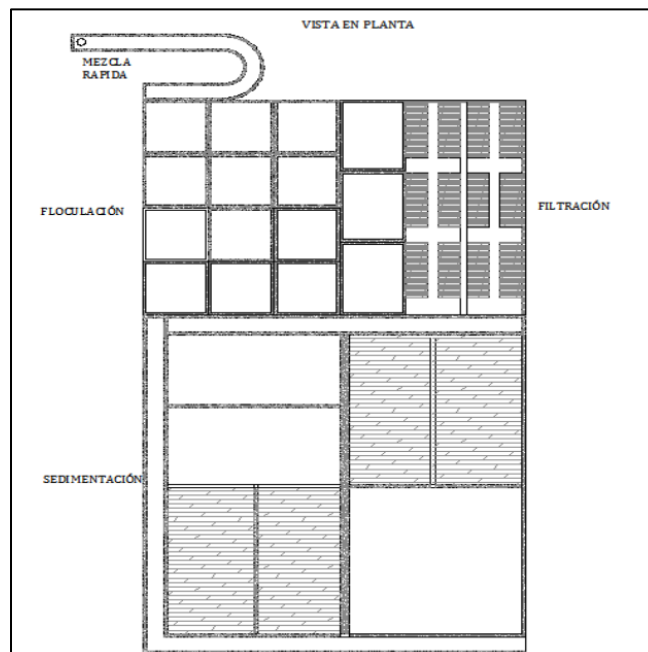
Inaugurada en 1945 la planta experimentó mejoras significativas en 1985. Se añadió una sección nueva para la floculación y se dividió la sedimentación existente en dos partes, además se implementó una sedimentación de alta tasa mediante placas paralelas para mejorar la clarificación del agua, lo que incrementó su capacidad de tratamiento a un promedio de 67 l/s a 70 l/s. El proceso de tratamiento utilizado es de tipo convencional con un sistema hidráulico de funcionamiento.

La capacidad de diseño de la Planta de Tratamiento de Agua Potable es de 200 l/s, lo que indica que está adecuadamente dimensionada para satisfacer la demanda prevista para el año 2038. Esta demanda se estima en un 68% del caudal máximo diario, equivalente a 128,14 l/s. Es importante tener en cuenta que la PTAP No.1 recibe contribuciones de las captaciones No.1 y No.2 (Valores tomados de DAG Ingeniería S.A.S., 2014).

Figura 14
Planta de Tratamiento de Agua Potable - Cariongo.



Figura 15
Esquema General de PTAP- Cariongo.



Nota. Figura obtenida de DAG Ingeniería S.A.S., 2014.

6.2.5.1.1 Mezcla Rápida – Dosificación. La dosificación del coagulante se efectúa mediante un dosificador volumétrico que emplea sulfato de aluminio y cal. Esta combinación se mezcla en la garganta de la canaleta Parshall. El dosificador funciona de manera aceptable, con un consumo mensual de 5 toneladas de sulfato de aluminio y 0.45 toneladas de cal.

Figura 16
Canaleta Tipo Parshall.



6.2.5.1.2 Floculación. El propósito del proceso de floculación es asegurar una adecuada unión y formación de flóculos en el tratamiento de potabilización del agua, llevándose a cabo justo después de la mezcla de productos químicos.

En la planta Cariongo, hay dos áreas dedicadas al proceso de floculación hidráulica, donde el flujo del agua se dirige verticalmente utilizando tabiques de concreto. Cada una de estas áreas está compuesta por varias cámaras floculadoras colocadas en secuencia, y cada cámara está equipada con una pantalla deflectora. La agitación del agua se controla ajustando la velocidad de entrada.

El primer floculador tiene 10 cámaras conectadas por un orificio rectangular, mientras que el segundo consta de 6 cámaras con una interconexión similar.

Figura 17
Floculador Tipo Alabama.



6.2.5.1.3 Sedimentación. El sistema de tratamiento incluye dos sedimentadores de forma rectangular, tipo: convencional y láminas de placas paralelas de asbesto-cemento, número de unidades: dos, forma: rectangular, material: concreto reforzado, inclinación de placas: 60°.

Figura 18
Sedimentador.



6.2.5.1.4 Filtración. La instalación dispone de dos sistemas de filtración que reciben el agua mediante una cámara de conexión conectada al sistema de sedimentación. Este proceso se lleva a cabo con una capa de material granular dispuesta en la parte inferior. Se trata de filtros de flujo descendente rápido con medios filtrantes de antracita, arena y grava, cada uno con un área efectiva de 29.48 m².

El agua dirigida a cada filtro pasa a través de un lecho compuesto de antracita y arena, que se sostiene sobre una capa de grava de diferentes tamaños. El fondo falso está construido con briquetas de asbesto-cemento que tienen orificios de medio pulgada. (Valores tomados de DPC).

Figura 19
Filtración.



6.2.5.1.5 Desinfección. La desinfección se realiza mediante la introducción de una solución de cloro en un tanque donde el agua previamente filtrada ingresa. El cloro, conocido por su poder como oxidante y germicida eficaz, es seguro y altamente eficiente si se utiliza correctamente. Elimina bacterias, hongos, virus y algas presentes, además de reducir los malos olores y sabores

al oxidar muchas sustancias. Además, su efecto residual garantiza la desinfección del agua desde la salida de la planta de tratamiento hasta el grifo del consumidor.

El sistema de desinfección existente es de post-cloración y emplea cilindros con una capacidad de 1000 kilogramos de cloro gaseoso. Se utiliza un clorador de marca HYDRO, de tipo manual, con una capacidad de dosificación de 100 lb/día. El cloro se aplica en solución de acuerdo con la dosis previamente establecida.

Una vez que el agua ha sido desinfectada en el tanque designado, se distribuye a través de tres redes principales: una tubería de hierro fundido de 12 pulgadas, una tubería de asbesto-cemento de 8 pulgadas y una tubería de polietileno de alta densidad de 16 pulgadas. Estas tuberías conducen el agua a tres zonas de distribución.

6.2.5.2 Planta de Tratamiento de Agua Potable No.2 – Monteadentro. Inaugurada en el año 2003, la planta comenzó a funcionar en julio de 2004. Su operación se basa en la energía hidráulica en todos los procesos unitarios. Este tipo de planta, denominada planta integral, alberga todos los procesos unitarios habituales de otras plantas convencionales en un espacio reducido. La estructura (Figura 20) está construida con concreto reforzado está ubicada en las coordenadas: N=7° 20' 93.73" W=72° 39' 43.76", es semi-convencional., opera continuamente durante todo el día. Cada dos días se efectúan análisis físico-químicos y bacteriológicos tanto del agua cruda como del agua tratada. Estos análisis incluyen mediciones de turbidez, color y pH.

La estructura está en condiciones óptimas, sin grietas ni fugas en las válvulas de compuerta ni en ninguna otra parte. Su caudal de diseño es de 80 l/s, lo que indica que está dimensionada adecuadamente para cubrir la demanda prevista hasta el año 2.038. Esta demanda proyectada representa el 32% del caudal máximo diario estimado en 60.30 l/s. Es importante tener en cuenta que la Planta de Tratamiento de Agua Potable No.2 recibe contribuciones de las captaciones No.3

y No.4, con un caudal promedio de entrada de 52 l/s y una salida de 50 l/s. (Valores tomados de IDSAAP-2014).

La instalación cuenta con tres trabajadores asignados en turnos para asegurar la cobertura de todas las horas del día. Estos empleados están debidamente capacitados y disponen de manuales de operación y mantenimiento. Además, se aplican rigurosas normas de higiene y seguridad industrial. En lo que respecta a los procesos, la planta realiza mezcla rápida, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y cloración.

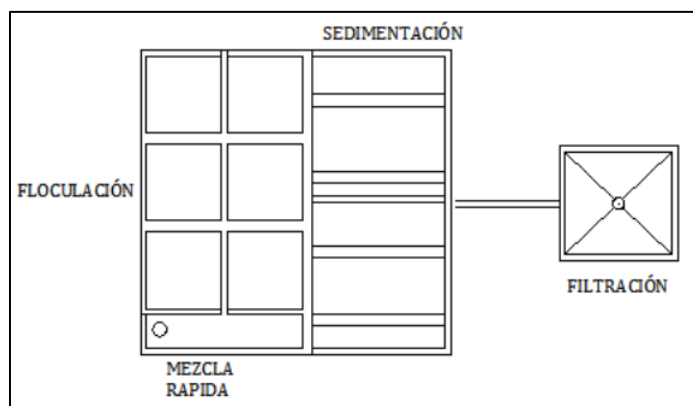
Figura 20

Planta de Tratamiento de Agua Potable - Monteadentro.



Figura 21

Esquema general PTAP - Monteadentro.



Nota. Figura obtenida de IDSAAP – 2014.

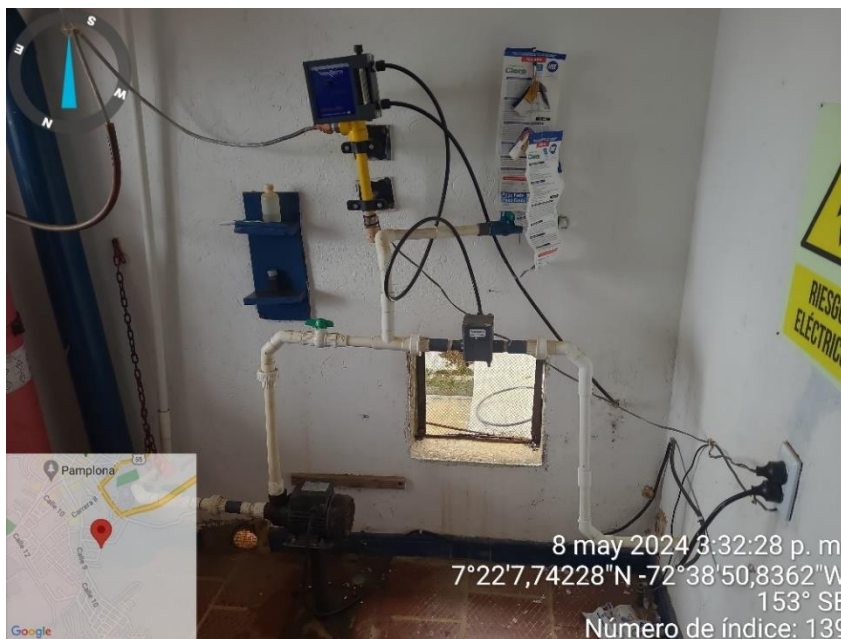
6.2.5.2.1 Mezcla Rápida. La caída del vertedero produce un efecto hidráulico que se aprovecha para mezclar el coagulante con el agua. Se emplea Polihidroxicloruro de Aluminio (PAC- QA 20S) y la cantidad del químico se ajusta según los resultados de las pruebas de jarras, así como la medición del color y del caudal entrante. El objetivo es provocar la desestabilización y aglutinación de los sólidos suspendidos en el agua. Hay un sensor que calcula constantemente el caudal que llega a la planta al cual se le toma el registro.

En la figura 9 se aprecia la situación presente del vertedero y el dosificador.

Figura 22
Dosificador y Vertedero.



Figura 23
Cloración.



6.2.5.2.2 Floculación. La etapa de floculación consta de seis compartimentos tipo Alabama diseñados para mezclar lentamente el agua y los productos químicos. Esta configuración permite la formación controlada de flóculos, los cuales capturan el color, la turbiedad y gran parte de los virus y bacterias patógenas que causan enfermedades. Cada uno de los seis compartimentos tiene múltiples orificios estratégicamente ubicados para garantizar un flujo de agua a una velocidad adecuada que asegure una mezcla óptima.

El tiempo de retención en cada compartimento oscila entre 2,5 y 3 minutos, con un tiempo de retención promedio de 18 minutos, estos compartimientos están contruidos en concreto.

Figura 24
Floculador Tipo Alabama.



6.2.5.2.3 Sedimentación. Se dispone de dos unidades, cada una con una capacidad de tratamiento de 40 litros por segundo. Estas estructuras posibilitan la separación eficiente de los lodos generados en el proceso de floculación. La cámara receptora del agua floculada divide el flujo en dos corrientes, que luego ingresan a la zona de sedimentación. Esta área está compuesta por láminas onduladas inclinadas a un ángulo de 60° y está equipada con tolvas para la recolección de lodos. Cada tolva está equipada con válvulas tipo compuerta de 6 pulgadas para una limpieza rápida de los lodos decantados: se abre la válvula de control de cada tolva durante dos minutos para purgar los lodos.

Figura 25
Sedimentador.



6.2.5.2.4 Filtración. Después de pasar por el proceso de sedimentación, el agua clarificada es transportada a través de tuberías al sistema de filtración, el cual consta de cuatro unidades diseñadas para operar a un caudal de 20 litros por segundo, con ciclos de operación que varían entre 19 y 24 horas.

Estos filtros, contruidos en concreto reforzado y de sección cuadrada, están compuestos por capas de materiales filtrantes: 45 cm de antracita, 25 cm de arena sobre un lecho de grava de soporte dispuesto en cinco capas. El falso fondo está constituido por colectores y difusores en PVC, los cuales recolectan el agua filtrada y la dirigen hacia el tanque de agua filtrada. Cada filtro cuenta con su propio tanque de almacenamiento, los filtros operan con una tasa de filtración promedio de 240-300 m³/m²-día.

Figura 26
Filtro.



6.2.5.2.5 Desinfección. El agua tratada sale de los tanques de almacenamiento y es dirigida hacia pequeños tanques de concreto, donde se introduce una solución de cloro para desinfectarla. Se utiliza cloro gaseoso mediante un clorador Hydro, con una capacidad de hasta 50 lb/día. El cloro gaseoso se suministra a la planta en cilindros de 68 kilogramos, y la dosificación promedio es de 10 lb/día.

Una vez desinfectada, el agua pasa a una cámara de distribución desde donde se envía a la tubería principal. Cualquier excedente se dirige a la planta Cariongo a través de un rebosadero. La tubería principal es de PVC de 8 pulgadas, con una derivación de 2 pulgadas para abastecer el Barrio Cariongo. Más adelante, se bifurca en dos redes para llevar agua al tanque Picapiedra y al tanque La Trinidad.

6.2.6 Tanques de Almacenamiento

El servicio de abastecimiento de Pamplona cuenta con 13 tanques de almacenamiento de concreto reforzado, aunque algunos son de columnas y tapa en concreto reforzado y paredes en

mampostería, Los tanques se clasifican según su categoría: enterrados, semienterrados y superficiales.

Los tanques están provistos de válvulas de drenaje, rebosadero, ventilación, tapas y accesos directos; sin embargo, no están protegidos ni aislados para prevenir el acceso de personas o animales. Estas estructuras de almacenamiento se mantienen llenas en todo momento, pero podrían experimentar rebosamientos. Se lleva a cabo el lavado y la desinfección de los tanques cada seis meses, aunque no se registra regularmente el nivel de llenado. Además, las válvulas de entrada y salida se cierran cada seis meses. Afortunadamente, no se han registrado problemas de capacidad, funcionamiento, estabilidad u operación en ninguno de los tanques.

Tabla 7

Descripción de Tanques de Almacenamiento.

TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE AGUA - PAMPLONA					
TANQUE No.	NOMBRE	PTAP - ABASTECIMIENTO	DIMENSIONES EXTERIORES (M)	VOLUMEN (M ³)	ESTADO
1	Cariongo	Monte dentro	4 x 4 x 2	32	Bueno
2	Tanque – Planta 1	Cariongo	15 x 10 x 4	600	Bueno
3	Tanque – Planta 2	Cariongo	15 x 10 x 4	600	Bueno
4	Trinidad	Monte dentro	15 x 10 x 4	600	Bueno
5	Progreso – 1	Monte dentro	3 x 4 x 2,3 *	10	Bueno
6	Progreso – 2	Monte dentro	4,5 x 4,5 x 2,2*	28	Bueno
7	Provincial	Cariongo	10 x 10 x 4	400	Bueno
8	Jurado 1	Monte dentro	2,8 x 2,6 x 2,6*	8	Bueno
9	Jurado 2	Monte dentro	3,8 x 4,5 x, 2,6*	28	Muy Bueno
10	Santa Marta	Cariongo	7,6 x 7,6 x 4	400	Bueno
11	Villa Cristina	Monte dentro	5,3 x 5,4 x 2*	30	Bueno
12	Animes	Monte dentro	7,4 x 7,4 x 3,7	200	Bueno
13	Picapiedra	Monte dentro	15 x 10 x 4	600	Bueno

Nota. Información obtenida de documento DAG Ingeniería S.A.S., 2014.

* Datos complementados obtenidos de mediciones en campo.

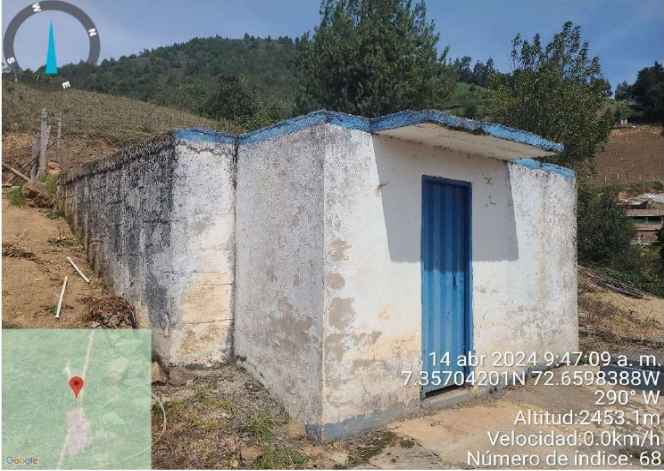
Debido a la falta de información en general sobre estas estructuras se realizaron visitas a los diferentes tanques de almacenamiento que conforman el Sistema de Acueducto para poder tomar datos de las características más importantes para posteriormente documentarlas en las fichas de catastro, de tal forma que, se realizaron 13 fichas las cuales se encuentran en el apéndice D llamado Fichas Elementos Red de Distribución.

En la Figura 27 se observa un ejemplo de ficha de levantamiento de Elementos de Red de distribución del Acueducto de Pamplona correspondiente al elemento de tanque de almacenamiento El Cariongo (véase Apéndice D), en esta se pueden evidenciar los diferentes encabezados anteriormente mencionados en los cuales, de acuerdo con los datos obtenidos en campo, se hizo el debido registro para poder tener claridad de los mismos, además, se hicieron las debidas observaciones de acuerdo a nuestro criterio además de los diferentes comentarios que nos proporcionó el fontanero encargado, persona encargada del continuo mantenimiento de estos elementos.

A su vez, se realizó una fotografía de los elementos a los cuales se nos fue posible acceder en la cual se pueden destacar información importante tal como: la fecha de la toma de la fotografía, esto con el fin de poder tener presente el estado del elemento al momento de la misma, coordenadas del elemento, importante para ubicar el elemento en diferentes herramientas virtuales y altitud, con el fin de tener una idea de la altura del elemento con respecto al nivel del mar. Algunos elementos no presentan esta información en las fotografías debido a que no fueron hechas por nosotros sino obtenidas por parte del fontanero, esto debido a que no se nos fue posible acceder a estos.

Figura 27
Ejemplo de Ficha Levantamiento de Elementos Red de Distribución.



Levantamiento de Elementos Red de Distribución de Acueducto del Municipio de Pamplona, Norte de Santander								
Elemento			Dirección	Calle 15 A – El Cariongo	Fecha	14/04/2024	Hora	09:47 a. m.
Tanque El Cariongo	Nº	1						
 14 abr 2024 9:47:09 a. m. 7.35704201N 72.6598388W 290° W Altitud: 2453.1m Velocidad: 0.0km/h Número de índice: 68								
Dimensiones Exteriores			Volumen De Almacenamiento [m3]	Material	Coordenadas		Estado	Observaciones
Largo [m]	Ancho [m]	Altura [m]			Latitud	Longitud		
4.00	4.00	2.00	32.00	Concreto Reforzado	7°21'25.32" N	72°39'35.50" O	Bueno	Se encuentra semi enterrado, la tapa de acceso está sellada.

"Formando líderes para la construcción de un nuevo país en paz"
 Universidad de Pamplona | Pamplona - Norte de Santander - Colombia
 Tels: (+57) 315 3429 495 - 3160 2444 75
 www.unipamplona.edu.co

6.2.7 Red de Distribución

El sistema de distribución del Pamplona actualmente está conformado por un conjunto de elementos tales como: tuberías, válvulas de corte, hidrantes de piso y columna, reducciones, cámaras de quiebre, válvulas reguladoras de presión, ventosas, purgas, galápagos y tapones, las tuberías presentes en la red van desde diámetros de 1/2" a diámetros de 16", actualmente no es necesario el racionamiento de agua y cuando hay mantenimiento necesario del sistema se presentan suspensión, la red no presenta daño en tuberías o accesorio y hay zonas sin la presencia del servicio de agua.

En el sistema se realizan continuamente actividades de operación y mantenimiento precautorio, el aprovisionamiento de los materiales necesarios es adecuado y las reparaciones de los daños del sistema se realizan inmediatamente, no se efectúan labores de desinfección de las tuberías del sistema de distribución, no se llevan a cabo análisis de presiones, ni se mencionan problemas relacionados con la continuidad del suministro, la presión del agua, la cantidad de agua, las pérdidas, o problemas institucionales. El sistema cuenta con dos macro medidores previos al tratamiento y uno posterior al tratamiento.

6.2.8 Estaciones de Bombeo

En la red de distribución del Sistema de Acueducto del municipio de Pamplona se cuentan con estaciones de bombeo, esto debido a que anteriormente se realizaba bombeo a diferentes tanques de la red. El sistema cuenta con 07 estaciones de bombeo distribuidas por el casco urbano ubicadas a inicios de cambios relativamente bruscos de altura, tales como, Jurado, El Progreso, Santa Marta y Ánimes. Actualmente el sistema de bombeo no se encuentra en uso debido a que con la construcción de la segunda planta de tratamiento se pudo obtener una red de distribución con mayor energía la cual puede abastecer estas áreas. Las fichas de las estaciones de bombeo se encuentran en el apéndice D llamado Fichas Elementos Red de Distribución.

6.2.9 Cámaras de Quiebre

La red de distribución cuenta con diferentes cámaras de quiebre distribuidas por diferentes sectores del casco urbano del municipio de Pamplona, el sistema cuenta con 09 cámaras de quiebre contadas desde las plantas de tratamiento hasta la red de distribución, las cuales hacen la labor de reducir la energía con la que viene el flujo para reducir la presión del mismo y así evitar posibles estallamientos de las tuberías. Algunas o casi en su mayoría cuentan con partes antiguas según palabras del fontanero encargado de su mantenimiento lo cual provoca que las cámaras fallen de

manera casi frecuente, por consiguiente, se hacen cortes de flujo para poder evaluar los daños y realizar las reparaciones pertinentes. Las fichas de las cámaras de quiebre se encuentran en el apéndice D llamado Fichas Elementos Red de Distribución.

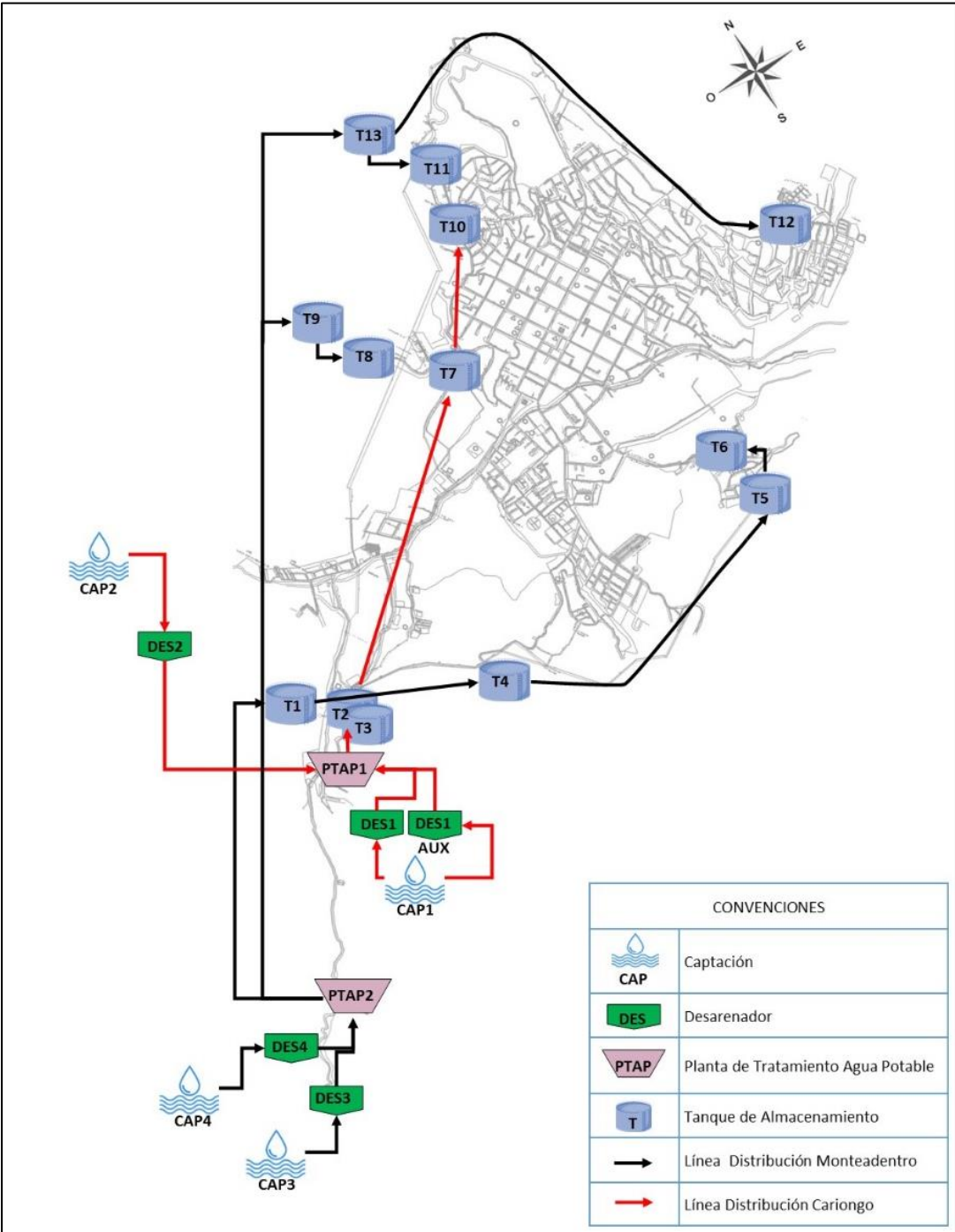
6.3 Análisis de Información y Recopilación de Información Faltante

Con la información anterior obtenida de distintas fuentes se evidenció una cierta discrepancia entre los documentos e inexistencia de datos importantes que no permitían visualizar completamente el esta actual del sistema, de acuerdo a lo anterior, se utilizaron los datos más relevantes de cada documento para poder crear un esquema básico del servicio de acueducto de Pamplona, dando como resultado la Figura 28 en la cual se puede apreciar la distribución de los elementos principales de la misma.

La imagen muestra el sistema de distribución de agua potable en Pamplona, donde se destacan cuatro captaciones principales: Cap1 a Cap4, que están conectadas a cuatro desarenadores: Des1 a Des4. Además, se incluye un desarenador auxiliar (aux) para complementar el sistema. El agua captada es procesada en dos plantas de tratamiento de agua potable: PTAP1 y PTAP2.

Una vez tratada, el agua se almacena en trece tanques de almacenamiento, identificados del T1 al T13, distribuidos a lo largo de la ciudad. El sistema cuenta con dos redes de distribución principales: la línea Monteadentro, marcada en negro, y la línea Cariongo, en rojo, que abastecen tanto áreas urbanas como rurales.

Figura 28
Esquema Básico del Sistema de Acueducto.



En la siguiente tabla se muestran las características más importantes de cada uno de los elementos que componen el Sistema de Acueducto Cariongo, en la cual se hace una breve descripción de capacidad estructural del elemento ya sea volumen o caudal, estructura en la cual

se describe el material o conjunto de componentes con el cual está fabricado o cuenta el elemento, dimensiones las cuales dan una idea de el volumen que ocupa, área que abarca o el diámetros de algún elemento y estado en el cual se reconoce la condición física del elemento.

Tabla 8

Descripción de Elementos del Sistema Cariongo.

SISTEMA CARIONGO					
ÍTEM	NOMBRE	CAPACIDAD	ESTRUCTURA	DIMENSIONES	ESTADO
CAP 1	Captación Cariongo	150 l/s*	Concreto Reforzado	3,25 m x 1,90 m*	Bueno
CAP 2	Captación El Rosal	150 l/s*	Concreto Reforzado	4,90 m x 3,10 m*	Bueno
ADC 1	Aducción 1	150 l/s*	Canal Concreto Reforzado	0,50 m x 0,42 m*	Regular
ADC 2	Aducción 2	150 l/s*	Tubería PVC	10’’ *	Regular
DES 1	Desarenador 1	68,77 l/s**	Concreto Reforzado	3,45 m x 13 m x 2,30 m*	Regular
DES 1	Desarenador 1 Aux	17,25 l/s**	Concreto Reforzado	2,5 m x 4,5 m x 2,30 m*	Regular
DES 2	Desarenador 2	72,96 l/s**	Concreto Reforzado	2,40 m x 19 m x 2,40 m*	Bueno
CND 1	Conducción 1	100 l/s*	Tubería AC	10’’ *	Regular
CND 2	Conducción 2	100 l/s*	Tubería AC	10’’ *	Bueno
PTAP 1	Planta De Tratamiento Cariongo	Caudal de entrada: 67 l/s - 70 l/s*	Componentes: Mezcla rápida, Floculador, Sedimentador, Filtro, Desinfección.	30,0 m x 33,0 m	Bueno
T2	Tanque Planta No.1	600 m ³	Concreto Reforzado	10,0 m x 15,0 m x 4 m	Bueno
T3	Tanque Planta No.2	600 m ³	Concreto Reforzado	10,0 m x 15,0 m x 4,0 m	Bueno
T7	Tanque El Provincial	400 m ³	Concreto Reforzado	8,00 m x 8,00 m x 6,50 m	Bueno
T10	Tanque Santa Marta	400 m ³	Concreto Reforzado	10,30 m x 10,50 m x 4,50 m	Regular

* Información suministrada por operarios EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P sin verificar

** Información calculada por autores basado en dimensiones, asumiendo tiempo de retención de 25 min

De la misma forma, la siguiente tabla muestra las características más importantes de cada uno de los elementos que componen el Sistema de Acueducto Monteadentro, en la cual se hace una breve descripción de capacidad estructural del elemento ya sea volumen o caudal, estructura

en la cual se describe el material o conjunto de componentes con el cual está fabricado o cuenta el elemento, dimensiones las cuales dan una idea de el volumen que ocupa, área que abarca o el diámetro de algún elemento y estado en el cual se reconoce la condición física del elemento.

Tabla 9

Descripción de Elementos del Sistema Monteadentro.

SISTEMA MONTEADENTRO					
ÍTEM	NOMBRE	CAPACIDAD	ESTRUCTURA	DIMENSIONES	ESTADO
CAP 3	Captación El Mono	60 l/s*	Concreto Reforzado	4,90 m x 3,10 m*	Bueno
CAP 4	Captación Potreritos	60 l/s*	Concreto Reforzado	6,57 m x 2,90 m*	Bueno
ADC 3	Aducción 3	60 l/s*	Canal Concreto Reforzado	0,50 m x 0,42 m*	Regular
ADC 4	Aducción 4	60 l/s*	Tubería AC / HF	8’’*	Regular
DES 3	Desarenador 3	39,25 l/s**	Concreto Reforzado	2,30 m x 12,80 m x 2,0 m*	Bueno
DES 4	Desarenador 4	51, 74 l/s**	Concreto Reforzado	3,30 m x 11,20 m x 2,10 m*	Bueno
CND 3	Conducción 3	60 l/s*	Tubería PVC	8’’ – 10’’*	Bueno
CND 4	Conducción 4	60 l/s*	Tubería PVC	8’’ – 10’’*	Regular
PTAP 2	Planta De Tratamiento Monteadentro	Caudal de entrada: 50 l/s - 52 l/s*	Componentes: Mezcla rápida, Floculador, Sedimentador, Filtro, Desinfección.	13,0 m x 12,0 m	Bueno
T1	Tanque Cariongo	32 m ³	Concreto Reforzado	4,00 m x 4,00 m x 2,00 m	Bueno
T4	Tanque Trinidad	600 m ³	Concreto Reforzado	15,60 m x 11,40 m x 4,25 m	Regular
T5	Tanque El Progreso 2	28 m ³	Concreto Reforzado	4,50 m x 4,55 m x 2,20 m	Bueno
T6	Tanque El Progreso 1	20 m ³	Concreto Reforzado	3 m x 4 m x 2,30 m	Bueno
T8	Tanque Jurado 1	8 m ³	Concreto Reforzado	2,80 m x 2,60 m x 2,60 m	Bueno
T9	Tanque Jurado 2	28 m ³	Concreto Reforzado	3,80m x 4,50 m x 2,60 m	Bueno
T12	Tanque Los Animes	200 m ³	Concreto Reforzado	8,00 m x 8,00 m x 4,20 m	Regular
T13	Tanque Villa Cristina	32 m ³	Concreto Reforzado	5,30 m x 5,40 m x 2,00 m	Bueno
T14	Tanque Picapiedra	600 m ³	Concreto Reforzado	15,50 m x 11,30 m x 3,80 m	Bueno

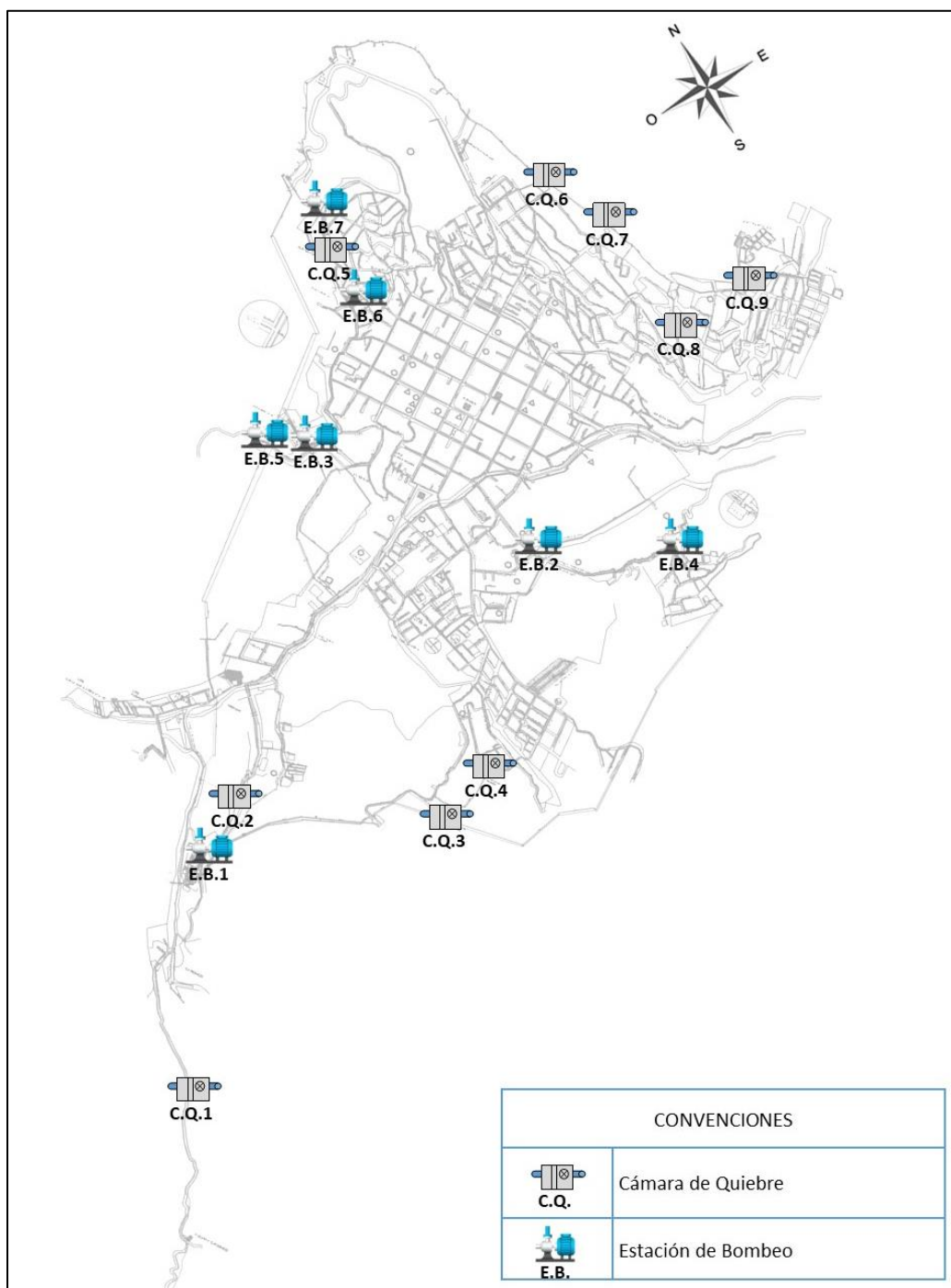
* Información suministrada por operarios EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P sin verificar

** Información calculada por autores basado en dimensiones, asumiendo tiempo de retención de 25 min

En la Figura 29 se ilustra la ubicación de las estaciones de bombeo y las cámaras de quiebre con las que cuenta el sistema de acueducto del municipio de Pamplona.

Figura 29.

Ubicación Estaciones de Bombeo y Cámaras de Quiebre



La Tabla 10 muestra un resumen de las características levantadas en campo de las cámaras de quiebre las cuales entre ellas se encuentran ubicación, diámetro de entrada, diámetro de salida, marca, dimensiones y estado. Es importante resaltar que en el encabezado de estado hay 3 opciones, Bueno, Regular y Malo, teniendo en cuenta que Bueno corresponde a un buen funcionamiento de la cámara de quiebre y que se encuentra en operación, el estado Regular indica que la cámara opera en condiciones precarias por la antigüedad de sus materiales y la dificultad en la adquisición y/o elaboración de los mismos, pero se encuentra en funcionamiento y Malo cuando no hay funcionamiento ni operación de la cámara de quiebre.

Tabla 10
Cámaras de Quiebre

CÁMARAS DE QUIEBRE						
ÍTEM	UBICACIÓN	DIAMETRO ENTRADA	DIAMETRO SALIDA	MARCA	DIMENSIONES	ESTADO
C.Q.1	Vía escuela Cariongo	8"	8"	Tanque - concreto	3m x 2m x 1,80 m	Regular
C.Q.2	Colegio La Normal de Varones	12"	12"	INDEL	3,15m x 1,50 m x 1,80 m	Regular
C.Q.3	Inmediaciones Barrio La Trinidad	2"	6"	INDEL	3,15m x 1,50 m x 1,80 m	Regular
C.Q.4	Inmediaciones Barrio La Trinidad, Parte Alta	6"	4"	INDEL	3,15m x 1,50 m x 1,80 m	Regular
C.Q.5	Carrera 6 Oeste, Santa Marta	4"	3"	INDEL	3,15m x 1,50 m x 1,80 m	Regular
C.Q.6	Juan XXIII Parte Alta, Periferias	6"	3"	INDEL	3,15m x 1,50 m x 1,80 m	Regular
C.Q.7	Juan XXIII Parte Alta, Periferias	4"	3"	INDEL	3,15m x 1,50 m x 1,80 m	Regular
C.Q.8	Carrera 11, Barrio Cristo Rey Parte Baja	4"	3"	INDEL	3,15m x 1,50 m x 1,80 m	Regular
C.Q.9	Carrera 13 - 6, Villa Cristina	4"	3"	INDEL	3,15m x 1,50 m x 1,80 m	Regular

En la siguiente tabla se presentan características principales de las estaciones de bombeo, estas características fueron rectificadas con visitas en campo, estas comprenden la capacidad de bombeo, la potencia de las tuberías, la marca, el número de bombas por estación y el estado de las mismas. Se aclara que hay 3 opciones de estados, Bueno, Regular y Malo, teniendo en cuenta que Bueno es si se encuentra en funcionamiento y puede que se encuentre o no en operación, el Regular es un estado en el cual la estación de bombeo se encuentra en condiciones de fallas de funcionamiento o condiciones de bajo mantenimiento y Malo en el cual se establece el no funcionamiento y la no operación de la estación de bombeo.

Tabla 11.
Estaciones de Bombeo

ESTACIONES DE BOMBEO						
ÍTEM	UBICACIÓN	CAPACIDAD DE BOMBEO (l/s)	POTENCIA (Hp)	MARCA	NÚMERO DE BOMBAS	ESTADO
E.B.1	Parque recreacional los Tanques	40	45	SIEMENS	3	Bueno
E.B.2	Calle 8, El Progreso parte baja, pasos abajo Escuela Demostrativa ISER	2,20	12	SIEMENS	1	Bueno
E.B.3	Carrera 1a, Jurado, Junto a la Vía	3,00	5,50	SIEMENS	1	Bueno
E.B.4	Calle 6a, El Progreso parte Media	2,20	12,00	SIEMENS	1	Bueno
E.B.5	Jurado parte alta	3,00	5,50	SIEMENS	1	Regular
E.B.6	Carrera 3 Oeste, Frente a la escuela Santa Marta	40,00	48,00	SIEMENS	3	Bueno
E.B.7	Inmediaciones barrio los Animes	25,00	18,00	SIEMENS	3	Bueno

6.3.1 Actualización Plano de Sistema de Acueducto de Pamplona

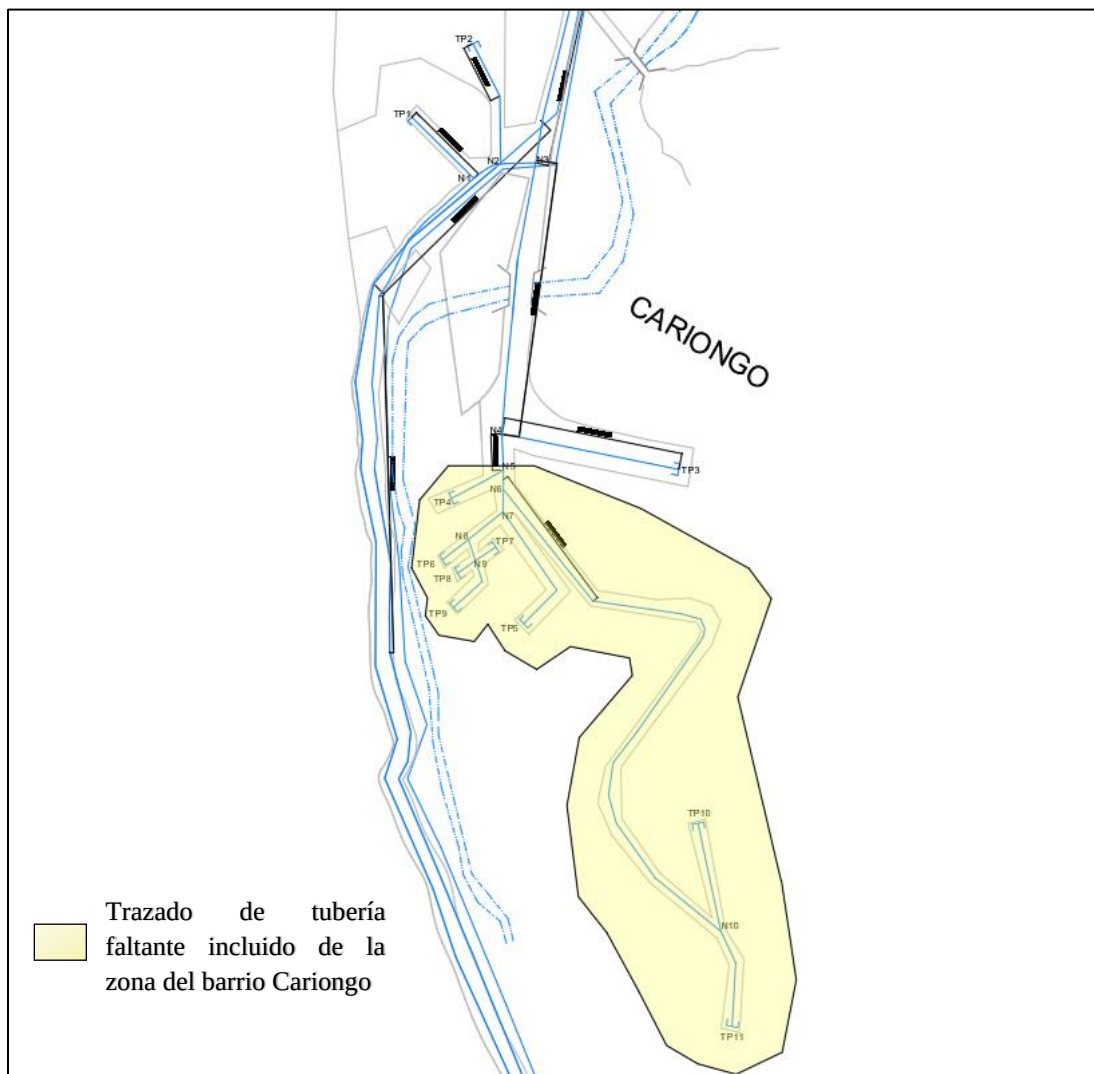
6.3.1.1 Trazado de Redes de Distribución Faltantes en Plano.

Con las distintas visitas realizadas a las plantas de tratamiento y en acompañamiento de personal experimentado del Sistema de Acueducto se pudieron evidenciar la falta de redes en dos sectores en específico, tales como: expansiones en las inmediaciones del barrio El Cariongo y una línea de distribución exprés que conecta la Planta de Tratamiento Monteadentro con la Planta de Tratamiento Cariongo, se pudo conocer de primera mano que esta última línea es antigua y es de 8” y de material PVC, gracias a esta información y a el acompañamiento del funcionario se realizó el trazado de la misma, con respecto al barrio El Cariongo, se realizó una visualización mediante la herramienta Google Earth con la cual se pudo hacer un trazado de la red que se expandió en el mismo.

Se puede observar el trazado realizado de la red de distribución en el sector El Cariongo, la cual se pudo conocer por experiencia del fontanero que es de 2” de diámetro, con la cual se puede concluir que se logró actualizar la red en esta parte. De la tubería llamada exprés por parte de los funcionarios se conoce que transporta excesos de producción de la Planta de Tratamiento Monteadentro, de la cual, se conocen que son caudales pequeños, además, la tubería de 8” no llega directamente a la planta, sino que llega a un compartimiento en la cual se puede redirigir hacia la mezcla rápida o hacia la desinfección, dependiendo del caso.

Figura 30

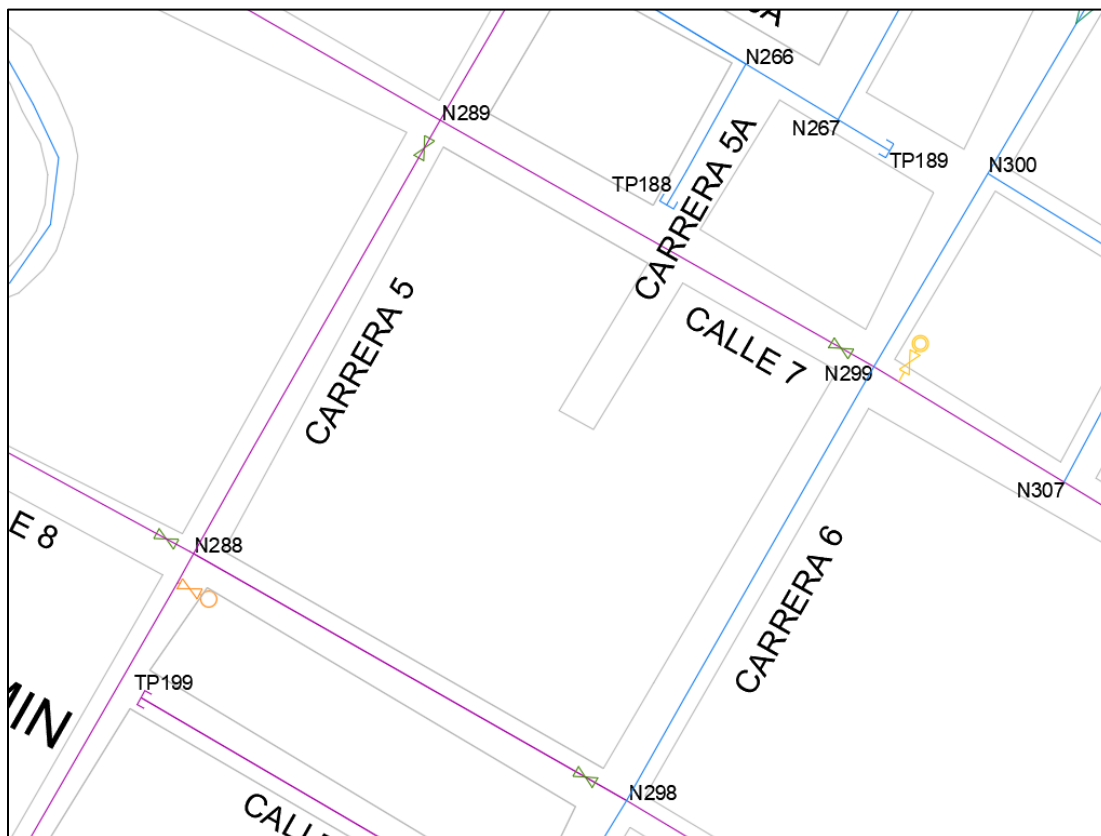
Trazado de Red de Distribución Barrio Cariongo.



6.3.1.2 Identificación de Nodos en Red de Distribución de Sistema de Acueducto.

Se está realizando una distribución del Sistema de Acueducto por medio de la ubicación de nodos en el mismo, esto con el fin de tener una mejor claridad sobre características del sistema, esta conlleva la medición de longitud de tubería entre nodos, tipo de tubería de acuerdo a su material y también el diámetro de la misma, además, se está registrando los accesorios que se pueden observar que hay en estos tramos. Con la realización de este ejercicio se puede obtener una mejor claridad en las cantidades o sencillamente en el catastro del Sistema de Acueducto.

Figura 31
Ubicación de Nodos y Categorización.



Con base del plano existente más actual del Sistema de Acueducto de Pamplona (Plano 2016) se realizó una actualización de los elementos que realmente pertenecen al sistema, así como una mejora de la acotación del mismo y una clasificación por capas de las tuberías del sistema dependiendo del tipo de material y/o diámetro (véanse Apéndice E y F), con esto se pudo obtener valores de longitudes por diámetro y por material que pueden ser visualizados en la Tabla 12, con esta información se realizaron análisis de gráficas en las cuales se pueden apreciar los porcentajes a los cuales corresponden esas longitudes con respecto al total del Sistema de Acueducto.

Tabla 12*Longitud de Tubería por Material y Diámetro.*

DIAMETRO	MATERIAL						MATERIAL					
	AC (m)	AP (m)	HF (m)	HG (m)	PVC (m)	SUBTOTAL	AC	AP	HF	HG	PVC	SUBTOTAL (%)
1/2"				56.7	217.32	274.02				0.05%	0.18%	0.23%
3/4"					460.94	460.94					0.39%	0.39%
1"				157.87	2263.88	2421.75				0.13%	1.92%	2.05%
1 1/2"					2404.03	2404.03					2.04%	2.04%
2"	47.2		52.1	523.55	36237.24	36860.09	0.04%		0.04%	0.44%	30.70%	31.22%
2 1/2"					1226.58	1226.58					1.04%	1.04%
3"	1960.43		5261.3	44.8	29034.92	36301.45	1.66%		4.46%	0.04%	24.59%	30.75%
4"	56.56		1484.61	302.12	4618.44	6461.73	0.05%		1.26%	0.26%	3.91%	5.47%
6"	795.96		1035.77	1038.51	8206.08	11076.32	0.67%		0.88%	0.88%	6.95%	9.38%
8"	2859.46		545.82		10434.31	13839.59	2.42%		0.46%		8.84%	11.72%
10"			853.49		1629.95	2483.44			0.72%		1.38%	2.10%
12"			2446.17			2446.17			2.07%			2.07%
16"		1798.98				1798.98		1.52%				1.52%
Total	5719.61	1798.98	11679.26	2123.55	96733.69	118055.09	4.84%	1.52%	9.89%	1.80%	81.94%	100.00%

Se pudo observar que gran parte de la tubería es de material PVC (Figura 32), esto debido a su accesibilidad y bajo costo, por ello, las tuberías antiguas, al momento de hacerles reparaciones se han estado cambiando a PVC, además, se puede observar diámetros no debidos en la red, tales como 1/2", 3/4", 1", 1 1/2", 2" y 2 1/2", diámetros que en total suman 36,9% del total de la red instalada y no concebidos para zonas secundarias o terciarias de Sistema de Acueducto según lo establecido en el artículo 63 del RAS, el cual indica que el diámetro mínimo en redes de distribución urbanas es de 75 mm (Figura 33).

Figura 32
Cantidad de Tubería por Material y Diámetro.

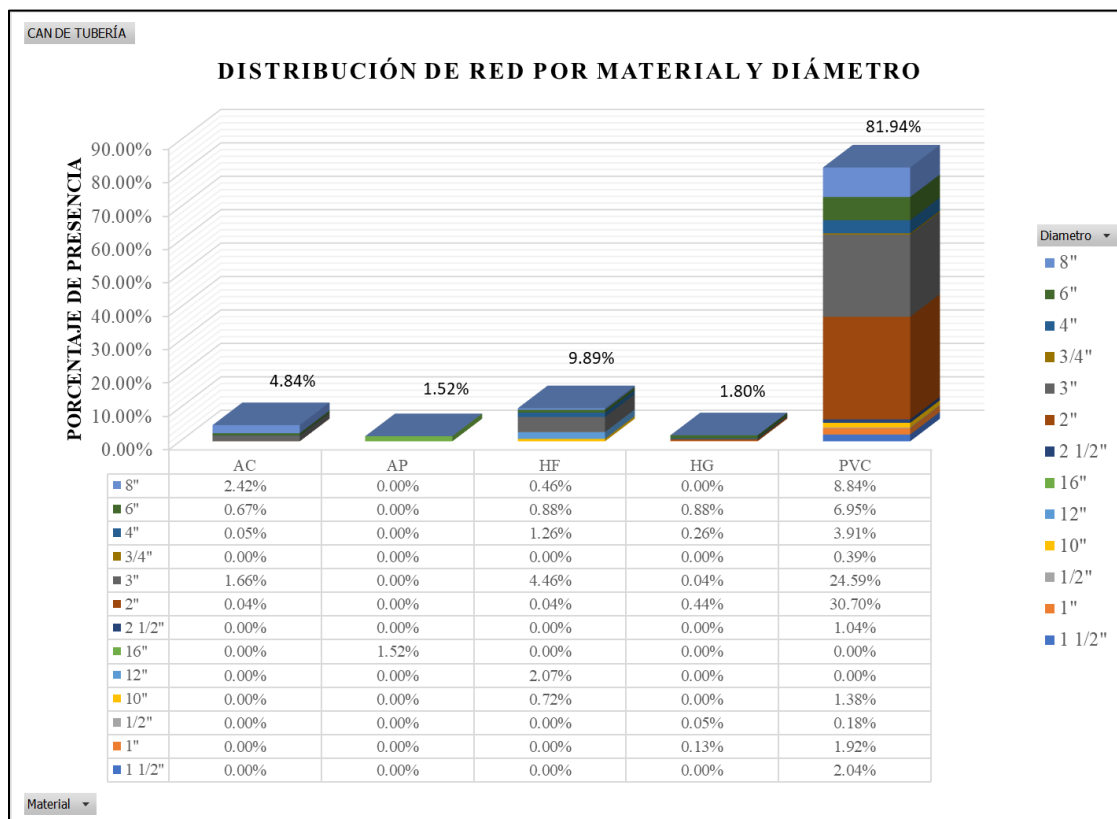
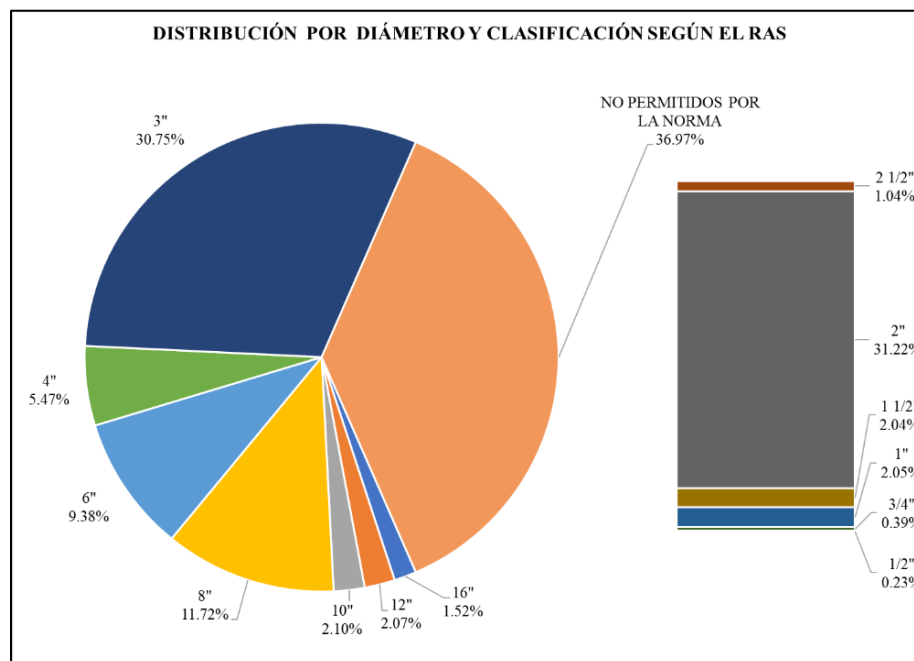


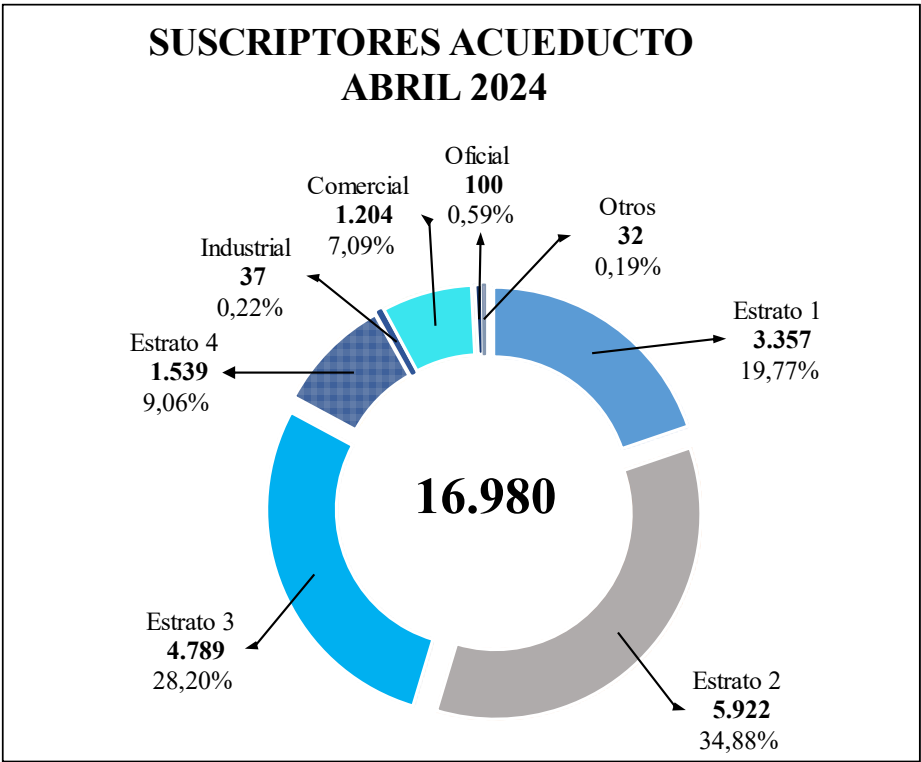
Figura 33
Tubería Admitida por el RAS.



6.4 Usuarios

El Sistema de Acueducto cuenta contaba con un total de 16.980 usuarios en el año 2024, estos usuarios estaban distribuidos de acuerdo a su estrato o al tipo de uso del suelo, de tal forma que se cuenta con una distribución de la siguiente manera: estrato 1: 3.357 usuarios para un total de 19,77%, estrato 2: 5.922 usuarios para un total de 34,88%, estrato 3: 4.789 usuarios para un total de 28,20%, estrato 4: 1.539 usuarios para un total del 9,06%, otros: 32 usuarios para un total de 0.19%, industrial: 37 usuarios para un total de 0.22%, comercial: 1.204 usuarios para un total del 7,09% y oficial: 10 para un total de 0,59%, con esto se tiene el total del 100% de los usuarios con vigencia al mes de abril del año 2024 como se puede observar en la siguiente figura. (SUI, 2024)

Figura 34
Distribución de Usuarios en el Sistema de Acueducto, Abril 2024.



6.5 Conclusión y Recomendación del Objetivo

La falta de claridad y registros precisos por parte de la empresa sobre algunas características de gran importancia como propiedades de elementos del sistema, la antigüedad de las tuberías y su ubicación exacta en las calles evidenció la necesidad de mejorar los sistemas de gestión de información. Actualmente, la empresa EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P tiene un sistema de catastro con el cual cumple parcialmente el Art 42 establecido en el RAS sobre el catastro de redes, además, no se dispone de una herramienta unificada y precisa para almacenar y gestionar los datos relevantes sobre las propiedades de los elementos que conforman el sistema de acueducto, lo que dificulta la planificación y ejecución eficiente de tareas de mantenimiento y supervisión.

A pesar de la ausencia de registros detallados sobre las características más importantes de algunos elementos primordiales del sistema de distribución, se logró realizar un catastro general de la red de acueducto. Este catastro incluyó la actualización de información sobre bocatomas, aducción, desarenadores, conducciones, plantas de tratamiento, red de distribución, tanques de almacenamiento, estaciones de bombeo y cámaras de quiebre. Las visitas a campo y la colaboración con fontaneros y funcionarios de EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P fueron cruciales para complementar y verificar los datos existentes, sin embargo, no fue posible obtener información directamente de las tuberías pues no se realizaron excavaciones, y debido a la complejidad del sistema, no se realizaron levantamientos cuadra a cuadra con gran detalle.

Para mejorar la precisión y eficiencia en la gestión de la red de acueducto, se recomienda recolectar la mayor cantidad de datos antiguos y nuevos e implementar un Sistema de Información Geográfica (GIS). Esta herramienta permitiría almacenar, gestionar y visualizar toda la información relevante de manera centralizada y georreferenciada. EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P

debería considerar la adopción de la metodología ofrecida por EPM tal como la especifica en su manual EPM E.S.P, 2010 para la georreferenciación de redes de acueducto y alcantarillado. La utilización de GIS facilitará no solo la actualización continua de los datos, sino también una mejor planificación de las tareas de mantenimiento y una mayor transparencia y accesibilidad de la información para los operarios y tomadores de decisiones. Además, sería beneficioso contar con operarios de mayor experiencia en el uso y manejo de tecnologías de georreferenciación para asegurar una implementación y gestión eficientes del sistema.

Nota Los datos expuesto en el capítulo titulado “Descripción del Sistema de Acueducto Urbano de Pamplona, Norte de Santander” se basa en información tomada del documento elaborado por DAG Ingeniería S.A.S., 2014 y no corresponde a cálculos propios, sino a los realizados por los autores de dicho documento.

7 Análisis de Consumos Y Estimación de Demandas

7.1 Proyección de Poblacional de Casco Urbano de Pamplona

Se trabajó en la elaboración detallada de la proyección de la población del área urbana del Municipio de Pamplona para poder obtener los valores de caudal para años proyectados. Este proceso requirió un análisis de datos históricos que abarcan varios años, con el objetivo de comprender la evolución del total poblacional en el sector urbano. Para llevar a cabo esta tarea con precisión, se realizó consultas en diferentes documentos del DANE donde se consignan los datos de los últimos censos, información vital para este estudio.

A continuación, se muestra un total de población del área urbana del Municipio de Pamplona desde el año 1985 a 2018.

Tabla 13

Población Histórica del Casco Urbano de Pamplona.

Año	Población
1985	35.058
1993	37.829
2005	48.575
2018	41.680

Nota. Obtenido del Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

Como se puede observar, hubo un decremento notorio en la población de Pamplona según el Censo Nacional de Población y Vivienda del 2018, las causas de este posible suceso son inciertas, pero se pudieron presentar debido a la migración de habitantes del sector a las grandes ciudades, o por bajo crecimiento vegetativo, es decir, pocos nacimientos y mayores defunciones. (Editorial La República S.A.S, 2019)

Se realizaron 2 casos para las proyecciones (véase Apéndice G), el primer caso en el cual se omite el valor del Censo Nacional de Población y Vivienda del 2018 y se trabajan con los

censos anteriores, es decir, con los valores del 1985, 1993, y 2005 para que el valor no afecte la rata de crecimiento y con ello obtener valores más acertados para la fecha de proyección.

Para realizar proyecciones precisas de la población del área urbana del Municipio de Pamplona, se exploraron diversas tasas de crecimiento a través de los métodos aritmético, geométrico, exponencial y Wappus. El método aritmético calcula un crecimiento constante en términos absolutos, el geométrico considera un crecimiento proporcional, el exponencial se basa en un crecimiento acelerado y el método Wappus incorpora variables adicionales para ajustar la proyección.

Tabla 14

Cálculo de la Tasa de Crecimiento de los Diferentes Métodos – Caso 1

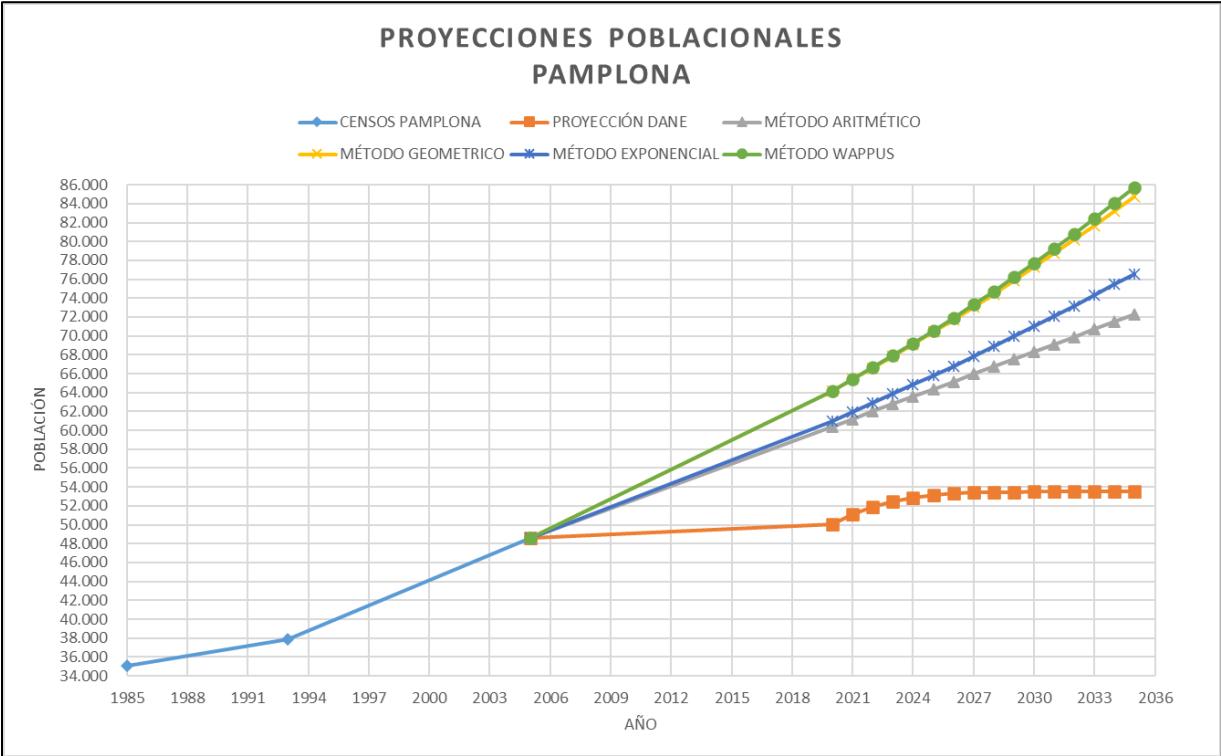
Año	Población	TASAS DE CRECIMIENTO			
		K Método Aritmético	r Método Geométrico	K Método Exponencial	i Método Wappus
1985	35.058	679,05	0,01644	0,00951	1,6200
1993	37.829	900,83	0,02105	0,02084	2,0700
2005	48.575				
PROMEDIO		789,94	0,018745	0,015175	1,8450

Al analizar estas diferentes tasas de crecimiento, se puede observar cómo cada método influye en las proyecciones poblacionales a lo largo del tiempo. Cada técnica de proyección tiene sus propias características y supuestos que afectan significativamente los resultados obtenidos. Utilizando datos históricos, se generaron proyecciones que varían en términos de magnitud y tendencia, lo que pone de manifiesto la sensibilidad de las estimaciones a las variaciones en los parámetros utilizados. Por ejemplo, mientras que algunos métodos pueden sugerir un crecimiento sostenido y acelerado, otros pueden prever una desaceleración o incluso una posible estabilización de la población.

Tabla 15
 Proyecciones Poblacionales Comparativa de Distintos Métodos – Caso 1.

PROYECCIONES POBLACIONALES						
Año Proyectado	Proyección del DANE	Método Aritmético	Método Geométrico	Método Exponencial	Método Wappus	Promedio
2005	48.639	48.575	48.575	48.575	48.575	48,588
2020	50.086	60.424	64.179	60.991	64.177	59,972
2021	51.128	61.214	65.382	61.924	65.397	61,009
2022	51.909	62.004	66.608	62.871	66.644	62,007
2023	52.472	62.794	67.857	63.832	67.919	62,975
2024	52.877	63.584	69.128	64.808	69.222	63,924
2025	53.141	64.374	70.424	65.799	70.554	64,859
2026	53.291	65.164	71.744	66.805	71.917	65,784
2027	53.385	65.954	73.089	67.827	73.312	66,713
2028	53.436	66.744	74.459	68.864	74.739	67,648
2029	53.457	67.534	75.855	69.917	76.200	68,593
2030	53.486	68.324	77.277	70.986	77.696	69,554
2031	53.505	69.113	78.726	72.072	79.229	70,529
2032	53.539	69.903	80.201	73.174	80.799	71,523
2033	53.561	70.693	81.705	74.292	82.408	72,532
2034	53.539	71.483	83.236	75.428	84.058	73,549
2035	53.558	72.273	84.796	76.582	85.749	74,592

Figura 35
 Comparativa entre Métodos de Proyección – Caso 1.



Se realizaron las proyecciones de poblaciones de acuerdo a los 4 métodos anteriormente nombrados y se evaluó el promedio de estas con el fin de tener un valor medio debido a la diferencia entre estos, esta metodología se trabajará también en el caso 2. Al representar gráficamente las proyecciones obtenidas a través de cada método, se puede visualizar claramente cómo difieren en sus predicciones a lo largo del tiempo. Esta comparación en la gráfica brinda una visión integral de las posibles evoluciones futuras de la población urbana de Pamplona.

Como caso 2 se realizó la proyección teniendo en cuenta el valor del Censo Nacional de Población y Vivienda para el año 2018, valor que puede variar el comportamiento de las proyecciones debido a su tendencia negativa, pero al ser un valor real nos puede ayudar a tener un panorama más acertado de las proyecciones para los años requeridos.

Tabla 16
Cálculo de Tasas de Crecimiento por Diferentes Métodos - Caso 2.

		TASAS DE CRECIMIENTO			
Año	Población	K Método Aritmético	r Método Geométrico	K Método Exponencial	i Método Wappus
1985	35,058	629.3	0.00526	0.00951	0.5200
1993	37,829	719.84	0.00389	0.02084	0.3900
2005	48,575	557.69	-0.01171	-0.01178	-1.1800
2018	41,680				
PROMEDIO		635.61	-0.00085333	0.00619	-0.0900

Al realizar un análisis de los resultados obtenidos para las tasas de crecimiento en el caso 2, se pudo observar que algunas de estas tasas arrojaron resultados negativos. Este fenómeno se debe a la inclusión del valor del Censo para el año 2018, lo cual introduce una base de datos que puede no ser representativa de las tendencias actuales. La utilización de datos censales puede alterar significativamente las proyecciones futuras, ya que las condiciones demográficas y socioeconómicas pueden haber cambiado desde entonces.

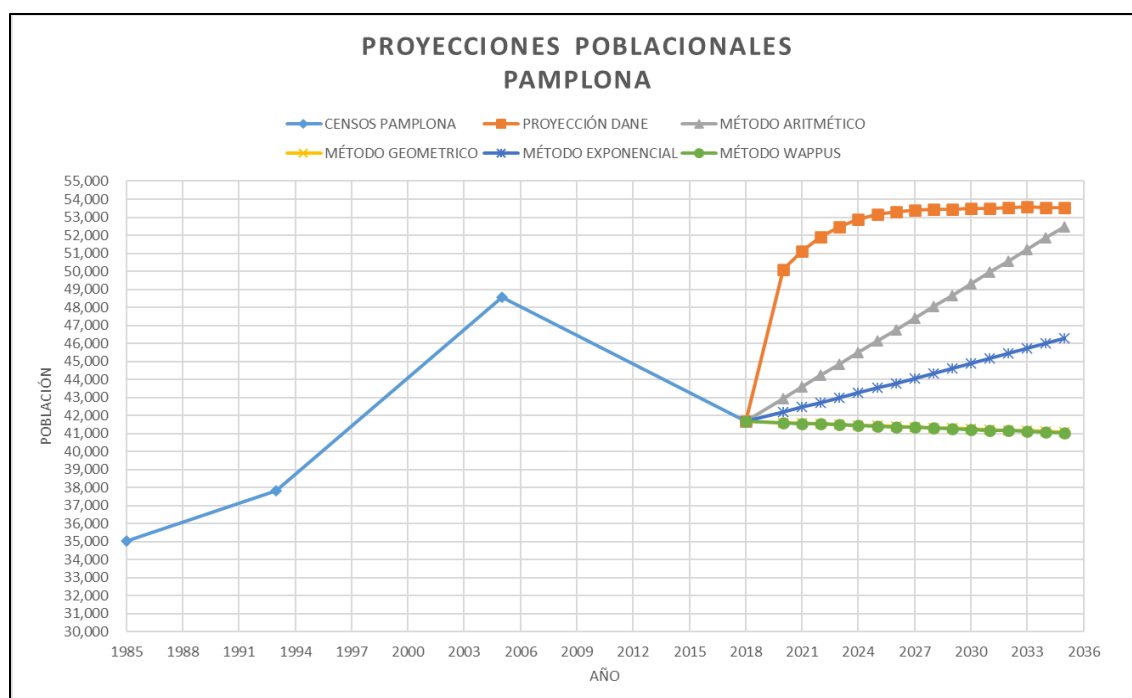
Tabla 17

Proyecciones Poblacionales Comparativa de Distintos Métodos - Caso 2.

PROYECCIONES POBLACIONALES						
Año Proyectado	Proyección del DANE	Método Aritmético	Método Geométrico	Método Exponencial	Método Wappus	Promedio
2018	41,680	41,680	41,680	41,680	41,680	41,680
2020	50,086	42,951	41,609	42,199	41,605	43,690
2021	51,128	43,587	41,573	42,461	41,568	44,063
2022	51,909	44,222	41,538	42,725	41,530	44,385
2023	52,472	44,858	41,502	42,990	41,493	44,663
2024	52,877	45,494	41,467	43,257	41,456	44,910
2025	53,141	46,129	41,432	43,526	41,418	45,129
2026	53,291	46,765	41,396	43,796	41,381	45,326
2027	53,385	47,400	41,361	44,068	41,344	45,512
2028	53,436	48,036	41,326	44,342	41,307	45,689
2029	53,457	48,672	41,290	44,617	41,269	45,861
2030	53,486	49,307	41,255	44,894	41,232	46,035
2031	53,505	49,943	41,220	45,173	41,195	46,207
2032	53,539	50,579	41,185	45,453	41,158	46,383
2033	53,561	51,214	41,150	45,735	41,121	46,556
2034	53,539	51,850	41,115	46,019	41,084	46,721
2035	53,558	52,485	41,079	46,305	41,047	46,895

Figura 36

Comparativa entre Métodos de Proyección – Caso 2.



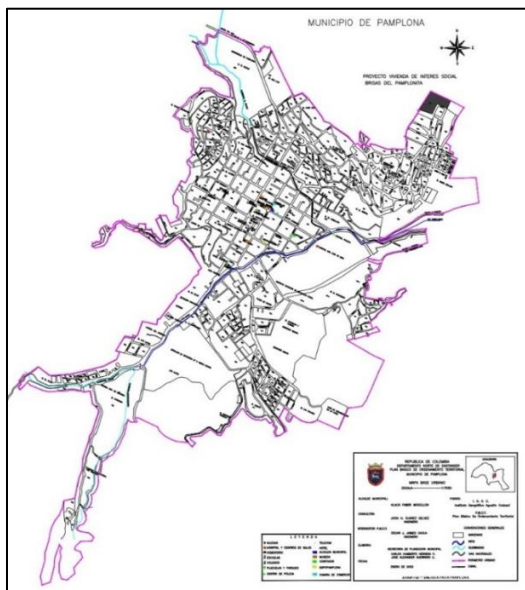
Como se puede observar al diferenciar los dos casos de proyecciones se pueden ver valores completamente distintos, esto debido principalmente por el uso del valor del censo correspondiente al año 2018, ya que, en el caso 2, al tener esta tendencia negativa en la cantidad de población se ve reflejada en las tasas de crecimiento y por ende en las proyecciones siendo estas más visibles en la población proyectada a años futuros, por ejemplo, al analizar la población del año 2035 para el caso 1 tenemos una población promedio de 74,592 Hab a diferencia del caso 2 que para el año 2035 obtenemos una población promedio de 46,895 Hab.

7.2 Área Existente Urbana

Se realizó una búsqueda de información en diferentes sitios web y elementos digitales con el fin de obtener el valor más preciso y actualizado de área urbana del Municipio de Pamplona de la cual se pudo encontrar que se cuenta con 5,898 Km² o 589,88 ha de área de extensión urbana, y un perímetro de 24,31 Km, datos obtenidos de información de plano perimetral.

Figura 37

Plano Perimetral del Área Urbana de Pamplona.



Nota. Obtenido y modificado a partir del plano perimetral del municipio de Pamplona

7.3 Identificación de Áreas por Tipo de Uso

Es necesario sectorizar las áreas más representativas de acuerdo al tipo de ocupación (véanse Apéndice H y I), para de esta manera hacer el cálculo de los caudales que estas generan y, de igual forma, realizar el cálculo del caudal medio diario.

Tabla 18

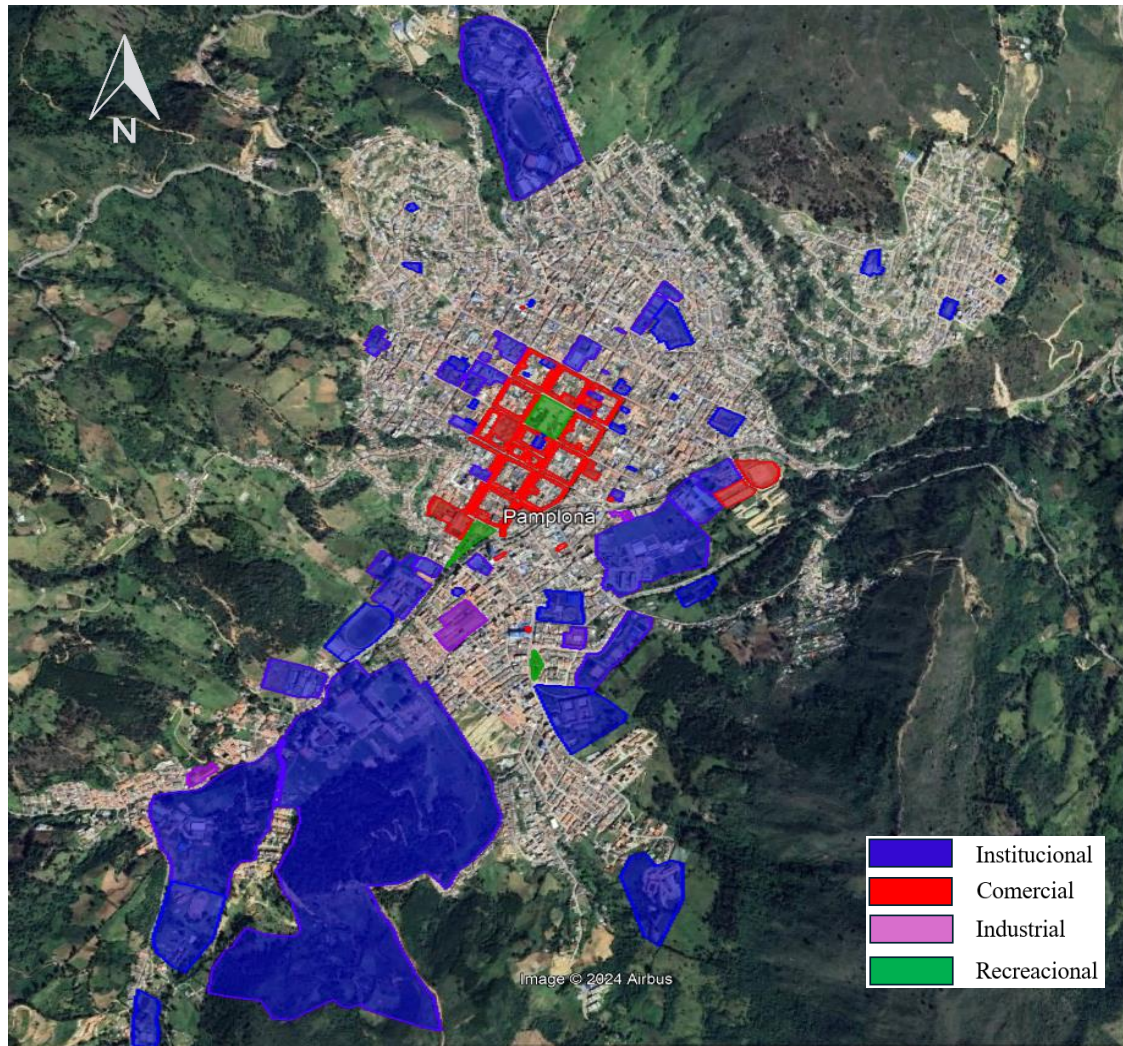
Uso del Suelo del Casco Urbano, Pamplona.

TIPO DE USO DEL SUELO	ÁREA TOTAL (ha)	OCUPACIÓN
Residencial	456,91	Casas o edificaciones que son utilizadas para fines residenciales.
Institucional	121,27	Universidad de Pamplona y sus sedes, colegios, alcaldía, SENA, ISER, Corponor, batallón, policía, hospital, iglesias, entre otros.
Comercial	9,7	Hoteles, plaza de mercado, terminal de transporte, bancos y zonas de comercio, entre otros.
Industrial	2	Bavaria, Hipinto, La Molinera, Salsamentaria Alemana LTDA, Distribuidora y Fabricaciones Peñaloza.

Como se puede apreciar, las áreas delimitadas mediante la creación de polígonos en la herramienta Google Earth están compuestas en su mayoría por zonas residenciales, así como por algunas áreas institucionales, comerciales e industriales. Además, se identifican zonas recreativas.

A continuación, se presenta la organización por polígonos de las zonas institucionales, comerciales y recreacionales, del cual, este último no se tiene en cuenta para el cálculo del caudal.

Figura 38
Polígonos según el uso del suelo en el casco urbano de Pamplona.



7.4 Cálculo de Caudales Residenciales de Años Proyectados.

Con la población proyectada para cada caso estudiado se realizó un cálculo del caudal residencial para poder obtener un punto de comparativa entre los dos casos de escenarios al ser comparados con los datos de producción de las plantas Cariongo y Monteadentro, valores reales de producción registrados para los primeros 5 mes del presente año.

Tabla 19
Caudales para Caso 1.

CAUDALES			
D bruta	Periodo Proyectado	Promedio	Qres
(l/s)	(Año)	(Hab)	(l/s)
160	2005	48.588	89,98
	2020	59.972	111,06
%p	2021	61.009	112,98
25	2022	62.007	114,83
	2023	62.975	116,62
	2024	63.924	118,38
	2025	64.859	120,11
	2026	65.784	121,82
	2027	66.713	123,54
	2028	67.648	125,27
	2029	68.593	127,02
	2030	69.554	128,80
	2031	70.529	130,61
	2032	71.523	132,45
	2033	72.532	134,32
	2034	73.549	136,20
	2035	74.592	138,13

Cabe aclarar que para el cálculo de los caudales anteriormente mencionados en la tabla se utilizó una dotación neta de 120 litros por segundo (L/s), un valor previamente establecido para la zona de estudio en el Artículo 43 del Reglamento de Agua y Saneamiento (RAS). Además, se consideró un porcentaje de pérdidas del 25%, el cual representa el valor máximo permitido según las normas del RAS.

Tabla 20
Caudales para Caso 2.

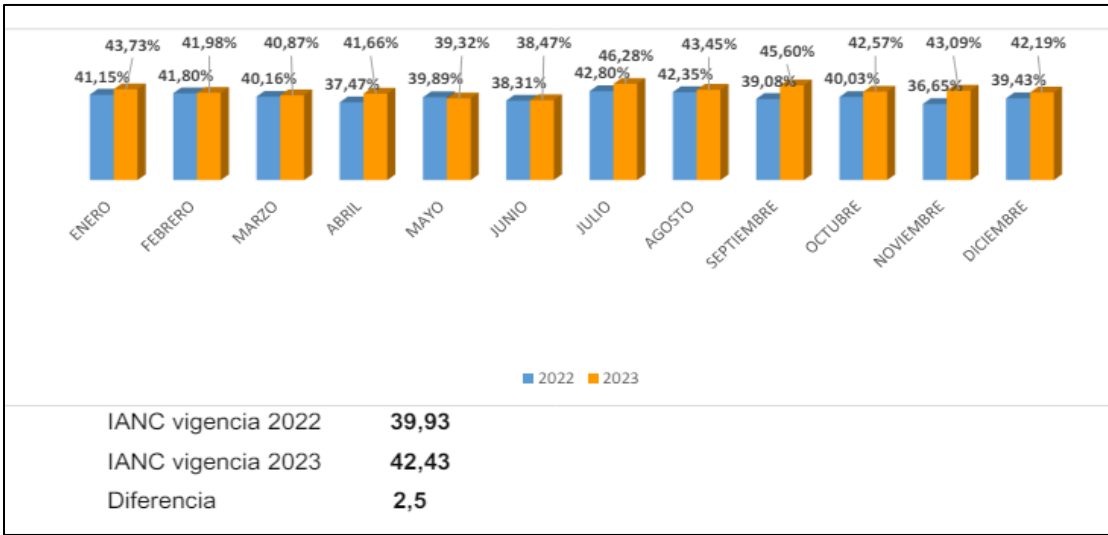
CAUDALES			
D bruta	Periodo Proyectado	Promedio	Qres
(l/s)	(Año)	(Hab)	(l/s)
160	2005	41.680	77,19
	2020	43.690	80,91
%p	2021	44.063	81,60
25	2022	44.385	82,19
	2023	44.663	82,71
	2024	44.910	83,17
	2025	45.129	83,57
	2026	45.326	83,94
	2027	45.512	84,28
	2028	45.689	84,61
	2029	45.861	84,93
	2030	46.035	85,25
	2031	46.207	85,57
	2032	46.383	85,89
	2033	46.556	86,22
	2034	46.721	86,52
	2035	46.895	86,84

De igual forma, para el cálculo de los caudales se empleó una dotación neta de 120 litros por segundo (L/s). Además, se consideró un porcentaje de pérdidas (%p) del 25%.

Como se puede observar, el caudal residencial presenta una gran variación entre los dos casos de estudio, para el caso 1 contamos con un caudal residencial de 118,38 (l/s) y en el caso 2 contamos con un caudal residencial de 83,17 (l/s), al verificar estos valores con los caudales reales suministrados de cada planta como se explica más adelante en la Tabla 23, se encontró que el caudal total proveniente de las dos plantas es de 132,40 (l/s), valor que es mayor al caudal teórico calculado en los dos casos, por ende, se realiza un escenario donde se tienen en cuenta las pérdidas en el sistema que reportó la empresa EMPOPAMPLONA para el año 2023.

El porcentaje de pérdidas (%p) fue obtenido del informe de gestión anual del año 2023 de la empresa de servicios públicos EMPOPAMPLONA, en el cual se hace mención al índice de agua no contabilizada (IANC), en este se hace una comparativa entre el año 2022 y el 2023 del cual se tiene la siguiente información.

Figura 39
Índice De Agua No Contabilizada (IANC) Vigencias 2022 vs 2023



Nota. Obtenido del informe de gestión del año 2023 de la empresa EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P.

De acuerdo a los datos anteriores, al evaluar los datos de todos los meses de los años 2022 y 2023 y realizar una promediación de los mismos se obtuvo un valor promedio de IANC para el año 2022 de 39,93 y para el año 2023 de 42,43, obteniendo así una diferencia de 2,5 teniendo en cuenta esto se puede deducir que el IANC para el año 2024 tienda a aumentar con respecto al año 2023.

Tabla 21

Caudales Caso 1 con Porcentaje de Pérdidas del Sistema para el Año 2023.

CAUDALES			
D bruta	Periodo Proyectado	Promedio	Qres
(l/s)	(Año)	(Hab)	(l/s)
208,44	2005	48.588	117,22
	2020	59.972	144,68
%p	2021	61.009	147,19
42,43	2022	62.007	149,59
	2023	62.975	151,93
	2024	63.924	154,22
	2025	64.859	156,47
	2026	65.784	158,71
	2027	66.713	160,95
	2028	67.648	163,20
	2029	68.593	165,48
	2030	69.554	167,80
	2031	70.529	170,15
	2032	71.523	172,55
	2033	72.532	174,98
	2034	73.549	177,44
	2035	74.592	179,95

Tabla 22

Caudales Caso 2 con Porcentaje de Pérdidas del Sistema para el Año 2023.

CAUDALES			
D bruta	Periodo Proyectado	Promedio	Qres
(l/s)	(Año)	(Hab)	(l/s)
208,44	2005	41.680	100,55
	2020	43.690	105,40
%p	2021	44.063	106,30
42,43	2022	44.385	107,08
	2023	44.663	107,75
	2024	44.910	108,35
	2025	45.129	108,88
	2026	45.326	109,35
	2027	45.512	109,80
	2028	45.689	110,23
	2029	45.861	110,64
	2030	46.035	111,06
	2031	46.207	111,48
	2032	46.383	111,90
	2033	46.556	112,32
	2034	46.721	112,72
	2035	46.895	113,14

Como punto de comparación y para conocer con cuál de los dos casos se continua para la aplicación del proyecto se usan los datos de producción de las plantas de tratamiento Cariongo y Monteadentro, datos que se nos fueron proporcionados por funcionarios de la empresa de servicios públicos EMPOPAMPLONA, los que se presentan a continuación de los cuales se tienen registro de los valores para el mes de enero hasta el mes de mayo, se presentan valores de producción individual por planta de tratamiento y en conjunto en metro cúbico (m³), a su vez, se realiza una conversión de estos caudales a litros por segundo (l/s).

Tabla 23

Producción Mensual de las Plantas Cariongo y Monteadentro para el Año 2024.

MES	PLANTA CARIONGO	PLANTA MONTEAD.	TOTAL	CAUDAL CARIONGO	CAUDAL MONTEAD.	CAUDAL TOTAL
	M ³	M ³	M ³	L/S	L/S	L/S
ENERO	222,104	109,663	331,766	82,92	40,94	123,87
FEBRERO	253,085	106,149	359,234	101,01	42,36	143,37
MARZO	233,969	89,860	323,829	87,35	33,55	120,90
ABRIL	249,806	97,068	346,873	96,38	37,45	133,82
MAYO	251,180	124,626	375,806	93,78	46,53	140,31
TOTAL	1,187,420	515,395	1,702,815	92,29	40,11	132,40

Nota. Obtenido de documentación entregada por funcionarios de EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P.

Como se puede observar, el caudal medio diario para el año 2024 obtenido según los datos de la suma de las dos plantas promediado es de aproximadamente 132,40 L/s, valor con el cual se hizo una comparación con los datos obtenidos en tablas de proyección de la cual se puede concluir que se trabajará con la proyección del caso 2 el cual es el más próximo teniendo en cuenta que el otro dato sobrepasa y teniendo en cuenta también que según la tendencia el porcentaje de pérdidas para el año 2024 debería ser mayor el registrado en el año predecesor. La proyección que se utilizará será la que contempla el dato del Censo Nacional de Población y Vivienda del año 2018.

7.5 Cálculo de Caudal Medio Diario Teórico

Se realizó un cálculo de caudal medio diario de acuerdo a las demandas que se presenta en la zona de estudio y de acuerdo a los parámetros que nos indica el RAS de la siguiente forma:

➤ Caudal residencial

Para este caudal, usamos la ecuación 22, con la cual obtendríamos la siguiente expresión:

$$Q_{RES} = \frac{44910 * 160}{86400} = 83,17 \left(\frac{l}{s}\right)$$

Como resultado de la expresión obtenemos un caudal residencial de 83,17 l/s.

➤ Caudal institucional

Con el área institucional anteriormente hallada se procedió a realizar el cálculo del caudal comercial donde se empleó la ecuación 23, dando como resultado la siguiente expresión:

$$Q_{INST} = 0,5 \left(\frac{1}{\frac{s}{ha}} \right) * 121,27 \text{ ha} = 60,64 \left(\frac{l}{s}\right)$$

Como resultado del cálculo, obtenemos un caudal institucional de 60,64 (l/s).

➤ Caudal comercial

Con el área comercial previamente determinada, se realizó el cálculo del caudal comercial utilizando la ecuación 24, lo que resultó en la siguiente expresión.

$$Q_{COM} = 0,5 \left(\frac{1}{\frac{s}{ha}} \right) * 9,7 \text{ ha} = 4,85 \left(\frac{l}{s}\right)$$

El cálculo realizado da como resultado un caudal comercial de 4,85 (l/s).

➤ **Caudal industrial**

Se determinó previamente el área industrial y, mediante la ecuación 25, se calculó el caudal, obteniendo la expresión siguiente.

$$Q_{IND} = 1,5 \left(\frac{1}{\frac{5}{ha}} \right) * 2 ha = 3 \left(\frac{l}{s} \right)$$

De acuerdo al cálculo efectuado, se obtiene un caudal industrial de 3 (l/s).

➤ **Caudal medio diario**

Con la realización de los cálculos de los caudales residencial, institucional, comercial e industrial de acuerdo a sus áreas, se continuó con el cálculo del caudal medio diario del sistema de acueducto, este cálculo se realizó siguiendo la ecuación 26, de la cual obtenemos la siguiente expresión:

$$Q_{md} = 83,17 \left(\frac{l}{s} \right) + 60,64 \left(\frac{l}{s} \right) + 4,85 \left(\frac{l}{s} \right) + 3 \left(\frac{l}{s} \right) = 151,66 \left(\frac{l}{s} \right)$$

Como resultado obtenemos un caudal medio diario de 151,66 (l/s).

7.6 Análisis de La Producción Horaria Mes de Mayo de las Plantas de Tratamiento

Con base en los datos suministrados (véase Apéndice J) por los funcionarios de la empresa EMPOPAMPLONA se realizó un análisis detallado de la producción horaria para el mes de mayo del presente año con el fin de evaluar el patrón de producción de las dos plantas de tratamiento y hallar el producto de los factores de mayoración K1 y K2 para cada planta de tratamiento por hora.

7.6.1 Planta de Tratamiento Cariongo

Para la planta de tratamiento Cariongo se cuenta con datos de producción del mes de mayo tomados cada día por hora, dichos datos se dan en metro cúbico por hora (m³/h) de los cuales, las sumatorias horarias por día se muestran en la siguiente tabla, en esta se tienen los encabezados de

día y producción, a su vez, se muestra el valor en metro cúbico (m³) del total de producción del mes de mayo para dicha planta.

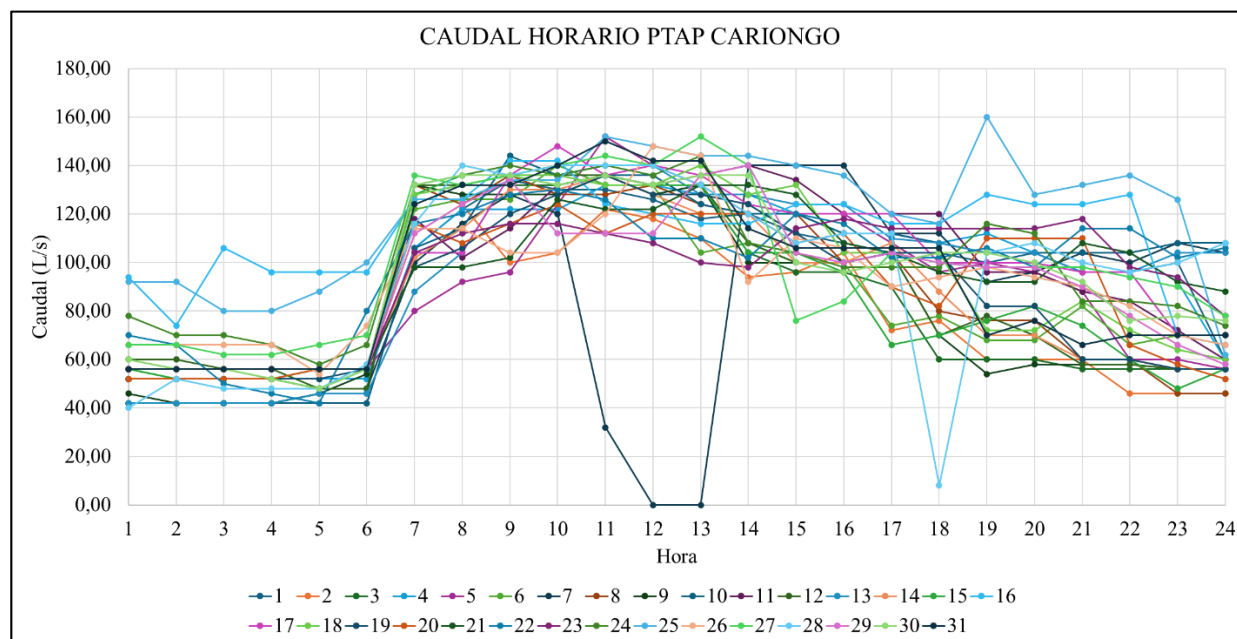
Tabla 24

Producción Diaria PTAP Cariongo Mes de Mayo - 2024.

DÍA	PRODUCCIÓN (m ³ /h)	DÍA	PRODUCCIÓN (m ³ /h)
1	7999,20	17	8481,60
2	6789,60	18	8136,00
3	7120,80	19	7560,00
4	8395,20	20	7754,40
5	7833,60	21	8208,00
6	7524,00	22	8553,60
7	7372,80	23	8200,80
8	7660,80	24	8748,00
9	7192,80	25	10425,60
10	8467,20	26	8035,20
11	8409,60	27	8755,20
12	7639,20	28	8330,40
13	8402,40	29	7970,40
14	7502,40	30	8388,00
15	7502,40	31	8128,80
16	9698,40	CAUDAL TOTAL MES (m ³)	251.186

Con los datos obtenidos sobre producción anteriormente transformados de metro cúbico por hora (m³/h) a litros por segundo (l/s) del mes de mayo se realizaron las curvas de producción diarias para cada día del mes de mayo, teniendo así una gráfica que muestra la variación por hora del caudal producido por la PTAP Cariongo a lo largo del día, a continuación, se presenta una gráfica la cual presenta la variación del caudal de los 31 días anteriormente obtenidos del mes de mayo a lo largo de 24 horas.

Figura 40
Curvas de Producción Diarias PTAP Cariongo.

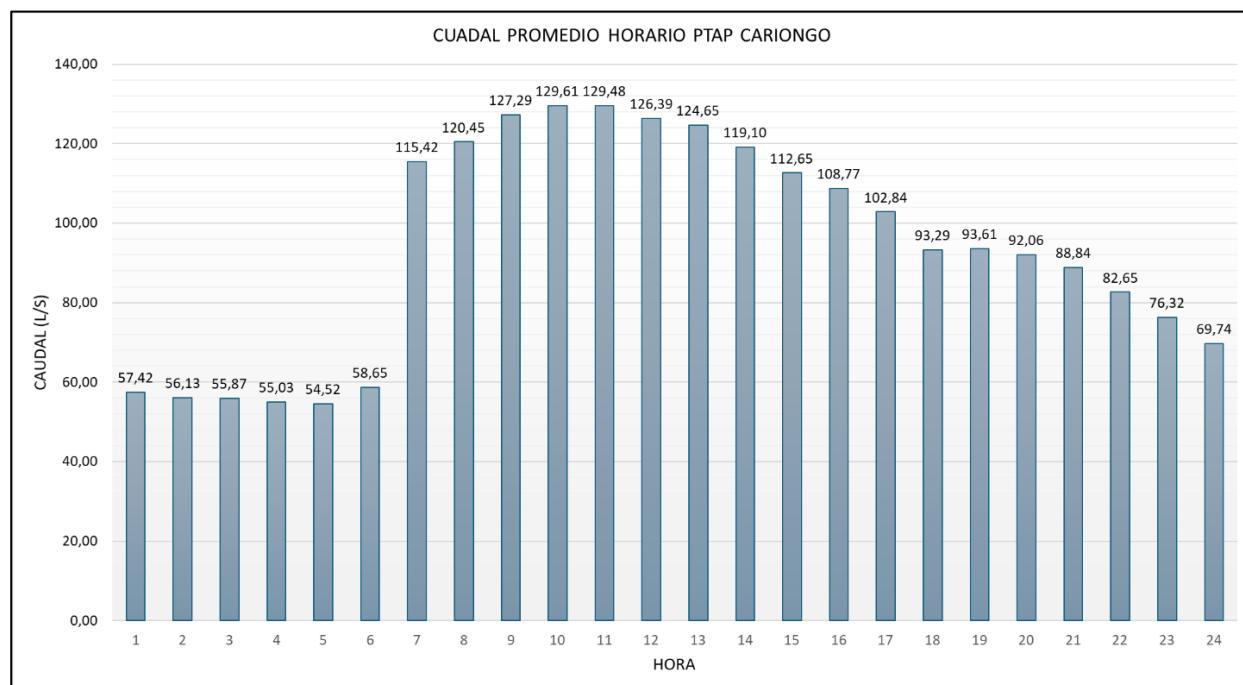


De esta figura se pueden observar que el día 25 se presentó a las 19:00 horas la producción más alta registrada en el mes de mayo, dicho caudal sería de aproximadamente 160 l/s. Los valores que se observar con anormalidad de producción en el día 07 de mayo corresponden a un cierre total de la PTAP Cariongo debido a labores de mantenimiento preventivo de la misma programado para las horas comprendidas entre las 07:00 a. m. y las 02:00 p. m., por ello, a las 11:00 horas se presentó un caudal de 32 l/s y desde las horas de 12:00 a 13:00 se presentó un caudal de 0 l/s. Para el día 25 de mayo se presentó una caudal de producción anormal debido a una suspensión programada para el 22 de mayo, pero realizada el día 25 (información sin confirmar), esta suspensión a diferencia de la presentada el día 07 sólo afectó la producción a las 18:00 horas en la cual se presentó un caudal de 8 l/s.

Con los datos de producción en litros por segundo (l/s) se realizó un promedio por hora de las producciones del mes de mayo, tal que, con esto valores se obtuvimos una gráfica en la cual se observa el caudal promedio más alto presentado en el mes de mayo.

Figura 41

Caudal Promedio Horario PTAP Cariongo Mes de Mayo - 2024.

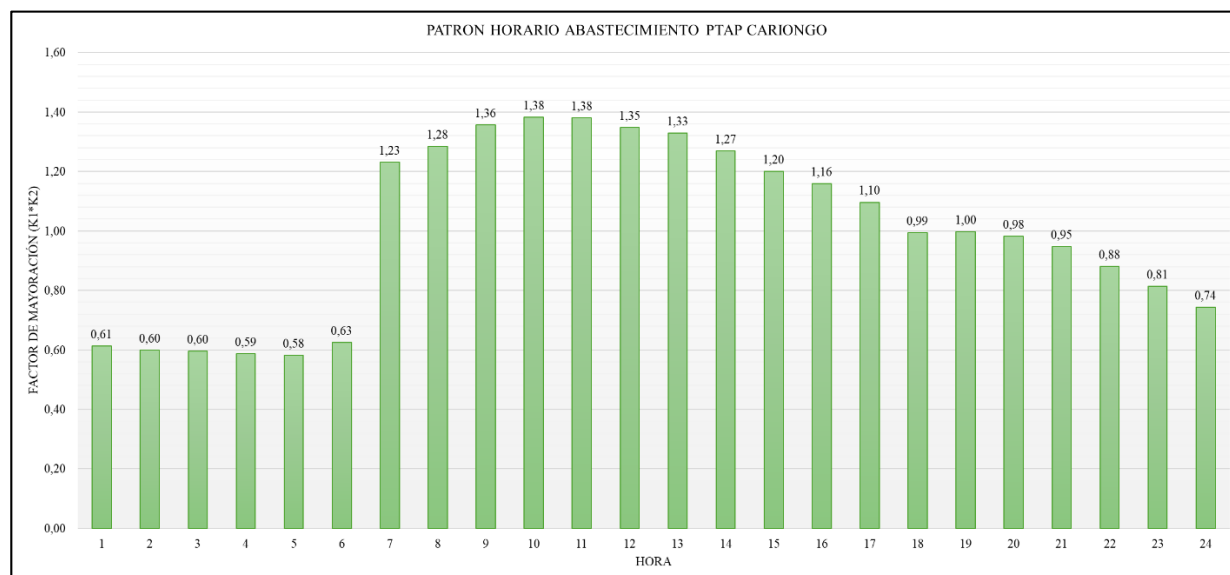


En gráfica se puede observar la hora de mayor producción promedio la cual corresponde a las 10:00 a. m. con un valor de caudal de 129,61 l/s, a partir de esta hora se comienza a presentar una disminución paulatina del caudal promedio, también se puede observar que la hora de menor producción es las 05:00 a. m. la cual presenta un caudal promedio de 54,52 l/s.

Con los valores promedio por hora calculados a partir de los valores de los días del mes de mayo se realizó la obtención del valor K para cada hora del día, que representa el producto de K1 y K2, valor que describe la modulación que tiene los caudales con respecto al caudal medio diario, a continuación, se presenta la gráfica en la cual se observa la variación del valor K con respecto a la hora del día.

Figura 42

Factor de Mayoración K PTAP Cariongo Mes de Mayo - 2024.



De la anterior se puede observar que el valor K máximo presentado en un día promedio se da en las horas 10:00 a. m. y 11:00 a. m. con un valor de 1,38 lo cual nos indica que allí se presentan valores máximos de caudal promedio producido durante un día en el mes de mayo en la PTAP Cariongo, por el contrario, el valor mínimo de K se presenta a la hora 05:00 a. m. con un valor de 0,58 lo cual indica la presencia del valor más bajo producido en un día en el mes de mayo en dicha PTAP.

7.6.2 Planta de Tratamiento Monteadentro

De igual forma, para la planta de tratamiento Monteadentro se cuenta con los datos de producción correspondientes al mes de mayo, registrados cada hora a lo largo de todos los días. Estos datos se expresan en metros cúbicos por hora (m^3/h), lo que permite observar el comportamiento horario de la planta durante ese periodo. Las sumatorias de la producción horaria por cada día del mes se presentan en la tabla que se muestra a continuación. En dicha tabla, se incluyen los encabezados de día y producción, y se detalla el valor total de producción diaria en metros cúbicos (m^3). Además, se muestra el total acumulado de la producción mensual de la planta

para el mes de mayo, proporcionando una visión clara del rendimiento global del sistema durante ese periodo.

Tabla 25

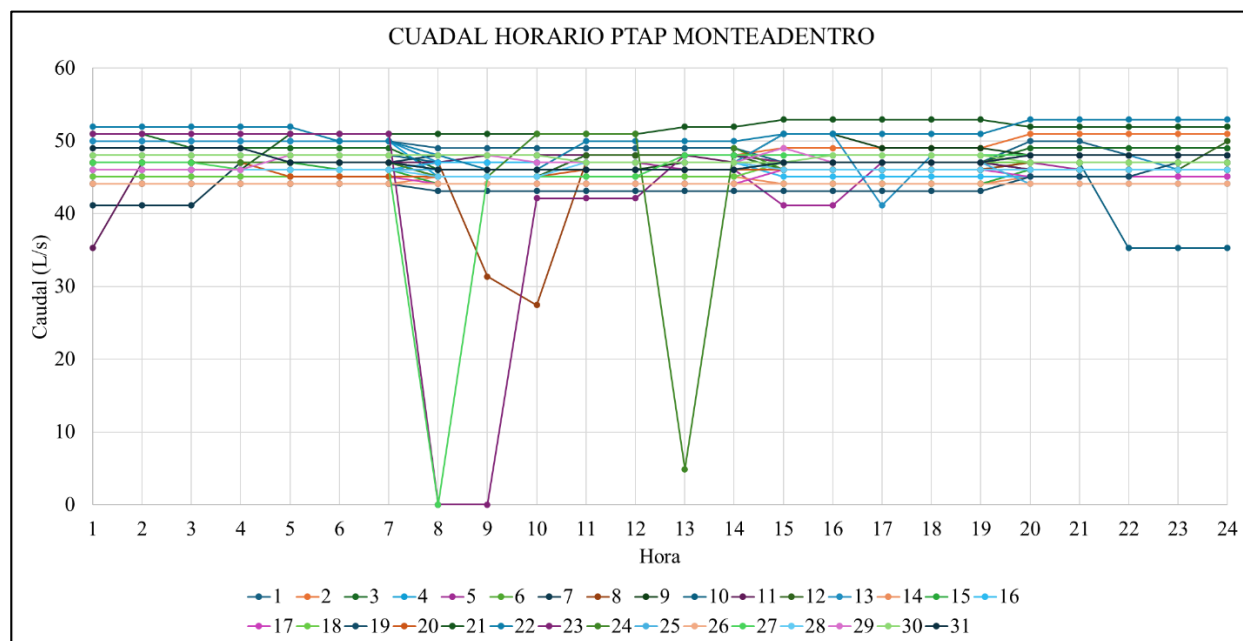
Producción Diaria PTAP Monteadentro Mes de Mayo - 2024.

DÍA	PRODUCCIÓN (m³/h)	DÍA	PRODUCCIÓN (m³/h)
1	4219,49	17	3887,86
2	4219,49	18	3965,47
3	4138,34	19	3799,66
4	4096,01	20	3972,53
5	3976,06	21	4392,36
6	3997,22	22	4388,83
7	4007,81	23	3796,13
8	3894,91	24	3912,55
9	4113,65	25	3961,94
10	3961,94	26	3810,24
11	4021,92	27	3894,91
12	4036,03	28	3983,11
13	4155,98	29	4092,48
14	3852,58	30	4113,65
15	3912,55	31	4085,42
16	3969,00	CAUDAL TOTAL MES (m ³)	124.630

Con los datos de producción del mes de mayo previamente convertidos de metro cúbico por hora (m³/h) a litros por segundo (l/s), se elaboraron las curvas de producción diarias para cada día de dicho mes. Así, se obtuvo una gráfica que muestra la variación horaria del caudal producido por la PTAP Monteadentro a lo largo del día. A continuación, se presenta una gráfica la cual presenta la variación del caudal de los 31 días anteriormente obtenidos del mes de mayo a lo largo de 24 horas.

Figura 43

Curvas de Producción Diarias PTAP Monteadentro.

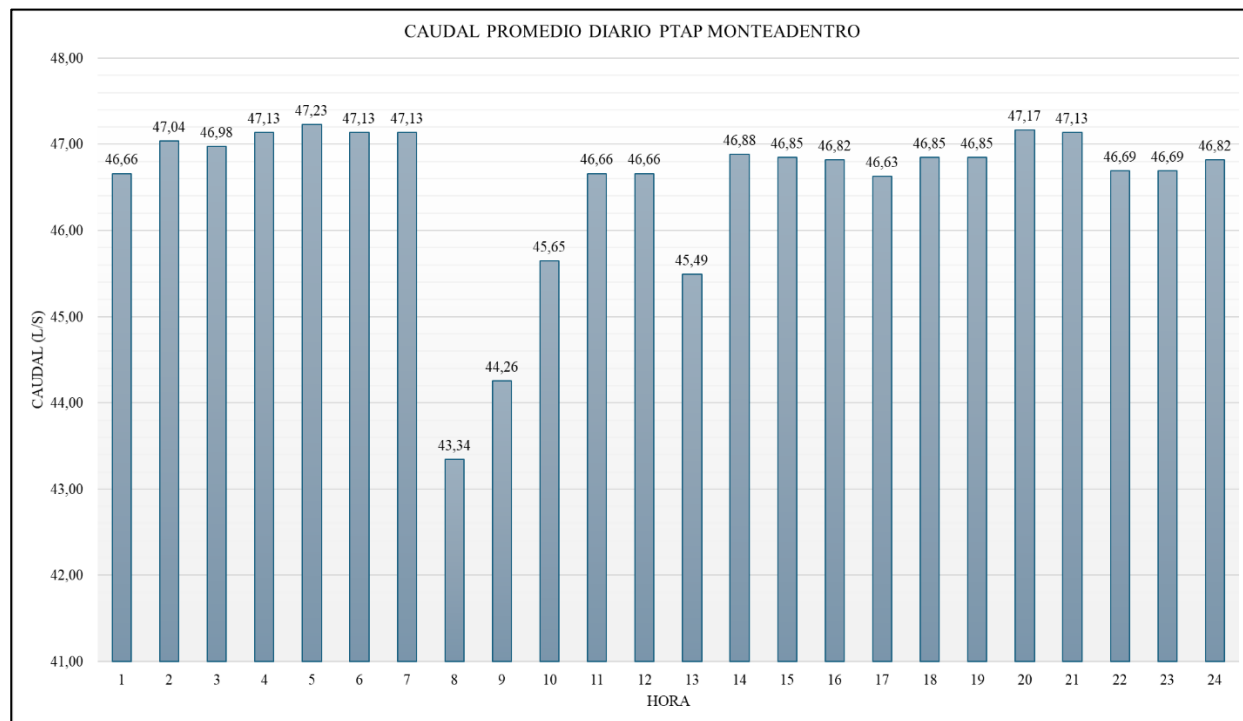


De esta podemos observar que la curva de consumo no presenta grandes diferencias de mínimos y máximos, es decir, el caudal de producción es estable según el día a analizar. El caudal máximo que se presenta en la producción de esta PTAP corresponde a un valor de 52,92 l/s valor que no depende de la hora del día. Como podemos observar, en el día 23 del mes de mayo se realizó un mantenimiento preventivo previsto para las horas contempladas desde las 07:30 a. m. hasta las 04:00 p. m. de tal manera que las horas en las cuales se presentó un caudal de 0 l/s fueron las comprendidas entre las 08:00 a. m. y las 09:00 a. m. Para los días 24 y 27 de mayo se presentaron reducciones significativas en la producción pues se registraron caudales de 4,9 l/s y 0 l/s respectivamente, el motivo por el cual se registraron estos valores es desconocido.

Con los datos de producción en litros por segundo (l/s), se calculó un promedio horario de las producciones durante el mes de mayo. Con estos valores, se generó una gráfica que muestra el caudal promedio más alto registrado en dicho mes.

Figura 44

Caudal Promedio Horario PTAP Monteadentro Mes de Mayo - 2024.

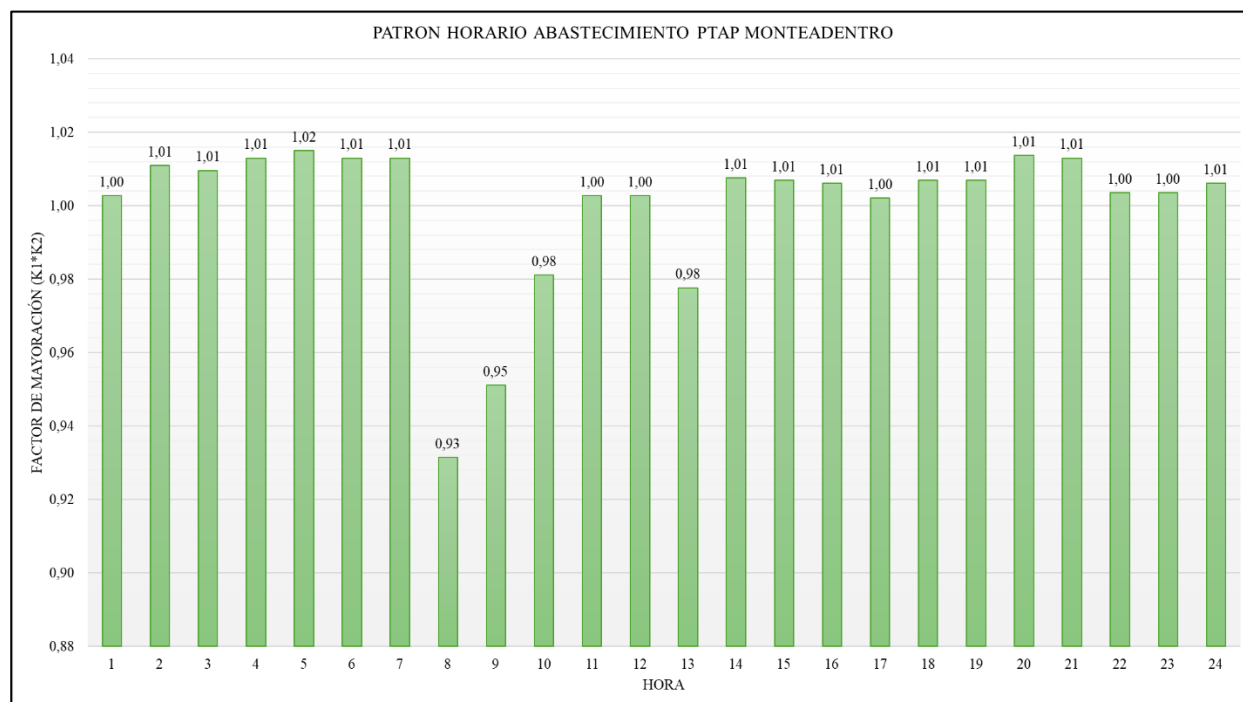


En la gráfica se observa que la hora de mayor producción promedio es a las 05:00 a.m., con un caudal de 47,23 l/s y el mínimo presentado a las 08:00 a.m. con un caudal de 43,34 l/s. Por lo general, los caudales producidos en esta PTAP oscilan entre 46,66 l/s a 47,23 l/s, en mayor proporción de la totalidad de las horas del día, sin embargo, se presentan espacios en el día en los cuales la producción baja de forma no muy significativa.

A partir de los valores promedio por hora calculados de los datos diarios de mayo, se determinó el valor K para cada hora del día. Este valor K, que es el producto de K1 y K2, describe cómo se modulan los caudales en relación con el caudal medio diario. A continuación, se presenta una gráfica que muestra la variación del valor K a lo largo del día.

Figura 45

Factor de Mayoración K PTAP Monteadentro Mes de Mayo - 2024.



De la gráfica anterior se observa que el valor máximo de K en un día promedio ocurre a las 05:00 a.m., con un valor de 1,02, indicando que este es el momento de mayor caudal promedio producido durante un día en mayo en la PTAP Monteadentro. En contraste, el valor mínimo de K se presenta a las 08:00 a.m., con un valor de 0,93, señalando el momento de menor caudal promedio producido en un día en mayo en dicha PTAP.

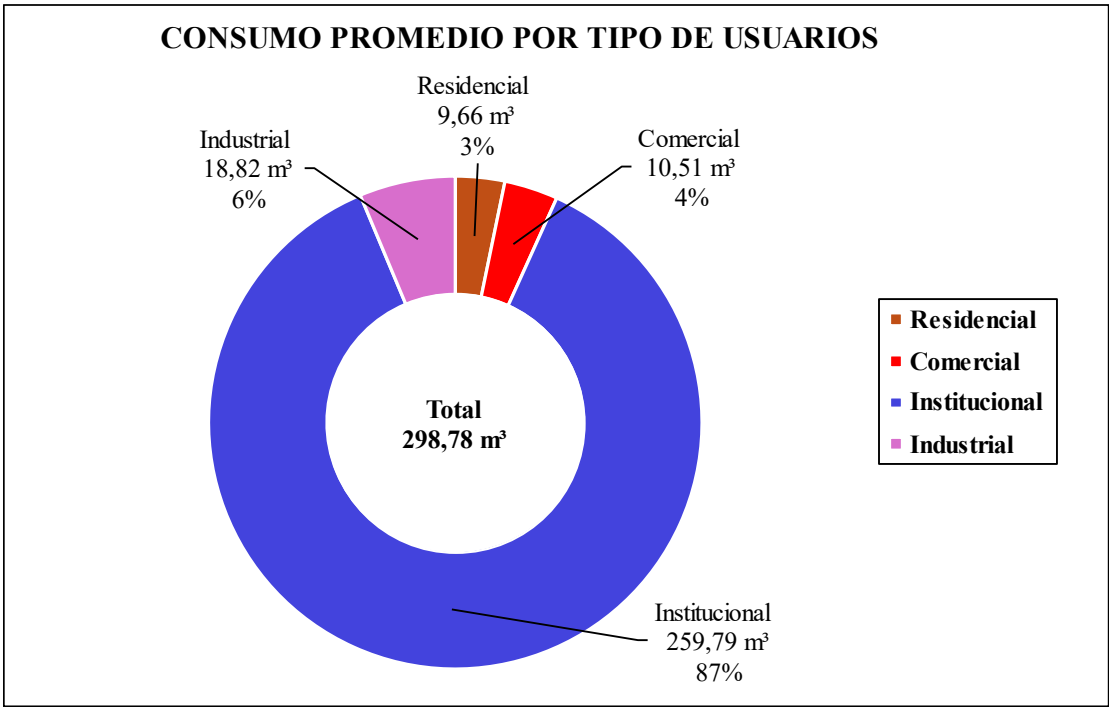
7.7 Consumos

La recopilación de datos de consumo de los diferentes usuarios ha presentado ciertas limitaciones. En primer lugar, es importante destacar que no fue factible obtener esta información a través de la empresa responsable, dado que los datos son considerados de carácter confidencial y, por lo tanto, no están disponibles para el público en general. Esta restricción se basa en políticas internas de protección de datos que buscan salvaguardar la privacidad y la información de los usuarios.

No obstante, hemos podido acceder a información relevante a través de la plataforma del Sistema Único de Información de servicios públicos domiciliarios (SUI). En dicha plataforma, se encuentran disponibles los reportes de consumo que permiten desglosar el uso de recursos por cada usuario. Esta información es presentada de forma mensual y se expresa en metros cúbicos (m³), lo que facilita el análisis de los patrones de consumo a lo largo del tiempo.

Con el objetivo de llevar a cabo un análisis detallado, procedimos a descargar los reportes correspondientes al año 2023 y al primer cuatrimestre de 2024. Estos datos nos permitieron evaluar el comportamiento del consumo por parte de los usuarios y establecer tendencias que podrían ser útiles para el análisis y posterior modelación.

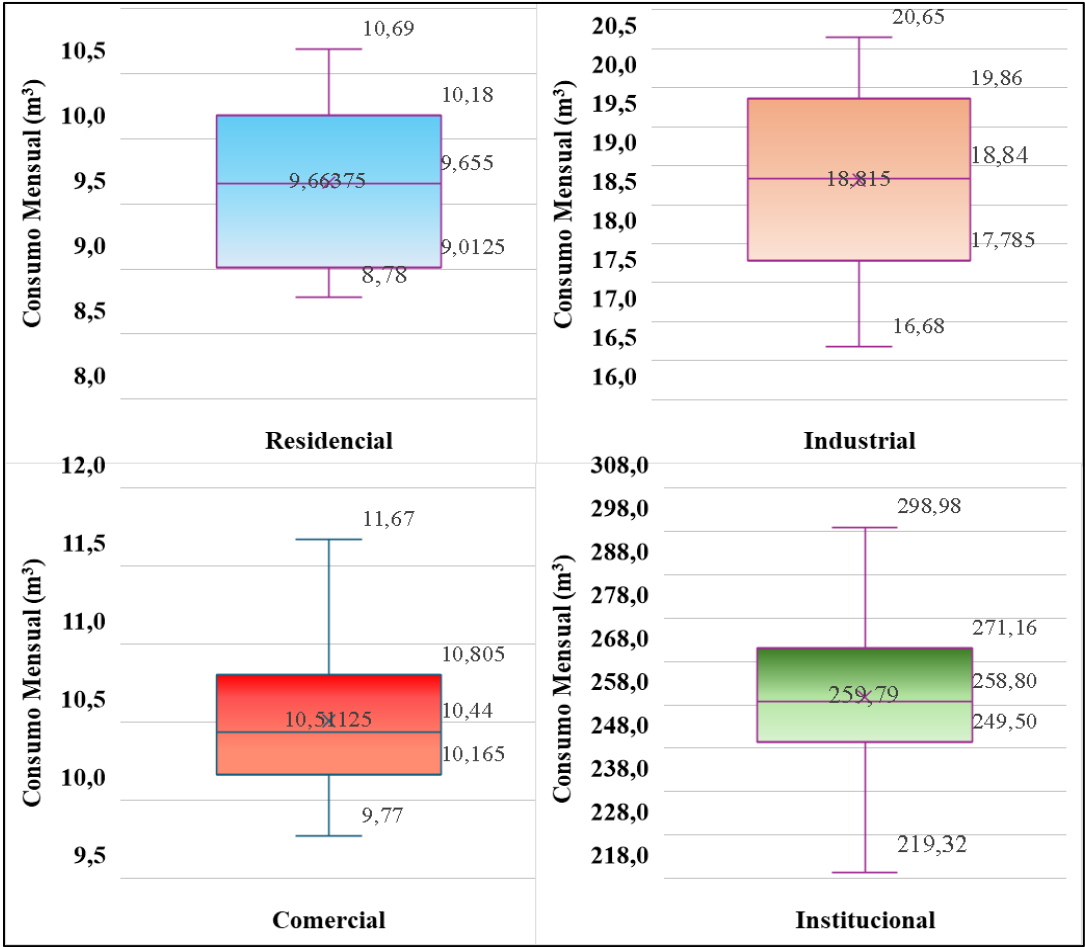
Figura 46
Consumo Promedio Mensual por Tipo de Usuario.



Según los datos reportados al SUI, se muestra el consumo promedio mensual de agua por tipo de usuario, totalizando 298,78 m³. El mayor consumo proviene del sector institucional, que representa un 87% del total con 259,79 m³, indicando una alta demanda de agua en este segmento.

Le sigue el sector industrial, que consume 18,82 m³, lo que equivale al 6% del total, y el sector comercial con 10,51 m³, correspondiente al 4%. Finalmente, el sector residencial es el que menos consume, con 9,66 m³, representando apenas el 3% del total. Estos datos resaltan la predominancia del consumo institucional frente a los otros tipos de usuarios.

Figura 47
Análisis de Consumos Promedio Mensual SUI.



La gráfica analiza el consumo mensual de agua por tipo de usuario mediante box plots. El sector institucional muestra el mayor consumo y variabilidad, con un rango medio de 249,50 m³ a 271,16 m³ y una mediana de 259,79 m³. El sector industrial tiene un consumo concentrado entre 17,785 m³ y 19,86 m³, con una mediana de 18,815 m³. El sector comercial presenta menor variabilidad, con una mediana de 10,5125 m³ y valores entre 9,77 m³ y 11,67 m³. El sector

residencial tiene una mediana de 9,66875 m³ y un rango medio de datos de 9,0125 m³ a 10,18 m³.

En resumen, el sector institucional destaca por su alto consumo y variabilidad, mientras que los sectores comercial y residencial tienen consumos más consistentes.

7.8 Caudal Medio Diario por Tipo de Usuario

Teniendo en cuenta los datos hallados sobre el consumo mensual según el tipo de usuario abastecido se realizó el cálculo del caudal medio diario expresado en litros por segundo (l/s), además, se efectuó una comparación con el caudal de producción de las plantas para observar el índice de agua no contabilizada del sistema, en la siguiente tabla se muestra la cantidad los usuarios según el tipo y el caudal que estos consumen.

Tabla 26

Caudal Medio Diario por Tipo de Usuario.

Tipo de Usuario	Cantidad	Caudal	
		M ³ /MES	L/S
Residencial	15607	9,57	57,62
Industrial	37	18,82	0,27
Comercial	1204	10,51	4,88
Institucional	132	357,62	18,21
		Qmd	80,99

Con el uso de la ecuación 27, se llevó a cabo un análisis sobre los datos obtenidos anteriormente, comparándolos con los datos obtenidos sobre producción mensual de las plantas de tratamiento de tal forma que se obtuvo el valor del IANC para este caso, a continuación, se muestra el cálculo del mismo.

$$IANC = \frac{(132.46 - 80.99)}{132.46} * 100 = 39\%$$

Como se observa, el porcentaje de agua no contabilizada es mayor al permitido por la normativa, este valor puede ser el resultado de numerosos factores como fugas en el sistema debido a la edad de las tuberías o incluso por conexiones ilícitas las cuales no son facturadas.

7.9 Conclusiones y Recomendaciones del Objetivo

El objetivo de desarrollar un análisis de consumos y estimación de demandas en la red, utilizando la información comercial de la empresa de agua, la estimación de población y el área existente, fue alcanzado de manera satisfactoria. Se completó un análisis integral que incluyó la proyección de población, el análisis de producción de las plantas de tratamiento, la evaluación del área del casco urbano y la obtención y análisis de la información sobre consumos por usuarios. Aunque el análisis fue completo y se abordaron adecuadamente todos los aspectos relevantes, la integración de la información presentó algunas complejidades. La falta de claridad en la clasificación de ciertos tipos de usuarios no impactó de manera directa en la calidad del análisis, pero subrayó la necesidad de un enfoque más refinado en la segmentación de datos. A pesar de estos desafíos, el análisis proporcionó una estimación valiosa y relevante de la demanda, cumpliendo en general con el objetivo planteado.

Para desarrollar un análisis de consumos y estimación de demandas en la red de una empresa de agua, se recomienda integrar datos históricos de consumo con proyecciones poblacionales y un mapeo exhaustivo de la infraestructura existente. Es aconsejable implementar un modelo predictivo que combine estos elementos para identificar patrones de consumo y prever la demanda futura. Este enfoque permitirá ajustar la capacidad de la red y planificar ampliaciones necesarias, garantizando una gestión eficiente de los recursos hídricos y una respuesta proactiva a las necesidades de los usuarios.

8 Modelo Digital de Elevación

En el diseño de un acueducto para una zona montañosa como lo es el municipio de Pamplona es de gran importancia la implementación un modelo digital de elevación preciso que tome en cuenta la topografía detallada del terreno, por ello, se decide emplear la fotogrametría con drones, en el caso de los barrios y/o zonas en las que se han presentado expansiones las cuales fueron de difícil acceso se utilizó la metodología de satelital.

8.1 Obtención de información

➤ Fotogrametría con dron

Se utilizaron imágenes aéreas de alta resolución capturadas por el dron DJI Phantom 4 Pro equipado con una cámara de 1" con sensor CMOS la cual cuenta con una resolución de 20 megapíxeles, las imágenes se tomaron siguiendo un plan de vuelo específico para garantizar la cobertura de las áreas de interés dando como resultado 4144 fotografías.

Figura 48

Fotografía Aérea Tomada con Dron: Salida del ISER hacia la Vía al Progreso (V01, F001).



➤ Información satelital

Se realizó un polígono en la herramienta Google Earth Pro el cual contempló el Sistema de Acueducto casi en su totalidad, posteriormente, se llevó este polígono en formato .KML a la herramienta EOSDA, 2024 donde se obtuvieron imágenes ráster las cuales tienen información sobre posicionamiento geográfico y altura de las zona que contienen, la cantidad de rásters que componen la zona de interés fue de 09, las cuales fueron adquiridas para su posterior procesamiento, a continuación se muestra una de imágenes en la cual se observa la diferencia de altura según la luminosidad siendo las zonas que presentan mayor altura los más luminosos y las zonas más bajas las más oscuras.

Figura 49
Polígono Casco Urbano Municipio de Pamplona.

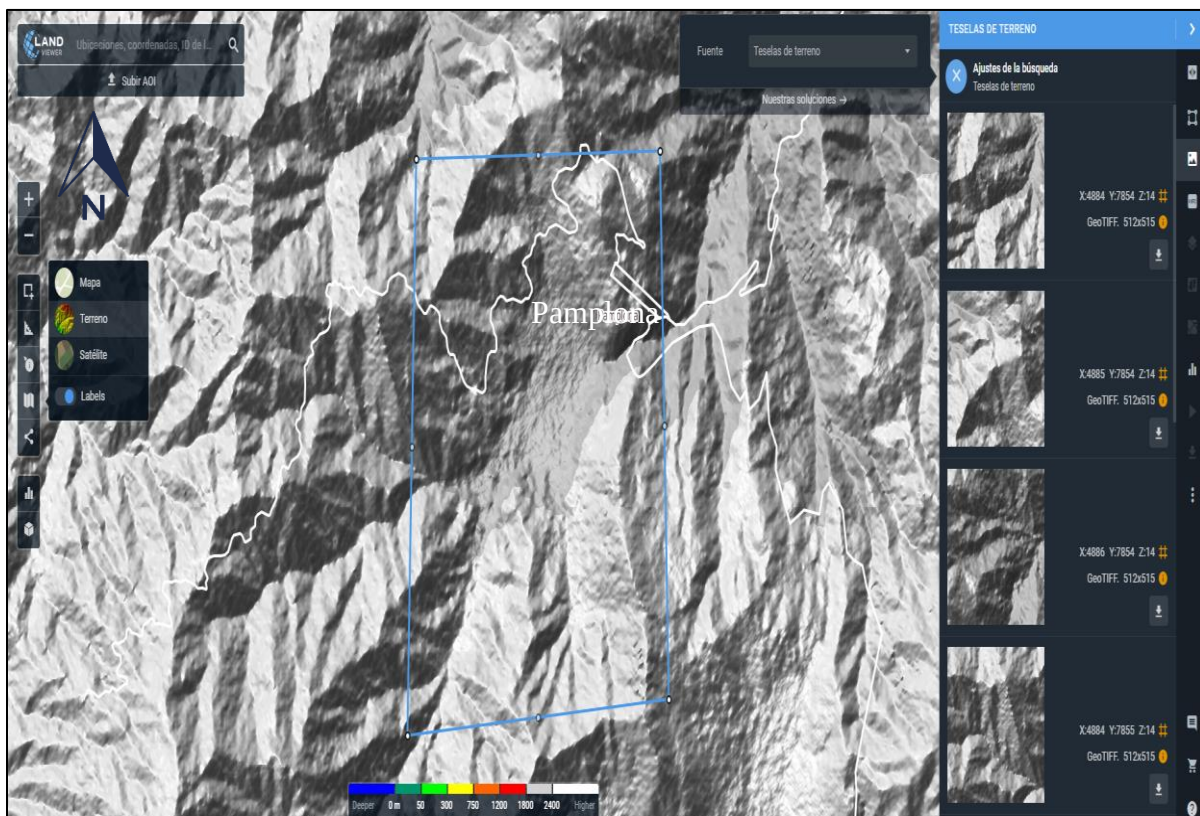
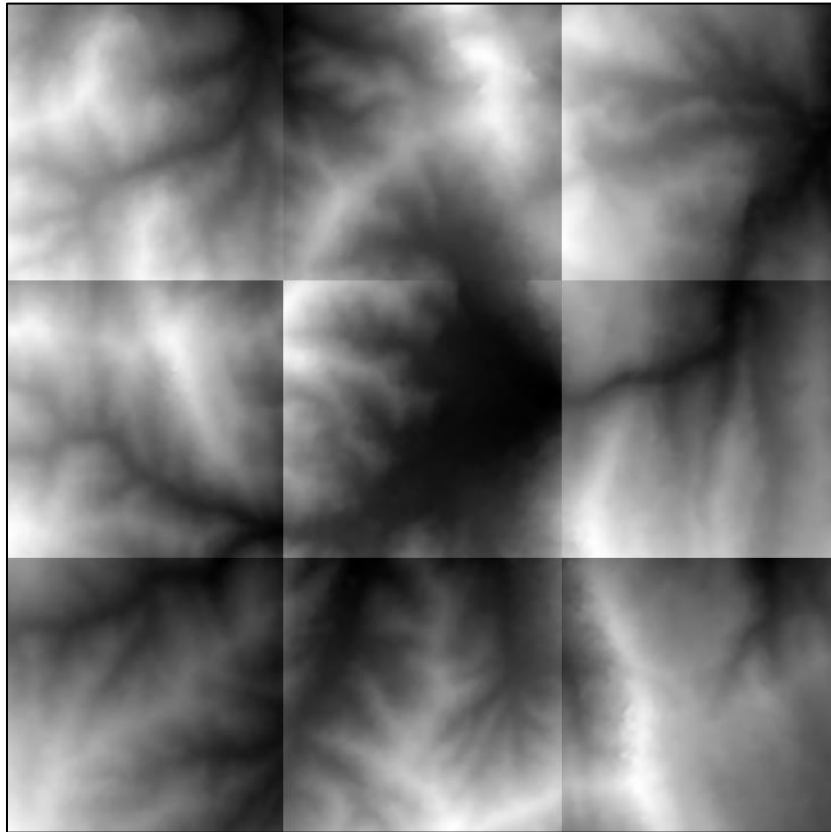


Figura 50
Rásters del Casco Urbano Municipio de Pamplona.



8.2 Procesamiento de datos

➤ Fotogrametría con dron

Con las imágenes obtenidas de los vuelos se realizó una verificación inicial sobre la calidad de información que obtuvieron las mismas de las cuales se pudo observar debido a que Pamplona se encuentra a un nivel alto con respecto al nivel del mar que tenían nubes las cuales obstruían la toma de datos, afortunadamente debido a los parámetros con los cuales fue configurado el vuelo esta información se puede traslapar con otras imágenes teniendo así la información faltante de la zona afectada.

Figura 51

Fotografías Tomadas con Dron: Interferencia por Nubosidad (V05, F097).

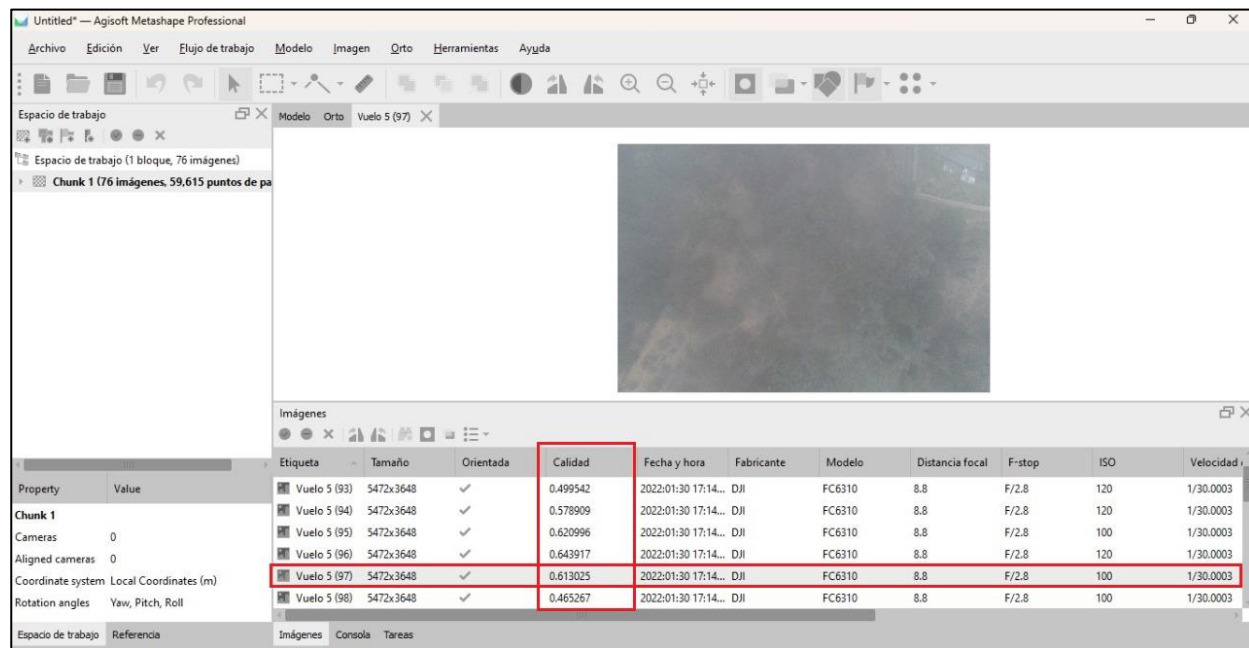


Posteriormente se utilizó la herramienta Agisoft Metashape, la cual cuenta con una licencia gratuita por 30 días que fue usada en este proyecto, se crearon diversos bloques para dividir el total de las imágenes al momento de su cargue en el programa, esto debido a que facilita el procesamiento de las imágenes y de la misma forma la obtención de la nube de puntos del bloque.

Luego de la creación de los bloques la herramienta hace una revisión de la calidad de las fotografías de dron, esto debido a que se busca una buena visualización del terreno para posteriores procesos, ya que, de no tener buena calidad de la visión, puede afectar la generación de puntos de la nube de características incorrectas, lo cual sería perjudicial al momento de la creación de la malla y su posterior MDE. Como se puede observar la siguiente figura, se cuenta con la fotografía V05, F097, la que, en el procesamiento, la herramienta Agisoft nos indica que tiene una calidad de 0,613, y debido a que es menor del 70% se debe descartar del proceso.

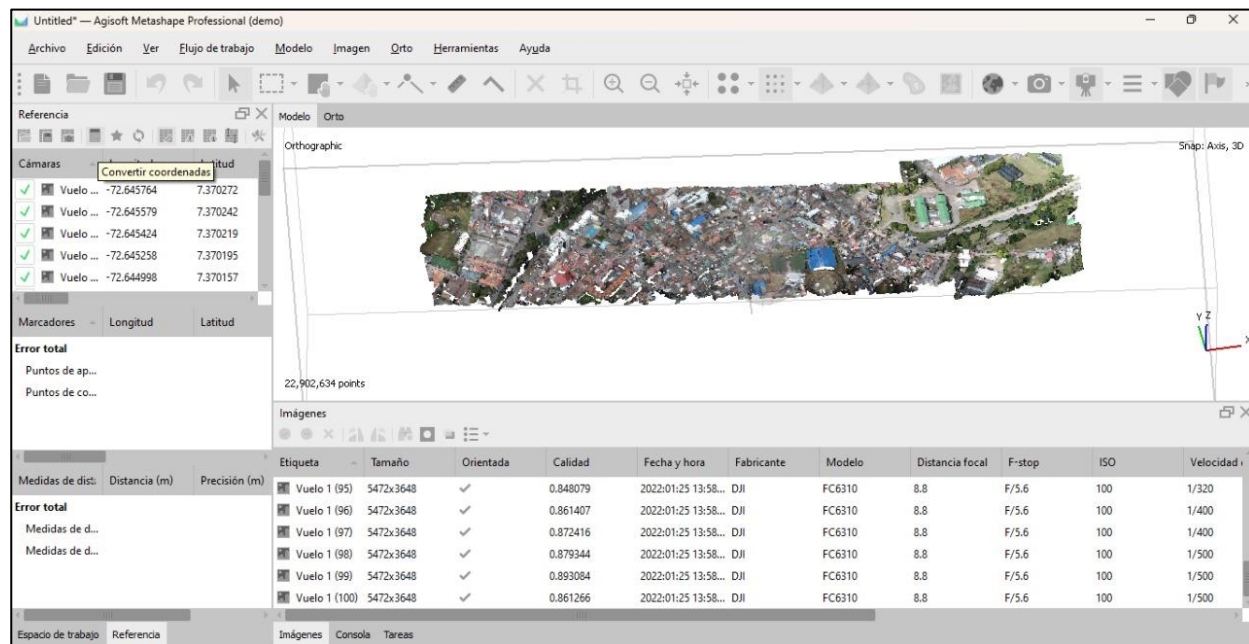
Figura 52

Revisión de Calidad de las Fotografías Tomadas con Dron (V05, F097).



Con el descarte de las fotografías que no cumplían con el nivel de calidad mínimo se continuó con el siguiente proceso, la creación de una nube de puntos, la cual se crea al seleccionar las imágenes restantes de calidad adecuada, para esta creación se deben dar dos parámetros, la calidad de la nube de la cual se eligió media y profundidad, la cual se seleccionó agresiva, con lo que, al dar los parámetros anteriores se crea automáticamente la nube de puntos, es importante mencionar que se puede ver el valor dado por la herramienta a las imágenes, las cuales superan en calidad el 70% establecido.

Figura 53
Nube de Puntos del Bloque 01.



Después de crear la nube de puntos a partir de las fotografías tomadas por el dron, se asignan marcadores en las imágenes correspondientes a los puntos geodésicos proporcionados por el (IGAC, 2024). Estos puntos permiten georreferenciar con precisión el bloque generado, asegurando su correcta ubicación en el espacio real y facilitando la unificación de todos los bloques previamente georreferenciados.

En total, se cuenta con cinco puntos geodésicos ubicados dentro de la zona de estudio, los cuales serán utilizados como referencias clave en el proyecto. Estos puntos permiten georreferenciar correctamente el área de trabajo, asegurando que los distintos bloques se ajusten de manera precisa entre sí. Gracias a su inclusión, se garantiza que el modelo final sea más coherente, tanto en su alineación espacial como en su representación topográfica, contribuyendo a la precisión general del proyecto.

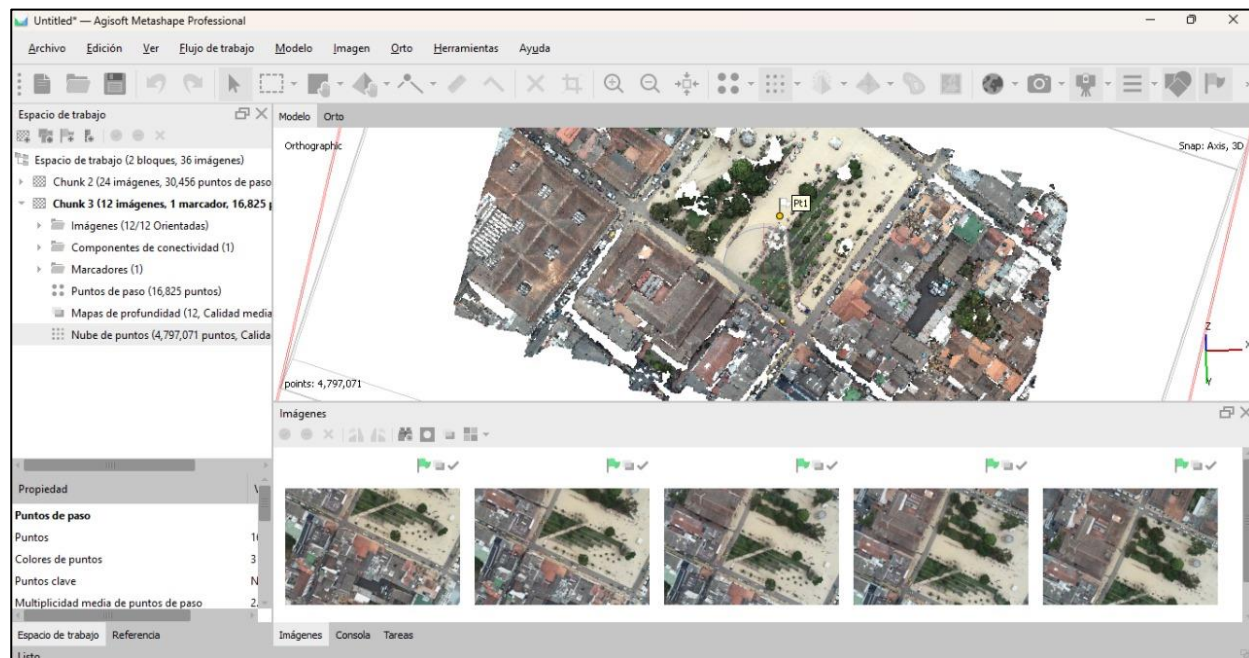
Figura 54

Punto de Georreferenciación Parque Central, IGAC.



Asignar la georreferenciación a las imágenes permite crear un nuevo modelo de nube de puntos georreferenciada, lo que asegura que cada punto se posicione correctamente dentro del sistema de coordenadas establecido. Este proceso es fundamental, ya que garantiza que la nube de puntos resultante se ubique con precisión en el espacio de acuerdo con el sistema de referencia seleccionado. Al estar georreferenciada, la nube de puntos adquiere una posición espacial precisa que respeta las coordenadas reales, lo cual es crucial para unificar todos los bloques creados a partir del conjunto total de imágenes adquiridas.

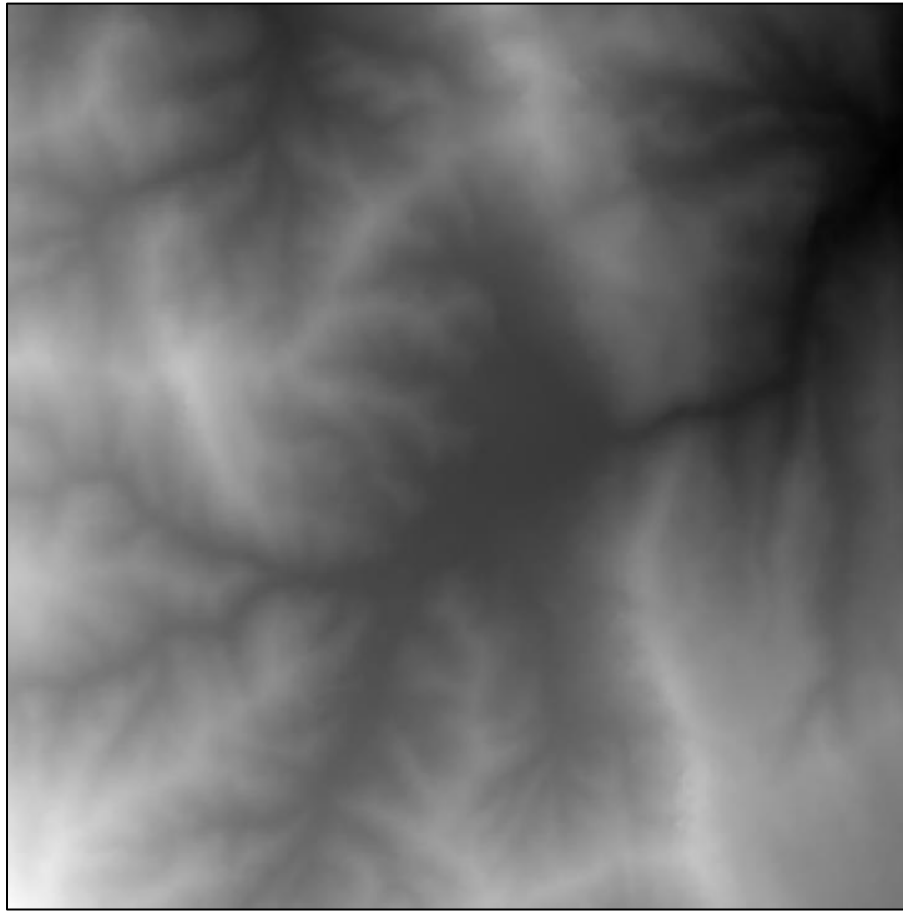
Figura 55
Nube de Puntos Georreferenciada.



➤ Información satelital

Con los rásters obtenidos y utilizando la herramienta QGIS se pudieron procesar estas imágenes para su unificación y consolidación, esto teniendo como parámetro fundamental el sistema de referencia, en este modelo se implementará el sistema WGS 84 debido a que la herramienta Google Earth trabaja con el mismo sistema para, posteriormente, ser cambiado al sistema de referencia CTM 12, sistema con el cual se trabajará en el proyecto, después de la unificación de las 09 imágenes rásters se realizó una verificación de la calidad de las mismas, notando que la relación de pixel a tamaño real es de aproximadamente 4,5 m lo cual es un indicativo de buena calidad del ráster.

Figura 56
Ráster Unificado - Zona de Interés.

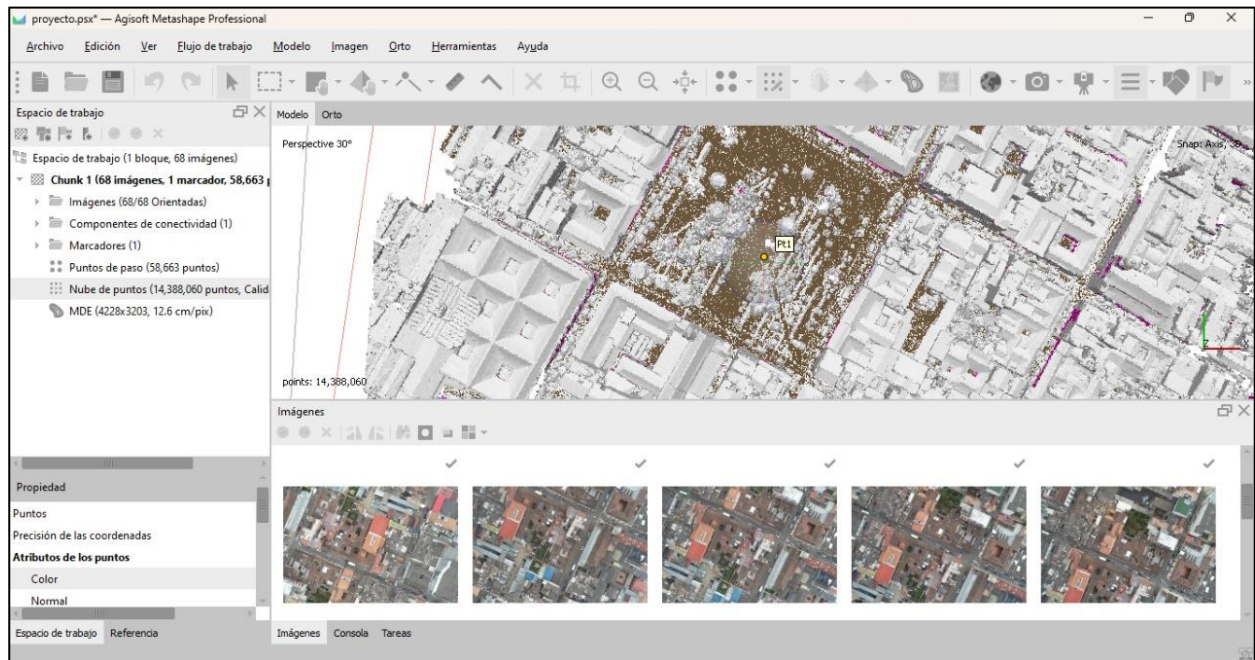


8.3 Modelo Digital de Elevación

➤ Fotogrametría con dron

Después de la creación de la nube de puntos georreferenciada, se crea el primer modelo digital de elevación, este con el fin de comenzar el proceso de clasificación de la nube de puntos de acuerdo a las características de los mimos, de la anterior se realiza una primera clasificación con la ayuda de la asignación de un parámetro, este con el fin de diferenciar el suelo de los demás elementos de la nube, posterior a esto, se puede observar el modelo digital separado por terreno y por objetos de acuerdo al color como se puede observar en la siguiente figura.

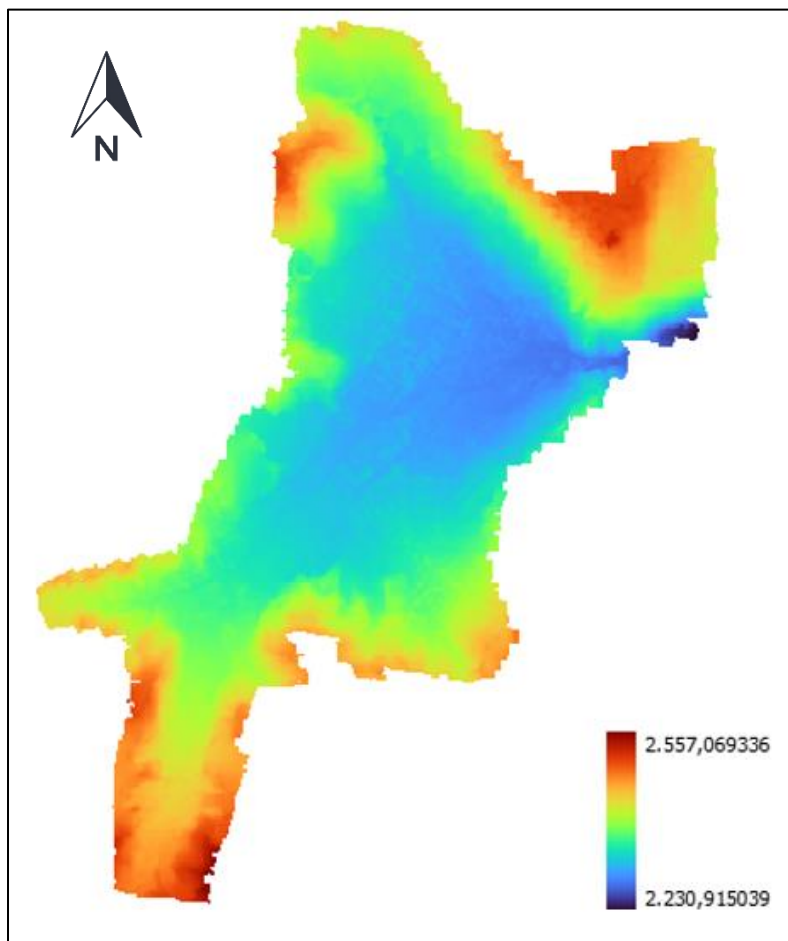
Figura 57
Clasificación del MDE por Puntos.



Luego, se realizó una segunda generación del modelo digital de elevación con el objetivo de limpiar los puntos que no correspondían a la capa de suelos. Este proceso se llevó a cabo para eliminar todos aquellos puntos relacionados con elementos como edificaciones, árboles, vehículos y otros objetos que no forman parte del terreno propiamente dicho. Con esta depuración, se busca obtener un modelo centrado únicamente en la topografía del suelo. En cuanto a los valores de altitud, se pudo apreciar que la zona más alta alcanza los 2.557 m.s.n.m, mientras que la zona más baja tiene una altitud de 2.230 m.s.n.m, proporcionando así un panorama claro de las variaciones topográficas presentes en el área de estudio.

Figura 58

Modelo Digital de Elevación por Fotogrametría Casco Urbano de Pamplona.



Como se observa en la figura anterior, se tiene el modelo digital de elevación del casco urbano del municipio de Pamplona, del cual, algunos barrios como lo son: parte al de Jurado, El Progreso y Picapiedra no fueron levantados por medio de las fotografías con dron debido a que son zonas de difícil acceso y seguridad a razón de salvaguardar la integridad de los equipos.

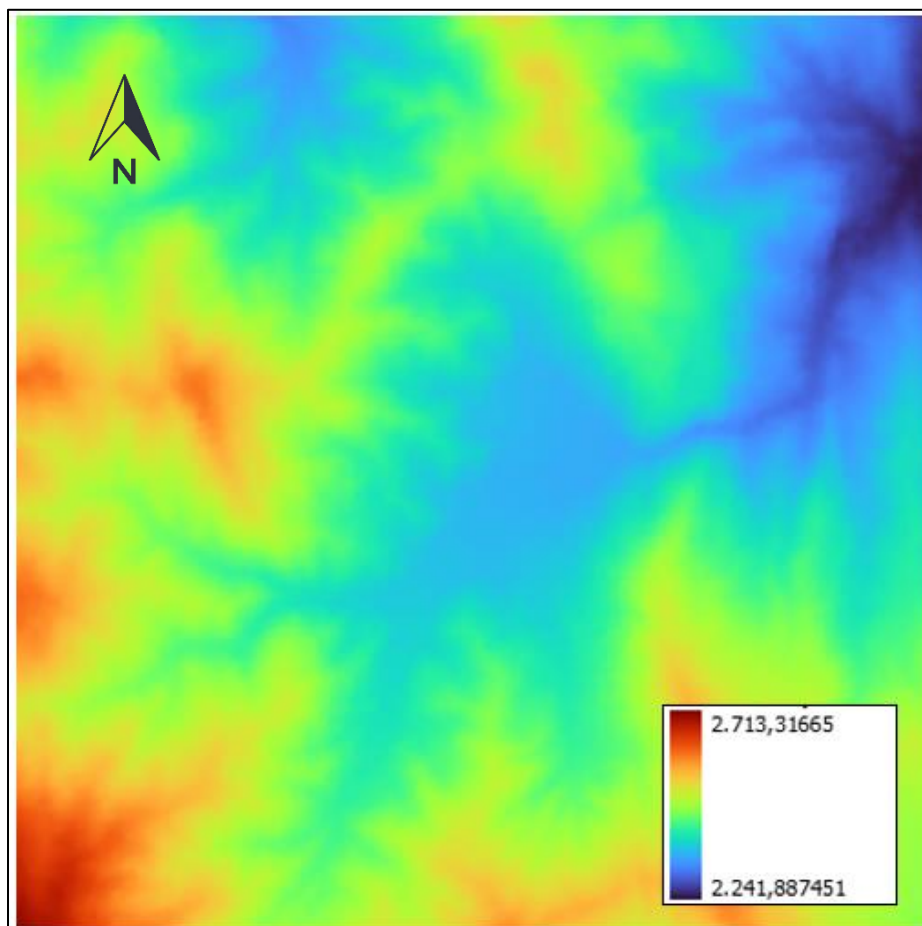
➤ **Información satelital**

Por último, se realizó una verificación del sistema de referencia del modelo digital de elevación obtenido a partir de los rásters, observándose que cumplía con los parámetros requeridos. Además, se hizo un cambio de color para una mejor visualización y comprensión del mismo: los colores azules representan las zonas bajas y los colores rojos las zonas altas. En este

análisis, se identificó que la zona más alta tiene un valor de altitud de 2.713 m.s.n.m y la zona más baja un valor de altitud de 2.241 m.s.n.m.

Figura 59

Modelo Digital de Elevación Satelital de la Zona Poligonal de Pamplona.

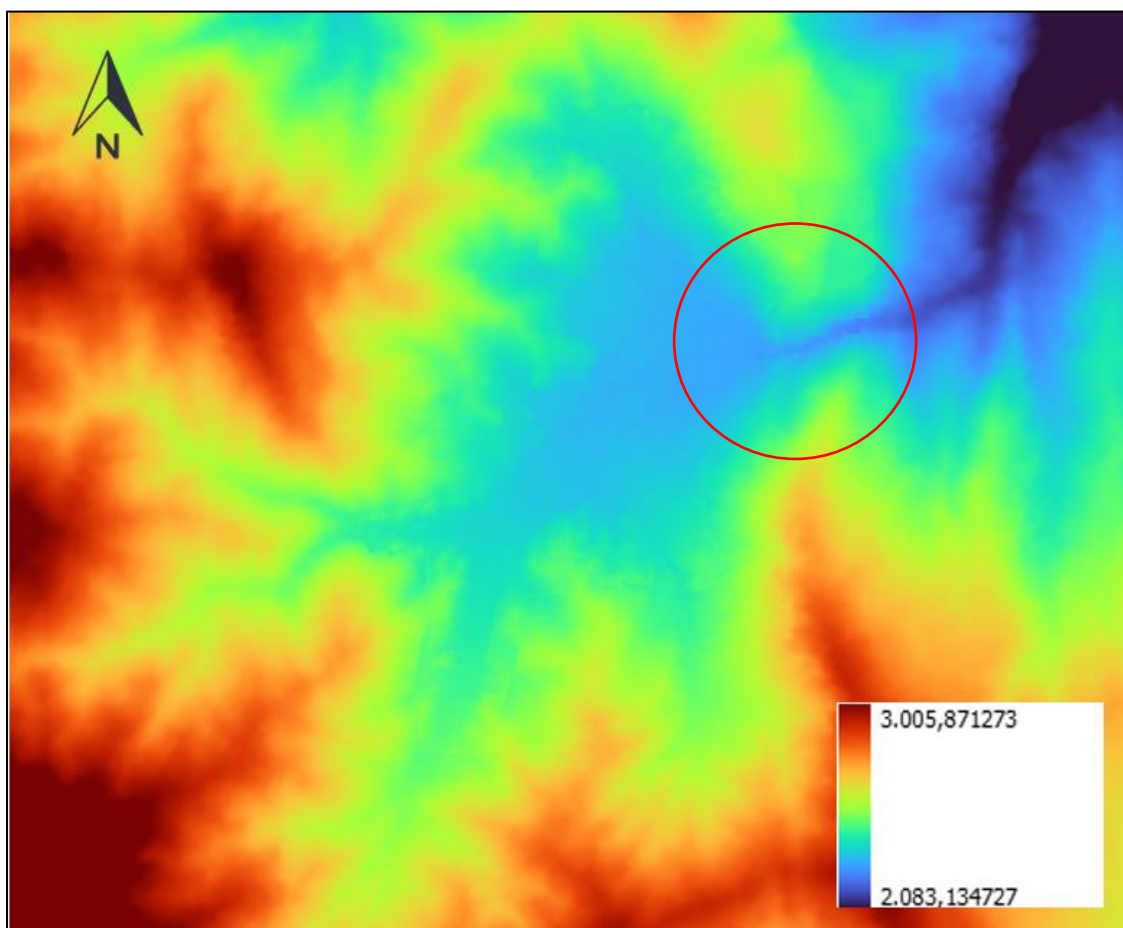


8.4 Combinación de los Modelos Digital de Elevación

Debido a que en el MDE realizado mediante fotogrametría por vuelos con dron le hacen falta ciertos sectores o barrios a los cuales no se fue posible acceder con el equipo por problemas de difícil acceso se planteó una combinación entre los dos MDE, este proceso se realizó en la herramienta QGIS siguiendo una serie de pasos ya realizados anteriormente al momento de crear el MDE con los rásters obtenidos de información satelital.

En primera instancia se usó la opción “crear ráster virtual” en la cual fueron seleccionados los dos MDE que se crearon por fotogrametría e información satelital, posterior a este paso se creó un nuevo MDE temporal al cual, después de una verificación se notó la necesidad de realizar una reproyección, con la opción “Combar”, se reproyectó el ráster al sistema de referencia CTM 12 del cual se obtuvo el siguiente MDE.

Figura 60
Combinación del MDE por Fotogrametría y Satelital.

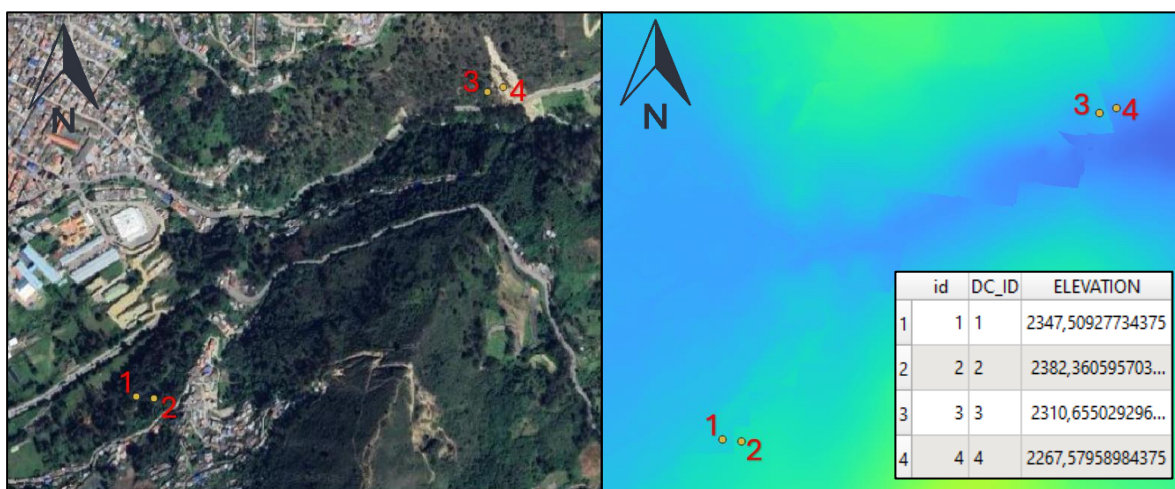


De la figura anterior se pudo apreciar que hay variaciones bruscas de nivel en zonas cercanas las cuales no son normales, se realizó una verificación realizando una asignación de 4 puntos de muestreo a los cuales se les extrajo la altura con la utilización del MDE como se observa en la siguiente figura, de la cual, se encontró que la variación de los niveles en 5 metros

aproximados de distancia entre los puntos fue alrededor de 30 m de altura, con base a esto se toma la decisión de no usar este MDE debido a estas discrepancias de elevación y usar el MDE satelital debido a que es el más completo y tiene una buena resolución por pixel.

Figura 61

Obtención de Elevación en 04 Puntos de Muestreo.



8.5 Conclusiones y Recomendaciones del Objetivo

Actualmente, no existe un modelo digital de elevación (MDE) que contemple todo el casco urbano de Pamplona. Es crucial desarrollar un MDE integral que cubra el casco urbano y se mantenga en continua actualización, especialmente en áreas de expansión. La precisión de este modelo depende en gran medida de la correcta ubicación de los puntos geodésicos del IGAC, lo cual es esencial para una georreferenciación eficiente y precisa, facilitando así la planificación y ejecución de proyectos de infraestructura.

La implementación de drones y tecnología de fotogrametría permitió obtener imágenes aéreas de alta resolución, facilitando la creación de un modelo digital de elevación (MDE) detallado para el casco urbano del municipio de Pamplona. A pesar de desafíos como las condiciones climáticas, el uso de parámetros de vuelo específicos y software avanzado como DJI GO 4 y Agisoft Metashape resultó en la generación de una nube de puntos precisa y

georreferenciada. Esto garantizó una cobertura adecuada y un MDE que refleja con precisión la topografía del terreno, esencial para el diseño de infraestructuras como el acueducto en zonas montañosas.

La combinación de fotogrametría con drones y datos satelitales demostró ser una estrategia efectiva para superar las limitaciones de acceso en ciertas áreas del municipio. Mientras que las imágenes capturadas por drones proporcionaron un nivel de detalle alto en áreas accesibles, los rásters satelitales completaron la información en zonas de difícil acceso. La unificación de estos datos mediante herramientas como QGIS permitió obtener un MDE integral que abarca tanto el casco urbano como las expansiones recientes, garantizando así una visión completa y precisa del terreno.

Para asegurar la continuidad y actualización precisa de los datos topográficos, se recomienda la implementación de un Sistema de Información Geográfica (GIS). Este sistema permitirá gestionar, analizar y visualizar los datos obtenidos de manera centralizada, facilitando la planificación y ejecución de proyectos de infraestructura, como el acueducto. Además, es crucial seguir los manuales de Agisoft Metashape si se trabaja con esta herramienta, específicamente el "Agisoft Metashape User Manual - Professional Edition, Version 2.1", para una correcta aplicación de la metodología fotogramétrica. Esto garantizará la obtención de datos precisos y la generación de un MDE de alta calidad. Capacitar a los operarios en el uso de GIS y en las directrices de Agisoft Metashape asegurará que los datos sean actualizados y mantenidos de manera continua, proporcionando una base sólida para futuros proyectos y el mantenimiento de infraestructuras críticas.

9 Construcción de Modelo Hidráulico

Con los dos caudales medios diarios, se establecieron los siguientes escenarios para su evaluación: el primer escenario corresponde a los caudales medios diarios calculados mediante el método teórico, mientras que el segundo escenario se basa en los datos analizados a partir de los consumos obtenidos del Sistema Único de información (SUI).

Con esta información, se tomó la decisión de proceder con la construcción del modelo hidráulico de la red de acueducto utilizando el complemento QWATER del software QGIS. Este modelo integrará los datos teóricos calculados y los patrones de funcionamiento de las plantas Cariongo y Monteadentro, lo que permitirá simular el comportamiento de la red en periodo extendido en la herramienta EPANET.

9.1 Modelo Hidráulico en QWATER y QGISRED

Utilizando la información disponible del sistema de acueducto, se procedió a crear un modelo hidráulico inicial en QGIS con la ayuda del complemento QWATER y QGISRED. Este proceso se dividió en tres etapas principales: la creación de nodos, el trazado de las tuberías y la parametrización de las características esenciales del sistema. Estas actividades nos proporcionaron un modelo georreferenciado inicial, el cual nos permitirá realizar modificaciones para lograr una simulación más precisa del sistema real.

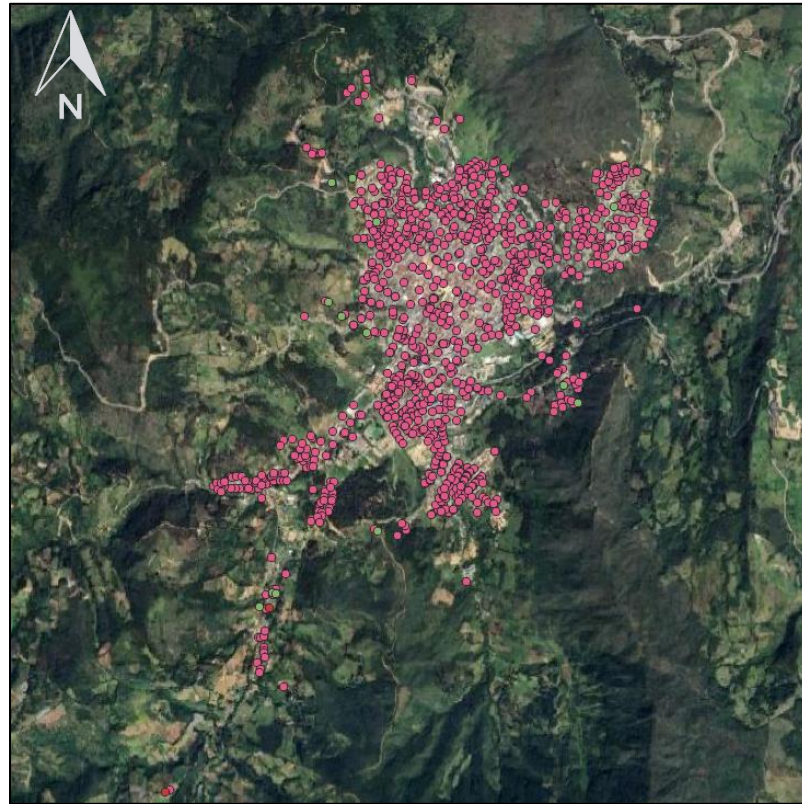
9.1.1 Creación de Nodos

Utilizando el plano actualizado del sistema de acueducto del casco urbano de Pamplona, se procedió a crear los nodos necesarios en la herramienta QGIS. Se crearon capas separadas para los elementos tipo "punto", como los nodos, tanques y reservorios. Durante la creación de los nodos, se tuvieron en cuenta los cambios de diámetro, material e intersección de tuberías. Es

importante destacar que la creación de estos elementos es fundamental para lograr una modelación precisa y correcta.

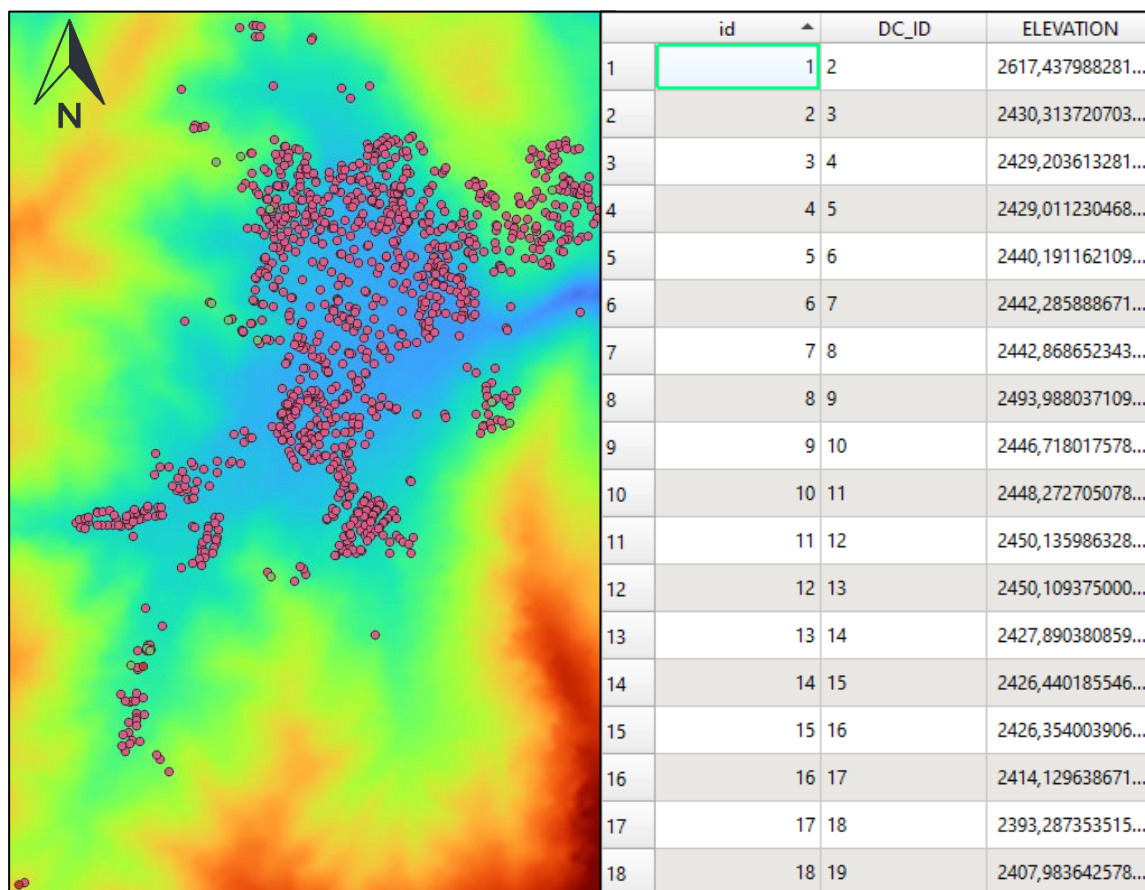
Figura 62

Creación de Nodos en la Herramienta QGIS.



Luego de la creación de los puntos, se procedió a extraer la elevación para cada uno de ellos, utilizando el Modelo Digital de Elevación (MDE) empleado en el estudio. Este proceso se realizó para los 1176 elementos generados, los cuales obtuvieron de manera satisfactoria su elevación, garantizando que los datos estuvieran correctamente alineados con las características topográficas del área. Esta información es clave para asegurar que el modelo refleje de manera precisa el terreno, facilitando su uso en análisis posteriores.

Figura 63
Elevación en Algunos Nodos del Sistema de Acueducto.

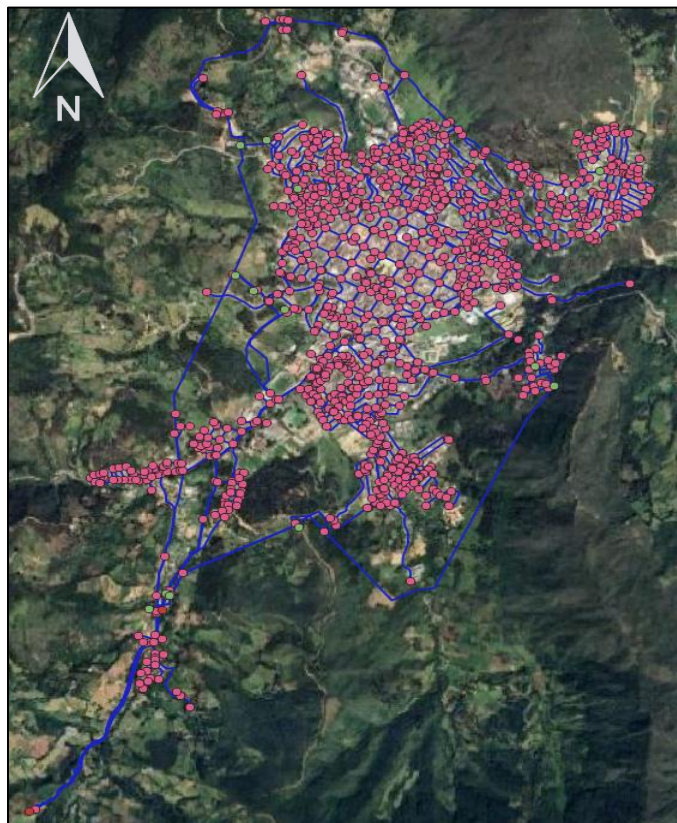


9.1.2 Trazado de tuberías

Una vez se crearon los puntos correspondientes a los nodos, tanques y reservorios, se procedió al trazado de las tuberías georreferenciadas que conectan estos elementos. Es crucial conocer el sentido del flujo, ya que el sistema de acueducto opera por gravedad. Además, se tuvieron en cuenta características importantes como el material y el diámetro de las tuberías. Todo este proceso contó con la guía del plano actualizado del sistema de acueducto del casco urbano de Pamplona, el cual nos proporcionó información precisa sobre la ubicación de las tuberías en la vía.

Figura 64

Trazado de la Red de Tuberías en el Sistema de Acueducto.



9.1.3 Parametrización de las Características del Sistemas

Con los nodos y tuberías creados y conectados, se procede a ingresar los parámetros iniciales necesarios en QWATER. Estos parámetros incluyen la población inicial y final, diámetro mínimo y profundidad de las tuberías, dotación bruta y factores de mayoración. Se realizaron dos escenarios de modelación para analizar el sistema de acueducto. En el primer escenario, se cargó en la red un caudal correspondiente al calculado teóricamente en la sección 7.5, este caudal es el correspondiente al consumo por tipos de uso del suelo en el área urbana de Pamplona. En el segundo escenario, se planteó el sistema con una demanda base proporcional correspondiente a los valores de consumo reportados por EMPOPAMPLONA al Sistema Único de Información (SUI).

Figura 65
Parametrización del Modelo Hidráulico en QWATER

Data	Pipes	Calculations Options
Initial Population	41680	Per capita (L/cap.day) 160
Final Population	44910	k1 (Max. Day) 1
Minimum Diameter (mm)	15	k2 (Max. hour) 1
Minimum covering (m)	1	Attendance Coefficient 1.0
		Calculated Initial Flow 77.185
		Calculated Final Flow 83.167
Template (INP file) Becerra/AppData/Roaming/QGIS/QGIS3/profiles/default/python/plugins/QWater/etc/template_d-w_ips.inp Select		

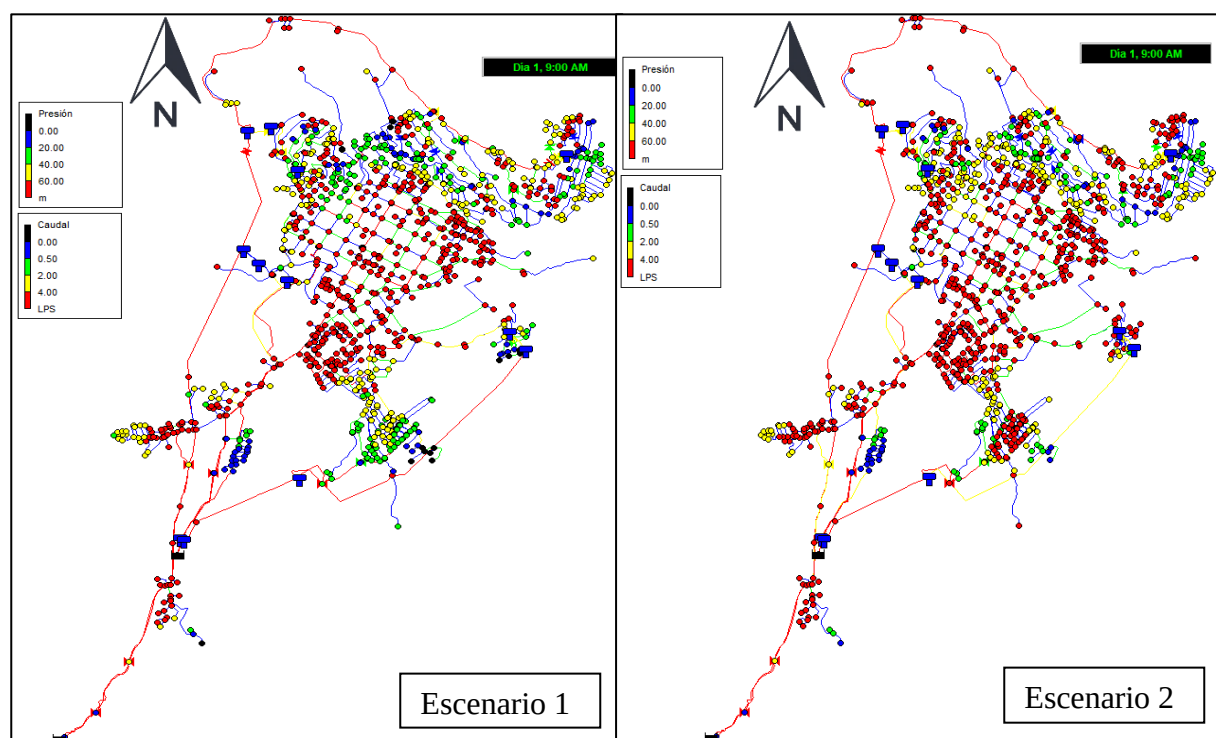
Data	Pipes	Calculations Options
Initial Population	41680	Per capita (L/cap.day) 120
Final Population	44910	k1 (Max. Day) 1
Minimum Diameter (mm)	15	k2 (Max. hour) 1
Minimum covering (m)	1	Attendance Coefficient 1.0
		Calculated Initial Flow 57.889
		Calculated Final Flow 62.375
Template (INP file) ers/sergi/AppData/Roaming/QGIS/QGIS3/profiles/default/python/plugins/QWater/etc/template_d-w_ips.inp Select		

Es importante destacar que para el cálculo hidráulico de este modelo se trabajó con la ecuación de Hazen-Williams. Para garantizar la precisión de los resultados, se consultaron las propiedades relevantes, como la rugosidad de las tuberías, según los datos proporcionados por este autor. Además, los valores de los factores de mayoración se establecieron en 1 para asegurar que la herramienta trabaje con el caudal medio diario de manera adecuada.

9.2 Simulación en Periodo Extendido

Con los documentos “.INP” exportados hacia EPANET del paso anterior, se les introdujeron a los nodos los datos correspondientes a los patrones de demanda de la planta Cariongo y Monteadentro según corresponda, estos patrones fueron obtenidos en la sección 7.6. Posteriormente, se realizaron las simulaciones en periodo extendido, es decir, en un periodo de 24 horas comprendido desde las 01:00 a.m. hasta las 24:00 p.m., en esta simulación se pudieron obtener presiones, velocidades, caudales y producciones de los diferentes elementos que conforman la red, estos valores fueron analizados para la realización de correcciones en el sistema.

Figura 66
Modelo Teórico (E.1) y por Consumo (E.2) en Periodo Extendido.



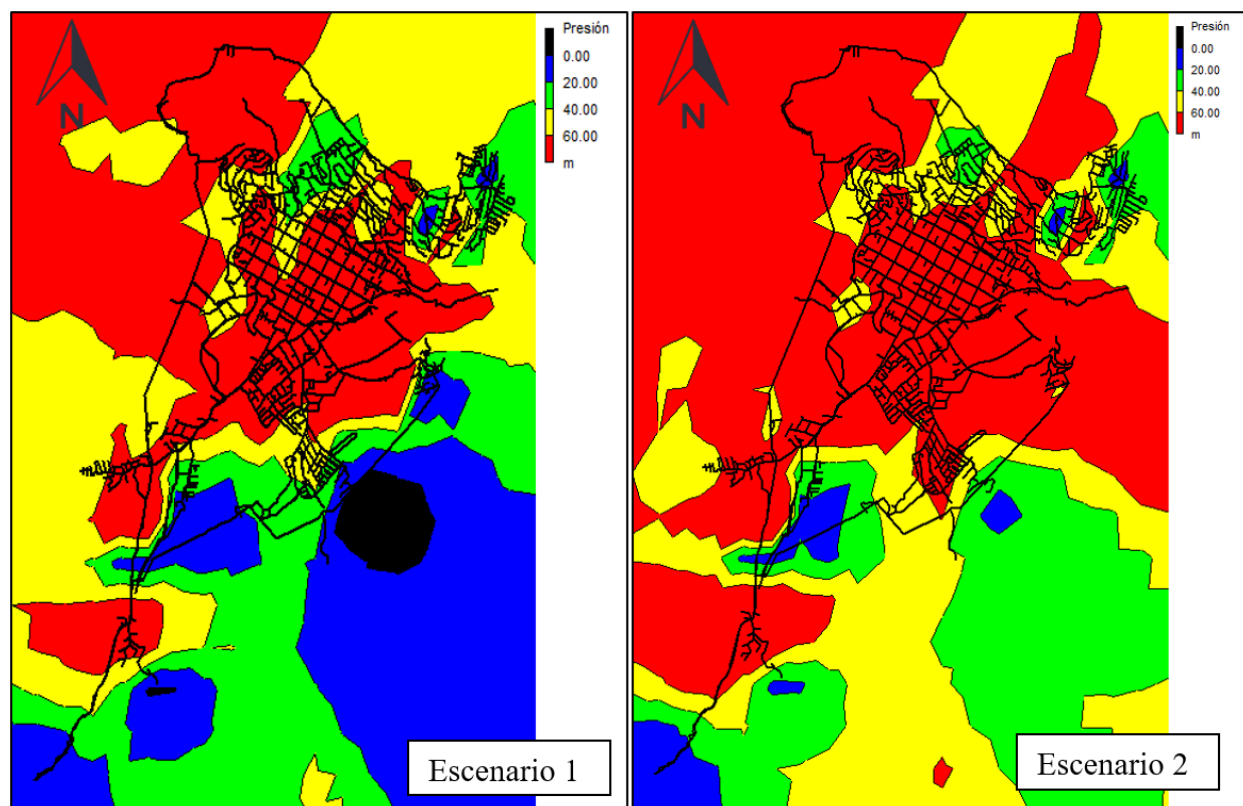
Los dos modelos hidráulicos tienen comportamientos distintos a lo largo de la simulación, esto principalmente debido a la diferencia entre las demandas presentes en los nodos, estas diferencias varían principalmente al evaluar las presiones en los puntos.

9.3 Comparativa Entre Modelos

Para poder optar por el uso de uno de los dos modelos se compararon características como las presiones y los caudales de producción que generan las plantas de tratamiento a lo largo de la simulación, es importante aclarar que la única diferencia entre estos dos modelos es la demanda cargada en los nodos.

En primera instancia se realizó la comparativa de presiones en los nodos para poder determinar el funcionamiento del sistema.

Figura 67
Mapas de Contorno de Presiones.

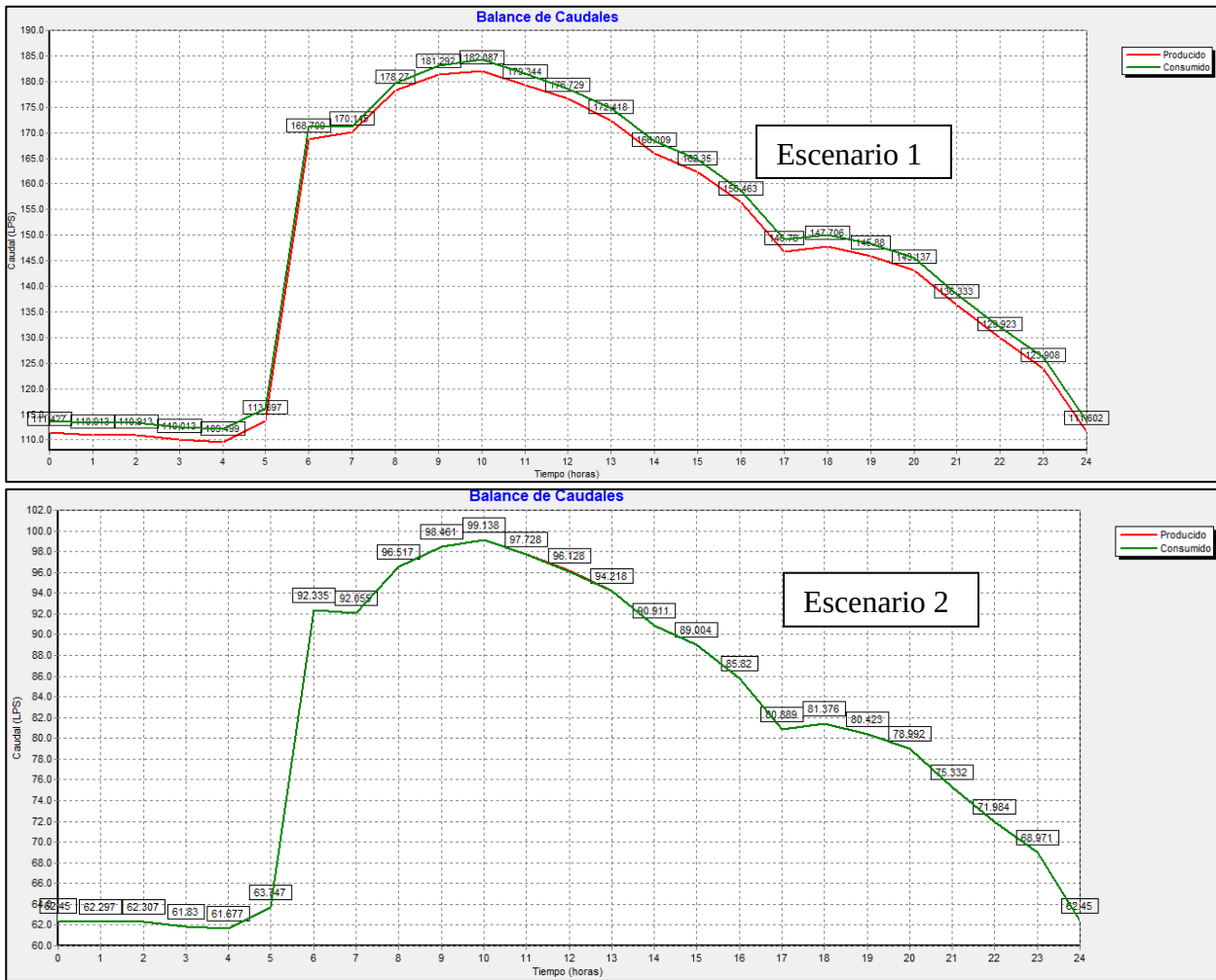


Observamos que en los escenarios se están presentando presiones superiores a 60 mca, que es la presión máxima permitida según la norma. Esto puede considerarse normal debido a que los modelos no han sido calibrados con las presiones adecuadas para los nodos de control. Sin embargo, es importante destacar que en el escenario 1 se están registrando presiones negativas, lo

cual no debería ocurrir debido a que las plantas de tratamiento se encuentran a una altura considerablemente superior a estas zonas y deberían ser capaces de abastecerlas de manera adecuada.

Por otra parte, se realizó la comparativa con el balance de los caudales del sistema, esta gráfica muestra el caudal producido por las plantas y el caudal consumido por los nodos al largo de la simulación teniendo en cuenta los patrones de consumo atribuidos a ellos, a continuación, se muestra una gráfica en la que se observar los balances de caudal de los dos escenarios.

Figura 68
Comparativa de Balance de Caudales en los Dos Escenarios.



Como se puede observar en el primer escenario, en comparación con el segundo escenario, no se alcanza un equilibrio en los caudales, ya que la cantidad de agua producida no coincide con la cantidad consumida. Esto puede deberse a diversas razones dentro del sistema, lo cual resulta en un funcionamiento poco eficiente.

Además, al comparar los valores de caudales en ambos escenarios con el caudal medio producido por las plantas, el cual se encuentra en la sección 7.4 y es de 132,46 l/s, se puede apreciar que en el escenario 1 se presenta una producción elevada. Durante la hora de máximo consumo, el caudal alcanza aproximadamente los 182 l/s, el cual actualmente las plantas no pueden abastecer. En cambio, en el escenario 2, durante su hora de máximo consumo, el caudal es aproximadamente de 98 l/s, valor que se encuentra por debajo del caudal de producción actual de las plantas.

Como resultado de la comparativa se concluyó la utilización del escenario 2 pues tiene un caudal óptimo y más similar al que produce el sistema actualmente, además, se tiene un mejor comportamiento de la simulación en periodo extendido.

9.4 Conclusiones y Recomendaciones del Objetivo

El objetivo principal de este proyecto, que consistía en construir un modelo hidráulico de la red de distribución de agua potable utilizando el software EPANET y complementos GIS, se completó satisfactoriamente. Como resultado, se obtuvo un modelo hidráulico del sistema de acueducto del casco urbano del municipio de Pamplona. Este modelo incorpora todas las características de los elementos reales, incluyendo diámetros de tuberías, rugosidades, materiales, alturas en los nodos, tanques y plantas de tratamiento, dimensiones en los tanques que aseguren el volumen real, cámaras de quiebre, válvulas reguladoras de presión y de corte. Además, el modelo contempla dos zonas de expansión que no estaban incluidas en el plano actual del sistema de

acueducto, lo que refuerza su validez y confiabilidad como base estable para futuras expansiones y análisis.

Aunque inicialmente no se disponía de información crucial, como un modelo digital de elevación, datos sobre los tanques de almacenamiento, un plano detallado y confiable del sistema de distribución de agua, y los consumos actuales del sistema, toda esta información fue obtenida progresivamente durante el desarrollo del proyecto. Esto permitió la creación de un modelo hidráulico preciso y confiable, que cumple con los requisitos establecidos y ofrece una herramienta robusta para la gestión del sistema de distribución de agua potable.

Se recomienda mejorar la calidad de la información utilizada en el modelo hidráulico. Aunque la información actual es de buena calidad, su precisión podría incrementarse al incorporar datos en tiempo real o lo más actualizados posible. Esto permitiría que el modelo refleje de manera más fiel la realidad del sistema de distribución de agua, mejorando su utilidad para la toma de decisiones.

Además, es crucial mantener un almacenamiento sistemático de versiones anteriores del modelo cada vez que se realicen cambios significativos. Tener una versión de respaldo permite regresar a un estado previo en caso de que se presenten errores, garantizando así la continuidad operativa del sistema sin interrupciones graves.

En los casos en que no se disponga de un archivo inicial confiable en formato shapefile o “.inp” de la red, se recomienda crear manualmente el sistema. Este enfoque facilita una mejor comprensión del funcionamiento y operación del modelo, asegurando que todos los detalles sean considerados de manera precisa.

Es importante seguir los lineamientos establecidos por manuales técnicos clave. Entre ellos, se destacan el manual de QWater (Sousa Moreira, 2018b), el manual de QGISRed (Martínez Alzamora, 2022), y el manual de EPANET (Rossman et al., 2021). Estos documentos proporcionan directrices esenciales que deben ser observadas para asegurar la precisión y efectividad del modelo.

También se recomienda unificar el sistema de georreferenciación utilizado en el proyecto. Es fundamental que el sistema de referenciación de los elementos y el sistema del modelo digital de elevación (MDE) sean compatibles para evitar errores en la interpretación de los datos. Para ello, se sugiere utilizar el sistema MAGNA-SIRGAS 2018 / Origen-Nacional EPSG:9377.

El uso conjunto de los complementos QWater y QGISRed es altamente recomendable para la creación y parametrización del modelo hidráulico inicial. Estos complementos se complementan entre sí, optimizando el proceso de modelación y mejorando la calidad del modelo final.

Es esencial tener especial cuidado en la creación, orden, sentido y ubicación de todos los elementos dentro del modelo. La precisión en estos aspectos es determinante para garantizar la calidad de los resultados obtenidos del modelo hidráulico.

Finalmente, se recomienda utilizar la herramienta EPANET para la visualización y análisis detallado de los resultados del modelo hidráulico. EPANET permite una apreciación más clara y comprensible de los resultados, facilitando la realización de ajustes y modificaciones sin la necesidad de intervenir directamente en el modelo dentro de QGIS. Esto optimiza significativamente el proceso de análisis, ya que ofrece una plataforma dedicada a la simulación hidráulica. Además, la integración entre QGIS y EPANET no solo mejora la eficiencia del flujo de trabajo, sino que también permite realizar pruebas de diferentes escenarios en el sistema hidráulico de manera rápida, precisa y con un impacto directo en la toma de decisiones.

10 Calibración del Modelo Hidráulico

Este proceso implica ajustar parámetros específicos para obtener valores que se aproximen a los observados en la realidad. Para lograrlo, se propuso variar la rugosidad de las tuberías como una de sus propiedades clave, determinar un valor correspondiente a las pérdidas menores en el sistema debido a los accesorios, y calcular un coeficiente emisor por nodo que refleje las pérdidas por fugas en el sistema.

10.1 Variación de la Rugosidad en las Tuberías

La determinación de los valores de rugosidad para los distintos materiales se realizó utilizando la Tabla 1. Se establecieron los valores de rugosidad: cuando las tuberías están completamente nuevas y cuando alcanzaban 40 años. Esto se hizo considerando que la mayoría de las tuberías del sistema de acueducto se encuentran en este grado de antigüedad, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 27
Variación de la Rugosidad por Material según los Años de Uso.

Material	Rugosidad C_{HW}	
	Materiales nuevos	Edad 40 [Años]
PVC	150	120
Hierro Fundido	130	83
Hierro Galvanizado	120	100
Asbesto Cemento	150	120
Aluminio Extruido	150	130

Nota: Adaptado de Piping Designer, (2019)

Como se puede observar, los valores de rugosidad para el año 40 muestran un cambio considerablemente en comparación con los valores iniciales, lo que en el estudio puede establecer

el deterioro debido al uso. Esto implica que las pérdidas por fricción en las tuberías también se incrementan con el tiempo, afectando el rendimiento del sistema.

10.2 Obtención del Coeficiente de Pérdidas Menores por Accesorios

A partir de los coeficientes recopilados en la Tabla 2, se procedió a realizar un cálculo detallado de la sumatoria total de los coeficientes asociados a todos los accesorios presentes en cada tramo del sistema de acueducto. Este proceso fue llevado a cabo tomando como referencia el plano completo del sistema, lo que permitió identificar con precisión la ubicación y características de cada uno de los tramos y sus respectivos accesorios.

Una vez obtenida la sumatoria de los valores de coeficiente para cada tramo, se procedió a calcular el coeficiente correspondiente para un metro de longitud considerando la totalidad de los tramos presentes en el sistema de distribución de agua. Como resultado de este proceso de cálculo, se obtuvo un valor de K_m de 0,01085424 por metro. Este valor de K_m es de gran relevancia, ya que representa el máximo permitido que se puede asignar a las tuberías en términos de pérdidas provocadas por los accesorios, y constituye una referencia fundamental para asegurar que las pérdidas dentro del sistema se mantengan dentro de los parámetros aceptables para su operación eficiente.

10.3 Cálculo del Coeficiente de Fugas

Para calcular el coeficiente de fugas en el sistema, se empleó la ecuación 32. Para ello, fue necesario establecer ciertos parámetros iniciales, eligiéndose los correspondientes a las condiciones observadas a las 10 a.m. En ese momento, se determinó el caudal promedio total real suministrado al sistema de acueducto, el coeficiente de consumo en un instante t , la sumatoria de las demandas cargadas en los nodos y el valor promedio de la presión en todo el sistema para ese

mismo instante. Estos parámetros fueron fundamentales para asegurar la precisión en el cálculo del coeficiente de fugas.

$$132,40 \frac{l}{s} = 1,18 * 80,99 \frac{l}{s} + C_{e,global} * [57,166 m.c.a.]^{0.5}$$

Posterior al ingreso de las variables a la fórmula se realizó un despeje del $C_{e,global}$, del cual se obtuvo el valor de:

$$C_{e,global} = 4,87 l/s(mca)^{0.5}$$

Luego, teniendo el valor del coeficiente global de fugas se realizó el cálculo del coeficiente unitario del coeficiente de fugas para cada nodo, teniendo en cuenta que en el modelo hidráulico hay un total de 1218 nodos, este proceso se realizó siguiendo la ecuación 28.

$$C_{e,i} = \frac{4,87 l/s(mca)^{0.5}}{1176}$$

Como resultado se obtuvo que para cada nodo se tiene un valor máximo correspondiente a fugas de $0,00414 l/s(mca)^{0.5}$.

10.4 Iteración del Coeficiente de Fugas

Con los parámetros necesarios para la calibración del sistema, se realizó un proceso iterativo empleando un código en Python, que hace uso de la librería WNTR. Este código ajusta de manera progresiva el valor del coeficiente de fugas hasta encontrar el valor óptimo, asegurando que el RMSE obtenido durante el proceso sea inferior al 5%. Los valores óptimos del coeficiente emisor para cada nodo se registraron en un documento llamado “resultados iteración” ver Figura 69, donde se detallan los valores más adecuados para cada caso. Estos resultados serán aplicados a los nodos, garantizando que cumplan con los requisitos establecidos. Los detalles de la iteración y los coeficientes emisores ajustados se encuentran en el documento “.txt” incluido en la lista de apéndices (véase apéndice K).

Los procesos anteriormente descritos se pueden resumir en los siguientes pasos, estos son los que realiza el código creado en manera secuencial:

➤ **Importar Librerías:**

- Se importan las librerías necesarias: `wntr` para la simulación de redes hidráulicas, `numpy` para operaciones matemáticas, `matplotlib` para gráficos, `sklearn.metrics` para métricas de error, y `os` para manejo de archivos.

➤ **Definir Rutas de Archivos:**

- Se define la ruta del archivo de entrada “.inp” y la ruta para guardar los resultados en un archivo de texto.

➤ **Cargar el Modelo Hidráulico:**

- Se intenta cargar el modelo hidráulico desde el archivo “.inp”. Si ocurre un error durante la carga, se lanza una excepción.

➤ **Definir Caudales y Presiones Observadas:**

- Se especifican los caudales y presiones observadas a las 10 a.m. para comparación durante la simulación.

➤ **Definir Rango de Coeficientes Emisores:**

- Se define un rango de valores para el coeficiente emisor, desde 0 hasta 0,01 en pasos de 0,0002.

➤ **Obtener Nodos y Reservorios/Tanques:**

- Se obtienen los nodos con patrones de demanda específicos y se identifican reservorios y tanques. Se almacenan en listas separadas para su posterior uso.

➤ **Definir Funciones para Métricas:**

- Se definen funciones para calcular el RMSE (Root Mean Squared Error) y el R^2 (Coeficiente de Determinación) entre los valores observados y simulados.

➤ **Optimizar el Coeficiente Emisor para Nodos con Patrón 1:**

- Se itera sobre el rango de coeficientes emisores, ajustando el coeficiente para nodos con patrón 1 y realizando la simulación.

- Se calcula el RMSE para los caudales simulados y se guarda el mejor coeficiente si el RMSE está dentro del rango aceptable.

➤ **Optimizar el Coeficiente Emisor para Nodos con Patrón 2:**

- Se repite el proceso para los nodos con patrón 2, ajustando el coeficiente emisor y calculando el RMSE para los caudales.

➤ **Configurar los Coeficientes Emisores Finales:**

- Se ajustan los coeficientes emisores finales en la red hidráulica con los mejores valores encontrados para ambos patrones.

➤ **Ejecutar la Simulación Final:**

- Se realiza la simulación final con los coeficientes emisores optimizados y se extraen las presiones simuladas.

➤ **Calcular RMSE y R^2 para Presiones:**

- Se calculan las métricas de error (RMSE y R^2) para las presiones simuladas en comparación con las observadas.

➤ **Guardar y Mostrar Resultados:**

- Se guardan los resultados en un archivo de texto y se imprimen en pantalla.
- Se grafican las presiones observadas versus las simuladas para visualización.

Figura 69

Resultados de la Iteración de Coeficiente Emisor.

```
resultados.txt
273 Caudal Observado Tuberia 1183: 40.11
274 Caudal Promedio Simulado Tuberia 1183: 37.22371292114258
275 RMSE Caudal Tuberia 1183: 2.89
276
277 Coeficiente emisor: 0.0018
278 Caudal Observado Tuberia 1183: 40.11
279 Caudal Promedio Simulado Tuberia 1183: 37.98960494995117
280 RMSE Caudal Tuberia 1183: 2.12
281
282 Coeficiente emisor: 0.0020
283 Caudal Observado Tuberia 1183: 40.11
284 Caudal Promedio Simulado Tuberia 1183: 38.7499885559082
285 RMSE Caudal Tuberia 1183: 1.36
286
287 Coeficiente emisor: 0.0022
288 Caudal Observado Tuberia 1183: 40.11
289 Caudal Promedio Simulado Tuberia 1183: 39.50363540649414
290 RMSE Caudal Tuberia 1183: 0.61
291
292 Coeficiente emisor: 0.0024
293 Caudal Observado Tuberia 1183: 40.11
294 Caudal Promedio Simulado Tuberia 1183: 40.247528076171875
295 RMSE Caudal Tuberia 1183: 0.14
296
297 RMSE de caudales para la tubería 1183 dentro del 0.5%. Deteniendo la variación del coeficiente emisor.
298 Mejor coeficiente emisor para caudal en la tubería 2439: 0.0090
299 RMSE para caudal en la tubería 2439: 0.37
300
301 Mejor coeficiente emisor para caudal en la tubería 1183: 0.0024
302 RMSE para caudal en la tubería 1183: 0.14
303 Simulación final completada con éxito.
304
305 RMSE de presiones: 8.44
306 R^2 de presiones: 0.92
```

Como resultado, se determinó que los nodos asociados a la tubería 1183, correspondiente a la PTAP Monteadentro, se cargarán con un coeficiente emisor de $0,0024 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$. Por otro lado, los nodos vinculados a la tubería 2439, que corresponden a la PTAP Cariongo, se cargarán con un coeficiente emisor de $0,009 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$.

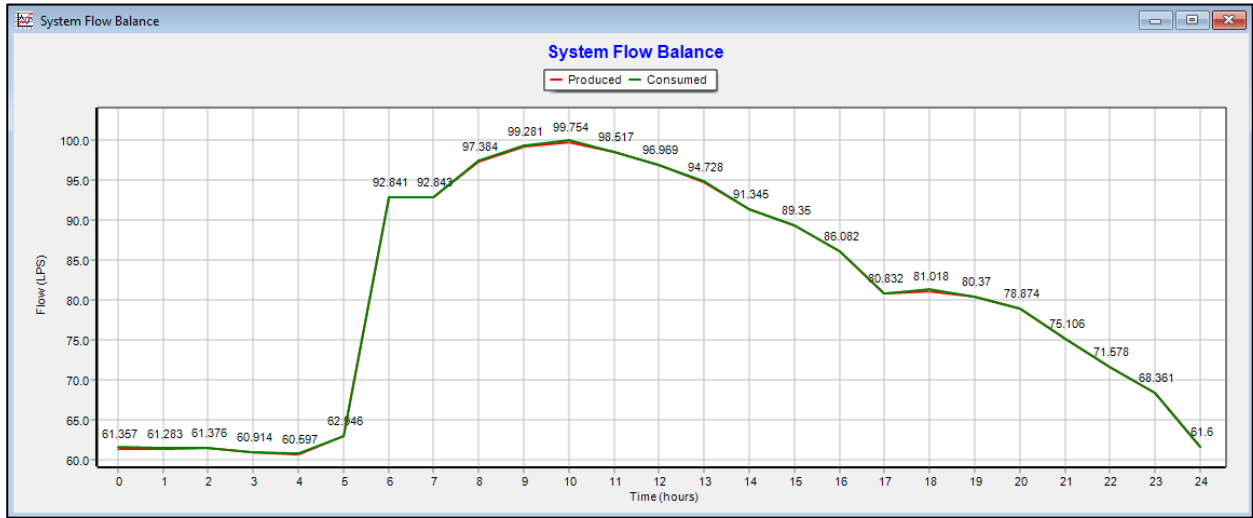
10.5 Resultados de la Calibración

La calibración del sistema de debe a la discrepancia entre los valores obtenidos mediante mediciones en el sistema y los valores simulados en el modelo hidráulico. Se encontraron diferencias significativas en los valores de caudales observados y los simulados, de igual forma, se encontraron diferencias en las presiones observadas y simuladas.

Como se observa en la siguiente figura se ve la gráfica de consumo y producción de caudal del modelo hidráulico simulado, al hacer la comparativa con el valor obtenido en la sección 7.3 de caudales promedio observados por planta de tratamiento o con el total de producción, se nota una diferencia significativa entre estos caudales, esto puede corresponder a pérdidas por fugas en las tuberías debido a que estas tienen hasta 40 años de antigüedad.

Figura 70

Balance de Caudales en Modelo Hidráulico No Calibrado.



Con la información anterior se puede hacer una comparativa inicial del valor de RMSE para los datos de caudales de producción observados y simulados, esto teniendo en cuenta la ecuación 33, con la cual obtendríamos la siguiente expresión.

$$RMSE_Q = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^1 (132,40 - 80,21)^2}{1}} \approx 52,19 \frac{l}{s}$$

Por lo tanto, el RMSE entre estos dos valores es aproximadamente 52,19 l/s.

Este valor no es aceptable pues, según (Zanfei et al., 2020), establecen que se considera que un RMSE menor al 5% es ideal, mientras que un RMSE entre 5% y 10% es aceptable.

10.5.1 Calibración de Caudales en el Sistema

Con la obtención de los parámetros necesarios se dio inicio al proceso de calibración, como objetivo principal se planteó la regulación de los caudales procedentes de las plantas hacia el sistema, es decir, la calibración de la producción y consumo en este, para esto, se les asignaron a todas las tuberías un valor de 0,8795, coeficiente de pérdidas menores por accesorios, posterior a eso, se inició el cargue de los nodos con un coeficiente de emisor que identifica las fugas debido a orificios y/o mala conexión entre tuberías, los nodos dependientes de la planta Monteadentro fueron cargados con un valor de $0,0024 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$, por otra parte, los nodos conectados a la planta Cariongo fueron cargados con un valor de $0,009 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$, con estos valores cargados en los nodos se notó el aumento del caudal producido, con ello el balance de caudales, teniendo un caudal media diario de aproximadamente 132,161 l/s.

Se observó que los valores del coeficiente emisor no corresponden exactamente a los calculados mediante la iteración en el código, pero se encuentran dentro del rango esperado. Esto se debe a que, al incorporar el valor de las pérdidas menores por accesorios, fue necesario reducir los coeficientes emisores.

Es importante destacar que los nodos conectados a la planta Cariongo presentan un coeficiente emisor mayor en comparación con los nodos conectados a la planta Monteadentro. Esto tiene sentido, ya que la zona abastecida por la planta Cariongo es más antigua, lo que implica mayores pérdidas por fugas.

Después de introducir los valores de pérdidas menores por accesorios y los coeficientes de fugas en el sistema, se realizó un análisis para verificar la precisión de los valores simulados comparándolos con los valores observados. Este proceso se llevó a cabo siguiendo la ecuación 33,

obteniendo así el valor correspondiente a la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para los caudales.

$$RMSE_Q = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^1 (132,40 - 132,161)^2}{1}} \approx 0,24$$

Por lo tanto, el RMSE entre estos dos valores es aproximadamente 0,24 l/s.

Teniendo en cuenta los parámetros descritos anteriormente, se puede concluir que el proceso de calibración del caudal en el modelo hidráulico es óptimo y adecuado pues se logró un valor menor al 5% entrando en el rango ideal.

Es importante destacar que, durante el proceso de calibración de los caudales, las demandas asignadas a los nodos se mantuvieron inalteradas. Esto se realizó con el propósito de preservar la consistencia en los valores de caudal y evitar posibles variaciones que pudieran distorsionar el comportamiento del modelo hidráulico. Manipular las demandas podría haber generado inconsistencias, como simulaciones inexactas de caudales que derivarían en presiones erróneas a lo largo de la red, afectando la precisión y confiabilidad del modelo. Mantener la integridad de los datos de demanda es esencial para obtener resultados realistas y representativos del sistema.

10.5.2 Calibración de Presiones en el Sistema.

El proceso de calibración de las presiones se realizó utilizando los valores de presión medidos en campo en 26 puntos distribuidos en diferentes sectores del casco urbano. A cada uno de estos valores se le asignó un nodo con un ID correspondiente en el modelo hidráulico, ubicado en el mismo lugar de la medición, para llevar a cabo la calibración. En la tabla siguiente se presentan los encabezados: "Número", que corresponde al número del piezómetro; "Ubicación",

que indica la ubicación del piezómetro; "ID", que es el identificador del nodo en el modelo; y "Valor", que representa la presión medida en campo, expresada en mca.

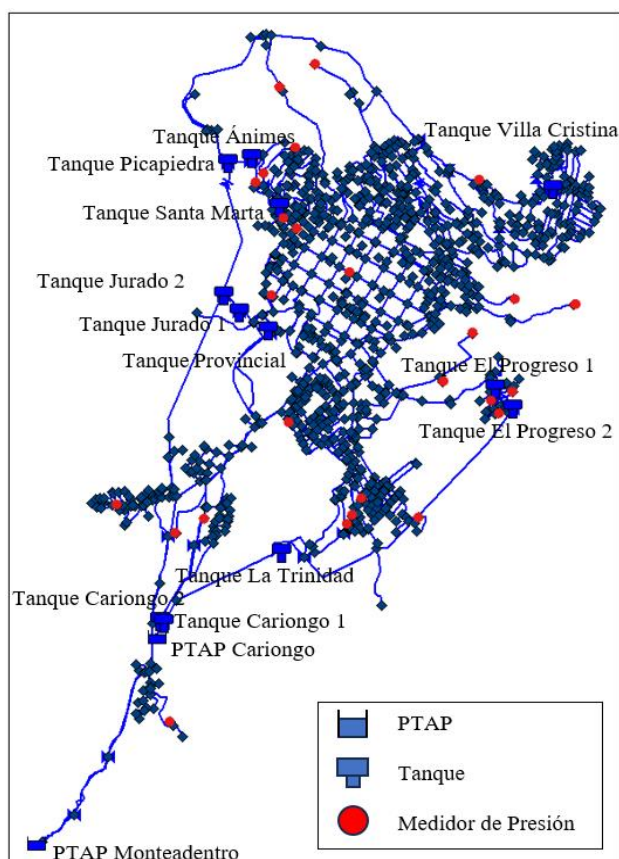
Tabla 28

Valores Observados de Presión en el Sistema.

Número	Ubicación	ID	Valor (mca)	Número	Ubicación	ID	Valor (mca)
1	Normal 1	1217	28.0	14	Nuevo Amanecer	755	29.4
2	Centro	532	63.0	15	Cinco Casas	764	56.0
3	Normal 2	1216	14.0	16	Santa Marta P. B.	547	49.0
4	Chíchira Z. B	676	59.5	17	EL Escorial	243	14.0
5	B. Esperanza	134	84.0	18	Barrios Unidos	233	63.0
6	Centro Acopio	406	105.0	19	San Pedro	248	35.0
7	Tinto Redondo	681	35.0	20	Las Colinas	317	24.5
8	Los Ánimes	758	42.0	21	Progreso P. Alta	798	14.0
9	El Buque	796	140.0	22	Progreso	417	35.0
10	Cristo Rey	962	28.0	23	Garabatos	411	35.0
11	Jurado	462	63.0	24	Matadero	407	84.0
12	Santa Marta P. A.	557	14.0	25	Cariongo	1091	35.0
13	Piscina	1219	35.0	26	Espíritu Santo	40	59.5

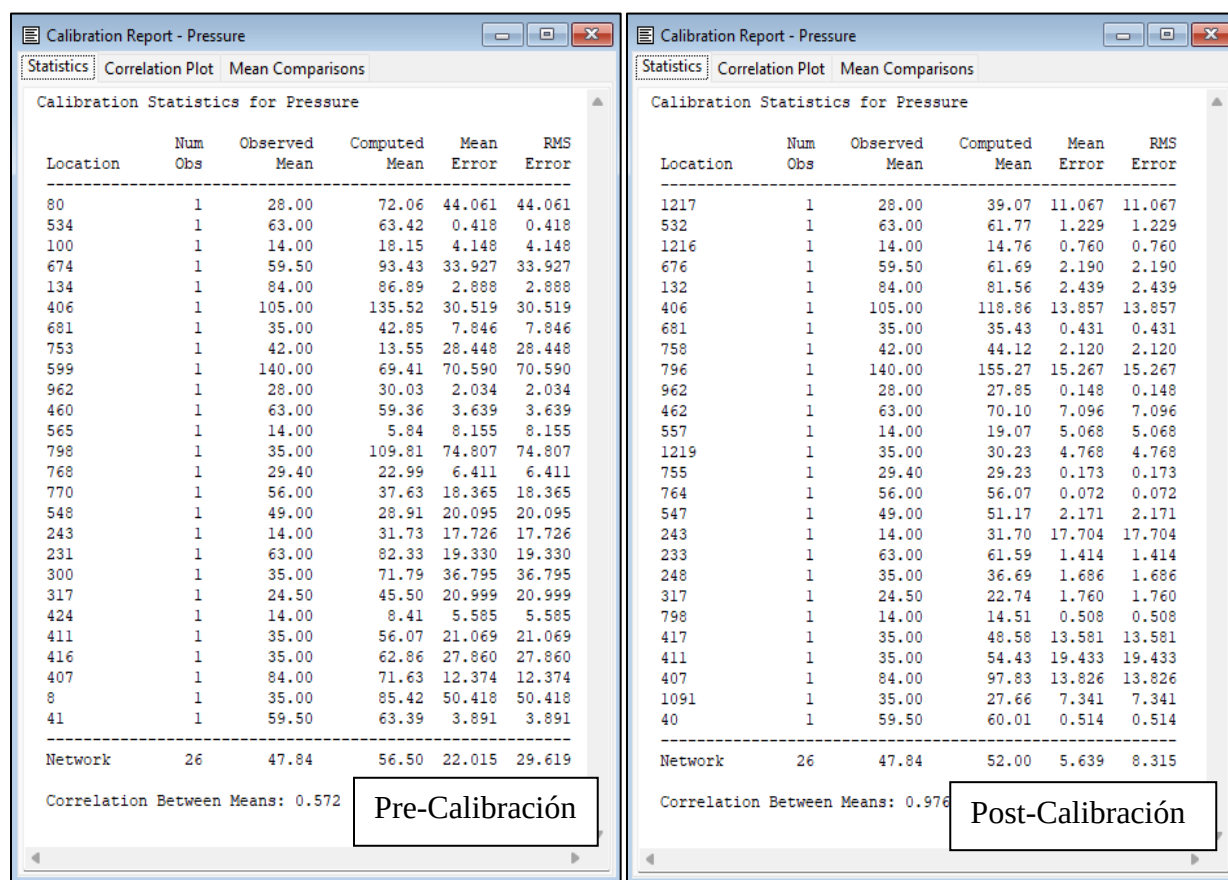
Figura 71

Puntos de Presión en el Sistema.



Con estos valores establecidos y asignados a nodos específicos, se procedió a ajustar la rugosidad de las tuberías. Junto con los valores asignados a las pérdidas menores por accesorios, se logró estabilizar las presiones observadas y simuladas. Para validar estos resultados, se calculó el RMSE de las presiones, siguiendo la ecuación 32. Los valores del RMSE fueron obtenidos directamente de la herramienta EPANET 2.2, y los resultados son los siguientes.

Figura 72
Comparativa Pre y Post Calibración de Presiones en Epanet 2.2.

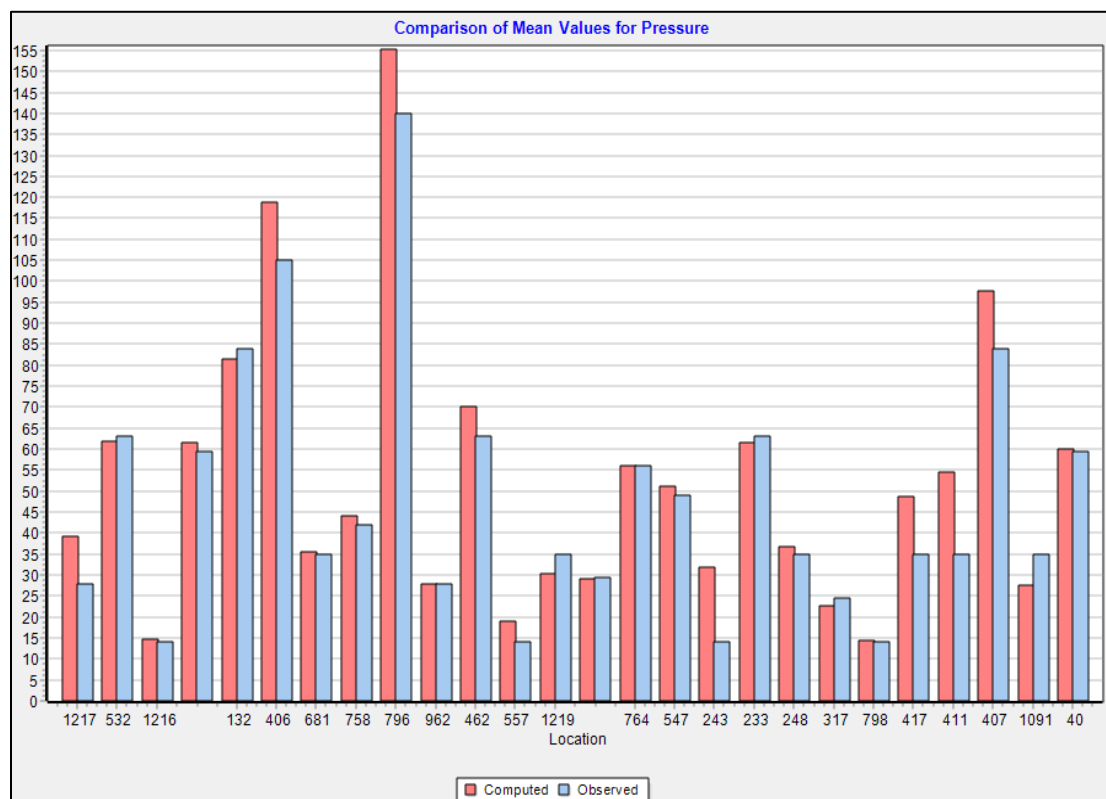


Como se puede observar, fue necesario reasignar nodos para que coincidieran mejor con los puntos de toma de presión observados en el sistema. Esto permitió reducir la diferencia entre las presiones observadas y simuladas, logrando un valor de RMSE pre-calibración de 29,619 mca, y se obtuvo un valor post-calibración de 8,315 además de un valor de R^2 de 0,92, valores que en el caso del RMSE se considera aceptable y para el caso del R^2 según (Zanfei et al., 2022) valores

altos del R^2 cercanos a 1 representan una mejor capacidad predictiva y los resultados de la predicción tienen una alta similitud con los datos reales.

Figura 73

Comparación de Valores Medios de Presiones Observadas vs Simuladas.



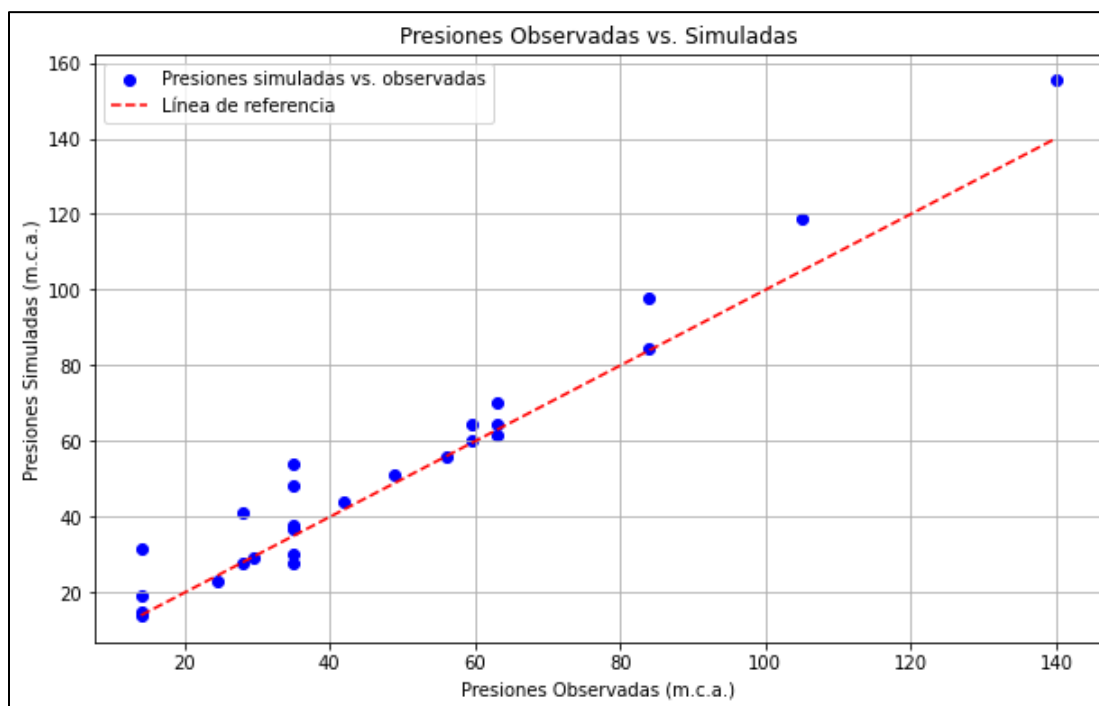
El gráfico compara las presiones observadas y simuladas en diferentes nodos del sistema hidráulico, representados en el eje horizontal. Las barras rojas corresponden a los valores calculados por el modelo, y las azules, a los valores medidos en campo. El eje vertical indica la presión en metros de columna de agua (mca).

Se observan discrepancias significativas entre los valores simulados y observados en algunos puntos, como los nodos 758 y 406, lo que sugiere que el modelo aún necesita ajustes en la calibración. Sin embargo, la calibración logró reducir de manera significativa la variación de las presiones, acercando el modelo a los valores reales medidos en la mayoría de los nodos.

La siguiente figura presenta un diagrama de dispersión que muestra la relación entre las presiones observadas (en el eje horizontal) y las presiones simuladas (en el eje vertical) en distintos puntos del sistema hidráulico, ambas en mca. Los puntos azules representan las presiones simuladas frente a las observadas en cada nodo, mientras que la línea roja discontinua es la línea de referencia, que indica donde deberían estar los puntos si las presiones simuladas y observadas fueran exactamente iguales.

Figura 74

Diagrama de Dispersión de Presiones Observadas vs Simuladas.



10.6 Modelo Hidráulico Calibrado

10.6.1 Resumen del Proyecto

El modelo hidráulico calibrado abarca un total de 1,176 nodos distribuidos por todo el casco urbano del municipio de Pamplona. Estos nodos están conectados por un sistema de 1,219 tuberías que varían en diámetro desde ½" hasta 16". Además, el sistema incluye 12 tanques de almacenamiento en operación, con capacidades que van de 8 m³ a 600 m³. El abastecimiento del

sistema se realiza a través de dos plantas de tratamiento: Cariongo y Monteadentro. Se han establecido dos patrones de consumo para los nodos, correspondientes a cada planta: el patrón de consumo 1 para Cariongo y el patrón de consumo 2 para Monteadentro. El sistema también cuenta con 23 válvulas que simulan cámaras de quiebre o reguladoras de presión. Es importante destacar que el modelo utiliza la ecuación de pérdida de carga de Hazen-Williams y que las unidades de caudal están en litros por segundo (L/s) (véanse Apéndice L y M). La demanda asignada a cada uno de los modelos (Teórico o Consumos) fue calculada según el cada caso, en el primero fue calculada a partir de datos de proyecciones y áreas aferentes, en el segundo a partir de datos reales del SUI.

Figura 75

Resumen del Modelo Hidráulico Calibrado.

Statistics	
Number of Junctions	1176
Number of Reservoirs	2
Number of Tanks	12
Number of Pipes	1219
Number of Pumps	0
Number of Valves	23
Flow Units	LPS
Flow Units	LPS
Headloss Formula	H-W

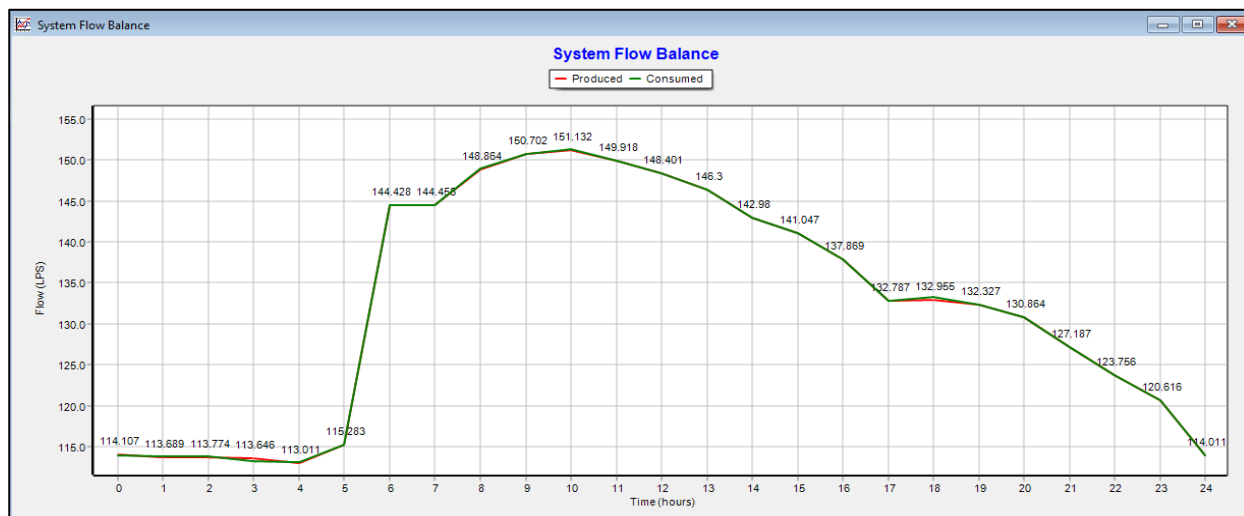
10.6.2 Balance de Caudales

Como resultado de todos los procesos descritos hasta este, se obtuvo un modelo hidráulico confiable y único, el cual es capaz de simular el comportamiento del sistema de acueducto del casco urbano de Pamplona, además de, predecir el comportamiento del sistema de acuerdo a cambios en el mismo o a expansiones propuestas.

El modelo cuenta con un balance de caudales el cual simula el comportamiento de producción y consumo teniendo en cuenta las pérdidas por distintos factores que afectan el

sistema, estos valores pueden ser observados en la sección 7.3 en la cual se observan los valores correspondientes a producción por planta de tratamiento y en conjunto.

Figura 76
Balance de Caudales Calibrado.



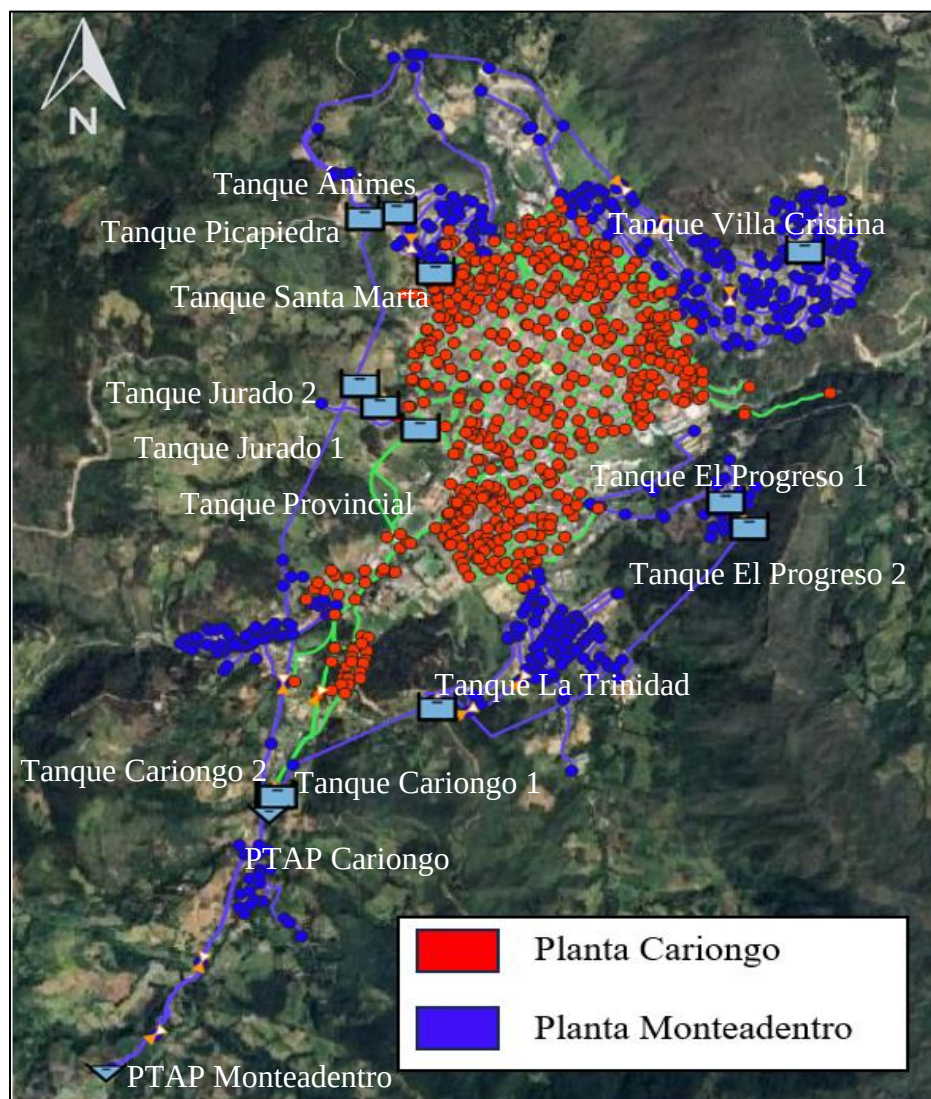
En este balance de caudales tenemos la información del caudal producido por las plantas de tratamiento a lo largo de un día común en el casco urbano de Pamplona, como se puede observar, al unificar los dos patrones de consumo se produce el que se observa en la figura anterior, teniendo como pico de consumo la hora 10:00 a. m, correspondiendo a un caudal de producción de 151,132 l/s, y la hora de menos consumo correspondiente a las 04.00 a. m, con un caudal de producción de 113,011 l/s. El caudal promedio de producción de este modelo es de aproximadamente 132,16l/s, valor que al ser comparado con el real (132,40 l/s) es altamente cercano.

10.6.3 Comparativa de Caudales entre Plantas

Los valores de producción de las plantas Cariongo y Monteadentro varían, la planta Cariongo abastece casi el 70% de la demanda del sistema, a comparación de la planta Monteadentro que abastece el 30% restante de la demanda, a continuación, se muestra un mapa en el cual se aprecia los nodos abastecidos por cada planta de tratamiento.

Figura 77

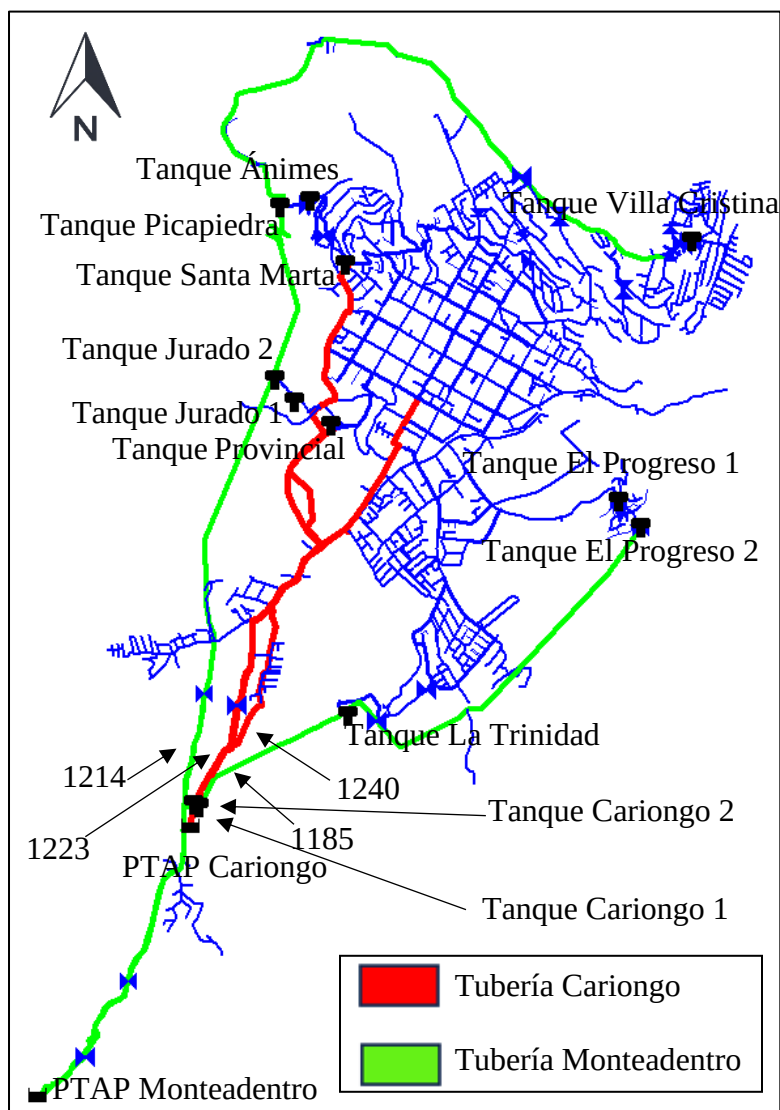
Abastecimiento de Demandas por Planta de Tratamiento.



Como se observa, la planta de tratamiento Cariongo tiene más nodos asociados a ella, es decir, cubre la demanda de más sectores además de que en estas zonas se encuentran gran parte de las zonas institucionales, comerciales e industriales, lo que aumenta en gran instancia la demanda que debe suplir.

Para hacer la comparativa de los caudales de producción en las 24 horas, se seleccionaron las tuberías principales que distribuyen los caudales producidos por las plantas, a continuación, se muestra un gráfico en el que se detallan dichas tuberías.

Figura 78
Tuberías Matriz por Planta de Tratamiento.

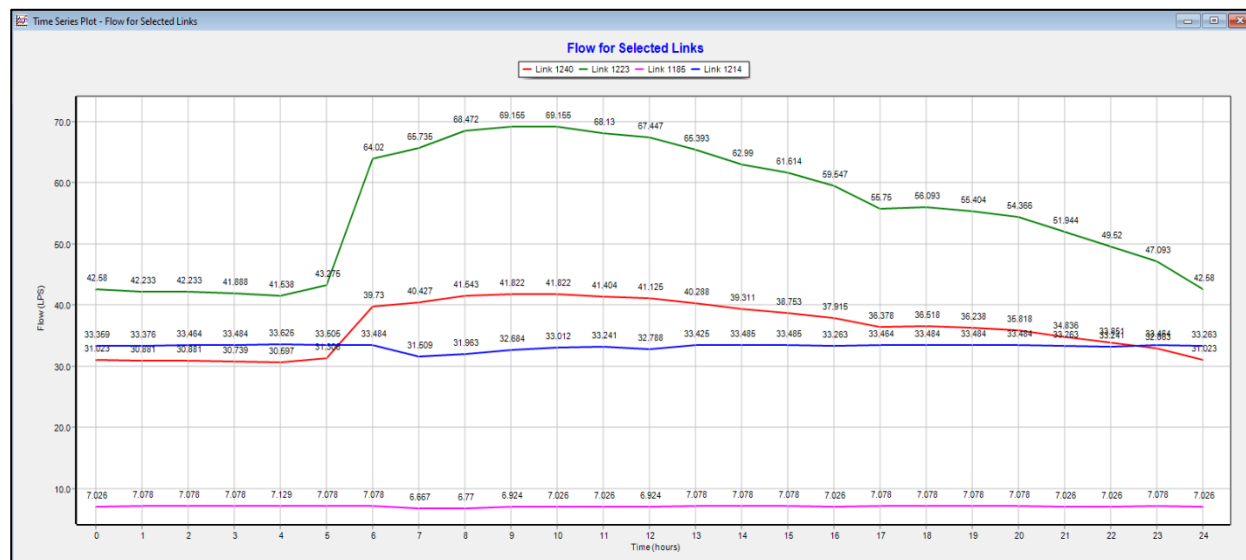


Como se observa, cada planta de tratamiento cuenta con dos tuberías principales que abastecen todo el sistema de distribución, con diámetros que varían de 3" a 16". Se nota que las tuberías 1223 y 1240, que se extienden desde la planta de tratamiento Cariongo hacia el sector de distribución, transportan un mayor caudal en comparación con las tuberías que parten de la planta Monteadentro pues, en las horas de máximo consumo se puede observar que transportan 69,155 l/s y 41,822 l/s respectivamente, transportando aproximadamente 110,98 l/s, por otra parte, a esta misma hora, las tuberías 1214 y 1185 transportan 33,012 l/s y 7,026 l/s respectivamente,

transportando aproximadamente 40,038 l/s. Esto se debe a la diferencia en la producción de las plantas en relación con la demanda que cada una abastece.

Figura 79

Caudal Transportado por Tuberías Matriz.



10.6.4 Presiones en Modelo Hidráulico Calibrado

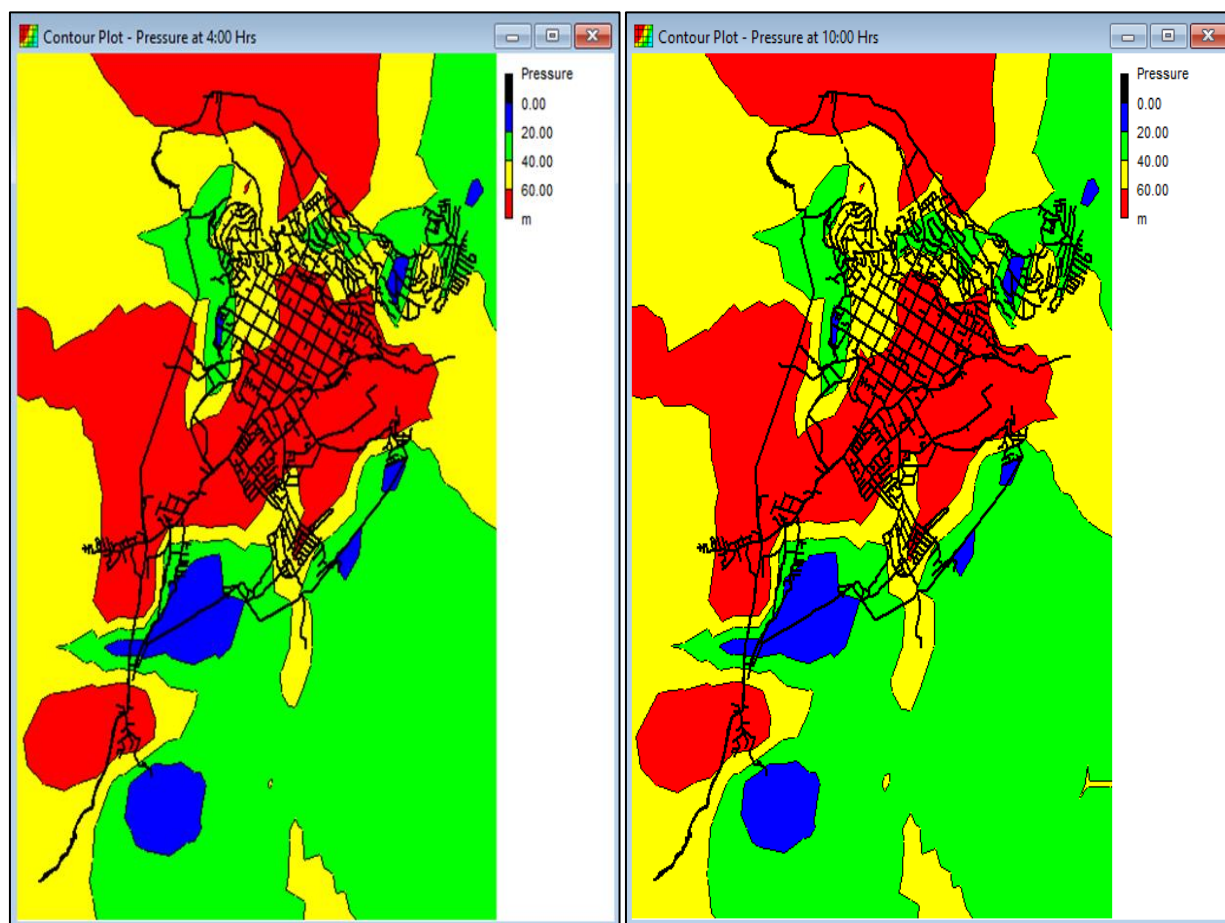
Las presiones presentes en el modelo varían a lo largo del día. A las 04:00 a. m., encontramos presiones mínimas de 0,47 m.c.a. y máximas de 161,58 m.c.a. Por otra parte, a las 10:00 a. m., se encuentran presiones mínimas de 0,28 m.c.a. y máximas de 163,05 m.c.a. Estos valores están fuera de los rangos recomendados por la normativa colombiana.

De acuerdo con la normativa colombiana, la presión mínima recomendada es de 15 m.c.a. (150 kPa) y la presión máxima recomendada es de 60 m.c.a. (600 kPa). sistema medio y bajo, el área a abastecer con una presión dinámica inferior a 98,1 kPa (10 mca) puede corresponder hasta el 10% del área, siempre que la presión mínima sea superior a 88,3 kPa (9 mca) y hasta el 5% del área de la zona de presión, siempre que la presión mínima sea superior a 78,5 kPa (8 mca).

A continuación, veremos un gráfico tipo mapa de contorno en el cual se aprecia la zonificación de las zonas de acuerdo con las presiones presentes a las horas de mínimo y máximo consumo en el sistema, respectivamente.

Figura 80

Mapa de Contorno de Presiones a las 04:00 a. m y 10:00



En estos gráficos de contorno de presiones, se observa cómo las diferentes zonas del casco urbano de Pamplona presentan una amplia variación de presiones a las 04:00 a.m. y a las 10:00 a.m. según el sistema de abastecimiento de agua, aunque la comparación entre estos dos tiempos es la diferencia de consumo se puede apreciar que las presiones no tienen gran variación, sólo en algunas partes como el barrio Juan XXIII se pueden observar pequeñas variaciones de presión, esto posiblemente debido a que en Pamplona, todos los días hay roturas en las tuberías del

acueducto (La Opinión, 2021), con lo cual se hace necesario el cierre de muchas tuberías aumentando consigo las presiones del sistema.

La leyenda de la derecha indica los rangos de presión en metros de columna de agua (mca) donde las zonas en azul y negro tienen presiones inferiores a 20 mca, mientras que las áreas en rojo presentan presiones superiores a 60 mca.

➤ **Zonas con presiones por encima de 60 mca (rojo)**

Las áreas rojas son las que presentan las presiones más altas, superiores al límite recomendado de 60 mca. Esto se debe principalmente a que son zonas más bajas en términos de altitud, lo que genera un aumento de presión debido a la diferencia significativa de alturas entre las plantas de abastecimiento y los nodos de distribución. En algunos casos, las diferencias pueden superar los 140 metros.

➤ **Zonas con presiones entre 40 y 60 mca (amarillo)**

Las áreas amarillas están dentro de un rango aceptable, pero cercano al límite superior. Esto indica que las presiones aquí están por debajo del umbral máximo recomendado, pero aún deben ser monitoreadas para evitar problemas como daños en las redes de distribución.

➤ **Zonas con presiones entre 20 y 40 mca (verde)**

Las áreas verdes representan presiones óptimas y dentro de los rangos recomendados para la operación normal. Estas áreas están en equilibrio entre la altitud y la proximidad a los centros de distribución.

➤ **Zonas con presiones menores a 20 mca (azul y negro)**

En las zonas más altas del casco urbano, como las áreas en azul, las presiones son notablemente bajas, incluso por debajo del mínimo recomendado de 8-15 mca. Esto indica

posibles problemas de suministro en estas áreas, donde la diferencia de altura reduce la presión, lo que puede requerir estaciones de bombeo o reguladores adicionales.

En resumen, el mapa revela claramente la relación entre la altitud de las áreas y las presiones observadas en la red de distribución, con zonas bajas experimentando alta presión y zonas elevadas enfrentando problemas de baja presión.

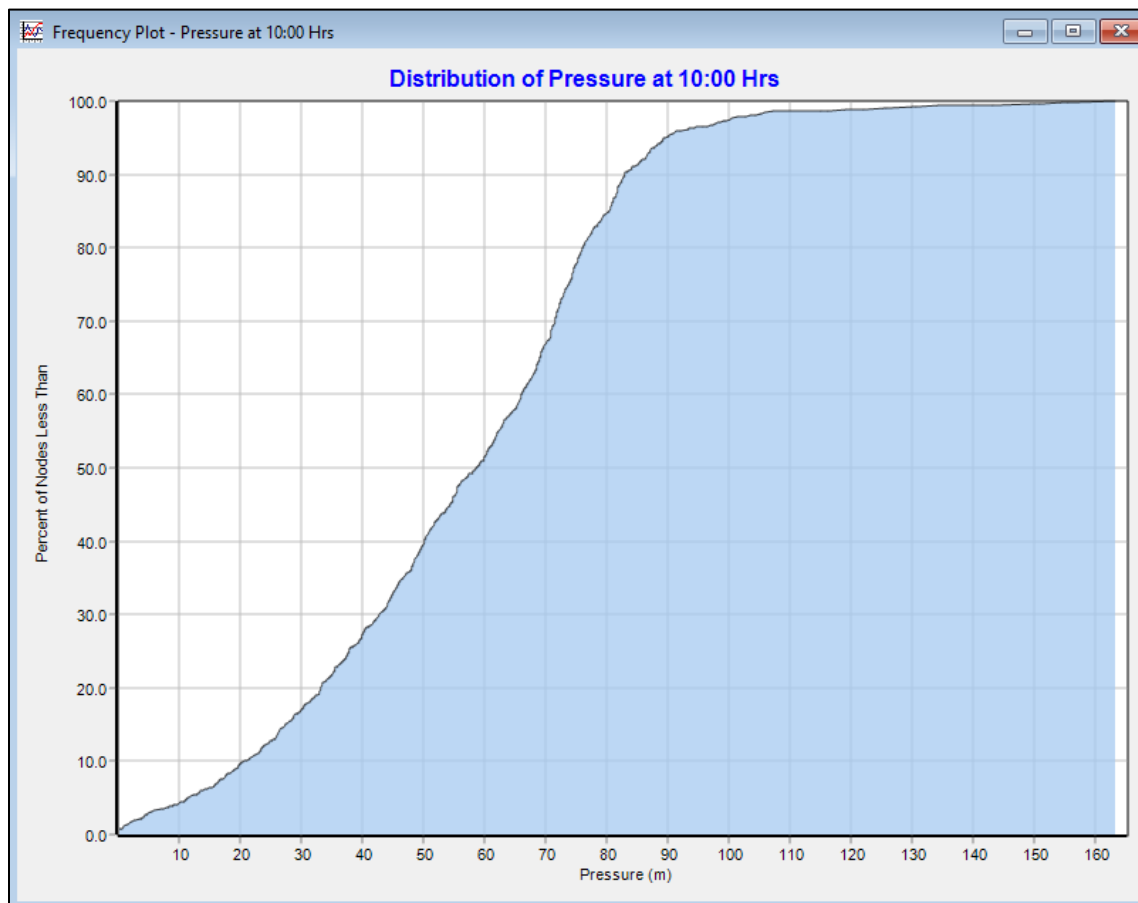
Por otra parte, podemos ver el gráfico de frecuencia de la presión a las 10:00 a.m. En este gráfico se muestra cómo se distribuyen las presiones en el sistema hidráulico, representando en el eje horizontal los valores de presión en metros de columna de agua (mca) y en el eje vertical el porcentaje acumulado de nodos que tienen una presión menor que el valor indicado en el eje horizontal.

Este análisis nos permite observar que alrededor del 50% de los nodos presentan presiones menores a 60 mca, lo que indica que una porción significativa del sistema opera dentro del rango óptimo superior. Sin embargo, un porcentaje notable de nodos supera este límite, alcanzando presiones de hasta 160 mca, lo que podría generar problemas de sobrepresión en algunas áreas del sistema.

Este gráfico es fundamental para identificar zonas donde las presiones podrían estar fuera del rango ideal, ayudando a optimizar el rendimiento del sistema y a planificar la implementación de medidas correctivas, como la instalación de válvulas reguladoras o ajustes en el diseño de las tuberías.

Figura 81

Mapa de Frecuencia de Presiones a las 10:00 a.m.

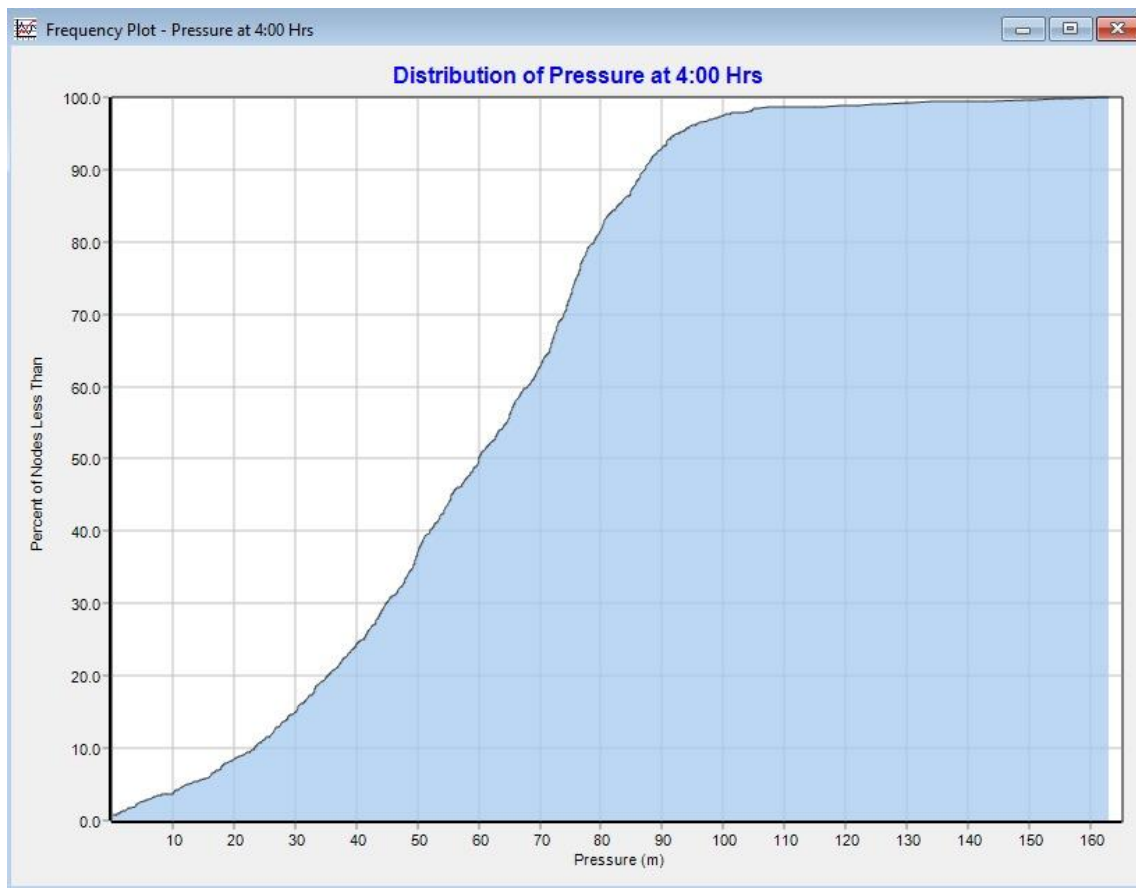


La siguiente figura muestra el diagrama de frecuencia de las presiones en la red de distribución de agua a las 04:00 a.m., que es la hora de menor consumo. El eje horizontal representa las presiones en metros columna de agua (mca) y el eje vertical muestra el porcentaje acumulado de nodos en la red que tienen una presión igual o inferior a un valor dado. Podemos observar que aproximadamente el 8% de los nodos presentan presiones inferiores a 15 mca. De igual forma, aproximadamente 4% de los nodos presentan presiones por debajo de 8 mca.

Estos valores sugieren que una pequeña parte de los nodos está funcionando a presiones muy bajas a las 4:00 a.m., lo que es consistente con las condiciones de menor consumo en una red de distribución de agua.

Figura 82

Mapa de Frecuencia de Presiones a las 04:00 a.m.



10.6.5 Velocidades en el Sistema

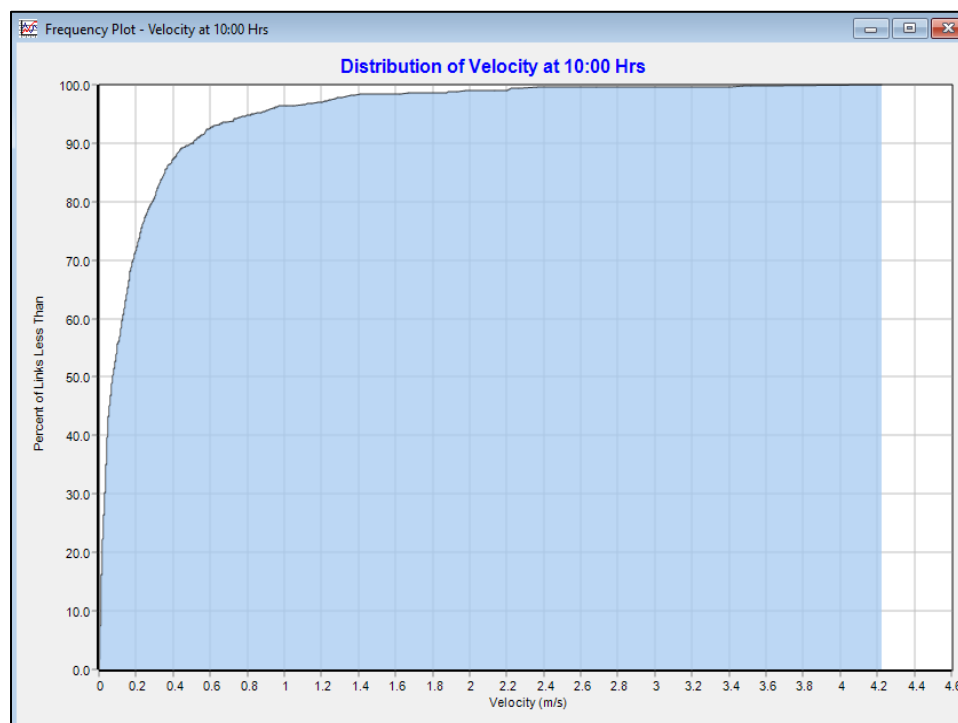
El gráfico de frecuencia muestra la distribución de las velocidades en el sistema a las 10:00 a.m. En el eje horizontal se observa la velocidad en metros por segundo (m/s), mientras que en el eje vertical se representa el porcentaje de unidades (tramos de tuberías) con velocidades menores a un valor dado.

Se puede ver que más del 90% de las tuberías tienen velocidades inferiores a 1 m/s, lo que sugiere que la mayor parte del sistema opera con flujos lentos. Solo una pequeña porción del sistema alcanza velocidades superiores a 1 m/s, y prácticamente ninguna tubería supera los 4 m/s. Este comportamiento sugiere que el sistema generalmente funciona con bajas velocidades, lo que

podría estar relacionado con el uso de tuberías de gran diámetro o con demandas moderadas en las zonas abastecidas.

Figura 83

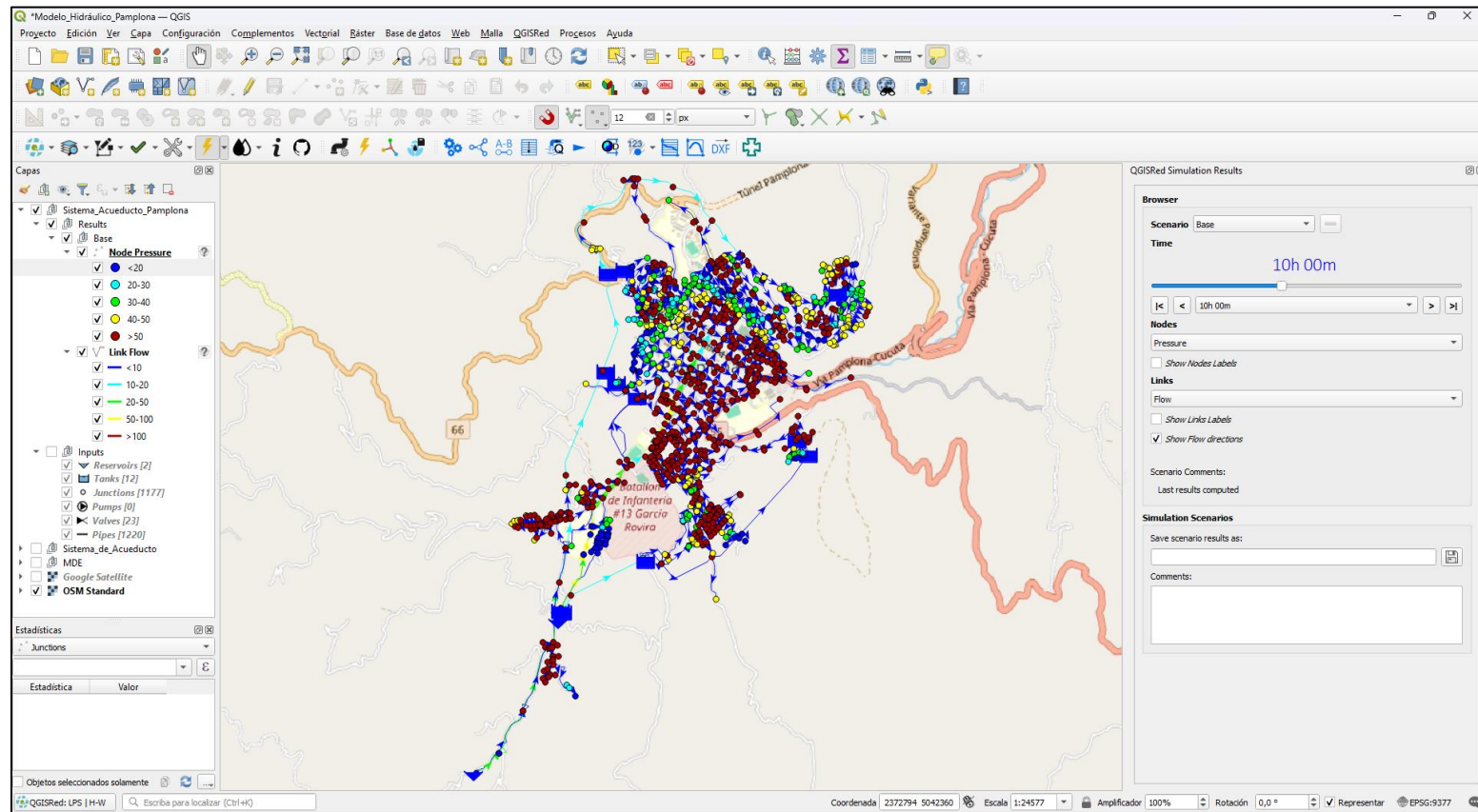
Mapa de Frecuencia de Velocidades a las 10:00 a.m.



10.7 Modelo Hidráulico en QGISRED

Finalmente, el modelo hidráulico calibrado fue integrado y optimizado en la plataforma QGIS, complementado con el plugin QGISRED. Esta integración permite no solo una visualización detallada y precisa de la red de distribución, sino también la gestión avanzada de gemelos digitales, lo que facilita el monitoreo en tiempo real mediante la implementación del sistema SCADA y la simulación de diferentes escenarios operativos. Con esta herramienta, es posible realizar análisis más completos de la infraestructura, optimizar la toma de decisiones y mejorar la eficiencia en la operación y mantenimiento del sistema.

Figura 84
Modelo Hidráulico en QGISRED.



En esta se observan todos los elementos que componen el modelo hidráulico, partiendo desde los reservorios hasta las tuberías, además, podemos hacer la visualización de los resultados obtenidos en periodo extendido para nodos y tuberías, permitiendo interactuar con estos para obtener todos los valores a lo largo de la simulación, a su vez, hay un apartado para asignar parámetros de válvulas de isolación y las condiciones de operación de tuberías.

10.8 Conclusiones y Recomendaciones del Objetivo

La calibración de la red de acueducto del municipio de Pamplona ha generado un modelo que refleja con precisión el comportamiento del sistema. Aunque los coeficientes de pérdidas por accesorios no generan cambios significativos en el modelo, las fugas presentes en el sistema han demostrado ser el factor más influyente en la calibración. Por lo tanto, el enfoque principal se centró en ajustar los parámetros relacionados con las pérdidas por fugas, que representaron los mayores cambios en la precisión del análisis hidráulico.

El proceso de calibración arrojó resultados destacados, logrando un coeficiente emisor óptimo de $0,0024 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$ para cada nodo abastecido por la planta Monteadentro y un coeficiente emisor de $0,009 \text{ l/s(mca)}^{0.5}$ para los nodos abastecidos por la planta Cariongo, resultando en un caudal modelado de 132,161 l/s, con un error cuadrático medio (RMSE) de 0,24 l/s en comparación con el caudal observado. Además, los puntos de presión analizados indicaron un error de 8,315 mca entre los conjuntos de datos, que, aunque cercanos a las condiciones reales, puede variar debido a la ubicación no específica en los barrios evaluados, además se encontró que el valor del R^2 para los datos de presión fue de 0.92, valor con el que se puede considerar que el sistema es confiable.

La correcta calibración de este modelo es fundamental para asegurar la precisión y fiabilidad de los datos obtenidos. Un proceso de calibración adecuado, como el realizado, reduce significativamente el riesgo de errores en los resultados y permite una interpretación más robusta de los datos. Esto ofrece una base sólida para la toma de decisiones informadas, tanto en la funcionalidad del sistema actual como en la planificación de futuras expansiones.

Este modelo calibrado servirá como punto de partida para futuras evaluaciones, proporcionando una visualización clara de posibles expansiones del sistema y facilitando la toma

de decisiones estratégicas, no solo desde un punto de vista técnico e hidráulico, sino también económico, optimizando así el uso de los recursos disponibles.

Para asegurar la calidad del modelo, se recomienda contar con datos precisos y actualizados. Se sugiere la creación de puntos de monitoreo continuo a lo largo de la red de acueducto, lo que permitirá obtener información en tiempo real y establecer una base sólida para la calibración. Estos puntos de monitoreo deben ser objetivos clave para ajustar y validar el modelo de manera eficiente.

Para lograr una calibración exitosa, se recomienda revisar exhaustivamente todos los factores que puedan influir en las discrepancias entre el modelo y el comportamiento del sistema real. Se deben analizar factores como las pérdidas menores por accesorios, las rugosidades de las tuberías, posibles fugas y otros elementos relevantes, según su grado de afectación. Este análisis es crucial para garantizar una representación precisa y fiel del sistema.

Al trabajar en Python con la librería WNTR, se recomienda que el modelo hidráulico esté basado en la ecuación de Hazen-Williams. Este enfoque asegura la compatibilidad con la librería y evita errores que impidan procesar el código.

Se sugiere el uso de gráficos y tablas generados por EPANET para identificar posibles inconsistencias en los resultados. Estas representaciones visuales permiten analizar la información de manera más detallada y eficiente, facilitando la identificación de anomalías en las presiones, caudales o pérdidas de energía en el sistema. Utilizar estos recursos gráficos proporciona una base sólida para realizar ajustes y mejoras en el modelo.

Finalmente, se recomienda que todos los interesados en el análisis y calibración del sistema estén familiarizados con herramientas de simulación como EPANET y con lenguajes de programación como Python, especialmente utilizando el paquete WNTR. Tener conocimientos

sólidos en programación en Python garantizará un manejo eficiente de los modelos, lo que permitirá una identificación más rápida de problemas, un análisis detallado de las iteraciones del sistema y la implementación de mejoras de manera más eficaz.

11 Conclusiones

El presente trabajo de grado ha permitido el desarrollo de un modelo hidráulico y el análisis de la red de distribución de agua potable en el municipio de Pamplona, Norte de Santander, cumpliendo con los objetivos planteados en la justificación inicial. A continuación, se presentan las conclusiones generales que sintetizan los aportes y resultados obtenidos a lo largo de la investigación.

Mejorar la gestión de información sobre el sistema de acueducto fue uno de los objetivos clave. A pesar de la falta de claridad y registros precisos, se logró realizar un catastro general de la red de acueducto. Este esfuerzo incluyó la actualización de información crítica sobre bocatomas, aducción, desarenadores, y otros elementos esenciales del sistema. Las visitas a campo y la colaboración con personal técnico de EMPOPAMPLONA S.A. E.S.P. fueron fundamentales para complementar los datos existentes, lo que resalta el compromiso con la mejora continua en la gestión de información, aunque se requiere una herramienta unificada para optimizar el almacenamiento y acceso a estos datos.

Se logró completar con éxito el análisis de consumos y la estimación de demandas, cumpliendo con el objetivo de utilizar información comercial y proyecciones de población. Se realizó un análisis integral que evaluó la producción de las plantas de tratamiento y los consumos por usuario, proporcionando estimaciones valiosas y bases del modelo hidráulico. Aunque se identificaron algunas complejidades en la integración de datos, el análisis cumplió con su propósito, subrayando la necesidad de un enfoque más refinado en la segmentación de datos para futuras investigaciones.

Desarrollar un Modelo Digital de Elevación (MDE) integral fue un objetivo fundamental del proyecto. Si bien no fue posible integrar imágenes capturadas por drones junto con rásters

satelitales, se logró cumplir plenamente el objetivo mediante el uso exclusivo de datos satelitales. A pesar de las limitaciones técnicas y logísticas iniciales, los datos satelitales ofrecieron una solución eficaz para crear un MDE preciso y detallado que cubre adecuadamente el casco urbano de Pamplona. Este modelo ha demostrado ser una herramienta valiosa, no solo para la planificación y ejecución de proyectos de infraestructura, sino también para proporcionar una georreferenciación fiable y actualizable, especialmente en zonas en expansión. La precisión del MDE generado permite optimizar los futuros desarrollos de la red de acueducto, asegurando una base sólida para la toma de decisiones estratégicas en el crecimiento del municipio.

Alcanzar el objetivo principal de construir un modelo hidráulico utilizando el software EPANET ha sido un éxito. Se desarrolló un modelo que integra todas las características clave del sistema de acueducto, como los diámetros de las tuberías, rugosidades, materiales y dimensiones de los tanques de almacenamiento, garantizando una representación fiel de la red. Además, el modelo incluye zonas de expansión, lo que refuerza su utilidad y confiabilidad para futuros análisis y ampliaciones del sistema. Aunque su precisión no es absoluta, este modelo constituye una herramienta valiosa para la gestión y planificación del sistema de distribución de agua potable a largo plazo, facilitando tanto la toma de decisiones informadas como la optimización de recursos en la operación del acueducto.

Calibrar el modelo hidráulico ha sido un paso fundamental que ha permitido reflejar con gran precisión el comportamiento del sistema. Los resultados obtenidos, como el coeficiente emisor óptimo y el caudal modelado, demuestran la efectividad del proceso de calibración. Esto proporciona una base sólida para la toma de decisiones informadas, minimizando el riesgo de errores y optimizando el uso de recursos. En conclusión, el proyecto ha cumplido con los objetivos planteados, mejorando significativamente la gestión del sistema de acueducto y proporcionando

herramientas valiosas para la planificación y toma de decisiones futuras. La integración de tecnología avanzada y un enfoque metódico han sido esenciales para lograr estos resultados.

Observamos que, mediante el desarrollo, la construcción, ejecución y calibración del modelo hidráulico, el 4% de los nodos tienen presiones por debajo de 8 mca, 8% de los nodos tienen presiones por debajo de 15 mca, hay un aproximado de 45% de nodos que tienen presiones entre 8 mca y 60 mca, y finalmente, más del 50% de los nodos tienen presiones por encima de los 60 mca, todo esto posiblemente debido a problemas de operación y mantenimiento de redes de distribución.

Logramos cumplir con los requerimientos normativos vigentes del RAS, específicamente en los artículos 57 y 58, que establecen que todos los sistemas de redes de distribución deben contar con un modelo hidráulico calibrado, constituye un aporte importante de este proyecto. Este modelo es esencial para predecir el comportamiento del sistema en diversas situaciones, como variaciones en la demanda o fallas en la infraestructura. Además, se logra la sectorización hidráulica a partir de los resultados obtenidos del modelo, lo que facilita la gestión y control de las redes de distribución, optimizando su operación y garantizando una distribución más eficiente del agua en diferentes zonas del sistema.

12 Recomendaciones

Se sugiere que, para optimizar la gestión de la red de acueducto, es fundamental recopilar datos históricos y actuales, así como continuar con la implementación del Sistema de Información Geográfica (GIS) que permita una gestión centralizada y georreferenciada de la información. Además, se recomienda adoptar metodologías específicas para asegurar una correcta georreferenciación y mejorar la planificación de mantenimiento.

Para realizar un análisis efectivo de consumos y demandas, se aconseja combinar datos históricos con proyecciones poblacionales y un mapeo detallado de la infraestructura existente, utilizando modelos predictivos que faciliten la identificación de patrones y la planificación de recursos.

Es esencial mantener actualizados los datos topográficos mediante un GIS, siguiendo manuales técnicos para asegurar la calidad de los datos y la correcta aplicación de metodologías fotogramétricas y un Modelo Digital de Elevación (MDE) de alta calidad. La capacitación en estas herramientas asegura que los datos se mantengan actualizados, lo cual es vital para el éxito a largo plazo.

Asimismo, se destaca la importancia de mejorar la calidad de la información en los modelos hidráulicos, incorporando datos en tiempo real y manteniendo un registro sistemático de versiones anteriores del modelo. Esto garantiza una operatividad continua y permite revertir cambios en caso de errores.

Se recomienda unificar los sistemas de georreferenciación y utilizar herramientas como EPANET para la visualización de resultados, asegurando la precisión en la creación y parametrización del modelo hidráulico. La familiarización con herramientas de simulación y

programación es crucial para una gestión eficiente y para la identificación de problemas en el sistema.

Se recomienda realizar limpiezas en las tuberías con agentes químicos o la implementación de puntos de desinfección e instalación de elementos como purgas para evitar la generación de biopelículas en las tuberías debido a las bajas velocidades en el sistema.

Se recomienda implementar un plan óptimo de presiones realizando una buena sectorización hidráulica con el fin de evitar la gran cantidad de zonas que presentan presiones elevadas en gran parte del sistema.

Se recomienda la implementación de monitorización del sistema mediante la metodología de colocación óptima de sensores (OSP) la cual puede contribuir de manera significativa la posibilidad de identificar o localizar daños futuros en estructuras.

Se recomienda implementar una metodología de localización y percepción de fugas en el sistema.

Finalmente, se recomienda continuar con la monitorización e implementación del modelo hidráulico realizando colaboraciones en conjunto entre la empresa de servicios públicos, la Universidad de Pamplona, el sector público, el sector privado y la academia, además de continuar con digitalizaciones encaminando a un gemelo digital del sistema de acueducto (sistema SCADA).

13 Actividades Derivadas del Proyecto

En este capítulo nombraremos las ponencias que se realizarán en días próximos a la sustentación del proyecto, estos serán nombrados en manera cronológica:

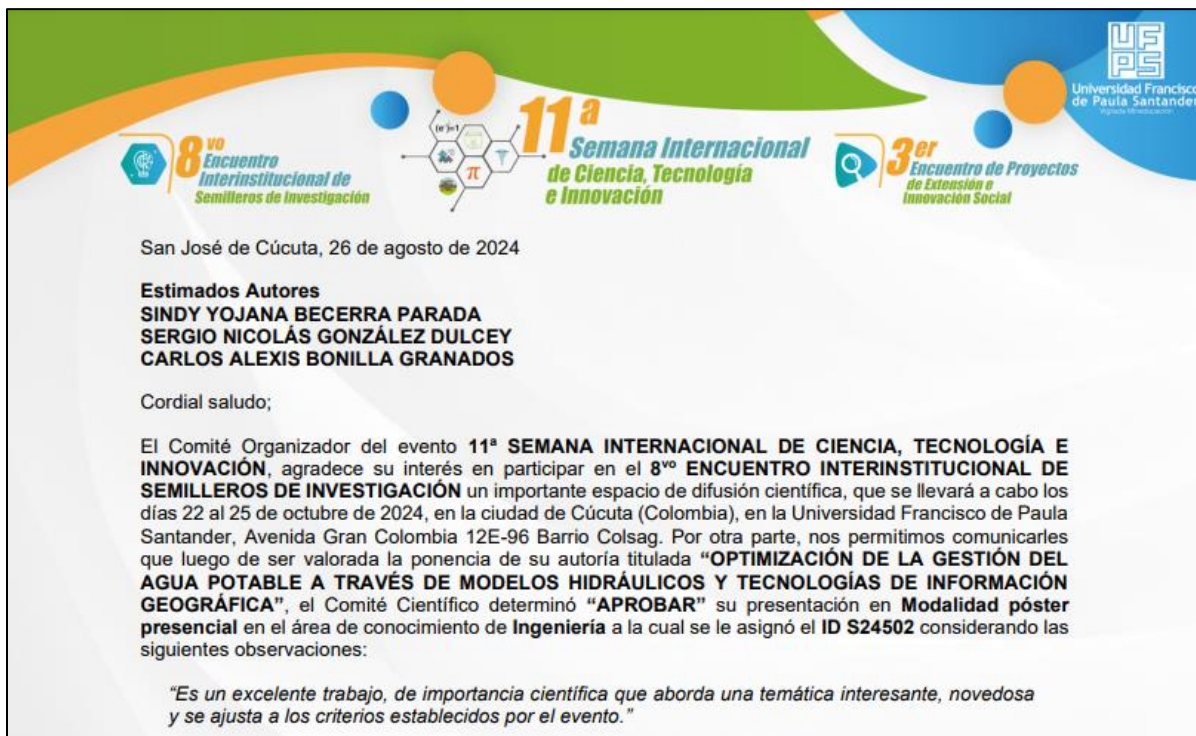
13.1 8vo Encuentro Interinstitucional de Semilleros de Investigación

Se realizó la inscripción en el 8vo ENCUENTRO INTERINSTITUCIONAL DE SEMILLEROS DE INVESTIGACIÓN DEL 22 AL 25 DE OCTUBRE DE 2024, que se desarrollará en la Universidad Francisco de Paula Santander, sede Cúcuta, la ponencia tiene como nombre: “OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DEL AGUA POTABLE A TRAVÉS DE MODELOS HIDRÁULICOS Y TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA”.

En la siguiente imagen se observa la aceptación y las observaciones presentadas por el jurado:

Figura 85

Respuesta del Comité Organizador 8vo EISI.



13.2 I Encuentro Nacional de Semilleros de Investigación

Se realizó la inscripción en el I Encuentro Nacional de Semilleros de Investigación en Ingeniería Civil y Arquitectura, que se desarrollará en la Universidad de Pamplona, sede Pamplona de manera híbrida, la ponencia tiene como nombre: “GESTIÓN EFICIENTE DEL AGUA POTABLE MEDIANTE EL USO DE MODELOS HIDRÁULICOS Y TECNOLOGÍAS GEOESPACIALES”.

13.3 Preparación de un Artículo Científico: Resultados y Hallazgos.

Como parte de las actividades derivadas del trabajo realizado, se ha decidido redactar un artículo científico que compile y presente los principales resultados y hallazgos obtenidos. Este artículo se elaborará en una fase posterior, con el objetivo de difundir el conocimiento generado y contribuir al avance en el área de estudio.

Referencias

- Alcaldía Municipal de Pamplona. (2024). *Mi Municipio*. <https://www.pamplona-nortedesantander.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>
- Bohórquez, J. A. G. (2020). *ELABORACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO PARA LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE FUNZA CUNDINAMARCA UTILIZANDO EL SOFTWARE EPANET*.
- Çenge, Y. A. (2019). *Mecánica de fluidos* (4.^a ed.). McGrawHill - Plus. <https://www-ebooks7-24-com.unipamplona.basesdedatosezproxy.com/?il=33272>
- Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2024). *¿Qué es el cargo por consumo de los servicios de acueducto y alcantarillado?* <https://www.cra.gov.co/preguntas/cargo-consumo-los-servicios-acueducto-alcantarillado>
- Constitución Política de Colombia, 216 (1991). <https://www.ramajudicial.gov.co/documents/10228/1547471/CONSTITUCION-Interiores.pdf>
- Contraloría General de la República de Costa Rica. (2020, mayo 11). *Transparencia en la emergencia—Continuidad del servicio público centrado en la ciudadanía*. <https://sites.google.com/cgr.go.cr/covid-19/reflexionescgr/continuidad-del-servicio-publico-centrado-en-la-ciudadania>
- DAG Ingeniería S.A.S. (2014, 05). *Informe Diagnóstico—Municipio de Pamplona*.
- Díaz Bocanegra, O. A. (2021, abril 29). *Modelos de Elevación Digital—DEM*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/modelos-de-elevaci%C3%B3n-digital-dem-oscar-alberto-diaz-bocanegra/>

- Editorial La República S.A.S. (2019, octubre 21). *Los municipios de Colombia que redujeron más de 25% de su población en 13 años*. Diario La República. <https://www.larepublica.co/economia/municipios-de-colombia-que-redujeron-mas-de-25-de-su-poblacion-en-13-anos-2922943>
- EMPOPAMPLONA S.A E.S.P. (s. f.). *Catastro redes de acueducto*.
- EMPOPAMPLONA S.A E.S.P. (2008). *Plano general de red de distribución de acueducto de Pamplona*.
- EMPOPAMPLONA S.A E.S.P. (2016). *Plano general de red de distribución de acueducto de Pamplona*.
- EOSDA. (2024). *Satellite Images on EOSDA LandViewer*. Land Viewer. <https://eos.com/landviewer>
- EPM E.S.P. (2010, junio 10). *Manual para la referenciación de redes de Acueducto y Alcantarillado*. https://www.findeter.gov.co/system/files/convocatorias/PAF-ATF-O-013-2018/PAF-ATF-O-013-2018%40Manual_Referenciacion.pdf
- ESRI. (2024, julio). *Definición de Ráster | Diccionario SIG*. <https://support.esri.com/es-es/gis-dictionary/raster>
- Giraldo Bueno, M. J. (2021). *Actualización Del Catastro De Redes De Servicios Públicos Acueducto Y Alcantarillado En Los Municipios De Belalcázar, San José, Palestina Y Los Corregimientos De Guarinocito Y Arauca*. https://repositorio.ucaldas.edu.co/bitstream/handle/ucaldas/17211/Informe%20de%20la%20Practica_MariaJoseGiraldo_2021.pdf?sequence=3&isAllowed=y#:~:text=Un%20catastro%20de%20redes%20o

- González Ramírez, E. A., & Bejarano Salazar, E. (2019, diciembre). Sistemas de información geográfica y modelado hidráulico de redes de abastecimiento de agua potable: Estudios de caso en la provincia de Guanacaste, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 63(2), 293-318.
- Huaquisto Cáceres, S., & Chambilla Flores, I. G. (2019). ANÁLISIS DEL CONSUMO DE AGUA POTABLE EN EL CENTRO POBLADO DE SALCEDO, PUNO. *Investigación & Desarrollo*, 19(1), 133-144.
- IDEAM. (2014). *Demanda agua*. <http://www.ideam.gov.co/web/siac/demandaagua>
- IGAC. (2024). *Centro de Control Geodésico Nacional*. https://redgeodesica.igac.gov.co/redes/red_geodesica.html
- Klise, K., Hart, D., Moriarty, D., Bynum, M., Murray, R., Burkhardt, J., & Haxton, T. (2017). *Water Network Tool for Resilience (WNTR) User Manual* (SAND2017--8883R, 1376816, 656369; pp. SAND2017--8883R, 1376816, 656369). <https://doi.org/10.2172/1376816>
- La Opinión. (2021, mayo 26). *Todos los días se presentan roturas de tuberías en Pamplona*. Noticias de Norte de Santander, Colombia y el mundo. <https://www.laopinion.co/pamplona/todos-los-dias-se-presentan-roturas-de-tuberias-en-pamplona>
- Ley 142 Servicios públicos domiciliarios, Pub. L. No. 142, 74 (1994). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>
- Martínez Alzamora, F. (2022, julio). *Manual de usuario QGISRed*. https://qgisred.upv.es/files/manuals/QGISRed_0.16_usermanual_es.pdf

- Molina Arce, S. X. (2014). *Metodología para la calibración preliminar de modelos de redes de distribución de agua mediante la utilización conjunta de demandas y consumos dependientes de la presión*. Universitat Politècnica de València.
- Moussy, L. (2020, mayo 20). LiDAR vs. RADAR: Una comparación exhaustiva. YellowScan. <https://www.yellowscan.com/es/knowledge/lidar-vs-radar/>
- Neira, G., & Sebastian, J. (2021). *Elaboración del catastro de la red de distribución de agua potable del municipio de Susacón en el departamento de Boyacá* [Bachelor thesis]. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/33934>
- Ochoa, F. (2023, enero 28). Ortofotos. El blog de franz. <https://acolita.com/ortofotos/>
- Peñaloza Suarez, J. A. (2023). *Elaboración del modelo hidráulico de la red de distribución de agua potable y del sistema de alcantarillado sanitario del casco urbano del municipio de Pamplonita – Norte de Santander*. Pamplona.
- Piping Designer. (2019, enero 6). *Hazen-Williams Coefficient*. <https://www.piping-designer.com/index.php/properties/fluid-mechanics/2500-hazen-williams-coefficient#C>
- PLINCO S.A. (2022, mayo 11). *ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS - Hidráulica Plinco*. <https://plinco.com.co/acueductos-y-alcantarillados/>
- Poco Rodríguez, B. A. (2022). Influencia del software de diseño en el modelamiento hidráulico del sistema de agua potable, Ucuchachas, Castilla, Arequipa – 2021. *Repositorio Institucional - UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/89228>
- Python. (2024). *El tutorial de Python*. Python documentation. <https://docs.python.org/3/tutorial/index.html>
- QGIS Org. (2022). *QGISRed—QGIS Python Plugins Repository*. <https://plugins.qgis.org/plugins/QGISRed/>

- Quispe Ccahuín, C. M. (2021). Modelamiento hidráulico de redes de distribución de agua potable mediante sistema de información geográfica (Qgis) en Nueva Esperanza—Apurímac, 2021. *Repositorio Institucional - UCV*.
<https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/75129>
- Ramos, I. A. N. (2021). *METODOLOGÍA PARA GENERACIÓN DE ORTOFOTOS Y MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN DE ALTA RESOLUCIÓN A TRAVÉS DE IMÁGENES OBTENIDAS CON DRONES NO-FOTOGRAMÉTRICOS*.
- Resolución 0330, 182 (2017). <https://www.minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0330-2017-0>
- Resolución 0799, 82 (2021). <https://www.acofi.edu.co/noticias/resolucion-minvivienda-799-de-2021-por-la-cual-se-modifica-la-resolucion-330-de-2017/>
- Rossman, L. A., Woo, H., Tryby, M., Shang, F., Janke, R., & Haxton, T. (2021). *Manual del usuario de EPANET 2.2*. https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-07/epanet_users_manual_2.2.0-1.pdf
- Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de tuberías*. Alfaomega.
- Sánchez Tapiero, D. I., & Mendoza Valencia, M. (2021). SIG aplicado a la optimización del tiempo de diseño en redes de distribución de agua potable. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 42(1), 68-80.
- Sousa Moreira, J. A. (2018a, julio 24). *QWater*. <https://github.com/jorgealmerio/QWater>
- Sousa Moreira, J. A. (2018b, noviembre 6). *Manual QWATER*. GitHub.
https://github.com/jorgealmerio/QWater/blob/master/tutorial_en.md

SUI. (2024). *Reportes SUI* [Portal]. Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios.

http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=acu_com_096

US EPA. (2023). *EPANET*. <https://www.epa.gov/water-research/epanet>

Zanfei, A., Bonilla, C., Brentan, B., Montalvo, I., & Izquierdo, J. (2022). *A Digital Twin of a Water Distribution System by Using Graph Convolutional Networks for Pump Speed-Based State Estimation*. 14, 16. <https://doi.org/10.3390/w14040514>

Zanfei, A., Menapace, A., Santopietro, S., & Righetti, M. (2020). Calibration Procedure for Water Distribution Systems: Comparison among Hydraulic Models. *Water*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/w12051421>

Apéndices

Apéndice A. [Actualización Sistema Acueducto Pamplona 2008.](#)

Apéndice B. [Actualización Sistema Acueducto Pamplona 2016.](#)

Apéndice C. [Catastro Redes Acueducto.](#)

Apéndice D. [Fichas Elementos Red de Distribución.](#)

Apéndice E. [Actualización Sistema Acueducto Pamplona 2024. \(O en .pdf\).](#)

Apéndice F. [Caracterización por Nodos de Sistema de Acueducto.](#)

Apéndice G. [Proyecciones Poblacionales.](#)

Apéndice H. [Zonificación de Áreas por Tipo de Suelo.](#)

Apéndice I. [Distribución de Áreas de Pamplona. \(O en .pdf\).](#)

Apéndice J. [Datos Caudales de Producción en las Plantas.](#)

Apéndice K. [Resultados de Iteración Coeficiente de Fugas.](#)

Apéndice L. [Modelo Hidráulico Calibrado.](#)

Apéndice M. [Resultados de Modelo Hidráulico Calibrado.](#)