

Evaluación hidráulica del sistema de acueducto del municipio de Tuta, Boyacá

Zulma Natalia Gualdrón Riaño

Yeison Alexander Niño Herrera

Universidad de Boyacá
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Programa de Ingeniería Sanitaria
Tunja
2023

Evaluación hidráulica del sistema de acueducto del municipio de Tuta, Boyacá

**Zulma Natalia Gualdrón Riaño
Yeison Alexander Niño Herrera**

**Trabajo de grado para optar al
título de: Ingenieros Sanitarios**

**Director:
David Felipe Bermúdez Duarte
Ingeniero Ambiental y Sanitario**

**Universidad De Boyacá
Facultad De Ciencias E Ingeniería
Ingeniería Sanitaria
Tunja
2023**

Nota de aceptación:

Firma Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Tunja, 17 de octubre de 2023

“Únicamente el graduando es responsable de las ideas expuestas en el presente trabajo”.
(Lineamientos constitucionales, legales e institucionales que rigen la propiedad intelectual).

Dedicamos este trabajo a Dios por bendecirnos, por guiarnos a lo largo de este proceso, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad, por brindarnos la paciencia y sabiduría necesaria para culminar con éxito nuestras metas propuestas.

Gracias infinitas a nuestros padres: Hilber Niño Forero, Marlen Herrera Niño, Antony Gualdron López y Miriam Riaño López, por ser los principales promotores de nuestros sueños, por confiar y creer en nuestras capacidades, por los consejos, valores y principios que nos inculcaron. Son ellos el pilar fundamental de nuestra vida y nuestro apoyo incondicional, por estar ahí cuando más los necesitamos frente a las adversidades e inconvenientes que se presentan.

Agradecimientos

A nuestro director y codirector de trabajo de grado David Felipe Bermúdez Duarte y Sergio David Torres Piraquive, docentes de la facultad de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Boyacá y un agradecimiento especial a la ingeniera Andrea Manosalva por compartir sus conocimientos, quienes con su experiencia y motivación nos orientaron en la investigación de manera especial, gracias por su paciencia, dedicación y apoyo incondicional, por guiarnos durante todo este proceso.

Contenido

	Pág.
Introducción.....	20
Diagnostico hidráulico de las estructuras del sistema de acueducto	21
Descripción general del sistema de acueducto del municipio de Tuta	21
Proyección de población.....	23
Censo poblacional	24
Métodos de cálculo para las proyecciones de población	25
Cálculo de caudales	31
Diagnostico bocatoma	39
Descripción.....	39
Requisitos de diseño	42
Evaluación hidráulica de la bocatoma	42
Diagnostico desarenador.....	52
Descripción.....	52
Requisitos de diseño	54
Evaluación hidráulica del desarenador	54
Diagnostico red de aducción	63
Descripción.....	63
Requisitos de diseño	66
Evaluación hidráulica de la red de aducción	66
Diagnostico planta de tratamiento de agua potable - PTAP.....	70
Descripción.....	70
Torre de aireación.....	72
Coagulación	78
Floculación	86
Sedimentación	93
Filtración.....	100
Almacenamiento.....	104
Diagnostico red de distribución	108

Descripción.....	108
Requisitos de diseño.....	113
Evaluación hidráulica red de distribución.....	115
Macro perfiles hidráulicos.....	162
Resumen del diagnóstico hidráulico del sistema de acueducto.....	166
Análisis de las alternativas planteadas para la optimización del sistema de acueducto.....	168
Alternativa 1: Construcción de bocatoma, desarenador y optimización de red de distribución.....	168
Alternativa 2: Construcción de PTAP en Rio de Piedras.....	170
Predimensionamiento de la alternativa seleccionada.....	178
Diseño de la bocatoma.....	178
Planos bocatoma.....	189
Diseño del desarenador.....	192
Planos Desarenador.....	201
Conclusiones.....	204
Referencias.....	206
Anexos.....	211

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Localización de la infraestructura inventariada.....	23
Tabla 2. Censos poblacionales del casco urbano del municipio de Tuta.	24
Tabla 3. Tasa de crecimiento urbano del municipio de Tuta	25
Tabla 4. Métodos de cálculo recomendados.....	26
Tabla 5. Proyección de población para el área urbana del municipio de Tuta	28
Tabla 6. Porcentaje de pérdidas en el sistema	34
Tabla 7. Coeficientes de consumo diario (K1), según el nivel de complejidad	36
Tabla 8. Coeficiente de consumo máximo horario (K2)	37
Tabla 9. Caudales año 2022 hasta 2047 – Acueducto urbano del municipio de Tuta.....	37
Tabla 10. Resumen caudales año 2047 – Acueducto urbano del municipio de Tuta.....	39
Tabla 11. Características hidrológicas cuenca alta del río Chicamocha.....	43
Tabla 12. Evaluación hidráulica bocatoma escenario actual (2022).	43
Tabla 13. Evaluación hidráulica bocatoma escenario futuro (2047).	47
Tabla 14. Evaluación hidráulica desarenador escenario actual (2022)	55
Tabla 15. Evaluación hidráulica desarenador escenario futuro (2047)	59
Tabla 16. Características y capacidad hidráulica de la red.....	66
Tabla 17. Características de tramo desarenador - PTAP	67
Tabla 18. Parámetros de referencia de diseño de aireadores de bandejas múltiples	74
Tabla 19. Evaluación hidráulica torre de aireación escenario actual 2022	74
Tabla 20. Evaluación hidráulica torre de aireación escenario futuro (2047).....	77
Tabla 21. Valores típicos ancho de garganta (w) de una canaleta Parshall.....	80
Tabla 22. Evaluación hidráulica canaleta Parshall	81
Tabla 23. Condiciones de sumergencia a partir del ancho de garganta.....	84
Tabla 24. Cuadro Resumen canaleta Parshall	85
Tabla 25. Evaluación hidráulica del floculador para el escenario actual (2022).....	88
Tabla 26. Evaluación hidráulica del floculador para el escenario futuro (2047)	91
Tabla 27. Evaluación hidráulica del sedimentador para el escenario actual (2022).....	95
Tabla 28. Evaluación hidráulica del sedimentador para el escenario futuro (2047)	98

Tabla 29. Características técnicas medio filtrantes PTAP Ginua.....	101
Tabla 30. Evaluación hidráulica del filtro para el escenario actual (2022)	102
Tabla 31. Evaluación hidráulica del filtro para el escenario futuro (2047).....	103
Tabla 32. Evaluación hidráulica del almacenamiento para el escenario futuro (2047).....	105
Tabla 33. Catastro redes de acueducto	109
Tabla 34. Catastro de válvulas.....	112
Tabla 35. Requisitos de diseño de la red de distribución según la res. 0330 del 2017.....	114
Tabla 36. Mediciones de lámina de agua en el tanque de almacenamiento	124
Tabla 37. Topología de los puntos de muestreo	126
Tabla 38. Presiones en cada punto de muestreo	126
Tabla 39. Asignación de demanda en cada nodo	134
Tabla 40. Características de la tubería.....	147
Tabla 41. Características de los nodos.....	155
Tabla 42. Tabla resumen del diagnostico	166
Tabla 43. Matriz multicriterio captación y desarenador – alternativa 1	168
Tabla 44. Matriz multicriterio captación y desarenador – alternativa 2.....	171
Tabla 45. Matriz multicriterio sistemas de tratamiento - PTAP.....	173
Tabla 46. Dimensiones propuestas de diseño bocatoma	187
Tabla 47. Dimensionamiento del desarenador	200

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Sistema de acueducto del municipio de Tuta.....	22
Figura 2. Proyección de población para el área urbana del municipio de Tuta.....	30
Figura 3. Proyección de población - Método geométrico	31
Figura 4. Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar.....	32
Figura 5. Curva de caudales de acuerdo a la proyección de población	38
Figura 6. Bocatoma existente	40
Figura 7. Dimensionamiento bocatoma actual	41
Figura 8. Desbordamiento sobre la presa de la bocatoma.	46
Figura 9. Modelo inundación para bocatoma existente	47
Figura 10. Estado de la bocatoma año 2022.....	51
Figura 11. Infraestructura del desarenador.....	52
Figura 12. Dimensionamiento desarenador actual	53
Figura 13. Estado de los deflectores salida del desarenador	55
Figura 14. Estado desarenador existente	62
Figura 15. Red de aducción del acueducto urbano del municipio de Tuta.....	64
Figura 16. Línea de aducción	65
Figura 17. Modelo hidráulico	67
Figura 18. Localización sistema de tratamiento - PTAP	71
Figura 19. Planta de tratamiento sector Ginua	72
Figura 20. Torre de aireación PTAP Ginua.....	73
Figura 21. Canaleta Parshall PTAP Ginua	79
Figura 22. Floculador PTAP Ginua.....	87
Figura 23. Sedimentador PTAP Ginua.....	94
Figura 24. Sistema de filtración PTAP Ginua	101
Figura 25. Tanque de almacenamiento.....	104
Figura 26. Dimensionamiento tanque de almacenamiento existente	107
Figura 27. Red de distribución del acueducto urbano del municipio de Tuta	108
Figura 28. Puntos concertados para el muestreo de agua para consumo humano.....	110

Figura 29. Localización de los hidrantes	110
Figura 30. Hidrantes de la red de acueducto	111
Figura 31. Micro medición municipio de Tuta.....	112
Figura 32. Diagrama de Flujo Metodología de Calibración CIACUA.	117
Figura 33. Localización puntos de monitoreo.	119
Figura 34. Montaje del equipo de medición.....	120
Figura 35. Mediciones de presión en los puntos establecidos.....	121
Figura 36. Medición de lámina de agua en los tanques de almacenamiento.....	123
Figura 37. Curva de consumo.....	125
Figura 38. Variación de la presión en el transcurso de las 24 horas de muestreo	128
Figura 39. Presión de punto 210.....	128
Figura 40. Presión de punto 209.....	129
Figura 41. Presión de punto 207.....	129
Figura 42. Presión de punto 211.....	130
Figura 43. Presión de punto 213.....	130
Figura 44. Presión de punto 212.....	131
Figura 45. Topografía del sistema de acueducto urbano Tuta.....	133
Figura 46. Modelación hidráulica acueducto urbano Tuta - sin calibración	142
Figura 47. Modelación Hidráulica acueducto urbano Tuta - Con Calibración	144
Figura 48. Modelación hidráulica acueducto urbano Tuta - con optimización	145
Figura 49. Modelación hidráulica acueducto urbano Tuta sin optimización	146
Figura 50. Modelación hidráulica acueducto urbano Tuta con optimización	146
Figura 51. Código perfiles hidráulicos	164
Figura 52. Perfil hidráulico tramo (173,203,204,205,206,207,208).....	165
Figura 54. Predimensionamiento bocatoma vista en planta	189
Figura 55. Bocatoma vista perfil	190
Figura 56. Detalle canal de aducción bocatoma.....	191
Figura 57. Desarenador vista en planta	201
Figura 58. Desarenador vista en perfil.....	202
Figura 59. Desarenador detalles	203

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A. Anteproyecto.....	212
Anexo B. Diagnostico físico de la captación.....	250
Anexo C. Diagnóstico desarenador municipio de Tuta.....	253
Anexo D. Diagnóstico PTAP municipio de Tuta.....	256
Anexo E. Coeficientes de gasto para los diferentes orificios de pared gruesa.	261

Glosario

Aducción: componente a través del cual se transporta agua cruda, ya sea a flujo libre o a presión.

Calibración: consiste en la modificación de parámetros del modelo matemático de la red. Esta modificación se realiza con el fin de mejorar la semejanza entre el modelo hidráulico y la red existente en campo. La calibración proporciona las variables óptimas de tal forma que mejoren el modelo tanto como sea posible.

Caudal máximo diario (QMD): consumo máximo durante veinticuatro horas, observado en un período de un año, sin tener en cuenta las demandas contra incendio que se hayan presentado.

Caudal máximo horario (QMH): consumo máximo durante una hora, observado en un período de un año, sin tener en cuenta las demandas contra incendio que se hayan presentado.

Golpe de ariete: fenómeno hidráulico de tipo dinámico oscilatorio, causado por la interrupción violenta del flujo en una tubería, bien sea por el cierre rápido de una válvula o por el apagado del sistema de bombeo, que da lugar a la transformación de la energía cinética en energía elástica, tanto en el flujo como en la tubería, produciendo sobre elevación de la presión, subpresiones y cambios en el sentido de la velocidad del flujo.

Macromedidor: aparato utilizado con el objetivo de tomar mediciones de grandes caudales en puntos específicos de un sistema de acueducto.

Modelo hidráulico: formulación idealizada que representa la respuesta de un sistema hidráulico a estímulos externos.

Optimización: la optimización es el conjunto de acciones encaminadas a mejorar la capacidad, eficiencia y eficacia de la infraestructura componente del sistema de acueducto, alcantarillado y/o aseo, mediante su intervención parcial o total.

Pérdidas por fricción: pérdida de energía causada por los esfuerzos cortantes del flujo en las paredes de un conducto.

Pérdidas técnicas: es la suma de las pérdidas técnicas en la red de distribución más las pérdidas en la conducción, más las pérdidas en los tanques de almacenamiento y compensación.

Red de distribución: una red de distribución se refiere al sistema de infraestructura utilizado para distribuir servicios públicos desde la fuente de suministro hasta los clientes finales, y está sujeta a regulaciones y supervisión para garantizar la seguridad, la calidad y la eficiencia del servicio.

Sectorización: es la división de una red de distribución en dos o más sectores hidráulicos, en la que cada sector con puntos definidos de alimentación o entrada de agua, opera independientemente, garantizando la prestación óptima del servicio a los usuarios comprendidos dentro de cada sector.

Sistema de acueducto: conjunto de elementos y estructuras cuya función es la captación de agua, el tratamiento, el transporte, almacenamiento y entrega al usuario final, de agua potable con unos requerimientos mínimos de calidad, cantidad y presión.

Sobrepresión: efecto del golpe de ariete, causado por el aumento repentino y en gran magnitud de presión debido a la apertura de una válvula, al apagado de una bomba, etc.

Tiempo de retención hidráulica: tiempo medio teórico que se demoran las partículas de agua en un proceso de tratamiento. Usualmente se expresa como la razón entre el caudal y el volumen útil.

Topología: es toda aquella información que define el recorrido y la distribución de una red de tuberías.

Resumen

Evaluación hidráulica del sistema de acueducto del municipio de Tuta, Boyacá:

En el presente trabajo de grado, se describe la evaluación hidráulica de cada uno de los componentes del sistema de acueducto del municipio de Tuta con el fin de optimizarlo. Inicialmente se realiza el diagnóstico hidráulico de cada infraestructura en diferentes escenarios temporales (actual y futuro), a partir de dicho diagnóstico se realiza un análisis y selección de la alternativa para la optimización del sistema, para finalmente, predimensionar los componentes del acueducto que lo requieran.

En este contexto, el presente trabajo evalúa el sistema de acueducto urbano del municipio de Tuta a través del diagnóstico hidráulico de sus componentes y de la modelación de la red de distribución para la posible optimización del mismo.

Dentro de esta investigación se presenta el diagnóstico hidráulico de los componentes del sistema de acueducto. Se parte de información base suministrada por la alcaldía municipal y visitas técnicas, en cuanto a la red de distribución, se llevó a cabo una modelación hidráulica a partir del software WaterGEMS y de esta forma determinar los valores de caudal, presión y velocidad los cuales permitieron realizar el análisis hidráulico correspondiente y con el objetivo de presentar un modelo cercano a la realidad se calibró mediante un ensayo de Pitometría, el cual consiste en medir la presión en determinados puntos estratégicos de la red de distribución.

De acuerdo a lo anterior, los resultados reflejan las malas condiciones en las que se encuentra el sistema de acueducto urbano del municipio de Tuta, a partir del diagnóstico realizado se identificaron algunos factores de mejora para garantizar la continuidad, cobertura y calidad en la prestación del servicio implementando matrices del análisis multicriterio planteadas por el RAS 2000 en especial en estructuras como la bocatoma, el desarenador y la red de distribución.

Palabras clave: diagnóstico hidráulico, acueducto, modelación, red de distribución, WaterGEMS.

Abstract

Hydraulic evaluation of the aqueduct system of the municipality of Tuta, Boyacá:

In this degree work, the hydraulic evaluation of each of the components of the aqueduct system of the municipality of Tuta is described in order to optimize it. Initially, a hydraulic diagnosis of each infrastructure in different temporary scenarios (current and future) is performed, and based on this diagnosis, an analysis and selection of the alternative for the optimization of the system is made, to finally pre-dimension the components of the aqueduct that require it.

In this context, the present work evaluates the urban aqueduct system of the municipality of Tuta through the hydraulic diagnosis of its components and the modeling of the distribution network for its possible optimization.

Within this research, the hydraulic diagnosis of the aqueduct system components is presented. Based on information provided by the municipal mayor's office and technical visits, regarding the distribution network, a hydraulic modeling was carried out using WaterGEMS software to determine the values of flow, pressure and velocity, which allowed performing the corresponding hydraulic analysis and with the objective of presenting a model close to reality, it was calibrated by means of a Pythometry test, which consists of measuring the pressure in certain strategic points of the distribution network.

According to the above, the results reflect the poor conditions of the urban water supply system of the municipality of Tuta. Based on the diagnosis made, some improvement factors were identified to guarantee continuity, coverage and quality in the provision of the service by implementing multicriteria analysis matrices proposed by the RAS 2000, especially in structures such as the intake, the sand trap and the distribution network.

Key words: hydraulic diagnosis, aqueduct, modeling, distribution network, WaterGEMS.

Introducción

Con el propósito de gestionar el uso eficiente del recurso hídrico se hace necesario la toma de decisiones operativas enfocadas a la optimización del sistema de acueducto para disminuir de esta manera el porcentaje de pérdidas y garantizar un buen servicio.

Por esta razón se hace necesario realizar la evaluación hidráulica de todo el sistema de acueducto, que permita conocer el estado actual, en este caso se empleará la calibración de un modelo hidráulico a partir de un ensayo de Pitometría (medida de presiones en diferentes puntos de la red de distribución), con el fin de determinar diferentes puntos de presión los cuales son puntos de referencia para la detección de fugas en el sistema y de esta manera obtener una herramienta eficaz para la toma de decisiones con respecto a la optimización de las redes de distribución con un programa de reducción de pérdidas que permita la preservación del agua.

La empresa de servicios públicos del municipio de Tuta es consciente de los problemas de operación y mantenimiento en el sistema de acueducto, se ha dado cuenta de la importancia que tiene el controlar el porcentaje de agua no contabilizada puesto que las pérdidas de agua son uno de los principales problemas que afronta el sistema de acueducto del municipio. Con el fin de mejorar el servicio de agua potable, es indispensable emprender programas enfocados al control y disminución de pérdidas de agua en el sistema, garantizando así un servicio eficiente y de buena calidad representando rentabilidad social, ambiental y financiera para la empresa.

El presente proyecto involucra la modelación hidráulica mediante la utilización de herramientas computacionales para representar, de la manera más cercana a la realidad, el funcionamiento de la red del sistema de acueducto del municipio de Tuta, además de la red de distribución se hace una evaluación general de cada componente del sistema.

Diagnostico hidráulico de las estructuras del sistema de acueducto

El diagnóstico y evaluación de las condiciones en las que se encuentra cada uno de los componentes del sistema de acueducto, así como las condiciones de operación de estos, se inició con una recopilación y análisis detallado de la información disponible, la cual fue complementada con visitas de campo.

Las condiciones de los componentes del sistema de acueducto se determinaron con base a la información disponible sobre las obras construidas, que fueron reevaluadas, verificadas y complementadas con información de campo. Esta información se obtuvo parcialmente por parte de la entidad municipal, por lo que fue necesario complementarla a través de visitas y entrevistas con los operadores del sistema.

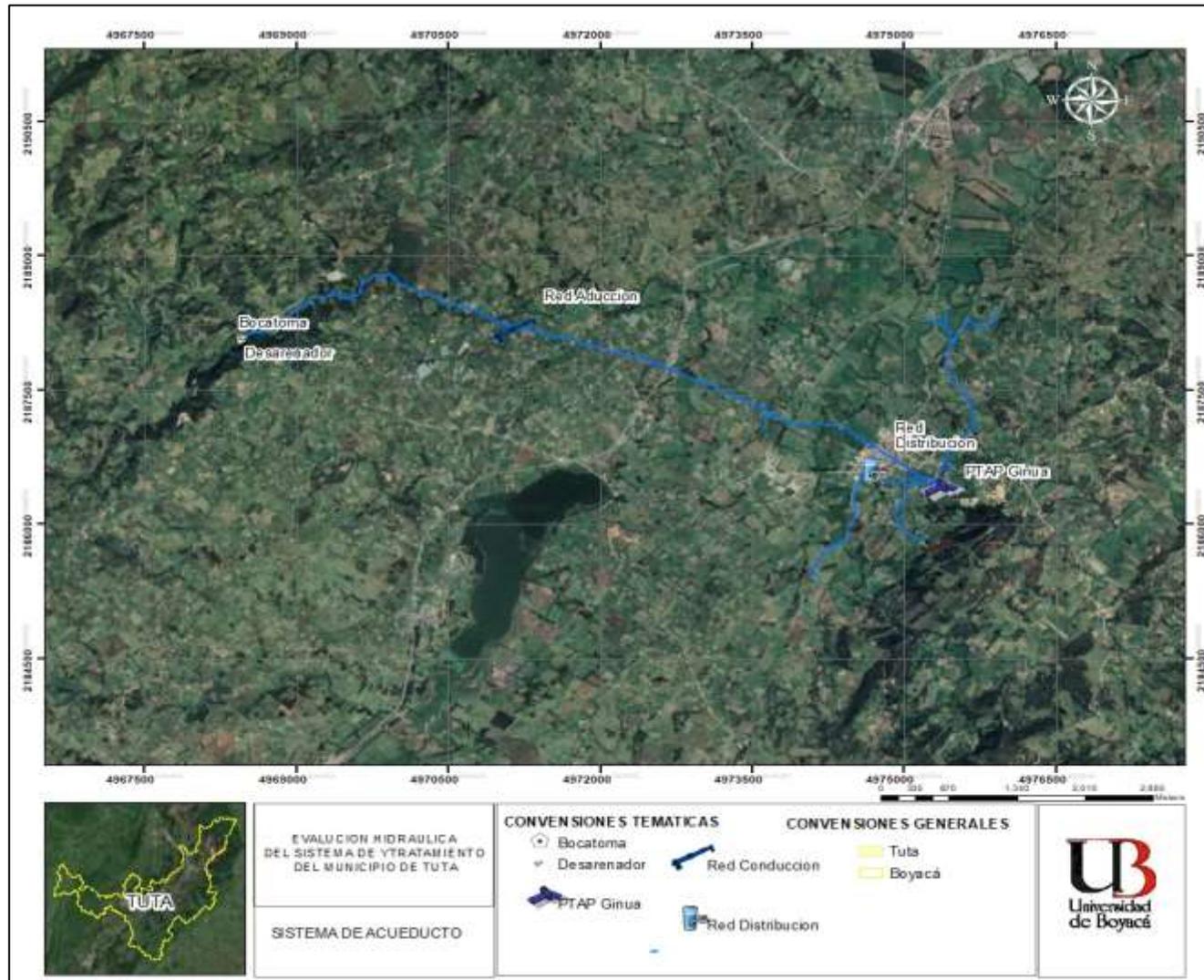
Descripción general del sistema de acueducto del municipio de Tuta

El sistema de acueducto urbano del municipio de Tuta, es un sistema que opera predominantemente por gravedad, siendo abastecido por una fuente superficial, "Rio de Piedras", esta microcuenca nace en el municipio de Cómbita y la comparten los municipios de Sotaquirá y Tuta, lo que requiere de un esfuerzo conjunto para su manejo y protección adecuada, ya que de allí se toma el agua para los acueductos de estos municipios, y más si se tiene en cuenta que nace entre altitudes de 2600 y 3600 msnm y que el 26% de su área está por encima de los 3000 msnm (Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua - PUEAA, 2020).

El sistema de acueducto del municipio de Tuta se conforma estructuralmente de la siguiente manera: desde la microcuenca Rio de Piedras se capta el caudal necesario por medio de una bocatoma de fondo, caudal que es transportado hasta el desarenador y a partir del cual inicia la línea de aducción, que conduce el agua hasta la planta de tratamiento mediante tubería en Policloruro de Vinilo - PVC; luego desde la planta se alimentan dos tanques de almacenamiento que a su vez distribuyen a los diferentes sectores del municipio el agua tratada, en la figura 1 se observa la ubicación geográfica de cada uno de los componentes:

Figura 1

Sistema de acueducto del municipio de Tuta



Fuente: autores.

La etapa inicial del proyecto consistió en la identificación visual de cada uno de los componentes del sistema, durante el recorrido se hizo un inventario de cada una de las infraestructuras con las que cuenta actualmente el sistema de acueducto que alimenta el casco urbano del municipio de Tuta. Durante el desarrollo de esta actividad paralelamente se solicitó al municipio todo el apoyo logístico en cuanto a información existente en lo referente a censos poblacionales, estratificación, concesiones otorgadas por Corpoboyacá, diseños, levantamientos topográficos y demás. En el recorrido se verifico la ubicación geográfica de cada una de las estructuras, en la tabla 1 se presentan las coordenadas planas y geográficas en las que se encuentra ubicada cada infraestructura que compone el sistema.

Tabla 1

Localización de la infraestructura inventariada

PUNTO	Coordenadas Planas		Coordenadas Geográficas	
	UTM_X	UTM_Y	ESTE	NORTE
Bocatoma Río de Piedras	1087786,533	1122333,615	73°17'06.13" O	5°42'06.88" N
Desarenador	1087810,092	1122361,394	73°17'05.37" O	5°42'07.79" N
Planta de tratamiento Ginua	1094734,000	1120732,000	73°13'20.37" O	5°41'14.56" N
Tanque de almacenamiento	1094734,649	1120732,601	73°13'20.43" O	5°41'14.45" N
Micromedidor 1 (Ingreso Ginua)	1094734,502	1120732,576	73°13'20.43" O	5°41'14.44" N

Fuente: Unidad de Servicios Públicos Tuta. (2020). *Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua - PUEAA*. Alcaldía Municipal de Tuta.

Proyección de población

El objeto de hacer el diagnóstico del sistema de acueducto es establecer las mejores condiciones técnico económicas para la ejecución y puesta en funcionamiento del sistema con el fin de garantizar condiciones de salud y desarrollo para el Municipio.

Para alcanzar los objetivos del diagnóstico es necesario tener certeza de la población actual y de su crecimiento en el tiempo de tal manera que se puedan brindar las condiciones necesarias de servicio, para satisfacer las necesidades actuales y para demandas futuras.

A partir de lo especificado en la resolución 330 de junio de 2017 y la resolución 799 del 2021, los períodos de diseño de los diferentes elementos que conforman un sistema de agua potable y saneamiento básico son de 25 años (Resolución 0330 del 08 de julio de 2017, art 40).

De esta manera se podrán comparar las condiciones de funcionalidad de cada componente del sistema en dos escenarios distintos el actual y el proyectado.

Para este estudio se resuelve de acuerdo a la Resolución 0330 del 08 de julio de 2017 en el artículo 40; se opta por usar un periodo de diseño de **25 años**.

Para el óptimo dimensionamiento de la red de distribución y las estructuras en un sistema de acueducto, es necesario visualizar y proyectar a futuro los habitantes del área urbana del municipio de Tuta, para la determinación de dichas estimaciones de acuerdo a los diferentes datos, entre las que se encuentran: censos según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE y datos del operador del servicio.

De los resultados obtenidos en cada uno de los datos históricos, se toma la población que más se ajuste al proyecto.

La evaluación del crecimiento de la población a lo largo de un período de diseño determinado, es un elemento fundamental tanto para definir la complejidad del sistema de acueducto aquí considerado, así como también para realizar el planeamiento y diseño detallado de cualquiera de los elementos que componen el sistema de acueducto en caso de ser necesario.

Censo poblacional

Los datos históricos y comportamiento de la tasa de crecimiento, se tiene en cuenta en el censo urbano por parte del DANE realizados en años anteriores (1973, 1985, 1993, 2005, 2018), igual las proyecciones de población de las cuales fueron realizadas tomando como base los resultados ajustados de población del Censo 2005 y la conciliación censal 1985 - 2005; así como los análisis sobre el comportamiento de las variables determinantes de la evolución demográfica, las hipótesis y algunos comentarios sobre sus resultados. En la tabla 2 se presenta la población censada por el DANE en el área urbana del municipio de Tuta.

Tabla 2

Censos poblacionales del casco urbano del municipio de Tuta.

Datos iniciales	
Censo	Población
1985	1,225
1993	1,349

2005	2,153
2018	2,312

Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. (2020). *Censo Nacional de Población y Vivienda*. <https://www.dane.gov.co/index.php/60-espanol/demograficas/censos>

De acuerdo al comportamiento de la población urbana del municipio de Tuta, presenta que desde el año 1973 al año 2018, hay una tasa de crecimiento positiva de 2.59%. De acuerdo a la tabla 3, los censos del municipio de Tuta desde 1973, 1985, 1993, 2005, y 2018, demuestran una tasa de crecimiento promedio positiva del +2.59%.

Tabla 3

Tasa de crecimiento urbano del municipio de Tuta

Año	Proyección de la población					
	Aritmético		Geométrico		Exponencial	
	K''	K'' _{prom}	r	r _{prom}	K	K _{prom}
1,985						
1,993	15.5	41	0.01213	0.0259	0.0121	0.0255
2,005	67.0		0.03973		0.0390	
2,018						

Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE. (2020). *Censo Nacional de Población y Vivienda*. <https://www.dane.gov.co/index.php/60-espanol/demograficas/censos>

Métodos de cálculo para las proyecciones de población

Con una población inicial de 2477 habitantes del sector urbano de Tuta, se realiza el análisis de proyección a 25 años por los diferentes métodos de crecimiento, a fin de obtener la población futura.

Los métodos que establece el Reglamento Técnico del Sector de Agua potable y Saneamiento Básico para el cálculo de las proyecciones de población urbana, los cuales se refiere a la determinación de la población, dotación y demanda. Estos métodos resumidos para el sector de agua potable y saneamiento básico se presentan a continuación:

Tabla 4*Métodos de cálculo recomendados*

Método por emplear	Tipo de población		
	Baja población	Mediana población	Alta población
Aritmético, Geométrico y exponencial	X	X	
Aritmético + Geométrico + exponencial + otros			X

Fuente: Cualla López, R. A. (2008). *Elementos de diseño para acueducto y alcantarillado*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

Como se puede observar en la tabla 4, estos métodos se aplican de acuerdo a tipo de población objeto. Se sugiere entonces para este caso proyectar las poblaciones con los tres primeros métodos.

Método aritmético. Este método es recomendado para poblaciones rurales y sector urbanos de baja población. Se caracteriza porque la población aumenta a una tasa constante de crecimiento aritmético, es decir, que a la población del último censo se le adiciona un número fijo de habitantes para cada período en el futuro. Este método es recomendado para pequeñas poblaciones de poco desarrollo o con áreas de crecimiento casi nulas. El método supone un crecimiento vegetativo balanceado por la mortalidad y la emigración. La ecuación para calcular la población proyectada es la siguiente:

$$Pf = Puc + \frac{Puc - Pci}{Tuc - Tci} * (Tf - Tuc)$$

donde:

Pf= Población correspondiente al año a proyectar (habitantes).

Puc= Población correspondiente a la proyección (habitantes).

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

Tuc= Año correspondiente al último año proyectado

Tci= Año correspondiente al censo inicial con información.

Tf= Año al cual se quiere proyectar la información.

A continuación, se presenta el cálculo de proyección de población por el método aritmético durante un periodo de 25 años con censo inicial para el sector urbano de 588 habitantes y una tasa de crecimiento positiva de 2.14%.

Método geométrico. Este método es útil en poblaciones que muestran una actividad económica importante, ampliamente utilizada para saneamiento básico rural y sectores urbanos menores a los 60000 habitantes, que generan un desarrollo mediano y que poseen áreas de expansión importantes las cuales pueden ser dotadas, sin mayor dificultad, de la infraestructura de servicios públicos. El crecimiento es geométrico si el aumento de la población es proporcional al tamaño de la misma. La ecuación que se emplea es:

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

Donde r es la tasa de crecimiento anual en forma decimal y las demás variables se definen igual que para el método anterior. La tasa de crecimiento anual se calcula de la siguiente manera:

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

P_f = Población correspondiente al año s a proyectar (habitantes).

P_{uc} = Población correspondiente a la proyección (habitantes).

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

T_{uc} = Año correspondiente al último año proyectado

T_f = Año al cual se quiere proyectar la información.

Método exponencial. La utilización de este método 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. 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:

$$P_f = P_{ci} * e^{Kx(Tf-Tci)}$$

Donde k es la tasa de crecimiento de la población la cual se calcula como el promedio de las tasas calculadas para cada par de censos, así:

$$K = \frac{\ln P_{cp} - \ln P_{ca}}{T_{cp} - T_{ca}}$$

donde:

Pcp = Población del censo posterior

Pca = Población del censo anterior (habitantes).

Tcp = Año correspondiente al censo posterior.

Tca = Año correspondiente al censo anterior.

Ln = Logaritmo natural o neperiano.

A continuación, en la tabla 5 se detallan los resultados de la proyección de población calculada por cada uno de los métodos establecidos por el Reglamento Técnico del Sector de Agua potable y Saneamiento Básico para el cálculo de las proyecciones de población urbana

Tabla 5

Proyección de población para el área urbana del municipio de Tuta

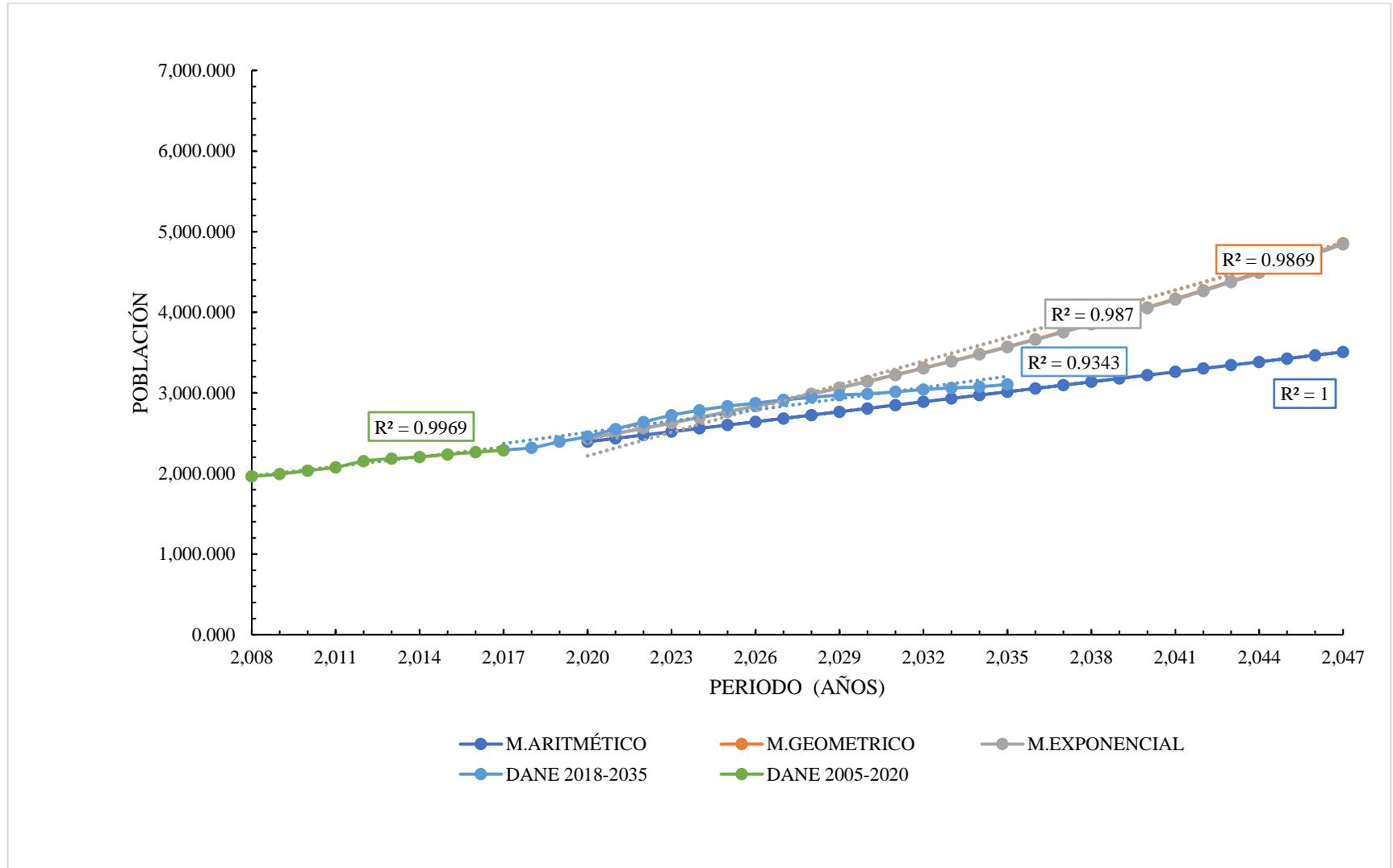
Población de diseño (Hab)			
Año	Proyección aritmética	Proyección geométrica	Proyección exponencial
2,020	2,394.500	2,433.438	2,432.997
2,021	2,435.750	2,496.528	2,495.850
2,022	2,477.000	2,561.254	2,560.327
2,023	2,518.250	2,627.658	2,626.470
2,024	2,559.500	2,695.784	2,694.321
2,025	2,600.750	2,765.676	2,763.925
2,026	2,642.000	2,837.380	2,835.327
2,027	2,683.250	2,910.943	2,908.573
2,028	2,724.500	2,986.413	2,983.712

2,029	2,765.750	3,063.840	3,060.792
2,030	2,807.000	3,143.275	3,139.863
2,031	2,848.250	3,224.768	3,220.977
2,032	2,889.500	3,308.375	3,304.187
2,033	2,930.750	3,394.149	3,389.546
2,034	2,972.000	3,482.147	3,477.110
2,035	3,013.250	3,572.427	3,566.936
2,036	3,054.500	3,665.047	3,659.083
2,037	3,095.750	3,760.069	3,753.610
2,038	3,137.000	3,857.554	3,850.579
2,039	3,178.250	3,957.566	3,950.053
2,040	3,219.500	4,060.172	4,052.097
2,041	3,260.750	4,165.437	4,156.778
2,042	3,302.000	4,273.432	4,264.162
2,043	3,343.250	4,384.227	4,374.321
2,044	3,384.500	4,497.894	4,487.325
2,045	3,425.750	4,614.509	4,603.249
2,046	3,467.000	4,734.146	4,722.167
2,047	3,508.250	4,856.886	4,844.158
Promedio		4,403.098	

Fuente: autores.

Figura 2

Proyección de población para el área urbana del municipio de Tuta

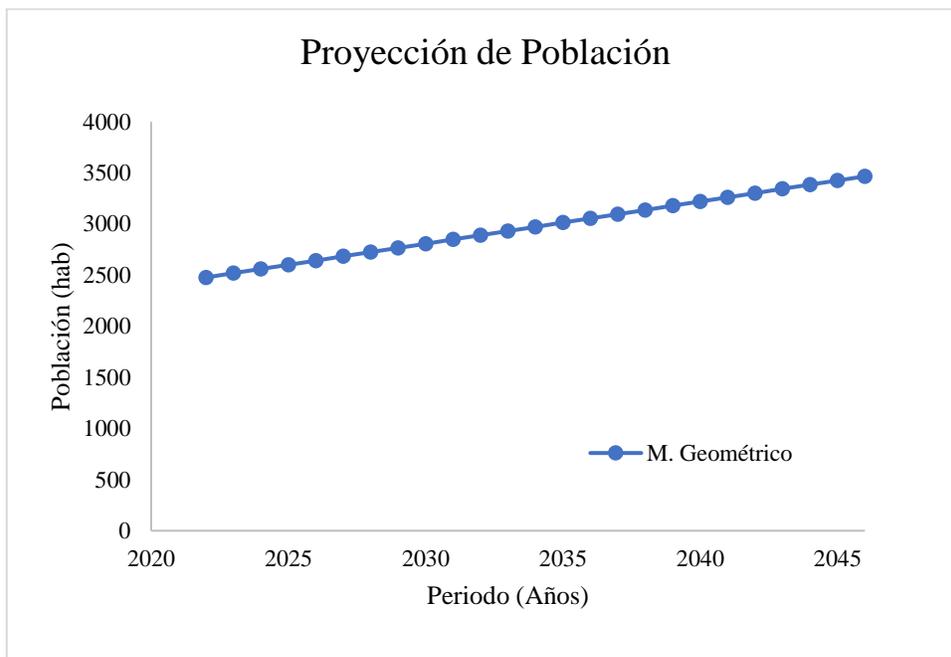


Fuente: autores.

El método de proyección seleccionado de acuerdo, a las proyecciones realizadas y el comportamiento poblacional para el sector urbano del municipio de Tuta, analizando con los tres métodos, el que más se adecua es el **aritmético**, por consiguiente, será insumo para proyección de caudales y a su vez el dimensionamiento hidráulico. En la figura 2 se observa la tendencia del crecimiento poblacional al 2047.

Figura 3

Proyección de población - Método geométrico



Fuente: autores.

De acuerdo a la figura 3 anteriormente presentada, se observa que el crecimiento poblacional del área urbana del municipio de Tuta corresponde a un crecimiento ascendente, reflejando la expansión que está teniendo el municipio.

Cálculo de caudales

Estimación de la dotación. La dotación es la asignación de agua que se le hace a un habitante usuario de un sistema de acueducto. La demanda total de agua se obtiene cuando se multiplica la población que va a ser servida por la dotación; por tal razón, la evaluación de la

dotación es tan importante como la proyección de la población. Dentro del planeamiento de expansiones de sistemas de acueducto y sólo una adecuada definición de estas dos variables permitirá el planteamiento de un plan de obras que garantice una óptima inversión de los recursos del municipio sin llegar a ninguno de los dos extremos: la generación de un "lucro cesante" por el sobredimensionamiento de la demanda o la insuficiencia a corto plazo de las obras propuestas por el sub dimensionamiento de la misma.

Dotación neta. La dotación neta corresponde a la cantidad mínima de agua requerida para satisfacer las necesidades básicas de un suscriptor o de un habitante, sin considerar las pérdidas que ocurran en el sistema de acueducto, dicha dotación es establecida por la resolución 0330 del 2017 en el artículo 43 de la siguiente manera:

Figura 4

Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar.

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

Fuente: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS [Resolución 0330 de 2017]. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf>

En la evaluación de las dotaciones netas de agua (consumos) para el sector se pueden tener tantas dotaciones como usos de agua existan. Los usos serán mencionados a continuación:

Residencial, comercial, industrial, institucional, servicios recreativos, comunitarios, escuelas urbanas y/o rurales, todos los cuales deberán ser considerados en la evaluación de dotaciones y demandas de agua, sin embargo, es una práctica común de la ingeniería hidráulica

que en sistemas donde el consumo de uso residencial represente más del 90% del consumo total, el cálculo de la demanda de agua se realice únicamente a partir de la dotación neta residencial.

Para el caso de los usuarios de la zona urbana, los usos del agua se estiman como residenciales, instituciones y comerciales, sin embargo, para este proyecto por motivos de información faltante se tuvo en cuenta únicamente la Dotación Neta Residencial, por tanto, para asignar un criterio de demanda para el caso de esta asignación debe hacerse dentro de los valores máximos y mínimos descritos por la Resolución 0330 del 08 de julio de 2017.

Según el proyecto por estar a una altura mayor a 2000 msnm, se utiliza una dotación neta máxima de 120 litros/hab.-día de consumo.

➤ Pérdidas de agua en el sistema: Dentro de estas pérdidas están incluidas las pérdidas físicas y las pérdidas domiciliarias del sistema. En una condición ideal en donde no existan "usuarios clandestinos" y se tenga micro medición con cobertura total y alta confiabilidad, las pérdidas comerciales no existirían y se tendría un sistema únicamente con pérdidas físicas cuya magnitud sería la diferencia entre el volumen producido y el volumen realmente consumido. Estas pérdidas físicas a veces llamadas pérdidas técnicas incluirían las fugas de agua en la red, en tanque de almacenamiento y los errores en la macro medición y micro medición.

Según el PUEAA, 2020, con los caudales aforados de cada componente del sistema de acueducto, se realizó en balance hídrico del sistema de abasto, para determinar las pérdidas en el sistema.

Para la determinación de pérdidas se estableció la siguiente formula:

$$\frac{(C_e - C_s)}{C_e} * 100 = \%$$

Donde:

Ce: Caudal de entrada

Cs: Caudal de salida

100: para que arroje el resultado en porcentaje

Tabla 6*Porcentaje de pérdidas en el sistema*

Pérdidas:	% Actual
En la aducción (agua cruda) (Bocatoma y desarenador)	22,78
En los procesos de tratamiento	10,43
En la conducción (agua tratada)	0,000
En el almacenamiento (si existe)	0,59
En las redes de distribución	30,49
Al interior de la vivienda	0,000
En el abrevadero y/o Aplicación del Riego	0,000
Otras pérdidas	0,000
Total, pérdidas	64,29

Fuente: Unidad de Servicios Públicos Tuta. (2020). *Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua - PUEAA*. Alcaldía Municipal de Tuta.

De acuerdo a la información anterior se decide asignar para este estudio un porcentaje de pérdidas del 65%.

Dotación bruta. La dotación, tal como ya se ha definido, se denomina usualmente "dotación bruta" (D_{bruta}), y en su definición intervienen dos variables: la dotación neta (D_{neta}) y el índice de pérdidas de agua en el sistema de acueducto (%P). La dotación bruta para el diseño de cada uno de los elementos que conforman un sistema de acueducto, indistintamente del nivel de complejidad, se debe calcular teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$D_{bruta} = \frac{D_{neta}}{1 - \%p}$$

D_{bruta} : dotación bruta

D_{neta} : dotación neta

%p: pérdidas máximas admisibles

Como el uso residencial es promedio de 90% de los usos totales, entonces la dotación residencial se considera como representativa del sistema y en cuanto al porcentaje de pérdidas técnicas máximas en la ecuación anterior engloban el total de pérdidas esperadas en todos los componentes del sistema como conducciones, aducciones, planta de tratamiento y red de distribución, donde estas pérdidas no deben superar el 25%; se hace claridad en que al hacer los cálculos proyectados en el presente proyecto se define como pérdidas técnicas máximas iniciales el 65% y proyectadas el 25% para dar cumplimiento a lo establecido por la normatividad legal vigente, por lo cual la D_{bruta} será así:

$$d_{bruta} = \frac{120 \frac{L}{hab * dia}}{1 - 0.25} = 160 \frac{L}{hab * dia}$$

Caudal medio diario (25 años). El caudal medio diario (Q_{md}), corresponde al promedio de los consumos diarios de caudal en un período de un año, proyectado al horizonte de diseño, el cual debe calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$Q_{md} = \frac{N^{\circ} hab * D_{bruta}}{86400 s}$$

$$Q_{md} = \frac{3508 hab * 160 \frac{l}{hab * dia}}{86400 s} = 6.5 l/s$$

Caudal máximo diario (25 años). El caudal máximo diario (Q_{MD}), corresponde al consumo máximo registrado durante 24 horas a lo largo de un período de un año. Se calcula multiplicando el caudal medio diario por el coeficiente de consumo máximo diario, K_1 , como se indica en la siguiente ecuación:

$$Q_{MD} = Q_{md} * K_1$$

El coeficiente K_1 se denomina coeficiente de consumo máximo diario y se obtiene de la relación entre el mayor consumo diario y el consumo medio diario, utilizando los registros

de medición en un período mínimo de un año, o el promedio de varios años. Como estos datos históricos de consumo no existan, se recomienda usar los siguientes valores establecidos en la siguiente tabla:

Tabla 7

Coefficientes de consumo diario (K1), según el nivel de complejidad

Factor de Mayoración	(K1) <12500 habitantes	(K1) >12500 habitantes
K1	1.30	1.20

Fuente: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS [Resolución 0330 de 2017]. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf>

Como la población es inferior a 12500 habitantes, el coeficiente **K1 es de 1.30**.

Para el proyecto la Demanda Máxima Diaria QMD se calcula por medio del factor mayoración estipulado en el artículo 47, obteniendo el siguiente resultado:

$$QMD = 6.5 \frac{L}{seg} * 1.3 = 8.45 \frac{L}{seg}$$

Caudal máximo horario. Corresponde a la demanda máxima estimada durante una hora en un período de un año, sin tener en cuenta el caudal de incendio. Se origina en el hecho de que durante un día los consumos de agua no son uniformes, sino que son mayores en algunas horas donde la actividad y el consumo de agua de la población se concentran. La demanda máxima horaria es el parámetro para el diseño de redes de distribución.

La Demanda Máxima Horaria (QMH) se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$QMH = QMD * K_2$$

El coeficiente K₂ se denomina coeficiente de consumo máximo horario y se puede calcular como la relación entre el caudal máximo horario (QMH) y el caudal máximo diario (QMD)

registrados durante un período mínimo de un año, sin incluir los días en que ocurran fallas relevantes en el servicio. Estos registros deben ser realizados sobre la red de conducción o a la salida de los tanques de almacenamiento y de compensación del sistema.

Para calcular en forma específica el valor del coeficiente de consumo máximo horario (K2), se utiliza la recomendada por la resolución 0330, mencionando en la tabla siguiente:

Tabla 8

Coefficiente de consumo máximo horario (K2)

Coeficiente de consumo diario	(K2) <12500 habitantes	(K2) >12500 habitantes
K2	1.60	1.50

Fuente: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS [Resolución 0330 de 2017]. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf>

Como la población es inferior a 12500 habitantes, el coeficiente **K2 es de 1.60**.

Para el proyecto, la Demanda Máxima horaria (QMH) se calcula de la siguiente manera:

$$QMH = 8.45 \frac{l}{s} * 1.60 = 13.51 \frac{l}{s}$$

Tabla 9

Caudales año 2022 hasta 2047 – Acueducto urbano del municipio de Tuta

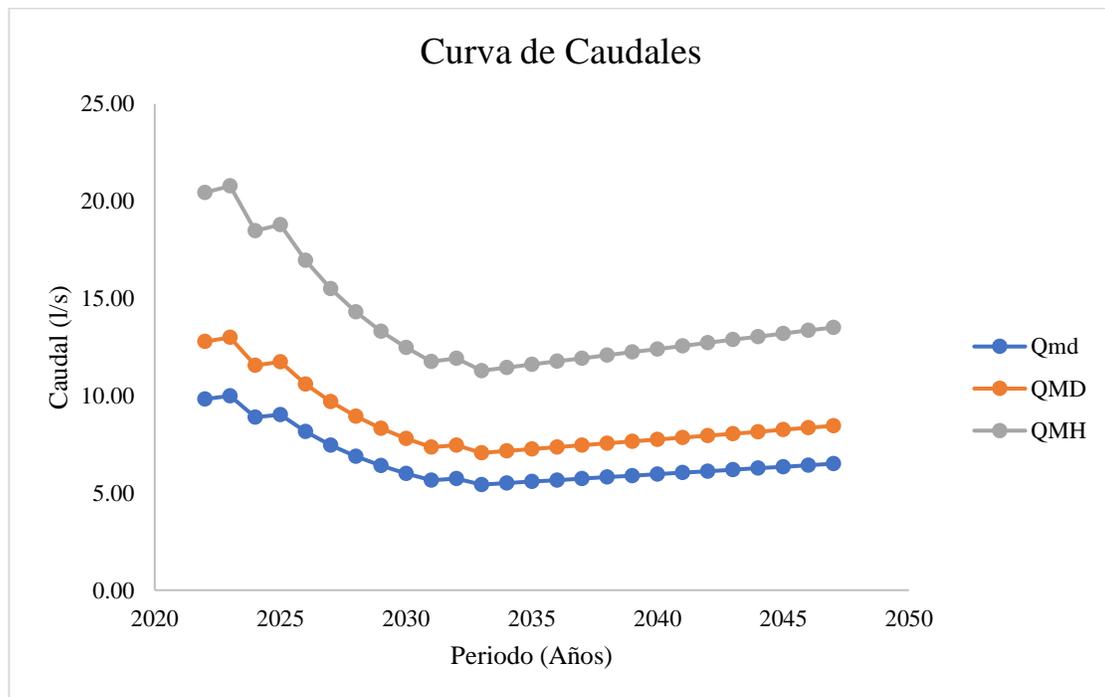
Año (proyectada a 25 años)	Población proyectada por método geométrico	% perdidas	Dotación neta (L/hab-d)	Dotación Bruta (L/hab-d)	Qmd (l/s)	QMD (l/s)	QMH (l/s)
2022	2477	65	120	342.9	9.83	12.78	20.45
2023	2518	65	120	342.9	9.99	12.99	20.79
2024	2560	60	120	300	8.89	11.55	18.49
2025	2601	60	120	300	9.03	11.74	18.78
2026	2642	55	120	266.7	8.15	10.60	16.96
2027	2683	50	120	240	7.45	9.69	15.50
2028	2725	45	120	218.2	6.88	8.94	14.31
2029	2766	40	120	200	6.40	8.32	13.32

2030	2807	35	120	184.6	6.00	7.80	12.48
2031	2848	30	120	171.4	5.65	7.35	11.75
2032	2890	30	120	171.4	5.73	7.45	11.92
2033	2931	25	120	160	5.43	7.06	11.29
2034	2972	25	120	160	5.50	7.15	11.45
2035	3013	25	120	160	5.58	7.25	11.61
2036	3055	25	120	160	5.66	7.35	11.77
2037	3096	25	120	160	5.73	7.45	11.92
2038	3137	25	120	160	5.81	7.55	12.08
2039	3178	25	120	160	5.89	7.65	12.24
2040	3220	25	120	160	5.96	7.75	12.40
2041	3261	25	120	160	6.04	7.85	12.56
2042	3302	25	120	160	6.11	7.95	12.72
2043	3343	25	120	160	6.19	8.05	12.88
2044	3385	25	120	160	6.27	8.15	13.04
2045	3426	25	120	160	6.34	8.25	13.20
2046	3467	25	120	160	6.42	8.35	13.35
2047	3508	25	120	160	6.50	8.45	13.51

Fuente: autores.

Figura 5

Curva de caudales de acuerdo a la proyección de población



Fuente: autores.

Tabla 10*Resumen caudales año 2047 – Acueducto urbano del municipio de Tuta*

Caudal	Medida	Unidad
Qmd	6.50	L/s
QMD	8.45	L/s
QMH	13.51	L/s

Fuente: autores.

A continuación, se realiza el diagnóstico hidráulico de los componentes del sistema de acueducto urbano del municipio de Tuta que son: bocatoma, aducción, desarenador, tanque de almacenamiento y red de distribución, en dos escenarios temporales uno actual (2022) y uno futuro (2047) y con base en este, evaluar las condiciones en las que está operando cada infraestructura de acuerdo a la verificación de los requisitos técnicos que exige la norma para cada uno de estos.

Diagnostico bocatoma

Descripción

La infraestructura de captación del sistema de acueducto urbano del municipio de Tuta corresponde a una bocatoma de fondo, está diseñada para captar agua de la fuente superficial Rio de Piedras. Esta toma se ubica en la parte inferior del cauce y está diseñada para captar agua de una manera eficiente y controlada. La bocatoma de fondo generalmente consta de una serie de aberturas ubicadas en el lecho del cuerpo de agua, permitiendo que el agua fluya hacia un conducto o canal de derivación.

Durante la visita de campo realizada en agosto de 2022, se identificó que la infraestructura destinada a la captación del recurso hídrico, se encuentra situada en las coordenadas geográficas 73°17'06,13''O; 5°42'06.88''N, con una altitud de 2723 m.s.n.m., en la vereda el Carmen del municipio de Cómbita.

La bocatoma existente consta de un dique de 6.0 m. de ancho que atraviesa el rio represando el agua para ser captada, esta infraestructura está conformada por aletas laterales construidas en concreto ciclópeo y por una presa en cuyo eje central está anclada una rejilla

sumergida de 0.4 m * 0.2 m. en varilla de ½” con espaciamientos de 5 cm; además esta captación cuenta con un dissipador de energía frontal para evitar erosiones tanto centrales como laterales en el punto de la toma, de la rejilla y perpendicular al muro central se capta el agua mediante tubería de 6” con pendiente mínima para controlar el arrastre de sólidos hasta una caja de decantadora de 1.63 m * 0.47 m * 1 m de profundidad seguida de una cámara dissipadora ubicada contiguamente de 1.0 m * 0.60 m. con un canal de transferencia de 0.4 m. Y una diferencia de nivel de 0.75 m. para permitir el paso del caudal captado y de allí conducirlo directamente al desarenador.

Figura 6

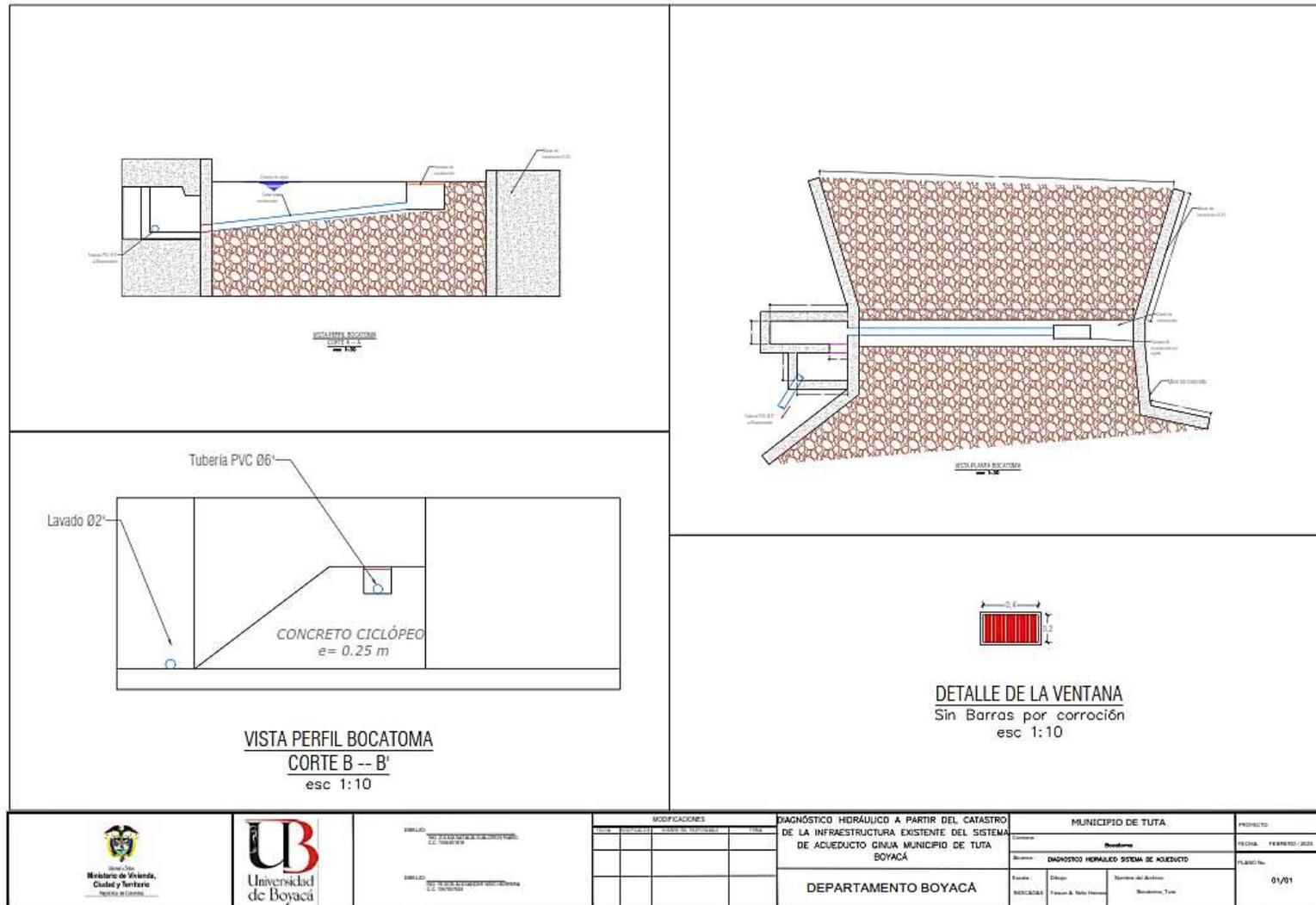
Bocatoma existente



Fuente: autores.

Figura 7

Dimensionamiento bocatoma actual



Fuente: autores.

 <p>Ministerio de Ambiente, Ciudad y Territorio PROCESO DE LICENCIAMIENTO</p>	 <p>UB Universidad de Boyacá</p>	<p>DEBILIDAD</p> <p>DEBILIDAD</p>	MODIFICACIONES		<p>DIAGNÓSTICO HIDRÁULICO A PARTIR DEL CATASTRO DE LA INFRAESTRUCTURA EXISTENTE DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO GUINJA MUNICIPIO DE TUTA BOYACÁ</p> <p>DEPARTAMENTO BOYACÁ</p>	MUNICIPIO DE TUTA			PROYECTO
			FECHA	FECHA		FECHA	FECHA	FECHA	
					<p>CONVENIO</p> <p>BOYACÁ</p>			FECHA	FEBRERO/2023
					<p>BOYACÁ</p> <p>BOYACÁ</p>			FECHA	01/01

Requisitos de diseño

A continuación, se relacionan los criterios técnicos para el diseño de la bocatoma en sistemas de acueducto, establecidos en la Resolución 0330 de 2017, artículo 53 los cuales se usaron como referente para hacer la respectiva evaluación hidráulica:

- El diseño deberá garantizar la altura de muros de protección y la estabilidad de las obras ante eventos de crecientes de retorno de 100 años.
- Deben diseñarse los dispositivos de rejillas y cribado necesarios para evitar el ingreso de objetos gruesos, así como pantallas para limitar el ingreso de material flotante.
- Toda captación deberá contar con los elementos de control necesarios para devolver los excesos de agua captados al cauce de la fuente, y evitar de esta forma el ingreso de caudales mayores al de diseño al sistema de aducción.
- Los diseños de captaciones que prevean la implementación de diques estabilizadores de nivel con vertederos deberán contemplar la estabilización del flujo aguas abajo mediante mecanismos de disipación de energía

Evaluación hidráulica de la bocatoma

Para la evaluación hidráulica de la bocatoma existente se realizó una validación de las dimensiones del diseño original a partir del caudal para el cual fue diseñada y se verificó el cumplimiento de los requisitos técnicos establecidos por la normatividad legal vigente. Este análisis se realizó empleando la metodología propuesta por el RAS 2000, la resolución 0330 de 2017 y los lineamientos establecidos por López Cualla en 2003.

Según la resolución 0330 del 2017 los diseños de captación deben contemplar de manera integral el conocimiento de la hidrología, de la geomorfología y de la hidráulica de la fuente de captación, motivo por el cual, para este caso se empleó el estudio hidrológico realizado en el plan maestro de acueducto y alcantarillado del municipio en el año 2008, en la tabla 11 se presentan los resultados de dicho estudio:

Tabla 11*Características hidrológicas cuenca alta del río Chicamocha*

Cuenca	Estación	Río	Área (km ²)	Q medio (m ³ /s)	Q máximo (m ³ /s)	Q mínimo (m ³ /s)	Rendimiento l/s/km ²
Río Jordán	Las Pilas	Jordán	311	0.55	1.95	0.18	1.77
Río Piedras	Generados	Piedras	55	0.75	4.50	0.32	10.19
Río Tuta	Marlén	Tuta	309	2.52	14.60	0.02	8.15
Río Tuta	El Palo	Tuta*	433	2.62	20.36	0.06	6.05
Río Sotaquira	Maguncia	Sotaquirá	151	1.54	11.89	0.10	10.19
Río Chicamocha	La Reforma	Chicamocha	898	5.39	40.31	0.49	5.45

Fuente: Unidad de Servicios Públicos Tuta. (2008). *Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado*. Alcaldía Municipal de Tuta.

Escenario actual. Según el Plan Maestro elaborado en el año 2008, el caudal de diseño y el caudal real de la estructura de captación es de 4 l/s respectivamente, en este documento se estima que dicha estructura fue construida hace aproximadamente 15 años, es decir al año 2022 tiene un tiempo de construcción de 30 años, en la tabla 12 se realiza la evaluación hidráulica el sistema de captación de acuerdo con las especificaciones técnicas según la resolución 0330 del 2017.

Tabla 12*Evaluación hidráulica bocatoma escenario actual (2022).*

Descripción	Unidad	Valor	Observación	Ecuación
Periodo de diseño	Años	25	Evaluación hidráulica para el caudal de diseño original	
Caudal de diseño (2022)	Qd m ³ /s	0.0040		
Características de la fuente				
Caudal mínimo	Qmin	m ³ /s	0.32	Estudio hidrológico PUEAA
Caudal medio	Qmed	m ³ /s	0.75	
Caudal máximo	Qmax	m ³ /s	4.50	
Diseño de la presa				
Ancho de la presa	L	m	6.0	$H = \left(\frac{Qd}{1.484 \cdot L} \right)^{2/3}$

Numero de contracciones	n		2.0			
Lámina de agua	H	m	0.0051			$L'' = L - (0,1 * n * H) \quad Vr = \frac{Qd}{L'' * H}$
Corrección por contracciones	L'	m	6.00			
Velocidad sobre la presa	Vr	m/s	0.13	0.3 < Vr < 3.0 m/s		No cumple
Diseño de la rejilla						
Alcance filo superior	Xs	m	0.12	Adoptada constructivamente según Planos		$Xs = 0,36 * Vr^{2/3} + 0,60 * H^{4/7}$
Alcance filo inferior	Xi	m	0.07			$Xt = 0,18 * Vr^{4/7} + 0,74 * H^{3/4}$
Ancho del canal	B	m	0.20			$B = Xs + 0,1$
	B	m	0.20			
Longitud de la rejilla						
Diámetro de varilla	Dvarilla	m	0.0254			
Velocidad entre barros	Vb	m/s	0.20	máxima de 0.2 m/s		
Distancia entre barros	a	m	0.05			
Área neta	An	m ²	0.0222			$An = \frac{Qd}{K * Vb}$
Longitud de rejillas	Lr	m	0.17			$Lr = \frac{An * (a + b)}{(a * b)}$
		m	0.35	Se adopta		
Área neta - 1	An	m ²	0.0464	Recalculando		
Número de orificios	N		4.64			$N = \frac{An}{a * B}$
			5.00	Se adopta		
Área neta - 2	An	m ²	0.05			
Velocidad entre barros	Vb	m/s	0.09	máxima de 0.2 m/s		
Longitud de rejillas	Lr	m	0.38			
	Lr	m	0.40	Adoptada constructivamente según Planos		
Cálculo del canal de aducción						
Borde Libre Canal Aducción	Bl	m	0.30			
Pendiente	S	%	0.01			
Gravedad	g	m/s ²	9.806			
Longitud de canal	Lca	m	4.980			
Nivel Agua Aguas Abajo	he=hc	m	0.03			$hc = \left(\frac{Qd^2}{g * B^2} \right)^{1/3}$

$$h = \left[2 * hc^3 + \left(hc - \frac{s * L_c}{3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

Longitud de canal total	Lc	m	5.36	Dimensión según Plano base	
Nivel Agua Aguas Arriba	ho	m	0.02		
Altura Muro Aguas Arriba	Ho	m	0.32		
Altura Muro Aguas Abajo	He	m	0.37		
Velocidad Agua al Final Canal	Ve	m/s	0.58	0.3 < Vr < 3.0 m/s	$ve = \left(\frac{Qd}{B * hc} \right)$

Diseño de la cámara de recolección

Alcance filo superior	Xs	m	0.34		$x_s = 0,36 * Ve^{2/3} + 0,60 * hc^{4/3}$
Alcance filo inferior	Xi	m	0.19		$x_r = 0,18 * Ve^{4/3} + 0,74 * hc^{3/4}$
Ancho de la cámara	Bc	m	1.5	Dimensión según Plano base	

Altura muro de contención

Altura lamina (máxima)	Hmax	m	0.55		$H_{muro} = H_{max} + BL$
Borde libre de muro	Bl	m	0.15		
Altura de muro calculada	Hmuro oc	m	0.70		$H_{max} = \left(\frac{Q_{max}}{1,84 * l} \right)^{2/3}$
Altura de muro existente	Hmuro	m	0.5	Dimensión según Plano base	

Caudales de exceso

Altura lamina (media)	Hmed	m	0.17		$H_{med} = \left(\frac{Q_{med}}{1,84 * l} \right)^{2/3}$
Coefficiente de descarga	Cd		0.3		
Caudal captado	Qcap	m ³ /s	0.027		$Q_{cap} = Cd * An * \sqrt{2 * g * H_{med}}$
Caudal exceso	Qexc	m ³ /s	0.023		$Q_{exc} = Q_{cap} - Qd$

Condiciones para el vertedero

Altura Carga Vertedero	Hexc	m	0.041		$H_{exc} = \left(\frac{Q_{exc}}{1,84 * Bc} \right)^{2/3}$
Velocidad Caudal Exceso	Vexc	m/s	0.374		$v_{exc} = \left(\frac{Q_{exc}}{H_{exc} * Bc} \right)$
Long Caída Vertedero	Xs	m	0.284		$x_s = 0,36 * V_{exc}^{2/3} + 0,60 * H_{exc}^{4/3}$

Fuente: autores.

De acuerdo a la verificación hidráulica de la bocatoma del diseño original se puede identificar que el diseño no cumple con los siguientes requerimientos técnicos:

➤ La velocidad sobre la presa es de 0.13 m/s, de acuerdo a las recomendaciones del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, 2000 este parámetro debe estar dentro de un rango de $0.3 < V_r < 3.0$ m/s por lo tanto incumple con este parámetro presentando problemas en la acumulación de sedimentos en la rejilla y en el canal de aducción generando taponamientos principalmente en la época de verano.

➤ La altura del muro de contención es de 0.5 m, esta altura es insuficiente ya que presenta problemas de desbordamiento como se observa en la figura 8 sobre la cámara de aducción, aumentando el caudal de captación.

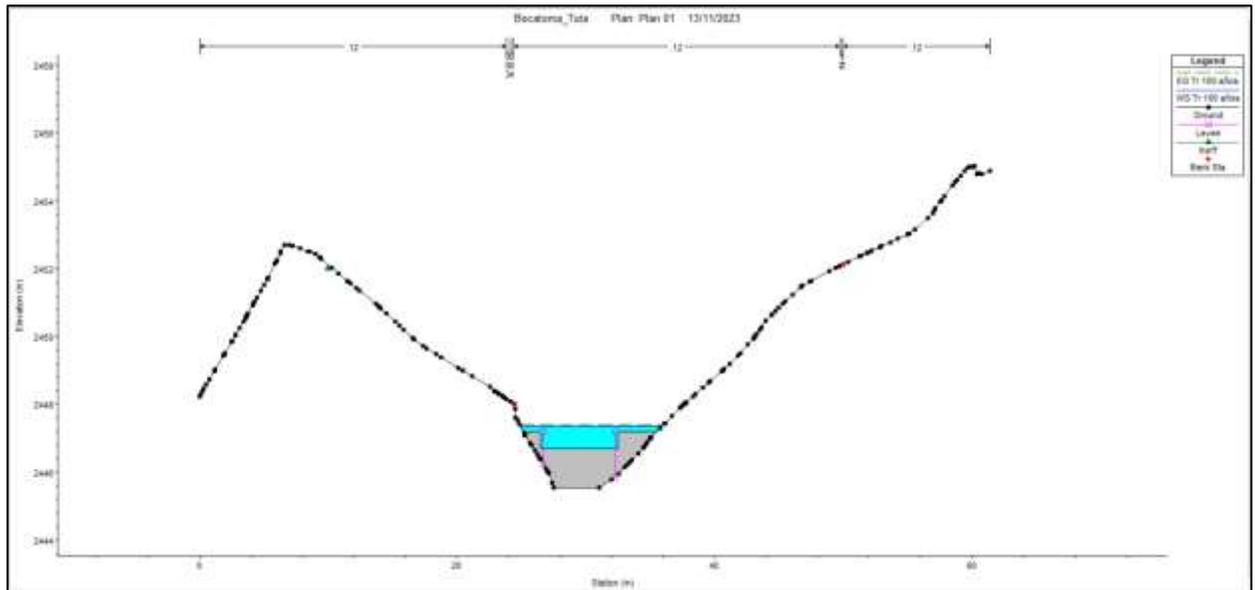
Figura 8

Desbordamiento sobre la presa de la bocatoma.



Fuente: autores.

Para llevar a cabo la evaluación hidráulica de la capacidad de la presa, conforme a las directrices establecidas por la normativa vigente para un periodo de retorno de 100 años, se realizó la modelación hidráulica de la infraestructura en el software HEC- RAS, teniendo como base la topobatimetría del cauce y las dimensiones de la presa, como resultado de la modelación se observa un desbordamiento sobre la estructura de la presa, tal como se ilustra en la figura 9.

Figura 9*Modelo inundación para bocatoma existente*

Fuente: autores.

Escenario futuro (2047). Según la proyección de población para el año 2047 se requiere una demanda de 8.45 L/s, caudal que la estructura no es suficiente de captar de acuerdo a la evaluación hidráulica como se observa en la tabla a continuación:

Tabla 13*Evaluación hidráulica bocatoma escenario futuro (2047).*

Descripción	Unidad	Valor	Observación	Ecuación
Periodo de diseño	Años	25	Evaluación hidráulica para el caudal proyectado a 2047 con las dimensiones existentes	
Caudal de diseño (2047)	Qd	m ³ /s 0.0169		
Características de la fuente				
Caudal mínimo	Qmin	m ³ /s	Estudio hidrológico PUEAA	
Caudal medio	Qmed	m ³ /s		
Caudal máximo	Qmax	m ³ /s		
Diseño de la presa				

Ancho de la presa	L	m	6.0		$L'' = L - (0,1 * n * H)$
Numero de contracciones	n		2.0		
Lámina de agua	H	m	0.0133		$H = \left(\frac{Qd}{1,84 * L} \right)^{2/3}$
Corrección por contracciones	L'	m	6.00		
Velocidad sobre la presa	Vr	m/s	0.21	0.3 < Vr < 3.0 m/s	$Vr = \frac{Qd}{L'' * H}$
Diseño de la rejilla					
Alcance filo superior	Xs	m	0.18		$Xs = 0,36 * Vr^{2/3} + 0,60 * H^{4/7}$
Alcance filo inferior	Xi	m	0.10		$Xt = 0,18 * Vr^{4/7} + 0,74 * H^{3/4}$
Ancho del canal	B	m	0.20		$B = Xs + 0,1$
	B	m	0.20	Se adopta	
Longitud de la rejilla					
Diámetro de varilla	Dvarilla	m	0.0254		
Velocidad entre barrotes	Vb	m/s	0.20	máxima de 0.2 m/s	
Distancia entre barrotes	a	m	0.05		
Área neta	An	m ²	0.0939		$An = \frac{Qd}{K * Vb}$
Longitud de rejillas	Lr	m	0.71		$Lr = \frac{An * (a + b)}{(a * B)}$
		m	0.35	Se adopta	
Área neta - 1	An	m ²	0.0464	Recalculando	
			5.00	Se adopta	$N = \frac{An}{a * B}$
Número de orificios	N		4.64		
Área neta - 2	An	m ²	0.05		
			0.38	máxima de 0.2 m/s	
Velocidad entre barrotes	Vb	m/s	0.38		
Longitud de rejillas	Lr	m	0.38		
	Lr	m	0.40	Adoptada constructivamente según Planos	
Cálculo del canal de aducción					
Borde Libre Canal Aducción	Bl	m	0.30		
Pendiente	S	%	0.01		
Gravedad	g	m/s ²	9.806		$Lc = Lr + ap$

Longitud de canal	Lca	m	4.980		
Nivel Agua Aguas Abajo	he=hc	m	0.03		
Longitud de canal total	Lc	m	5.36	Dimensión según Plano base	$h = \left[2 \cdot hc^3 + \left(hc - \frac{s \cdot Lc}{3} \right)^2 \right]^{1/2}$
Nivel Agua Aguas Arriba	ho	m	0.11		
Altura Muro Aguas Arriba	Ho	m	0.41		
Altura Muro Aguas Abajo	He	m	0.46		
Velocidad Agua al Final Canal	Ve	m/s	0.94	0.3 < Vr < 3.0 m/s	$ve = \left(\frac{Qd}{B \cdot hc} \right)$

Diseño de la cámara de recolección

Alcance filo superior	Xs	m	0.50		$xs = 0,36 \cdot Ve^{2/3} + 0,60 \cdot hc^{4/3}$
Alcance filo inferior	Xi	m	0.30		$xt = 0,18 \cdot Ve^{4/3} + 0,74 \cdot hc^{3/4}$
Ancho de la cámara	Bc	m	0.80		
	Bc	m	1.5	Dimensión según Plano base	

Altura muro de contención

Altura lamina (máxima)	Hmax	m	0.55		$Hmuro = Hmax + BL$
Borde libre de muro	Bl	m	0.15		
Altura de muro calculada	Hmuroc	m	0.70		$Hmax = \left(\frac{Qmax}{1,84 \cdot l} \right)^{2/3}$
Altura de muro existente	Hmuro	m	0.5	Dimensión según Plano base	

Caudales de exceso

Altura lamina (media)	Hmed	m	0.17		$Hmed = \left(\frac{Qmed}{1,84 \cdot l} \right)^{2/3}$
Coefficiente de descarga	Cd		0.3		$Qcap = Cd \cdot An \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot Hmed}$
Caudal captado	Qcap	m³/s	0.027		
Caudal exceso	Qexc	m³/s	0.010		$Qexc = Qcap - Qd$

Condiciones para el vertedero

Altura Carga Vertedero	Hexc	m	0.024		
Velocidad Caudal Exceso	Vexc	m/s	0.285		$vexc = \left(\frac{Qexc}{Hexc} \right)$
Long caída Vertedero	Xs	m	0.227		$Hexc = \left(\frac{Qexc}{1,84 \cdot l} \right)^{2/3}$ $xs = 0,36 \cdot Vexc^{2/3} + 0,60 \cdot Hexc^{4/3}$

Fuente: autores.

De acuerdo a la verificación hidráulica de la bocatoma del diseño original para un caudal de 8.45 l/s (escenario futuro) se puede identificar que el diseño no cumple con los siguientes requerimientos técnicos:

La velocidad sobre la presa es de 0.21 m/s, de acuerdo a las recomendaciones del RAS, 2000 este parámetro debe estar dentro de un rango de $0.3 < V_r < 3.0$ m/s por lo tanto incumple con este parámetro presentando problemas en la acumulación de sedimentos en la rejilla y en el canal de aducción generando taponamientos principalmente en la época de verano.

El área de la rejilla esta subdimensionada para el caudal necesario en el año 2047 ya que la existente cuenta con un área de 0.4 m*0.2 m y para cubrir con la capacidad se necesitaría un área de 0.7 m* 0.2 m.

La altura del muro de contención actual es de 0.5 metros, sin embargo, esta dimensión es insuficiente ya que presenta problemas de desbordamiento.

Observaciones. En general, durante la visita técnica efectuada a esta estructura se observó que la bocatoma se encuentra en mal estado ya que no cuenta con rejilla, no existe vertedero de excesos ni caja de control de caudal, no hay cerramiento o tapa de protección a la misma; adicional a esto no se han realizado labores de mantenimiento dado que se encuentran materiales que generan obstrucción en el canal como palos, postes en concreto y ramas como se observa en la figura 10, aspecto que provoca que el flujo del agua hacia la bocatoma se haga por la parte superior. Por información suministrada por el operario del sistema de acueducto, se sabe que las labores de mantenimiento se realizan únicamente cuando evidencian una disminución de caudal de entrada a la plata de tratamiento de agua potable.

Figura 10

Estado de la bocatoma año 2022.



Fuente: autores.

Recomendaciones. La infraestructura de captación presenta notables errores en términos de diseño, mantenimiento y falta de operación. La evaluación hidráulica revela que la bocatoma no presenta dimensiones adecuadas para su correcto funcionamiento, tanto para el escenario actual como para el futuro, considerando la normatividad vigente (resolución 0330 de 2017). Además, la optimización de la infraestructura existente no se considera como viable desde una perspectiva hidráulica. Por consiguiente, se propone el diseño y construcción de una nueva estructura que pueda satisfacer las necesidades y requisitos técnicos de manera más efectiva como se observa en el capítulo 3.

Diagnostico desarenador

Descripción

En el diseño de estructuras para acueducto el desarenador es considerado como un tratamiento primario ya que su función es remover las partículas de determinados tamaños que en la captación mediante la rejilla y cajas de decantación han dejado pasar. El desarenador del acueducto del municipio de Tuta, está conformado por una unidad construida en concreto reforzado, de 6,10 m de longitud, 2,10 m de ancho y 1,70 m de profundidad útil, posee válvula en la entrada y salida del desarenador y una válvula para realizar el lavado.

En la estructura posterior a la zona de sedimentación empotrada en la pared del desarenador existe una cortina o claraboya de 0.45 cm. * 070 cm. con varillas espaciadas cada 0.10 cm. que permiten el paso del agua clarificada a la zona de salida, en el anexo 1 se presenta a detalle cada una de las dimensiones que compone la infraestructura que se inventario en la correspondiente visita de campo.

Figura 11

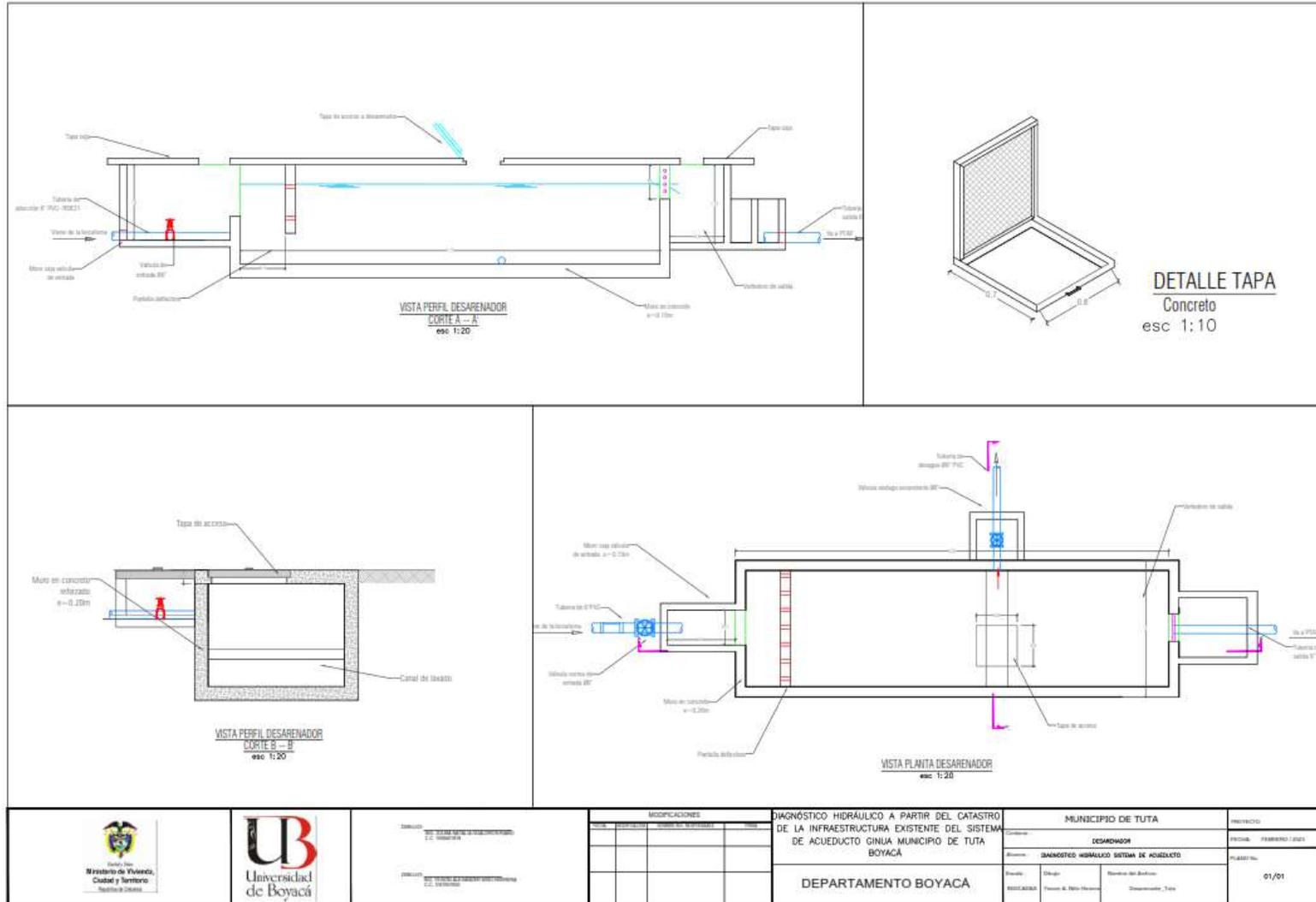
Infraestructura del desarenador



Fuente: autores.

Figura 12

Dimensionamiento desarenador actual



Fuente: autores

Requisitos de diseño

A continuación, se relacionan los criterios técnicos para el diseño del desarenador en sistemas de acueducto, establecidos en la Resolución 0330 de 2017, artículo 55 los cuales se usaron como referente para hacer la respectiva evaluación hidráulica:

- Contar con dispositivo de rebose mediante un vertedero lateral, el cual debe estar ubicado en la entrada del desarenador.
- El desarenador debe prever la eliminación de partículas con diámetro mínimo de 0,1mm con una velocidad del asentamiento vertical calculada en función de la temperatura del agua y eso específico de la partícula, teniendo en cuenta el régimen laminar.
 - Se deberá mantener una velocidad horizontal inferior a 0.25 m/s.
 - El peso específico de las partículas de arena por remover será de 2.65 gr/cm³.
 - La relación entre la velocidad horizontal y la velocidad de asentamiento vertical será inferior a 20.
- La estructura deberá contar suficiente almacenamiento de arenas y contar con sistemas hidráulicos con pendientes superiores al 10% para obtener una eficiente evacuación del producto del desarenador.
- La unidad debe tener un paso directo con la capacidad para operar el caudal de diseño cuando la estructura este en limpieza, como los respectivos descoles a las fuentes receptoras de los caudales de exceso y del producto del desarenador.

Evaluación hidráulica del desarenador

La evaluación hidráulica del desarenador en función del caudal de diseño implica garantizar que la instalación esté dimensionada adecuadamente para gestionar el flujo de agua esperado en condiciones normales. Es esencial revisar el diseño original del desarenador, asegurándose de que su capacidad sea suficiente para evitar problemas como desbordamientos o estrés hidráulico.

Al observar los deflectores del desarenador se considera que, estos son deficientes debido al mal estado en el que se encuentran como se observa en la siguiente figura:

Figura 13*Estado de los deflectores salida del desarenador*

Fuente: autores.

A partir de lo anterior y del Número de Hazen resultante del porcentaje de remoción y las condiciones en las que se encuentra el desarenador, que para este caso es de 1.80 se procede a realizar la respectiva evaluación hidráulica de este componente, en la tabla 14 se presentan los resultados. (Cualla López, R. A.,2008)

Escenario actual. Se realiza la verificación la velocidad de flujo, el diseño de la entrada, la altura del agua, y la eficiencia de sedimentación, en la tabla 15 se presentan los resultados.

Tabla 14*Evaluación hidráulica desarenador escenario actual (2022)*

Memoria de cálculo desarenador				
Datos iniciales				
Descripción	Unidad	Cantidad	Símbolo	
Caudal de diseño actual	LPS	8	QMD	
	LPS	8		
Caudal	m ³ /seg	0.008	Q	
	m ³ /día	691.2		
Periodo de diseño	Años	25	PD	

Numero de módulos	Und	1	#M
Caudal de diseño por modulo	m ³ /seg	0.008	Q/UND
Remisión de partículas de diámetro	mm	0.05	d
Porcentaje de remoción	%	75	R
Temperatura	Oc	15	T
Viscosidad cinemática	cm ² /s	0.01059	μ
Densidad del agua a la temperatura ambiente	g/cm ³	1.0	p
Grado del desarenador	n	1	G
Relación Longitud: Ancho	adimensional	4:1	L:H
Gravedad	cm/S ²	981	g
Peso específico de la partícula de arena	g/cm ³	2.65	ρs
Peso específico de la partícula del fluido agua	g/cm ³	1	ρ
Cota de la lámina a la entrada del desarenador:		m	0.29
Cota de entrada del desarenador:		msnm	479.30

Descripción	Símbolo	Valor	Unidad	Ecuación
Velocidad de sedimentación	V _s	0.21	cm/s	$V_s = \frac{g (\rho_s - \rho)}{18 \mu} d^2$
Profundidad	h	1.70	m	
Tiempo	t	800.36	seg	$t = \frac{h}{V_s}$
Periodo de retención hidráulico	TRH	640.29	seg	$\frac{\theta}{t} = \frac{V_s}{V_o}$
		1067 0.18	min HR	No cumple
Volumen del tanque	V	5.12	m ³	$V = \theta \times Q$
Área superficial	A _s	3.01	m ²	$A_s = \frac{V}{h}$
	b	0.87	m ²	
	L	3.47	m ²	$b = \sqrt{\frac{A_s}{4}}$
Área superficial	A _s	12	m ²	$L = 4 \times b$
Ancho	b	2	m	$q = \frac{Q}{A_s}$
Largo	L	6	m	

Carga hidráulica superficial	ch	0.000067	m ³ /m ² -s	$V_o = q$
		57.6	m ³ /m ² -dia	ok
	Vo	0.07	cm/s	
Sedimentación de la partícula	do	0.00326	cm	$d_o = \sqrt{\frac{V_o \times 18 \times \mu}{g \times (\rho_s - \rho)}}$
		0.03	mm	ok
	Vh	0.24	cm/s	
Velocidad horizontal	vhmX	13.84	cm/s	
	Vr	13.14	cm/s	

Elementos desarenador

Vertedero de salida	Hv	0.004	m	$H_v = \left(\frac{Q}{1.84 b}\right)^{\frac{2}{3}}$
Vertedero de salida	Vv	1.32	m/s	$V_v = \frac{Q}{b H_v}$
Vertedero de salida	Xs	0.46	m	$X_s = 0.36 (V_v)^{\frac{2}{3}} + 0.60 (H_v)^{\frac{4}{3}}$
	Lv	0.35	m	
Pantalla de salida	H	0.85	m	$\frac{H}{2}$
Distancia al vertedero de salida		0.06	m	$15 H_v$
Pantalla de entrada	H	0.85	m	
Distancia al vertedero de salida		1.48	m	$\frac{L}{4}$

Almacenamiento de lodos

Relación Longitud: Profundidad Lodos		10		$\frac{L}{10}$
Profundidad máxima		0.59	m	$\frac{L}{3}$
Profundidad máxima adoptada		3	m	$\frac{L}{3}$
Profundidad mínima adoptada		1	m	$\frac{2L}{3}$
Dist. Pto. de salida a la cámara de quietamiento		1.98	m	$\frac{L}{3}$

Dist. Pto. de salida al vertedero de salida	3.96	m
---	------	---

Pantalla de orificios en la entrada del desarenador

Diámetro de los orificios	3	in
Área de cada orificio	0.0046	m ²
Velocidad de paso (máxima)	0.2	m/s
Caudal de diseño por modulo	691.2	m ³ /día
Área del modulo	0.040	m ²
Numero requerido de orificios	8.77	
Numero de orificios adoptado	90	

Perdidas del desarenador

Perdidas en la pantalla de entrada	H entrada	0.00005	m	$h_f = \left(\frac{1}{2g}\right) \left(\frac{Q}{Cd A}\right)^2$
Perdidas en la pantalla de salida	H salida	0.00000	m	
Pérdidas totales	hf	0.00005	m	

Fuente: autores.

De acuerdo a la verificación hidráulica del desarenador para un caudal de 8 l/s según del diseño original se puede identificar que el diseño no cumple con el siguiente requerimiento técnico:

Con base al número de Hazen y el tiempo de remoción, el tiempo de retención hidráulico es de 10.67 min y la Resolución 0330 de 2017, artículo 55 recomienda que este entre 30 *min* y 240 *min*.

Escenario futuro. Según la proyección de población para el año 2047 se requiere una demanda de 8.45 L/s, caudal que la estructura no es suficiente de captar de acuerdo a la evaluación hidráulica como se observa en la tabla 16:

Tabla 15*Evaluación hidráulica desarenador escenario futuro (2047)*

Memoria de cálculo desarenador				
Descripción	Datos iniciales		Símbolo	
	Unidad	Cantidad		
Caudal de Diseño Actual	LPS	8.45	QMD	
Caudal	m ³ /seg	0.00845		
	m ³ /día	730.08		
Periodo de diseño	Años	25	PD	
Numero de módulos	Und	1	#M	
Caudal de diseño por modulo	m ³ /seg	0.008	Q/UND	
remoción de partículas de diámetro	mm	0.05	d	
Porcentaje de remoción	%	75	R	
Temperatura	Oc	15	T	
Viscosidad cinemática	cm ² /s	0.01059	μ	
Densidad del agua a la temperatura ambiente	g/cm ³	1.0	p	
Grado del desarenador	n	1	G	
Relación Longitud: Ancho	adimensional	4:1	L:H	
Gravedad	cm/S ²	981	g	
Peso específico de la partícula de arena	g/cm ³	2.65	ρs	
Peso específico de la partícula del fluido agua	g/cm ³	1	ρ	
Descripción	Símbolo	Valor	Unidad	Ecuación
Velocidad de sedimentación	Vs	0.21	cm/s	$V_s = \frac{g (\rho_s - \rho)}{18 \mu} d^2$
Profundidad	h	1.70	m	
Tiempo	t	800.36	seg	$t = \frac{h}{V_s}$
Periodo de retención hidráulico	trh	640.29	seg	$\frac{\theta}{t} = \frac{V_s}{V_o}$
		10.67	min	
		0.18	HR	
Volumen del tanque	V	5.41	m ³	$V = \theta \times Q$
Área superficial	As	3.18	m ²	$A_s = \frac{V}{h}$

	b	0.89	m ²	
	L	3.57	m ²	
Área superficial	As	12.00	m ²	
Ancho	b	2.00	m	$b = \sqrt{\frac{A_s}{4}}$
Largo	L	6.00	m	$L = 4 \times b$
Carga hidráulica superficial	ch	0.00070	m ³ /m ² -s	$q = \frac{Q}{A_s}$
		60.84	m ³ /m ² -dia	ok
	Vo	0.07	cm/s	$V_o = q$
Sedimentación de la partícula	do	0.00302	cm	$d_o = \sqrt{\frac{V_o \times 18 \times \mu}{g \times (\rho_s - \rho)}}$
		0.03	mm	ok
Velocidad horizontal	Vh	0.25	cm/s	$V_h = \frac{V_o \times L}{h}$
	vhmX	4.25	cm/s	$V_{hmax} = 20 \times V_s$
Velocidad de Resuspensión	Vr	9.29	cm/s	$V_r = \sqrt{\frac{8k}{f} g (\rho_s - \rho) d}$

Elementos desarenador

Vertedero de salida	Hv	0.006	m	$H_v = \left(\frac{Q}{1.84 b}\right)^{\frac{2}{3}}$
Vertedero de salida	Vv	1.56	m/s	$V_v = \frac{Q}{b H_v}$
Vertedero de salida	Xs	0.52	m	$X_s = 0.36 (V_v)^{\frac{2}{3}} + 0.60 (H_v)^{\frac{4}{3}}$
	Lv	0.35	m	
Pantalla de salida	H	0.85	m	$\frac{H}{2}$
Distancia al vertedero de salida		0.09	m	$15 H_v$
Pantalla de entrada	H	0.85	m	

Distancia al vertedero de salida	0.89	m	$\frac{L}{4}$
Almacenamiento de lodos			
Relación Longitud: Profundidad Lodos	10		
Profundidad máxima	0.36	m	$\frac{L}{10}$
Profundidad máxima adoptada	3	m	
Profundidad mínima adoptada	1	m	$\frac{L}{3}$
Dist. Pto. de salida a la cámara de aquietamiento	1.19	m	$\frac{2L}{3}$
Pantalla de orificios en la entrada del desarenador			
Diámetro de los orificios	3	in	
Área de cada orificio	0.0046	m ²	
Velocidad de paso (máxima)	0.2	m/s	
Caudal de diseño por modulo	730.08	m ³ /día	
Área del modulo	0.042	m ²	$A = \frac{Q}{86400 V_{pasomax}}$
Numero requerido de orificios	9.26		
Numero de orificios adoptado	90		
Perdidas del desarenador			
Perdidas en la pantalla de entrada	H entrada	0.00005	m
Perdidas en la pantalla de salida	H salida	0.00000	m
Pérdidas totales	H f	0.00005	m

Fuente: autores.

De acuerdo a la verificación hidráulica del desarenador para un caudal de 8.45 l/s se puede identificar que el diseño no cumple con el tiempo de retención hidráulica, se determina que esta estructura no tiene las dimensiones necesarias para realizar una correcta sedimentación; debido a esto, en el capítulo 3 se presenta el diseño de un desarenador del mismo tipo al actual pero que cumple con las especificaciones para el caudal en el escenario futuro (2027).

Observaciones. Después de visitar el desarenador, llevar a cabo la inspección y revisar la documentación existente, se concluyó que el desarenador instalado no está operando adecuadamente. Se pudo observar que no logra sedimentar una considerable cantidad de

partículas presentes en el agua debido al bajo tiempo de retención hidráulica en el tanque de sedimentación. Además, el agua se desborda por las paredes del desarenador, resultando en su deterioro.

En general, el desarenador presenta gran desgaste en su estructura, dado que las cámaras de ingreso y salida se encuentran colmatadas de lodo y se observa que el mantenimiento correctivo al sistema es insuficiente. Adicional a esto es preciso mencionar que las válvulas de lavado están fuera de funcionamiento debido a que, por falta de uso, estas se sellaron, la infraestructura tampoco cuenta con bypass para realizar labores de mantenimiento sin necesidad de suspender el paso de agua. La evidencia de lo mencionado anteriormente se presenta a continuación.

Figura 14

Estado desarenador existente



Fuente: autores.

Recomendaciones. Bajo los criterios hidráulicos mencionados anteriormente se recomienda el cambio de la estructura actual que garantice una óptima prestación del servicio dado que la estructura del desarenador se considera como un tratamiento primario en el funcionamiento del sistema y al no estar operando de forma adecuada afecta completamente todas las estructuras siguientes incluyendo los sistemas de tratamiento. Por ende, es necesario ampliar el volumen del tanque para garantizar un tiempo de retención hidráulico dentro del rango establecido como se presenta en el capítulo 3.

Diagnostico red de aducción

Descripción

La red de aducción es el sistema de tuberías y componentes que transporta agua desde el pretratamiento hasta la planta de tratamiento. Desde un punto de vista técnico, su diseño implica consideraciones hidráulicas, topográficas y estructurales para garantizar un flujo eficiente y minimizar pérdidas. Factores clave incluyen el diámetro de las tuberías, el material, la elevación del terreno y la capacidad para gestionar variaciones en la demanda de agua. Un diseño cuidadoso y una operación eficiente son esenciales para asegurar la calidad y disponibilidad del agua suministrada a la planta de tratamiento.

La red de aducción se compone en dos tramos, el primero cuenta con una longitud de 20 metros lineales comprendidos desde la bocatoma hasta el desarenador, en material de PVC de diámetro de 6"; y el segundo con una longitud de 7.988,82 m que inicia desde el desarenador y termina en la planta de tratamiento de agua potable, en este último tramo se evidencia que la red presenta un cambio de diámetro de 6" a 4" en material de PVC en el kilómetro 3874,84, según información suministrada por el operario Miguel Rodríguez, este cambio se implementó como diseño hidráulico, dado que al reducir el diámetro de la tubería se aumenta la cabeza de presión de acuerdo a la topología del terreno.

Figura 15

Red de aducción del acueducto urbano del municipio de Tuta



Fuente: Unidad de Servicios Públicos Tuta. (2008). *Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua*. Alcaldía Municipal de Tuta.

Durante el recorrido se identificaron 6 pasos elevados como se evidencia en la figura 16 los cuales son utilizados por los habitantes de la zona como puentes peatonales, produciendo sobrecargas, roturas de la tubería y fugas. Adicionalmente la línea cuenta con válvulas de compuerta y 11 válvulas ventosas, sin embargo, estas carecen de cajas de protección, lo que dificulta su ubicación, motivo por el cual se encuentran en regular estado y requieren mantenimiento a corto plazo.

Figura 16

Línea de aducción



Fuente: autores

Requisitos de diseño

A continuación, se relacionan los criterios técnicos para el diseño de redes de aducción en sistemas de acueducto, establecidos en la Resolución 0330 de 2017, Resolución 0799 de 2021, artículo 56, los cuales se usarán como parámetro de evaluación para el diagnóstico hidráulico:

El diseño debe basarse en el QMD

- La velocidad mínima debe ser de 0.5 m/s, o aquella que genere un esfuerzo cortante en la pared de la tubería mínimo de 1.50 Pa.
- La velocidad máxima no deberá sobrepasar los límites de velocidad recomendados para el material del ducto a emplear y/o los accesorios correspondientes.
- Se debe generar una profundidad mínima de 0.60 m desde la superficie del terreno hasta el lomo de la tubería.

Evaluación hidráulica de la red de aducción

La revisión del estado actual presenta los resultados contenidos en la tabla 17, en el análisis y evaluación de la línea de aducción:

Con las características verificadas para el diseño de la red, se realiza el modelado hidráulico en el software WaterGEMS el cual permite la simulación y facilita la verificación del cumplimiento con normativas y la evaluación de acuerdo a la información topográfica del respectivo trazado.

Tabla 16

Características y capacidad hidráulica de la red

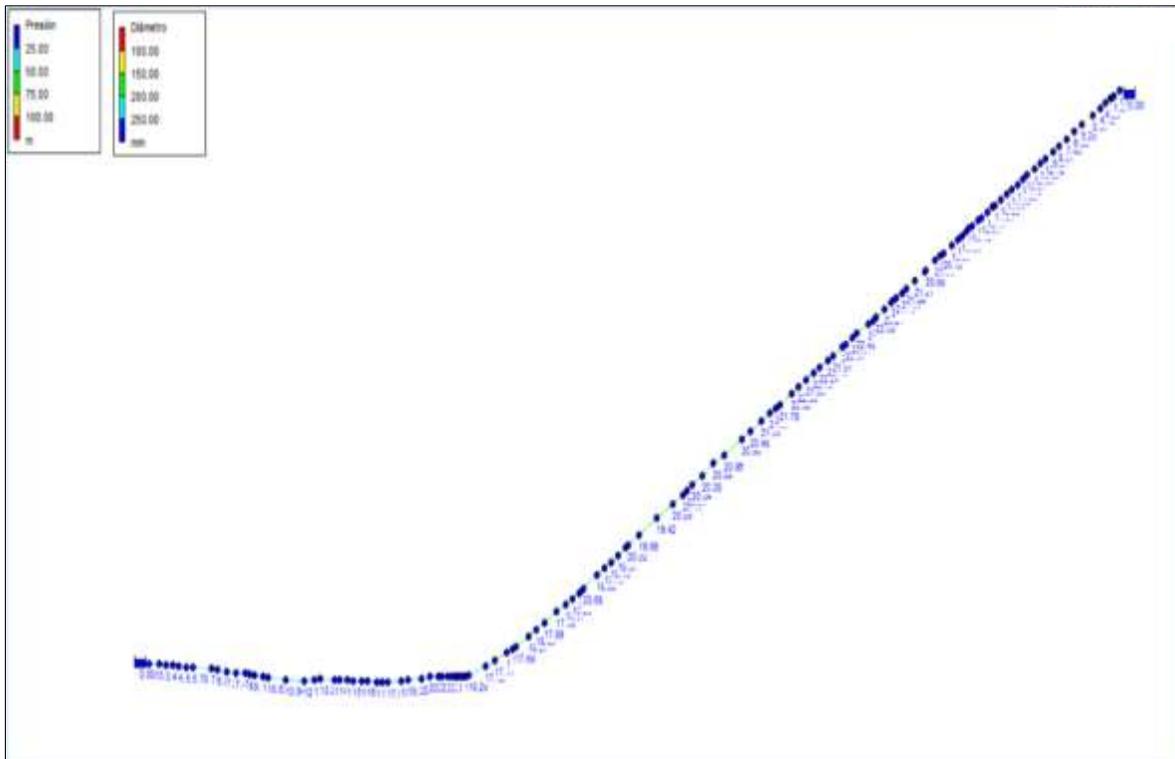
Tubería	Evaluación Hidráulica
PVC RDE 21 6"-4"	11.92 l/s
Presión en el primer nodo de la red	2.03 m
Presión a la llegada del desarenador	1.02 m
Longitud real tubería PVC 6"	3874.84 m

Longitud real tubería PVC 4"	4113.98 m
Longitud total de la red	7988.82 m

Fuente: autores.

Figura 17

Modelo hidráulico



Fuente: autores.

Tabla 17

Características de tramo desarenador - PTAP

TUBERÍA	Q (L/s)	V (m/s)	PRESIÓN (m.c.a.)	TUBERÍA	Q (L/s)	V (m/s)	PRESIÓN (m.c.a.)
Tubería p1	11.92	0.55	Nod-2 2.03	Tubería p41	11.92	0.59	Nod-42 20.08
Tubería p2	11.92	0.55	Nod-3 2.62	Tubería p42	11.92	0.59	Nod-43 19.49
Tubería p3	11.92	0.55	Nod-4 3.4	Tubería p43	11.92	0.59	Nod-44 19.01
Tubería p4	11.92	0.55	Nod-5 3.58	Tubería p44	11.92	0.59	Nod-45 18.29
Tubería p5	11.92	0.55	Nod-6 4.28	Tubería p45	11.92	0.59	Nod-46 17.12
Tubería p6	11.92	0.55	Nod-7 4.54	Tubería p46	11.92	0.59	Nod-47 17.11
Tubería p7	11.92	0.55	Nod-8 5.09	Tubería p47	11.92	0.59	Nod-48 17.17

Tubería p8	11.92	0.55	Nod-9	5.78	Tubería p48	11.92	0.59	Nod-49	17.6
Tubería p9	11.92	0.55	Nod-10	7.07	Tubería p49	11.92	0.59	Nod-50	17.68
Tubería p10	11.92	0.55	Nod-11	6.86	Tubería p50	11.92	0.59	Nod-51	18.27
Tubería p11	11.92	0.55	Nod-12	7.21	Tubería p51	11.92	0.59	Nod-52	18.05
Tubería p12	11.92	0.55	Nod-13	7.42	Tubería p52	11.92	0.59	Nod-53	17.89
Tubería p13	11.92	0.55	Nod-14	7.93	Tubería p53	11.92	0.59	Nod-54	17.58
Tubería p14	11.92	0.55	Nod-15	8.01	Tubería p54	11.92	0.59	Nod-55	18.67
Tubería p15	11.92	0.55	Nod-16	9.13	Tubería p55	11.92	0.59	Nod-56	19.2
Tubería p16	11.92	0.55	Nod-17	10.03	Tubería p56	11.92	0.59	Nod-57	20.87
Tubería p17	11.92	0.55	Nod-18	10.52	Tubería p57	11.92	0.59	Nod-58	20.78
Tubería p18	11.92	0.55	Nod-19	10.94	Tubería p58	11.92	0.59	Nod-59	20.68
Tubería p19	11.92	0.55	Nod-20	12.69	Tubería p59	11.92	0.59	Nod-60	18.68
Tubería p20	11.92	0.55	Nod-21	12.83	Tubería p60	11.92	0.59	Nod-61	19.13
Tubería p21	11.92	0.55	Nod-22	13.27	Tubería p61	11.92	0.59	Nod-62	19.7
Tubería p22	11.92	0.55	Nod-23	14.14	Tubería p62	11.92	0.59	Nod-63	19.57
Tubería p23	11.92	0.55	Nod-24	14.89	Tubería p63	11.92	0.59	Nod-64	19.6
Tubería p24	11.92	0.55	Nod-25	15.08	Tubería p64	11.92	0.59	Nod-65	20.02
Tubería p25	11.92	0.55	Nod-26	15.54	Tubería p65	11.92	0.59	Nod-66	19.99
Tubería p26	11.92	0.55	Nod-27	16.22	Tubería p66	11.92	0.59	Nod-67	19.42
Tubería p27	11.92	0.55	Nod-28	16.48	Tubería p67	11.92	0.59	Nod-68	20.09
Tubería p28	11.92	0.55	Nod-29	17.36	Tubería p68	11.92	0.59	Nod-69	20.46
Tubería p29	11.92	0.55	Nod-30	17.4	Tubería p69	11.92	0.59	Nod-70	20.94
Tubería p30	11.92	0.55	Nod-31	17.81	Tubería p70	11.92	0.59	Nod-71	20.04
Tubería p31	11.92	0.55	Nod-32	18.48	Tubería p71	11.92	0.59	Nod-72	20.38
Tubería p32	11.92	0.55	Nod-33	19.26	Tubería p72	11.92	0.59	Nod-73	20.88
Tubería p33	11.92	0.55	Nod-34	20.39	Tubería p73	11.92	0.59	Nod-74	20.96
Tubería p34	11.92	0.55	Nod-35	22.09	Tubería p74	11.92	0.59	Nod-75	20.9
Tubería p35	11.92	0.55	Nod-36	21.68	Tubería p75	11.92	0.59	Nod-76	20.98
Tubería p36	11.92	0.55	Nod-37	22.04	Tubería p76	11.92	0.59	Nod-77	21.33
Tubería p37	11.92	0.55	Nod-38	22.68	Tubería p77	11.92	0.59	Nod-78	21.3
Tubería p38	11.92	0.55	Nod-39	22.06	Tubería p78	11.92	0.59	Nod-79	21.66
Tubería p39	11.92	0.55	Nod-40	21.19	Tubería p79	11.92	0.59	Nod-80	21.78
Tubería p40	11.92	0.55	Nod-41	20.54	Tubería p80	11.92	0.59	Nod-81	22.62
Tubería p81	11.92	1.28	Nod-82	22.93	Tubería p121	11.92	1.28	Nod-122	17.11
Tubería p82	11.92	1.28	Nod-83	21.89	Tubería p122	11.92	1.28	Nod-123	17.17
Tubería p83	11.92	1.28	Nod-84	22.15	Tubería p123	11.92	1.28	Nod-124	17.6
Tubería p84	11.92	1.28	Nod-85	22.24	Tubería p124	11.92	1.28	Nod-125	17.68
Tubería p85	11.92	1.28	Nod-86	22.13	Tubería p125	11.92	1.28	Nod-126	18.27
Tubería p86	11.92	1.28	Nod-87	21.51	Tubería p126	11.92	1.28	Nod-127	18.05
Tubería p87	11.92	1.28	Nod-88	22.26	Tubería p127	11.92	1.28	Nod-128	17.89
Tubería p88	11.92	1.28	Nod-89	22.51	Tubería p128	11.92	1.28	Nod-129	17.58

Tubería p89	11.92	1.28	Nod-90	22.61	Tubería p129	11.92	1.28	Nod-130	18.67
Tubería p90	11.92	1.28	Nod-91	22.42	Tubería p130	11.92	1.28	Nod-131	19.2
Tubería p91	11.92	1.28	Nod-92	22.92	Tubería p131	11.92	1.28	Nod-132	20.87
Tubería p92	11.92	1.28	Nod-93	23.15	Tubería p132	11.92	1.28	Nod-133	20.78
Tubería p93	11.92	1.28	Nod-94	22.68	Tubería p133	11.92	1.28	Nod-134	20.68
Tubería p94	11.92	1.28	Nod-95	23.21	Tubería p134	11.92	1.28	Nod-135	18.68
Tubería p95	11.92	1.28	Nod-96	22.43	Tubería p135	11.92	1.28	Nod-136	19.13
Tubería p96	11.92	1.28	Nod-97	21.47	Tubería p136	11.92	1.28	Nod-137	19.7
Tubería p97	11.92	1.28	Nod-98	21.78	Tubería p137	11.92	1.28	Nod-138	19.57
Tubería p98	11.92	1.28	Nod-99	21.99	Tubería p138	11.92	1.28	Nod-139	19.6
Tubería p99	11.92	1.28	Nod-100	21.84	Tubería p139	11.92	1.28	Nod-140	19.13
Tubería p100	11.92	1.28	Nod-101	21.27	Tubería p140	11.92	1.28	Nod-141	14.9
Tubería p101	11.92	1.28	Nod-102	20.88	Tubería p141	11.92	1.28	Nod-142	14.13
Tubería p102	11.92	1.28	Nod-103	20.68	Tubería p142	11.92	1.28	Nod-143	13.37
Tubería p103	11.92	1.28	Nod-104	20.36	Tubería p143	11.92	1.28	Nod-144	12.65
Tubería p104	11.92	1.28	Nod-105	20.27	Tubería p144	11.92	1.28	Nod-145	13.36
Tubería p105	11.92	1.28	Nod-106	20.12	Tubería p145	11.92	1.28	Nod-146	12.12
Tubería p106	11.92	1.28	Nod-107	19.57	Tubería p146	11.92	1.28	Nod-147	9.81
Tubería p107	11.92	1.28	Nod-108	19.17	Tubería p147	11.92	1.28	Nod-148	8.61
Tubería p108	11.92	1.28	Nod-109	18.89	Tubería p148	11.92	1.28	Nod-149	7.45
Tubería p109	11.92	1.28	Nod-110	18.56	Tubería p149	11.92	1.28	Nod-150	6.55
Tubería p110	11.92	1.28	Nod-111	18.4	Tubería p150	11.92	1.28	Nod-151	5.25
Tubería p111	11.92	1.28	Nod-112	18.18	Tubería p151	11.92	0.65	Nod-152	3.91
Tubería p112	11.92	1.28	Nod-113	18.1	Tubería p152	11.92	0.65	Nod-153	4.12
Tubería p113	11.92	1.28	Nod-114	18.01	Tubería p153	11.92	0.65	Nod-154	4.28
Tubería p114	11.92	1.28	Nod-115	18.17	Tubería p154	11.92	0.65	Nod-155	2.86
Tubería p115	11.92	1.28	Nod-116	17.2	Tubería p155	11.92	0.65	Nod-156	2.29
Tubería p116	11.92	1.28	Nod-117	18.02	Tubería p156	11.92	0.65	Nod-157	1.79
Tubería p117	11.92	1.28	Nod-118	17.94	Tubería p157	11.92	0.65	Nod-158	1.81
Tubería p118	11.92	1.28	Nod-119	16.86	Tubería p158	11.92	0.65	Nod-159	1.02
Tubería p119	11.92	1.28	Nod-120	15.69					
Tubería p120	11.92	1.28	Nod-121	15.32					

Fuente: autores.

En atención a la evaluación hidráulica presentada y las observaciones realizadas en la zona de estudio se mencionan las siguientes consideraciones:

➤ La evaluación hidráulica del modelo revela que la red de aducción cuenta con una capacidad total de transporte de 11.92 L/s, en consecuencia, la red de aducción está

adecuadamente dimensionada para transportar el caudal de diseño proyectado para el año 2047, que corresponde a 8.45 L/s.

➤ La red de aducción cumple con los criterios de diseño para la capacidad total (11.92 L/s) en términos de velocidades y esfuerzos cortantes.

Observaciones. En la red de aducción es frecuente la realización de derivaciones autorizadas y no autorizadas para el uso agropecuario y consumo humano, causas de grandes pérdidas en el sistema, por lo mismo requiere de una actividad de reposición de tubería, donde se garantice la disminución de pérdidas en el sistema. Por información suministrada por el operario se sabe que la aducción es el componente que más pérdidas se presentan, según él, estas pérdidas se deben a roturas en la tubería y derivaciones no autorizadas por los vecinos circundantes a la red, además la diferencia de caudales entre el captado y el que entra a la PTAP es significativa hecho que comprueba lo informado por el fontanero.

Recomendaciones. La red de aducción enfrenta notables pérdidas de caudal debidas a conexiones ilícitas realizadas por habitantes cercanos a la cobertura del sistema. Estos residentes, con el propósito de abastecerse de agua para actividades agrícolas, efectúan perforaciones en la tubería. Como resultado, el caudal promedio que llega actualmente a la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) se sitúa en 7.2 L/s. En vista de esta problemática, se recomienda una intervención integral en la red, que incluya procesos de verificación y mantenimiento para controlar estas pérdidas. Es esencial considerar la reposición de tuberías en los tramos más afectados. Además, se propone la implementación de accesorios necesarios para garantizar el óptimo funcionamiento de la red en el futuro.

Diagnostico planta de tratamiento de agua potable - PTAP

Descripción

El municipio de Tuta cuenta con dos plantas de tratamiento de agua potable, la principal es la planta Ginua, situada en la vereda El Resguardo, en la figura 18 se puede localizar, esta PTAP tiene un caudal de diseño de 6 L/s y presta el servicio al 100% de los usuarios del

perímetro urbano, y la planta de tratamiento de San Antonio, que abastece los usuarios del perímetro rural cuya capacidad es de 6 L/s y abastece al perímetro urbano en casos de contingencia como periodos de mantenimiento. A continuación, se presenta una descripción del sistema.

Figura 18

Localización sistema de tratamiento - PTAP



Fuente: autores

En la figura 19 se presenta la planta de tratamiento sector Ginúa, la cual fue construida en el año 2003, es una planta modular compacta tipo CLARIFIT con una capacidad de diseño de 6 L/s, la cual se encuentra localizada aproximadamente a 17 Km de la captación. El agua cruda se suministra a la planta por gravedad.

Figura 19

Planta de tratamiento sector Ginua



Fuente: autores.

El análisis de la planta de tratamiento de agua potable se realizó a partir de la evaluación hidráulica de cada una de las estructuras que componen el tren de tratamiento de los procesos unitarios: oxidación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y almacenamiento.

Torre de aireación

La torre de aireación de la PTAP cuenta con 4 bandejas, de 1 m *1 m de base, cada bandeja cuenta con 40 orificios, una altura neta de 0.25 m y una altura total de 2 m, construida en fibra de vidrio. Es una estructura diseñada para facilitar la transferencia de oxígeno al agua mediante un proceso de aireación. La torre consta de cuatro niveles horizontales o bandejas superpuestas, cada una con un material de adsorción como es carbón activado que actúa como lecho de contacto. Permite remover la concentración de sustancias volátiles provenientes de la fuente de captación, como son: hierro, manganeso, COV, gases y los excesos de oxígeno disuelto.

Figura 20*Torre de aireación PTAP Ginua*

Fuente: autores

Evaluación hidráulica torre aireación. Según el artículo 110 de la resolución 0330 y la 0799 del 2021, la estructura de aireación deberá localizarse al principio del tren de tratamiento. Se debe realizar un análisis multivariable en función de la eficiencia de remoción, tiempo de retención hidráulica y superficie de ocupación para saber si está en correcto funcionamiento. Para este caso en específico, el sistema de aireación se trata de un aireado de bandejas múltiples, por lo que la evaluación hidráulica se realizara de acuerdo a los criterios de referencia establecidos por la normativa, en la tabla 19 se presentan las unidades que deben considerarse:

Tabla 18*Parámetros de referencia de diseño de aireadores de bandejas múltiples*

Parámetro	Valor
Carga hidráulica	500 – 1500 m/d
Altura total	1,2 – 3,0 m
Número de bandejas	3 – 9
Distancia entre bandejas	0,3 – 0,5 m
Altura de bandeja	0,20 – 0,25 m
Diámetro medio orificios	0,5 – 0,6 cm
Separación media entre orificios	2,5 cm
Eficiencia de remoción de CO ₂ esperada	60%
Material del lecho de contacto	carbón activado o coque, ladrillo triturado, cerámica, resinas de intercambio iónico
Tamaño del material de contacto	4 – 12 cm
Espesor del lecho de contacto	0,15 – 0,20 m

Fuente: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). Por la cual se modifica la Resolución 0330 de 2017 [Resolución 0799 de 2021]. https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/0799_2021.pdf

Escenario actual (2022). La revisión del estado actual presenta los siguientes resultados consignados en la tabla 19, en el análisis y evaluación de la torre de aireación:

Tabla 19*Evaluación hidráulica torre de aireación escenario actual 2022*

Información preliminar				
	Valor	Unidad	Res. 799/2021	Observaciones
Caudal (Q)	6	L/s		
	518.4	m ³ /d		
Carga Hidráulica Superficial (CHS)	129.60	m/d	500-1500	
Altura Total	2	m	1.2 - 3.00	
Número de Bandejas	4	bandejas	3-9 bandejas	Cumple
Distancia entre bandejas	0.25	m	0.3 - 0.5	Cumple
Altura de bandeja	0.25	m	0.20 - 0.25	Cumple
Diámetro medio orificios	0.6	cm	0.5 - 0.6	Cumple

Separación media entre orificios	0.025	m	0.025	
Eficiencia de remoción CO2	60	%	60%	
Material del lecho de contacto	Carbón Activado	*	CA, Coque...	
Tamaño del material de contacto	8	cm	4 - 12	Cumple
Espesor del lecho de contacto	0.15	m	0.15 - 0.20	Cumple
Forma de bandeja	Cuadrada	*	*	

Dimensionamiento Bandeja

Área Total (A)	Valor	Und	Observaciones
$CHS = \frac{Q}{A}$	4.000	m ²	Al contar con el área total del aireador se calculó la carga hidráulica superficial

Área por bandeja

$$A_{bandeja} = \frac{\text{Área Total}}{N^{\circ} \text{ bandejas}}$$

1.000 m²

Largo de la bandeja

$$A = L^2$$

1.000 m

$$L = \sqrt{A}$$

Ancho de la bandeja

1.000 m

Dimensiones de la infraestructura actual

Número de Orificios Bandeja

N° orificios por fila y/o columna	Valor	Und	Observaciones
$N^{\circ} \text{ Orif} = \frac{L_{bandeja} [m]}{\text{Separacion orificios} [m]}$	40		
N° orificios por bandeja	1600		
N° orificios Totales	6400		

Área Total de Orificios

Área de 1 Orificio	Valor	Und	Observaciones
	0.283	cm ²	

$A_o = \frac{\pi}{4} * (D_o)^2$	2.83E-05	m ²
Área Total de Orificios	0.1810	m ²

Velocidad de Flujo a través de los Orificios			
--	--	--	--

	Valor	Und	Observaciones
$V = \frac{Q}{At \text{ de orificios}}$	2.18E+03	m/d	
$V = C_v * \sqrt{2 * g * h}$	0.02525	m/s	

Altura de lámina de agua en el aireador			
---	--	--	--

	Valor	Und	Observaciones
$h = \frac{(\frac{V}{C_v})^2}{2 * g}$	0.0000834	m	
	0.083361191		

Cv: Coeficiente de variación 0.82

Altura Total			
--------------	--	--	--

$Alt \text{ Total} = (Alt \text{ bandejas} + Dist \text{ bandejas})$	Valor	Und	Observaciones
	2	m	

Fuente: autores.

Según las dimensiones del aireador de bandejas que hace parte de la planta de tratamiento de agua potable y el caudal que está operando actualmente de 6 l/s, se pudo verificar que este proceso unitario cumple con la mayoría de los requerimientos establecidos por la resolución 0799 del 2021. Sin embargo, en cuanto a la carga hidráulica superficial se identificó que no se encuentra dentro del rango permitido por la normatividad, puesto que la infraestructura está sobredimensionada, ya que al tratarse de una planta compacta está diseñada para tratar hasta 12 L/s.

Escenario futuro (2047). De acuerdo a la proyección de población realizada la verificación de la infraestructura actual para un caudal de 8.45 l/s presenta los siguientes resultados en la tabla 20, en el análisis y evaluación de la torre de aireación:

Tabla 20*Evaluación hidráulica torre de aireación escenario futuro (2047)*

Información preliminar				
	Valor	Unidad	Res. 799/2021	Observaciones
Caudal (Q)	8.45	L/s		
	730.08	m ³ /d		
Carga Hidráulica Superficial (CHS)	182.52	m/d	500-1500	
Altura Total	2	m	1.2 - 3.00	
Número de Bandejas	4	bandejas	3-9 bandejas	CUMPLE
Distancia entre bandejas	0.25	m	0.3 - 0.5	CUMPLE
Altura de bandeja	0.25	m	0.20 - 0.25	CUMPLE
Diámetro medio orificios	0.6	cm	0.5 - 0.6	CUMPLE
Separación media entre orificios	0.025	m	0.025	
Eficiencia de remoción CO ₂	60	%	60%	
Material del lecho de contacto	Carbón Activado	*	CA, Coque...	
Tamaño del material de contacto	8	cm	4 - 12	CUMPLE
Espesor del lecho de contacto	0.15	m	0.15 - 0.20	CUMPLE
Forma de bandeja	Cuadrada	*	*	

Dimensionamiento Bandeja			
	Valor	Und	Observaciones
Área Total (A) $CHS = \frac{Q}{A}$	4.000	m ²	Al contar con el área total del aireador se calculó la carga hidráulica superficial
Área por bandeja $A_{bandeja} = \frac{\text{Área Total}}{N^{\circ} \text{ bandejas}}$	1.000	m ²	
Largo de la bandeja $A = L^2$ $L = \sqrt{A}$	1.000	M	
Ancho de la bandeja	1.000	M	Dimensiones de la infraestructura actual

Número de Orificios Bandeja			
	Valor	Und	Observaciones
N° orificios por fila y/o columna $N^{\circ} \text{ Orif} = \frac{L_{bandeja} [m]}{\text{Separacion orificios} [m]}$	40		
N° orificios por bandeja	1600		

N° orificios Totales 6400

Área Total de Orificios

Área de 1 Orificio	Valor	Und	Observaciones
$A_o = \frac{\pi}{4} * (D_o)^2$	0.283	cm ²	
	2.83E-05	m ²	
Área Total de Orificios	0.1810	m²	

Velocidad de Flujo a través de los Orificios

	Valor	Und	Observaciones
$V = \frac{Q}{A_t \text{ de orificios}}$	4.03E+03	m/d	
$V = C_v * \sqrt{2 * g * h}$	0.04670	m/s	

Altura de lámina de agua en el aireador

	Valor	Und	Observaciones
$h = \frac{(\frac{V}{C_v})^2}{2 * g}$	0.0001653	m	
	0.16533882		
Cv: Coeficiente de variación	0.82		

Altura Total

<i>Alt Total = (Alt bandejas + Dist bandejas)</i>	Valor	Und	Observaciones
	2	m	

Fuente: autores.

Coagulación

Para la fase de mezcla rápida de la PTAP, se implementa un sistema hidráulico de tipo canal Parshall. Este sistema está diseñado con una estructura específica, comprende una sección convergente, seguida por una garganta y una sección divergente. La sección convergente acelera el flujo del agua, mientras que la garganta mantiene una velocidad constante y la sección divergente permite un flujo libre posterior a la garganta. La profundidad del agua en la garganta se correlaciona directamente con el caudal.

Esta estructura de canal Parshall se utiliza en dos etapas: en primer lugar, para la dosificación del coagulante y, en segundo lugar, para llevar a cabo la mezcla efectiva del coagulante. En la figura 21 se observa la infraestructura.

Figura 21

Canaleta Parshall PTAP Ginua



Fuente: autores

Evaluación hidráulica de la canaleta. Con el objetivo de realizar la evaluación hidráulica del proceso unitario de coagulación, se propone realizar el diseño de la canaleta Parshall para el caudal con el que está operando la planta actualmente de 6 l/s, bajo la metodología de Azevedo, la cual se describe en el libro manual de hidráulica (De Azevedo, J. M., y Acosta, G., 1976) y de esta manera verificar condiciones de funcionamiento de la canaleta como la sumergencia, resalto hidráulico, ancho de la garganta, medidas de las secciones divergentes y convergentes, número de Froude, entre otras.

$$Q = 6 \text{ L/s}$$

$$w = 3 \text{ in} = 0.0762 \text{ m}$$

$$Q_{\text{m}\acute{\text{a}}\text{x}} = 53.8 \text{ L/s}$$

$$Q_{\text{m}\acute{\text{i}}\text{n}} = 0.80 \text{ L/s}$$

Según el manual de hidráulica de Azevedo, se establecen las dimensiones para la construcción de la canaleta Parshall, teniendo como base el ancho de garganta (w).

Tabla 21

Valores típicos ancho de garganta (w) de una canaleta Parshall

Opción de Canaleta	W	Unidades	cm	A	B	C	D	E	F	G	K	N
1	1	Pulgadas	2.54	36.6	35.6	9.3	16.8	22.9	7.6	20.3	1.9	2.9
2	3	Pulgadas	7.62	46.6	45.7	17.8	25.9	38.1	15.2	30.5	2.5	5.7
3	6	Pulgadas	15.24	62.1	61.0	39.4	40.3	45.7	30.5	61.0	7.6	11.4
4	9	Pulgadas	22.86	88.0	86.4	38.0	57.5	61.0	61.0	45.7	7.6	22.9
5	1	Pie	30.48	137.2	134.4	61.0	84.5	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
6	1 1/2	Pie	45.72	144.9	142.0	76.2	102.6	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9

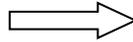
Fuente: autores

De acuerdo a la tabla 21, el valor típico del ancho de la garganta bajo la metodología de (De Azevedo, J. M., y Acosta, G., 1976), coincide con la dimensión infraestructura la cual es de 8 cm. A partir de estos valores se verifican los demás parámetros de diseño para la canaleta.

A partir de los valores anteriormente obtenidos se procedió a realizar los siguientes cálculos presentados en la tabla 22 para realizar las respectivas validaciones.

Tabla 22*Evaluación hidráulica canaleta Parshall***Ancho de la canaleta en la sección de medida**

$$D' = \frac{2}{3}(D - W) + W$$



$$D' = 19.81 \text{ cm}$$

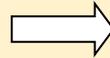
Altura de la lámina de agua sobre la solera de la canaleta

En cuanto a la altura de la lámina de agua sobre la solera de la canaleta, se considera un cambio de caudal para el cumplimiento de la relación ha/w .

$$Q_2 = \text{Caudal Máximo} \quad 6.00 \text{ l/s}$$

$$Q_1 = \text{Caudal mínimo} \quad 6.00 \text{ l/s}$$

$$Q = kh_a^n$$



$$ha_1 = 0.11 \text{ m}$$

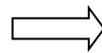
$$ha_2 = 0.11 \text{ m}$$

A partir del cálculo de caudal necesario para el cumplimiento de la relación ha/w , se establecen las constantes K y n a partir del ancho de garganta de la canaleta, estos valores se presentan en la siguiente tabla.

Opción	W	n	k
2	3	1.55	0.18
3	6	1.58	0.38
4	9	1.53	0.54

Velocidad en la sección de medida

$$Q = V \times D' \times ha$$

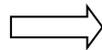


$$Va_1 = 0.27 \text{ m/s}$$

$$Va_2 = 0.27 \text{ m/s}$$

Energía total disponible

$$Ea = ha + \frac{Va^2}{2g} + N$$

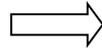


$$Ea_1 = 0.17 \text{ m}$$

$$Ea_2 = 0.17 \text{ m}$$

Angulo φ

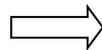
$$\cos\varphi = \frac{-gQ}{W(0.67gEa)^{1.5}}$$



$$\begin{aligned} j_1 &= 129.48 && ^\circ \\ j_2 &= 129.48 && ^\circ \end{aligned}$$

Velocidad antes de resalto

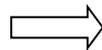
$$V_1 = 2 \cos\left(\frac{\varphi}{3}\right) \left(\frac{2gEa}{3}\right)^{0.5}$$



$$\begin{aligned} V_{11} &= 1.55 && \text{m/s} \\ V_{12} &= 1.55 && \text{m/s} \end{aligned}$$

 Y_1 o hb

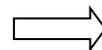
$$Y_1 = Ea - \frac{V_1^2}{2g}$$



$$\begin{aligned} Y_{11} &= 0.05 && \text{m} \\ Y_{12} &= 0.05 && \text{m} \end{aligned}$$

Numero de Froude

$$Fr = \frac{V_1}{\sqrt{gY_1}}$$

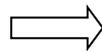


$$\begin{aligned} Fr_{11} &= 2.21 \\ Fr_{12} &= 2.21 \end{aligned}$$

De acuerdo al número de Froude se verifica que la cumple con un resalto hidráulico estable.

Altura del resalto al final del trecho divergente

$$Y_3 = \frac{Y_1}{2} \left[\sqrt{(1 + 8Fr_1^2)} - 1 \right]$$



$$\begin{aligned} Y_{31} &= 0.13 && \text{m} \\ Y_{32} &= 0.13 && \text{m} \end{aligned}$$

$$Y_2 = Y_3 - (N - K)$$

$$\begin{aligned} Y_{21} &= 0.102 && \text{m} \\ Y_{22} &= 0.10 && \text{m} \end{aligned}$$

Velocidad al final del trecho divergente

$$V_2 = \frac{Q}{Y_2 C}$$

$$\Rightarrow \begin{array}{l} V_{21} = 0.33 \text{ m/s} \\ V_{22} = 0.33 \text{ m/s} \end{array}$$

Perdida de carga

$$h_f = ha + N - Y_3 \Rightarrow \begin{array}{l} h_{f1} = 0.04 \text{ m} \\ h_{f2} = 0.04 \text{ m} \end{array}$$

Tiempo de mezcla

$$T_{mr} = \frac{2G}{(V_1 + V_2)} \Rightarrow \begin{array}{l} T_{mr1} = 0.32 \text{ s} \\ T_{mr1} = 0.32 \text{ s} \end{array}$$

Gradiente medio de velocidad

$$G_{mr} = \sqrt{\frac{\gamma h_f}{\mu T_{mr}}} \Rightarrow \begin{array}{l} G_{mr1} = 1014.63 \text{ s}^{-1} \\ G_{mr2} = 1014.63 \text{ s}^{-1} \end{array}$$

Fuente: autores.

A continuación, se realiza el chequeo Canaleta Parshall para validación del diseño en función de la sumergencia, Relación ha/w y numero de Froude.

Tabla 23*Condiciones de sumergencia a partir del ancho de garganta*

Criterio:		
Relación Hb/Ha	Ancho de garganta	Máxima sumergencia (Hb/Ha)
	7.3 (3') a 22.9 (9')	0.6
	30.5 (1') a 244 (8')	0.7
	305 (10') a 1525 (50')	0.8
Relación Ha/w	Criterio: entre 0.4 y 0.8	
Numero de Froude	Criterio: comprendido entre 1.7 a 2.5 o 4.5 a 9.0, debe evitarse números entre 2.5 y 4.5.	

Fuente: De Azevedo, J. M., y Acosta, G. (1976). *Manual de Hidráulica*. HARLA.

➤ Sumergencia

$$S = \frac{hb}{ha}$$

$$S = \frac{0.05034 \text{ m}}{0.11258 \text{ m}}$$

$$S = 0.45$$

Según el ancho de garganta ($w = 0.0762\text{m}$), la relación hb/ha no se encuentra dentro del rango establecido en la Tabla 24.

➤ Relación ha/w

$$\frac{ha}{w}$$

$$\frac{ha}{w} = \frac{0.11 \text{ m}}{0.0762 \text{ m}}$$

$$\frac{ha}{w} = 1.44$$

La relación ha/w no se encuentra dentro del rango establecido de 0.4 – 0.8, por ende, no cumple con la condición.

- Numero de Froude

$$Fr = 2.21$$

En el resalto hidráulico, el número de Froude se encuentra entre el rango de 4.5 – 9, dando cumplimiento en este factor.

En la tabla 24 se presentan los resultados obtenidos en la evaluación hidráulica realizada a la Canaleta Parshall.

Tabla 24

Cuadro Resumen canaleta Parshall

Cuadro resumen de los parámetros de diseño de la canaleta Parshall		
Caudal inicial de diseño	6.00	l/s
Ancho de garganta (w)	0.0762	m
Altura de lámina de agua (ha)	0.11	m
Ancho de canaleta en la sección media (D')	0.1981	m
Velocidad en la sección de medida (V)	0.27	m/s
Energía total disponible (Ea)	0.17	m
φ Angulo	129.48	°
Velocidad antes de resalto (V ₁)	1.55	m/s
hb o Y ₁	0.05	m
Numero de Froude (Fr)	2.21	
Altura del resalto al final del trecho divergente (Y ₃)	0.13	m
Altura del resalto al final del trecho divergente (Y ₂)	0.102	m

Velocidad al final del trecho divergente (V_2)	0.33	m/s
Perdida de carga (h_f)	0.04	m
Tiempo de mezcla (T)	0.32	s
Gradiente de velocidad (G)	1014.63	s^{-1}

Fuente: autores.

Teniendo en cuenta que dos de los 3 criterios de verificación cumplen, el valor de la sumergencia y el número de Froude, se determina que la canaleta Parshall se encuentra en correcto funcionamiento. Durante la visita técnica, se pudo validar la eficiencia de esta estructura, asegurando así una aplicación efectiva de las fases de dosificación y mezcla rápida.

Así mismo, al tratarse de un mezclador hidráulico, el valor del gradiente de velocidad medio $1014.63 s^{-1}$ cumple con el rango máximo establecido por la resolución 0330 del 2017, con un tiempo de mezcla menor a 1 segundo. Por otro lado, se hace la claridad que no es necesario hacer los cálculos para los dos escenarios el actual y el futuro, teniendo como referencia que este diseño se realiza para un caudal de diseño máximo de 53,8 L/s y el proyectado corresponde a 8,45 L/s por ende se determina que cumple para ambos escenarios.

Floculación

Para la etapa de mezcla lenta en la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), se ha implementado un floculador hidráulico de flujo horizontal que está constituido por un canal en pantallas con dos cámaras en serie con lo que se aprovechara el gradiente decreciente. El objetivo de la floculación es la agregación de flóculos para que los sólidos en suspensión puedan ser removidos fácilmente en la sedimentación.

Las dimensiones específicas de esta estructura son 2 m ancho * 2 m de largo * 3 m de alto. La estructura está construida con lámina de acero al carbono de 3/16 de pulgada de espesor. Este floculador consta de tres cámaras de floculación y una cámara de sedimentación, cada una con funciones específicas. La estructura del floculador incluye una cámara de floculación, una ventanilla de interconexión, una cámara de quietamiento, una tolva floculadora, una tubería de extracción de lodos y tres válvulas (Válvula 4, Válvula 5 y Válvula 6) diseñadas para extraer lodos de las cámaras de floculación respectivas. Estas características proporcionan un diseño

integral para lograr una mezcla lenta y efectiva, facilitando así el proceso de floculación en la planta.

Figura 22

Floculador PTAP Ginua



Fuente: autores

Evaluación hidráulica floculación. Para el sistema unitario de floculación se realizó el diseño de la correspondiente infraestructura que compone la planta de tratamiento, un floculador hidráulico de flujo horizontal, en este diseño se tuvieron en cuenta las dimensiones actuales con las que cuenta y se verificaron las diferentes condiciones hidráulicas que exige la normatividad legal vigente para este caso, como es el gradiente hidráulico, la velocidad de flujo, el tiempo de retención hidráulica, entre otras.

Escenario actual (2022). Inicialmente se hace la evaluación para el caudal de diseño original del floculador que es de 6 l/s, con el propósito de saber si el floculador está funcionando correctamente para el escenario actual (2022).

Tabla 25*Evaluación hidráulica del floculador para el escenario actual (2022)*

Información preliminar				
	Valor	Unidad	RAS 0330	Título C RAS
Caudal (Q)	6	l/s		
	0.006	m ³ /s		
Gradiente hidráulico	69.93	s-1	10 - 70 s-1	20 - 70 s-1
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	20	minutos	20 - 40	20 - 30
Base del tabique	1.9	m	*	
Altura del tabique	3	m	*	
Espesor del tabique	0.006	m	*	
Borde Libre	0.1	m	*	
Velocidad de flujo	0.1575	m/s	0.09 - 0.3 m/s	0.2 - 0.6
Temperatura del agua	12	°C		
Densidad del agua	999.58	kg/m ³		
Viscosidad dinámica	0.00123	kg / (m·s)		
	6			
Diseño del floculador hidráulico de flujo horizontal				
Longitud del recorrido del agua en el floculador (L)				

	Valor	Unidad	Observación
$L = Vel Flujo * t$	189.0	m	

Área en la sección (A)

	Valor	Unidad	Observación
$A = \frac{Q}{V}$	0.038	m ²	

Ancho de canal (a)

	Valor	Unidad	Observación
$a = \frac{A}{Hu}$	0.013	m	

$$Hu = \text{Altura total} - \text{borde libre} \quad 2.9 \quad \text{m}$$

Separación muro – tabique (b)

	Valor	Unidad	Observación
$b = 1.5 * a$	0.020	m	

Ancho del tanque (B)

	Valor	Unidad	Observación
$B = \text{ancho del tabique} + b$	1.920	m	Adoptado diseño original

Número de canales (N)

	Valor	Unidad	Observación
$N = \frac{L}{B}$	98	canales	Adoptado diseño original
	98		

Largo del tanque (l)

	Valor	Unidad	Observación
$l = (a + e) * N$	1.875	m	Adoptado diseño original

Pérdidas localizadas

	Valor	Unidad	Observación
$h_1 = 3 * N * \frac{V^2}{2 * g}$	0.372	m	

Pérdidas por fricción

	Valor	Unidad	Observación
$h_2 = \frac{(V * n)^2}{R_H^{\frac{4}{3}}} * l * N$	0.368	m	

$$R_H = \frac{A}{P} \quad 0.010 \quad \text{m}$$

$$A = H_u * b \quad 0.057 \quad \text{m}^2$$

$$P = 2 * H_u + b \quad 5.820 \quad \text{m}$$

n: coeficiente de Manning 0.013

Pérdidas Totales

0.740 m

$$h_T = h_1 + h_2$$

Gradiente de velocidad (G)

	Valor	Unidad	Res 799/21
$G = \sqrt{\frac{\rho * g * h_T}{\mu * t}}$	69.93	s ⁻¹	10 - 70

Fuente: autores.

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 26 se puede verificar que, según las dimensiones actuales del floculador, este cumple con los criterios técnico de acuerdo a lo exigido por la resolución 0330 del 2017 y 799 del 2021 en el artículo 112, la cual establece que el gradiente de velocidad de mezcla debe estar entre 70 s⁻¹ y 10 s⁻¹ y para este caso es de 69 s⁻¹ y en cuanto al tiempo de retención hidráulica debe estar dentro del rango de 20 a 40 minutos y para el proceso objeto de estudio es de 20 minutos.

Escenario futuro (2047). A continuación, se procede a realizar la respectiva verificación de funcionamiento del mismo floculador para un caudal de diseño de 8,45 l/s que corresponde al caudal a suplir en el escenario futuro (2047).

Tabla 26*Evaluación hidráulica del floculador para el escenario futuro (2047)*

Información preliminar				
	Valor	Unidad	RAS 0330	Titulo C RAS
Caudal (Q)	8.45	L/s		
	0.00845	m3/s		
Gradiente hidráulico	25.57	s-1	10 - 70 s-1	20 - 70 s-1
Tiempo de retención hidráulica (TRH)	20	minutos	20 - 40	20 - 30
Base del tabique	1.9	m	*	
Altura del tabique	3	m	*	
Espesor del tabique	0.006	m	*	
Borde Libre	0.1	m	*	
Velocidad de flujo	0.09	m/s	0.09 - 0.3 m/s	0.2 - 0.6
Temperatura del agua	15	°C		
Densidad del agua	999.19	kg/m ³		
Viscosidad dinámica	0.00113	kg / (m·s)		
	9			

Diseño del floculador hidráulico de flujo horizontal**Longitud del recorrido del agua en el floculador (L)**

	Valor	Unidad	Observación
$L = Vel Flujo * t$	108.0	m	

Área en la sección (A)

	Valor	Unidad	Observación
$A = \frac{Q}{V}$	0.094	m ²	

Ancho de canal (a)

	Valor	Unidad	Observación
$a = \frac{A}{Hu}$	0.032	m	

$$Hu = \text{Altura total} - \text{borde libre} \quad 2.9 \quad \text{m}$$

Separación muro – tabique (b)

	Valor	Unidad	Observación
$b = 1.5 * a$	0.049	m	

Ancho del tanque (B)

	Valor	Unidad	Observación
$B = ancho\ del\ tabique + b$	1.949	m	Adoptado diseño original

Número de canales (N)

	Valor	Unidad	Observación
$N = \frac{L}{B}$	98	canales	Adoptado diseño original
	98		

Largo del tanque (l)

	Valor	Unidad	Observación
$l = (a + e) * N$	2.111	m	Adoptado diseño original

Pérdidas localizadas

	Valor	Unidad	Observación
$h_1 = 3 * N * \frac{V^2}{2 * g}$	0.068	m	

Pérdidas por fricción

	Valor	Unidad	Observación
$h_2 = \frac{(V * n)^2}{R_H^{\frac{4}{3}}} * l * N$	0.023	m	

$$R_H = \frac{A}{P} \quad 0.024 \quad \text{m}$$

$$A = H_u * b \quad 0.141 \quad \text{m}^2$$

$$P = 2 * H_u + b \quad 5.829 \quad \text{m}$$

n: coeficiente de Manning 0.013

Pérdidas Totales

$$h_T = h_1 + h_2 \quad 0.091 \quad \text{m}$$

Gradiente de velocidad (G)

$$G = \sqrt{\frac{\rho * g * h_T}{\mu * t}}$$

Valor	Unidad	Res 799/21
25.57	s ⁻¹	10 - 70

Fuente: autores.

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 26 se puede verificar que, para el escenario futuro, el floculador también cumple con las especificaciones técnicas a lo exigido por la resolución 0330 del 2017 y 799 del 2021 en el artículo 112, con un gradiente de velocidad de mezcla de 25.67s^{-1} y un tiempo de retención hidráulico de 20 minutos.

Sedimentación

En la fase de sedimentación de la PTAP de Ginua, se ha implementado un sedimentador de alta tasa tipo colmena de flujo ascendente. Se compone de cuatro zonas distintas, cada una con funciones específicas. La primera es la Zona de Entrada, diseñada para distribuir de manera uniforme el flujo de agua que ingresa al sedimentador. La segunda, conocida como Zona de Sedimentación, está dedicada exclusivamente a facilitar la sedimentación y se compone de placas planas paralelas. La tercera es la Zona de Salida, que proporciona las estructuras

necesarias para la recolección uniforme del agua sedimentada. Finalmente, la cuarta zona es la Zona de Lodos, destinada a recibir el material sedimentado que posteriormente será drenado.

Cuenta con elementos clave, tales como tuberías de entrada y salida de 6 pulgadas en PVC-S, una tubería de distribución con orificios de 2 pulgadas cada 14.5 centímetros, una tolva, módulos de sedimentación y un sistema de extracción de lodos compuesto por válvulas de mariposa ANSI 150 (Válvula 7, Válvula 8, Válvula 9), módulos inclinados en forma de paneles inclinados a 60 grados con respecto a la horizontal, los flocs debidamente formados sedimenten y decanten de tal forma que el agua clarificada fluya por la parte superior dirigiéndose a la siguiente etapa.

Figura 23

Sedimentador PTAP Ginua



Fuente: autores

Evaluación hidráulica sedimentador. La evaluación hidráulica de un sedimentador implica el análisis detallado de su desempeño en términos de la carga hidráulica, factores como la velocidad del flujo de agua, la eficiencia de la sedimentación.

Escenario actual (2022). La evaluación hidráulica del sedimentador se realizó a partir de la validación de parámetros de diseño establecidos por la resolución 0330 del 2017 en el artículo 113.

Tabla 27

Evaluación hidráulica del sedimentador para el escenario actual (2022)

Información preliminar			
	Valor	Unidad	Res 0330
Caudal (Q)	6	L/s	
	518.4	m ³ /d	
Carga superficial (mod. Angosto)	200	m ³ /m ² /d	200 - 300
Tiempo de retención hidráulica	20	minutos	10 - 20
	0.0139	día	*
Placas inclinadas	60	°	*
Velocidad crítica de sedimentación	16.03	cm/s	15 - 30
Largo de la placa (l)	2.6	m	*
Ancho de la placa (a)	2	m	*
Espesor de placa (ep)	0.006	m	
Espacio entre placas (e)	0.05	m	
Altura de lodos	1	m	
Borde libre	0.15	m	
Profundidad del tanque	3	m	4 - 5.5
Número de Reynolds	272.98		250 - 500
ZONA DE SEDIMENTACIÓN			
Velocidad de flujo entre placas (Vo)			
	Valor	Unidad	Observación
$V_o = \frac{CHS}{\text{Sen } 60}$	230.9	m/d	
Seno 60°	0.86603		
Factor Épsilon			
	Valor	Unidad	Observación
$\epsilon = \frac{ep}{e + ep}$	0.107	m	

ep (espesor de placas (m))

e (espacio entre placas (m))

Área cubierta por las placas (At)

$$At = \left(\frac{Q}{Vo * Sen 60} \right) + \left(\frac{1}{1 - \epsilon} \right)$$

Valor	Unidad	Observación
3.712	m ²	

Longitud del sedimentador (Ls)

$$Ls = \frac{At}{Bneto}$$

Valor	Unidad	Observación
1.856	m	Adoptado diseño original

Número de Reynolds

$$NR = \frac{2 * Vo * e}{\gamma}$$

Valor	Unidad	Observación
272.98		<500

Y (m²/s)

1.00E-06

Y (m²/d)

8.46E-02

Volumen zona sedimentación

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$V = Q * t$$

Valor	Unidad	Observación
7.2	m ³	

Cálculo de alturas

Hu - Altura útil

Valor Unidad Observación

$$V = A * Hu$$

1.9396 m

HT - Altura Total

	3.08	m	Adoptado diseño original
$H_T = H_u + BL + H_{Lodos}$			
Carga superficial equivalente			
	Valor	Unidad	Observación
$V_{sc} = \frac{Sc * V_o}{Sen \theta + \left(\frac{l}{e} - N * NR\right) * Cos \theta}$	9.203	m/d	
Sc (factor de forma - módulos)	1		
N - Manning	0.013		
Coseno (60)	0.5		
Número de placas (n)			
	Valor	Unidad	Observación
$n = \frac{At + Sen \theta}{a * (e + ep)}$	41		

Fuente: autores.

Según los cálculos realizados y teniendo en cuenta las dimensiones actuales del sedimentador se logró verificar y determinar que hidráulicamente el sedimentador está funcionando correctamente, puesto que cumple con los criterios de referencia de diseño de sedimentadores de alta tasa, establecidos por la resolución 0330 del 2017 y la 799 del 2021 en el artículo 113:

- La carga superficial para módulos $L > 1.2m$ es de $200 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$.
- El tiempo de retención hidráulica es de 20 minutos.
- La velocidad crítica de sedimentación es de 16.03 cm/min.

Escenario futuro (2047). A continuación, se procede a realizar la respectiva verificación de funcionamiento del mismo sedimentador para un caudal de diseño de 8,45 l/s que corresponde al caudal a suplir en el escenario futuro (2047).

Tabla 28*Evaluación hidráulica del sedimentador para el escenario futuro (2047)*

Información preliminar			
	Valor	Unidad	RAS 0330
Caudal (Q)	8.45	L/s	
	730.08	m3/d	
Carga superficial (mod. Angosto)	200	m3/m2/d	120 - 185
Tiempo de retención hidráulica	20	minutos	10 - 20
	0.0139	día	*
Placas inclinadas	60	°	*
Velocidad critica de sedimentación.	16.03	cm/s	15 - 30
Largo de la placa (l)	2.6	m	*
Ancho de la placa (a)	2	m	*
Espesor de placa (ep)	0.006	m	
Espacio entre placas (e)	0.05	m	
Altura de lodos	1	m	
Borde libre	0.15	m	
Profundidad del tanque	3	m	4 - 5.5
Número de Reynolds	272.98		<250 - 500

Zona de sedimentación**Velocidad de flujo entre placas (Vo)**

	Valor	Unidad	Observación
$V_o = \frac{CHS}{\text{Sen } 60}$	230.9	m/d	
Seno 60°	0.86603		

Factor Épsilon

	Valor	Unidad	Observación
$\epsilon = \frac{ep}{e + ep}$	0.107	m	

ep (espesor de placas (m))

e (espacio entre placas (m))

Área cubierta por las placas (At)			
	Valor	Unidad	Observación
$At = \left(\frac{Q}{Vo * Sen 60} \right) + \left(\frac{1}{1 - \epsilon} \right)$	4.770	m ²	
Longitud del sedimentador (Ls)			
	Valor	Unidad	Observación
$Ls = \frac{At}{B_{neto}}$	2.137	m	Adoptado diseño original
Número de Reynolds			
	Valor	Unidad	Observación
$NR = \frac{2 * Vo * e}{\gamma}$	272.98		<500
Y (m ² /s)	1.00E-06		
Y (m ² /d)	8.46E-02		
Volumen zona sedimentación			
	Valor	Unidad	Observación
$Q = \frac{V}{t}$	9.18	m ³	
$V = Q * t$			
Cálculo de alturas			
Hu - Altura útil	Valor	Unidad	Observación
$V = A * Hu$	1.96	m	
HT - Altura Total			Adoptado diseño original
$H_T = Hu + BL + H_{Lodos}$	3.101	m	
Carga superficial equivalente			

	Valor	Unidad	Observación
$V_{sc} = \frac{Sc * V_o}{Sen \theta + \left(\frac{L}{e} - N * NR\right) * Cos \theta}$	12.24	m/d	
Sc (factor de forma - módulos)	1		
N - Manning	0.013		
Coseno (60)	0.5		
Número de placas (n)			
$n = \frac{At + Sen \theta}{a * (e + ep)}$	44.18		

Fuente: autores.

Según los cálculos realizados y teniendo en cuenta las dimensiones actuales del sedimentador se logró verificar y determinar que hidráulicamente el sedimentador cumple con los criterios técnicos establecidos por la resolución 0330 del 2017 y la 799 del 2021 en el artículo 113: en el escenario futuro, es decir para un horizonte de 25 años.

- La carga superficial para módulos $L > 1.2m$ es de $200 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$.
- El tiempo de retención hidráulica es de 20 minutos.
- La velocidad crítica de sedimentación es de $16.03 \text{ cm}/\text{min}$.

Filtración

En la fase de filtración, se empleó un filtro rápido con lecho mixto, se lleva a cabo en un filtro convencional de tipo circular, el cual cuenta con una altura de 5 m y un diámetro de 2.3 m, que comprende grava gruesa malla 3-6, grava fina malla 6-12, arena gruesa malla 12-20, arena fina malla 20-40 y antracita. Con la filtración se remueven las partículas suspendidas y coloidales presentes en el agua sedimentada mediante su ascenso a través de un medio poroso. Esta es considerada como el resultado de dos mecanismos diferentes, pero complementarios: transporte de las partículas dentro de los poros y la adherencia a los granos del medio.

Los medios filtrantes utilizados son:

Tabla 29

Características técnicas medio filtrantes PTAP Ginua

Tipo	Altura (cm)	Masa (Kg)
Grava gruesa malla 3-6	10	520
Grava fina malla 6-12	5	280
Arena gruesa malla 12-20	5	280
Arena fina malla 20-40	40	2000
Antracita	13	600

Fuente: Unidad de Servicios Públicos Tuta. (2020). *Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua - PUEAA*. Alcaldía Municipal de Tuta.

Figura 24

Sistema de filtración PTAP Ginua



Fuente: autores

Evaluación hidráulica sedimentación. A partir de la siguiente evaluación hidráulica se validaron parámetros como la tasa de filtración y la profundidad de los medios para el caudal de los dos escenarios actual y futuro.

Escenario actual (2022). A continuación, se presenta la evaluación hidráulica para el caudal de diseño original 6 l/s.

Tabla 30

Evaluación hidráulica del filtro para el escenario actual (2022)

Información preliminar			
	Valor	Unidad	Res 799/21
Caudal	6	l/s	
	518.4	m3/d	
Tasa de filtración	180	m3/m2/d	180 - 250
Velocidad de filtración	0.208	cm/s	
Área de filtro			
$TF = 180 \left(\frac{m3}{m2 - dia} \right)$	$A = \frac{Q}{Tf}$	Valor	Unidad Observaciones
		2.9	
Diámetro del filtro			
		Valor	Unidad Observaciones
$AF = \left(\frac{\pi i}{4} \right) * DF^2$	$DF = \left(\frac{4 * AF}{\pi i} \right)^{0.5}$	1.9	m ² Verificación del diseño original

Fuente: autores.

De acuerdo a los resultados obtenidos se determina que el filtro cumple con las especificaciones técnicas establecidas por la normatividad legal vigente, al cumplir con las profundidades del medio y la tasa de filtración. Por otro lado, en los resultados de la evaluación hidráulica consignados en la tabla 31 se puede evidenciar que para el escenario actual con un caudal de operación de 6 l/s el diámetro del filtro es igual a 1.9m, 40 centímetros por debajo del valor real (2.3m), lo que indica que hay un sobredimensionamiento de la infraestructura, sin embargo, esto no afecta su correcto funcionamiento.

Escenario futuro (2047). A continuación, se procede a realizar la respectiva verificación de funcionamiento del mismo sistema de filtración para un caudal de diseño de 8,45 l/s que corresponde al caudal a suplir en el escenario futuro (2047).

Tabla 31

Evaluación hidráulica del filtro para el escenario futuro (2047)

Información preliminar			
	Valor	Unidad	Res 799/21
Caudal	8.45	l/s	
	730.08	m ³ /d	
Tasa de filtración	180	m ³ /m ² /d	180 - 250
Velocidad de filtración	0.208	cm/s	
Área de filtro			
$TF = 180 \left(\frac{m^3}{m^2 - dia} \right)$	$A = \frac{Q}{Tf}$	Valor	Unidad
		4.1	Observaciones
Diámetro del filtro			
		Valor	Unidad
$AF = \left(\frac{\pi i}{4} \right) * DF^2$	$DF = \left(\frac{4 * AF}{\pi i} \right)^{0.5}$	2.3	m ²
			Verificación del diseño original

Fuente: autores.

En cuanto a los resultados obtenidos para el escenario futuro se puede verificar que, para un caudal igual a 8,45 l/s las dimensiones del filtro corresponden a las reales lo que da garantía del correcto funcionamiento del mismo, para un horizonte de 25 años, adicionalmente también se cumplen con los parámetros establecidos por la norma.

Almacenamiento

Descripción. La PTAP del sector Ginua cuenta con un tanque de almacenamiento el cual está localizado sobre las coordenadas geográficas 73°13'20.43''O; 5°41'14.45''N. Posee una capacidad de 450 m³, en las dimensiones, 20 de largo, 10 m de ancho y una profundidad de 2.25 m, el tanque se encuentra construido en concreto, válvula de lavado, escalera de acceso, tubos de ventilación y dos tapas metálicas.

Figura 25

Tanque de almacenamiento



Fuente: autores

Evaluación hidráulica tanque de almacenamiento. La evaluación hidráulica para esta estructura se basó en definir si la capacidad actual del tanque es suficiente para el escenario futuro (2047), puesto que para el escenario actual cumple con todos los requisitos establecidos por la resolución 0330 del 2017 y 799 del 2021 en el artículo 79:

- El tanque funcionar hidráulicamente con esquema de mezcla FIFO (lo primero que entra es lo primero que sale).
- Las esquinas del tanque son achaflanadas.

- Cuenta con sistema de renovación de aire y un borde libre de 0.5 m.
- La tubería de salida se ubica, de tal manera que en niveles mínimos de operación no se generen vórtices, no ingrese aire a la red y no se genere resuspensión de sedimentos.
- El tanque cuenta con pendiente de fondo que facilita la limpieza y evacuación de lodos.
- Se garantiza drenaje del terreno donde está instalada la estructura actualmente.

Tabla 32*Evaluación hidráulica del almacenamiento para el escenario futuro (2047)*

Volumen para la regulación de la demanda doméstica		
Parámetro	Valor	Unidad
Población Proyectada	3508	hab
QMD	8.450E+00	l/s
Consumo diario	715.08	m ³
 Tanque Superficial		
Factor de seguridad (25%)	1.25	
% consumo máximo diario	23.00	%
Volumen del tanque	209.898	m ³
<hr/> Volumen final total del tanque <hr/>		
Tanque Superficial		
Calculado con el volumen total de incendio (Vf)	209.898	m ³
Calculado con el volumen adicional de incendio (Vf)	209.9	m ³
<hr/> Dimensionamiento del tanque superficial <hr/>		
Volumen total del tanque (Vf)	2.09898	m ³
Constante en función de la capacidad (K)	0.3	
Profundidad del tanque (H)	0.99966	m

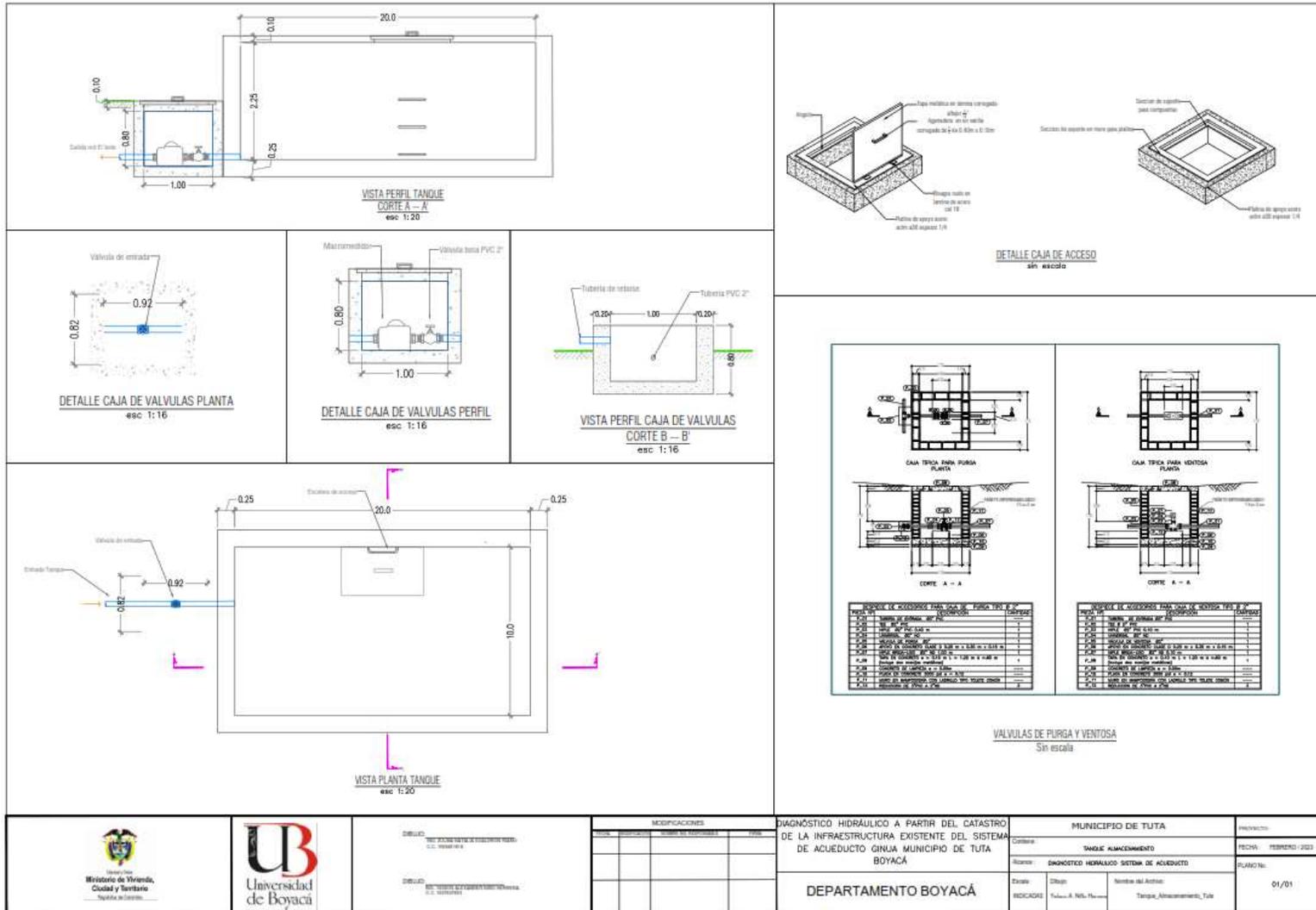
Área del tanque	209.9693896 m ²
Largo: Ancho 1:1	14.49032055 m
Número de módulos	1 uni
Volumen final del tanque por unidad (Vfu)	209.898 m ³
Volumen final del tanque por unidad en cientos m ³ (Vfu)	2.09898 m ³
Constante en función de la capacidad (K)	0.3
Profundidad del tanque (H)	0.99966 m
Área del tanque	209.9693896 m ²
Largo: Ancho 1:1	14.49 m

Fuente: autores.

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 33 se evidencia que para el escenario futuro el tanque de almacenamiento cumple con la capacidad requerida para el caudal de diseño de 8,45 l/s, dado que, según los cálculos se necesita un tanque con dimensiones de Largo: Ancho relación 1:1, de 14.5 m y una profundidad de 1m para un volumen total de 900 m³ y de acuerdo a esto se cumple con otro requerimiento de la normatividad legal vigente, que establece que todos los tanques deben contar con sistema de alivio que tenga la capacidad para evacuar excesos y el diseño debe basarse en el QMD para el horizonte de diseño.

Figura 26

Dimensionamiento tanque de almacenamiento existente



Fuente: autores

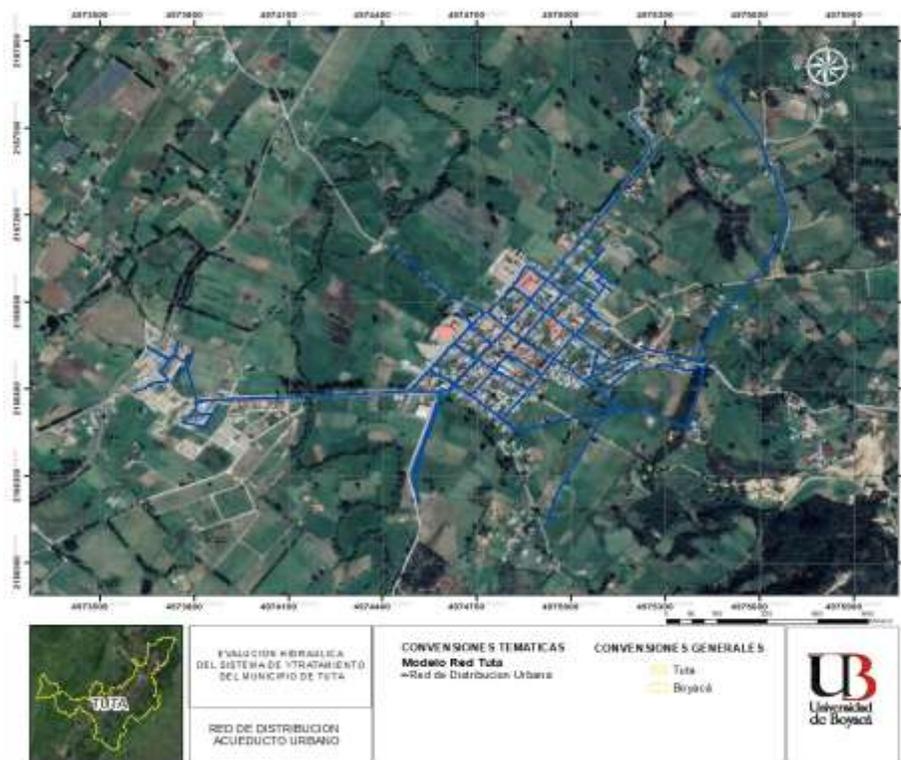
Diagnostico red de distribución

Descripción

En el contexto de la infraestructura de suministro del municipio, resulta esencial destacar la presencia de una red de distribución integral, cuyo punto de origen es el tanque de almacenamiento conectado a la planta de tratamiento de agua potable. Este sistema de distribución, representado de manera detallada en la figura 28, desempeña un papel central en asegurar el suministro efectivo de agua potable a lo largo del perímetro urbano. La red no solo canaliza el agua tratada desde la planta hacia los diversos sectores residenciales y comerciales, sino que también abarca una serie de elementos clave, como hidrantes y válvulas de control, para optimizar la gestión y responder eficazmente a las necesidades cambiantes de la comunidad.

Figura 27

Red de distribución del acueducto urbano del municipio de Tuta



Fuente: autores

El PUEAA del municipio precisa que la red de distribución tiene una longitud de 12.800 metros lineales aproximadamente, la red está compuesta por tubería PVC con diámetros desde 4" hasta ¾", en la tabla 34 se presenta un desglose detallado que especifica los diámetros y las longitudes correspondientes de cada tramo de la red, proporcionando una visión más detallada de la infraestructura que compone el suministro de agua en el casco urbano del municipio de Tuta.

Tabla 33

Catastro redes de acueducto

Diámetro	Material	Longitud
4"	PVC	377,17
3"	PVC	837,42
2½"	PVC	849,25
2"	PVC	6533,46
1"	PVC	2232,07
¾"	PVC	1214,69
TOTAL		12786,96

Fuente: Unidad de Servicios Públicos Tuta. (2020). *Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua - PUEAA*. Alcaldía Municipal de Tuta.

En lo que respecta a la vigilancia y control, conforme a las disposiciones establecidas en el decreto 1575 de 2017 y la resolución 2115 de 2017, el municipio ha implementado un sistema integral de monitoreo de la calidad del agua. Se han instalado un total de nueve (9) cajas destinadas exclusivamente para la toma de muestras, las cuales han sido ubicadas estratégicamente. La implementación de este sistema de monitoreo avanzado no solo asegura el cumplimiento de las normativas vigentes en materia de calidad del agua, sino que también proporciona datos valiosos para la detección temprana de posibles problemas y la adopción de medidas preventivas, contribuyendo así a la preservación de la salud pública y la sostenibilidad del suministro de agua en el municipio.

Figura 28

Puntos concertados para el muestreo de agua para consumo humano



Fuente: autores

Adicionalmente, dentro del sistema hidráulico, se han instalado dos hidrantes estratégicamente ubicados para facilitar la rápida intervención en caso de emergencias o necesidades operativas. Estos hidrantes no solo sirven como puntos de acceso rápido al suministro de agua, sino que también desempeñan un papel crucial en la planificación de contingencias y la gestión eficiente de situaciones imprevistas.

Asimismo, se han incorporado un total de nueve (9) válvulas de compuerta con el propósito de facilitar la suspensión selectiva del servicio y permitir la sectorización del sistema. Estas válvulas, distribuidas estratégicamente a lo largo de la red, posibilitan el control preciso del flujo de agua en diferentes secciones, facilitando las labores de mantenimiento, reparación y optimización del sistema.

Figura 29

Localización de los hidrantes

	X	Y
Hidrante 1	1094132,39	1121096,22
Hidrante 2	1094112,11	1121024,63

Fuente: Unidad de Servicios Públicos Tuta. (2008). *Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua*. Alcaldía Municipal de Tuta.

Figura 30*Hidrantes de la red de acueducto*

Fuente: autores.

En cuanto a la micro medición en el perímetro urbano del municipio, es relevante destacar que la cobertura actual alcanza un 100%. No obstante, se observa que la expansión de la cobertura, la reposición y la ampliación de las redes han sido llevadas a cabo de manera progresiva, en paralelo con el crecimiento urbanístico y la ejecución de nuevos proyectos de vivienda. Un aspecto crítico es la falta de diseños apropiados para garantizar el funcionamiento eficiente de la red en estas áreas en expansión, lo que podría estar contribuyendo a problemas técnicos en cuanto a exigencias de caudal y presiones en la red, que podría estar generando inconvenientes en la operación y mantenimiento de la red, lo cual requiere una evaluación más detallada.

Figura 31*Micro medición municipio de Tuta*

Fuente: autores.

En la tabla 35 se detalla minuciosamente el catastro de válvulas que integran la red de distribución, que regulan y controlan el flujo de agua en todo el sistema. Cada válvula desempeña un papel específico en la gestión eficiente de la red, ya sea para permitir el mantenimiento, segmentar secciones para reparaciones localizadas, o facilitar la regulación del caudal según las demandas fluctuantes. Este catastro proporciona información detallada sobre la ubicación, tipo y profundidad de cada válvula, permitiendo una planificación estratégica y un mantenimiento proactivo.

Tabla 34*Catastro de válvulas*

No	Ubicación	Diámetro (pulg)	Profundidad a la base (m)	Tipo
1	Carrera 8 con calle 2	2"	0.80	Sello bronce
2	Carrera 7 con calle 3	2"	0.80	Sello bronce
3	Carrera 7 con calle 4	2"	0.80	Sello bronce
4	Carrera 5 con calle 5	2"	0.80	Sello bronce
5	Carrera 5 con calle 6	2"	0.80	Sello bronce
6	Carrera 5 con calle 7	2"	0.80	Sello bronce
7	Barrio la pradera	3"	0.80	Sello bronce
8	Carrera 6 con calle 8	2"	0.80	Sello bronce
9	Carrera 7 con calle 8	2"	0.80	Sello bronce

10	Carrera 7 con calle 6	2"	0.80	Sello bronce
11	Carrera 8 con calle 5	2"	0.80	Sello bronce
12	Carrera 4ª con calle 6	4"	0.80	Sello bronce
13	Carrera 3 con calle 6	2 ½"	0.80	Sello bronce
14	Carrera 3 con calle 4	2"	0.80	Sello bronce

Fuente: Unidad de Servicios Públicos Tuta. (2020). *Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua - PUEAA*. Alcaldía Municipal de Tuta.

Requisitos de diseño

Según la resolución 0330 del 2017 en el artículo 57, la modelación de redes de distribución de agua permite predecir el comportamiento frente a diferentes condiciones operativas, de mantenimiento o de expansión. Para esto se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La modelación debe realizarse en período extendido, con frecuencia horaria, incorporando en los nodos los patrones de consumo medidos en campo.
- Los programas utilizados para la modelación hidráulica deben incorporar el método del gradiente para sus cálculos.
- Todos los modelos hidráulicos deben estar calibrados y validados, con base en las series disponibles de presión, caudal y niveles de tanques.
- La validación de los modelos hidráulicos debe realizarse con una frecuencia mínima de cinco años, o cada que se realice un cambio que afecte sustancialmente las condiciones operativas del sistema.
- El diseño de la red debe contemplar los sitios de salida para mediciones piezométricas, de caudal y puntos de muestreo en red de distribución.

En cuanto al diseño de las redes de distribución del sistema de acueducto se deben tener en cuenta los requerimientos establecidos por la resolución 0330 del 2017 y 799 del 2021 en los artículos 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67 y 68, en la tabla 36 se presentan dicha información:

Tabla 35*Requisitos de diseño de la red de distribución según la res. 0330 del 2017***Requisitos de diseño de la red de distribución según la resolución 0330 del 2017 y 799 del 2021**

- Artículo 60** *Profundidades máximas y mínimas para la instalación de tuberías enterradas en las redes de distribución.* La profundidad de instalación de las tuberías en zona urbana no debe exceder de 0.6 m. en vías peatonales o zonas verdes y 1.0 m. en vías vehiculares, medidos desde la clave de la tubería hasta la superficie del terreno.
- Artículo 61** *Presiones de servicio mínimas en la red de distribución.* La presión dinámica mínima en la red de distribución debe ser de 10 m.c.a. en sistemas con poblaciones de diseño de hasta 12.500 habitantes.
- Artículo 62** *Presiones de servicio máximas en la red de distribución.* Para sistemas nuevos u optimizaciones, la presión estática máxima debe ser de 50 m.c.a.
- Artículo 63** *Diámetro interno real mínimo en la red de distribución.* El diámetro mínimo en las redes de distribución no deberá ser inferior a 75 mm para sectores urbanos
- Artículo 64** *Válvulas de corte o cierre en la red de distribución.* Deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:
- Las válvulas de compuerta no se deben utilizar en tuberías con diámetros superiores o iguales a 350 mm, en cuyo caso se deben utilizar válvulas de mariposa.
 - Cuando en un punto dado de la red se interconecten tres o más tramos de las tuberías, el diseño debe prever una válvula de cierre en cada tramo.
 - Deberán colocarse válvulas con drenaje y pozo de succión para mantenimiento de la red, evitando puntos muertos en la misma.
- Artículo 65** *Válvulas reguladoras de presión.* Deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:
- Para redes de distribución, el diámetro de la válvula debe determinarse de acuerdo con el caudal máximo horario (QMH).
 - Todas las válvulas reguladoras de presión deben ir acompañadas de válvulas de cierre que permitan el rápido monte y desmonte con fines de mantenimiento y/o cambio de las válvulas.
 - Las válvulas reguladoras de presión deben soportar la presión a ambos lados (aguas arriba y aguas abajo)
- Artículo 66** *Válvulas de ventosa.* Las líneas de conducción y distribución deben contar con válvulas ventosas. Éstas se ubicarán en los sitios altos de la red, en cambios bruscos

de pendiente de positiva a negativa. El diámetro mínimo de las ventosas debe ser de 25 mm.

Artículo 67 *Válvulas de purga.* Deben instalarse válvulas de purga en los puntos bajos de las redes, con el fin de permitir el lavado y la descarga de las mismas. El diámetro de la tubería de desagüe deberá estar entre 1/3 y 1/4 del diámetro de la tubería principal.

Artículo 68 *Cajas de las válvulas.* Todas las válvulas que conformen un sistema de distribución de agua potable deben colocarse dentro de cajas cuya construcción se debe realizar en el mismo momento en que el tramo correspondiente sea colocado

Fuente: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS [Resolución 0330 de 2017]. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf>

Evaluación hidráulica red de distribución

La evaluación hidráulica de la red de distribución implica la modelación detallada de la malla de distribución. Es esencial realizar un ensayo de presiones que incluya la recopilación de datos en varios puntos estratégicos de la red, lo que permitirá ajustar y calibrar de manera precisa el modelo hidráulico. La metodología empleada para llevar a cabo este proceso de calibración se presenta a continuación, destacando las fases clave que garantizarán la fiabilidad y representación precisa del comportamiento hidráulico de la red. Este enfoque metodológico proporciona las bases necesarias para obtener resultados confiables en la evaluación y optimización de la red de distribución de agua.

Calibración y validación del modelo. Según la Metodología de Calibración CIACUA de la Universidad de los Andes (2022), se propone un enfoque estratégico para el ajuste de variables en el modelo hidráulico. Este enfoque implica la agrupación de las variables a calibrar con base en su impacto sobre el sistema. Inicialmente, se procede a ajustar aquellas variables que ejercen una influencia primordial en la distribución de caudales en el sistema. Una vez logrado este ajuste, se procede al análisis de las variables que tienen un impacto significativo en la energía disponible en diferentes sectores de la red. Este método secuencial facilita una calibración efectiva y sistemática, priorizando aspectos críticos para optimizar el rendimiento

hidráulico global del sistema de distribución de agua. A continuación, se detalla la línea base de la metodología CIACUA:

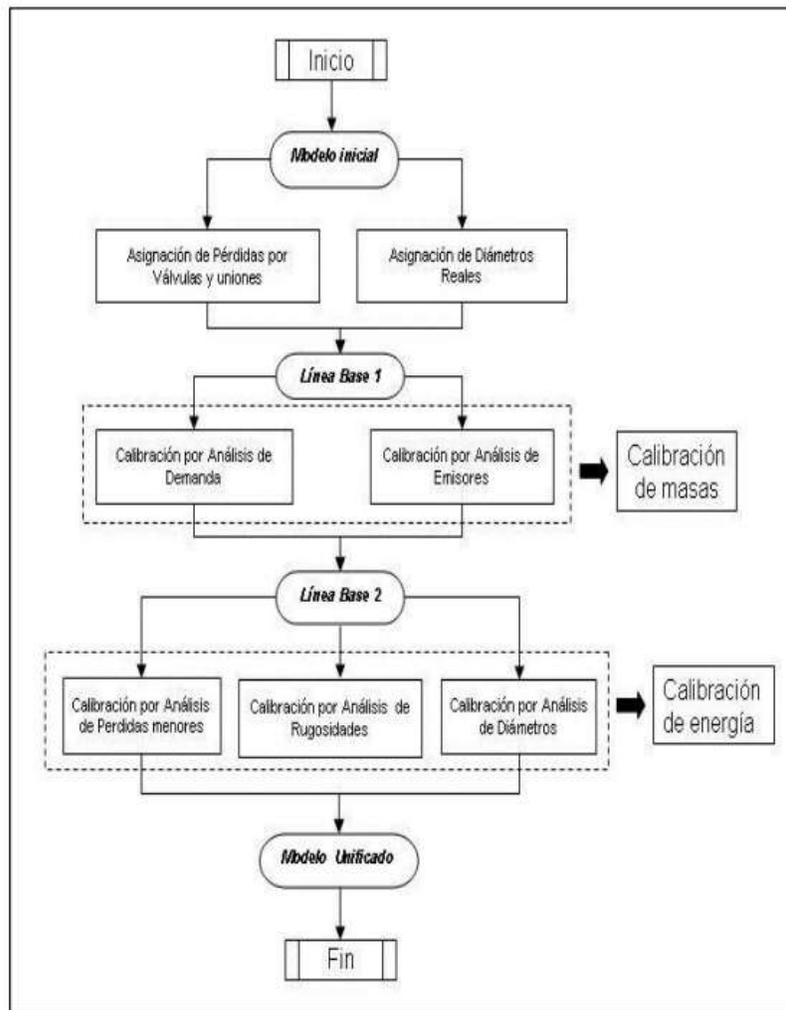
➤ Línea Base 1: Una vez concluido el proceso de transformación de los archivos topológicos en archivos que pueden ser medidos por los programas de simulación hidráulica, se cuenta con un Modelo Inicial que se aproxima a las condiciones reales de terreno. Sin embargo, típicamente en los planos topológicos se hace referencia a los diámetros nominales de las tuberías, los cuales difieren de los diámetros internos reales que se obtienen en fábrica. Por otro lado, el Modelo Inicial no tiene en cuenta la presencia de pérdidas menores por accesorios como uniones o codos, los cuales sin duda afectan el plano de presiones de la red.

➤ Línea Base 2: Una vez se tiene claro el comportamiento de las mediciones de caudal y presión frente a la presencia de Demandas Desconocidas y Emisores, el siguiente paso en el proceso de calibración consiste en condensarlas en un solo modelo en el cual se representen correctamente las mediciones de caudal y se tenga una muy buena aproximación de las mediciones de energía.

En la figura 45, se presenta de manera concisa y esquemática la síntesis visual de la Metodología de Calibración CIACUA de la Universidad de los Andes. Esta representación gráfica encapsula los pasos clave y la secuencia lógica que guían el proceso de calibración hidráulica.

Figura 32

Diagrama de Flujo Metodología de Calibración CIACUA.



Fuente: Leal Villarreal, F. (2003). *Metodología para la calibración de redes de distribución bajo ambiente de fugas*. (Trabajo de Grado, Universidad de los Andes). <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/7da1fe5b-c707-430e-910d-b3ae06495d26/content>

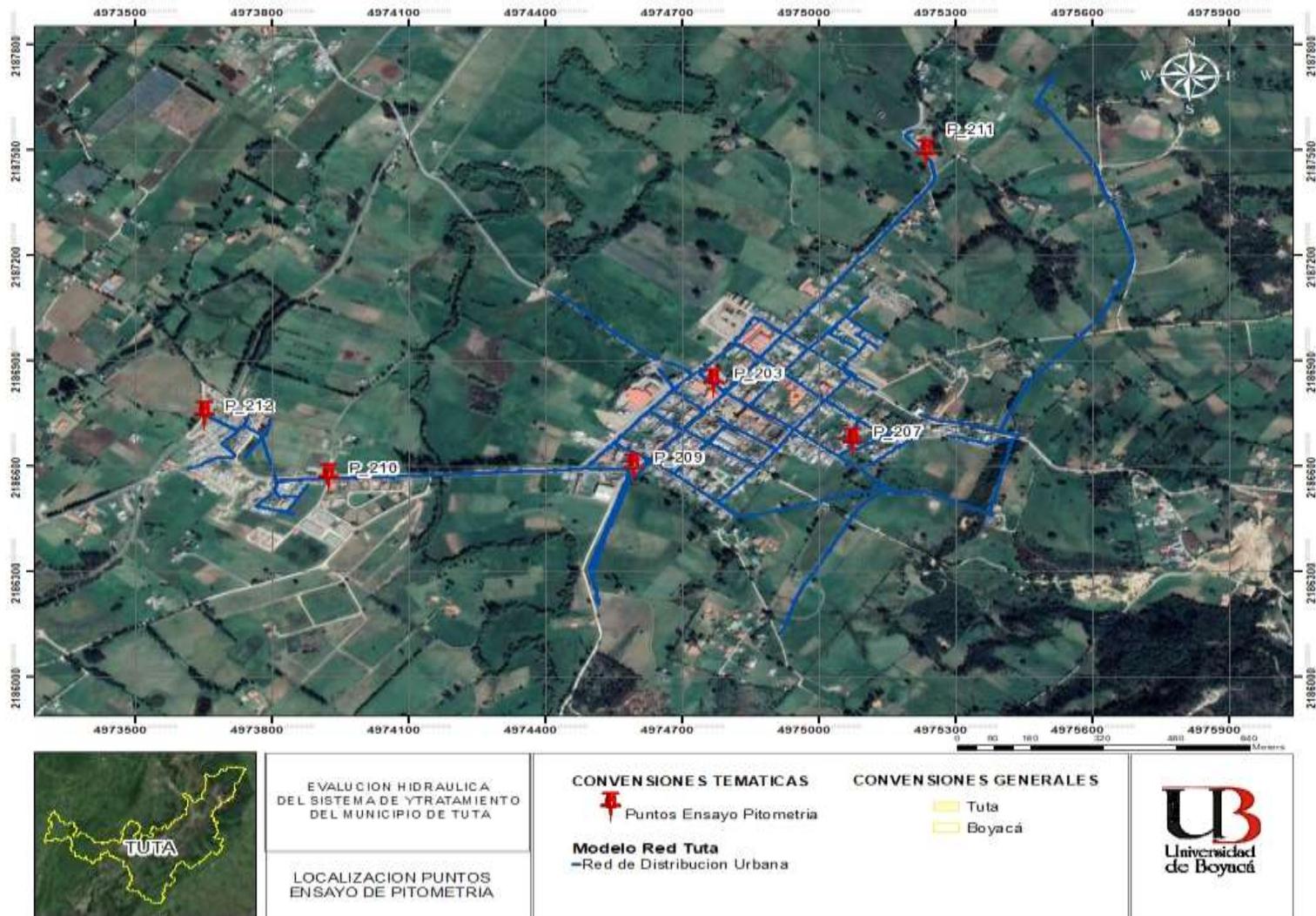
Ensayo de Pitometría. La prueba de Pitometría es un conjunto de actividades destinadas a la obtención, procesamiento, análisis y divulgación de datos operacionales relativos a caudales, volúmenes, presiones y niveles de agua, con el objeto de obtener un diagnóstico específico sobre condiciones reales o simuladas del funcionamiento de los componentes de un sistema de abastecimiento de agua y de esta manera calibrar el modelo a condiciones reales. Por lo tanto, la Pitometría, representa un apoyo de vital importancia en las áreas de operación, mantenimiento, planeamiento y construcción de las redes del acueducto.

La metodología aplicada en la elaboración del ensayo de Pitometría se desglosa en varias etapas para evaluar el comportamiento hidráulico del sistema. En primer lugar, se llevó a cabo la identificación y ubicación estratégica de los puntos de monitoreo a lo largo del sistema. Posteriormente, se procedió al montaje de los equipos de medición necesarios en cada ubicación identificada. La fase final consistió en la lectura de los instrumentos medidores de presión en cada punto, proporcionando datos detallados sobre las variaciones de presión durante un periodo de 24 horas.

1. Localización de puntos de monitoreo: Se han identificado y seleccionado meticulosamente seis (6) puntos de monitoreo, estratégicamente ubicados en los mismos sitios de muestreo de calidad de agua, lo que garantiza representatividad y pertinencia en la evaluación. Estos puntos, dispuestos según la figura 34, no solo sirven como indicadores clave del rendimiento hidráulico, sino que también facilitan una comprensión más completa de la dinámica de presión en la red de acueducto.

Figura 33

Localización puntos de monitoreo.



Fuente: autores.

2. Montaje de equipos de medición. En esta etapa, se lleva a cabo la instalación precisa de los instrumentos de medición, como manómetros, en los puntos de monitoreo previamente identificados en la red de acueducto como se detalla a continuación:
- En el punto de muestreo, se retira la llave y se instala el acople ensamblado con anterioridad (sección de tubo, adaptador macho, filtro y válvula de apertura), con el manómetro.
 - En la instalación del manómetro, se debe verificar la posición del equipo, el cual se debe ubicar siempre en posición vertical y con la válvula cerrada, quedando a una altura cómoda, lo cual contribuirá en una lectura adecuada del mismo como se observa en la figura 35.

Figura 34

Montaje del equipo de medición



Fuente: autores.

3. Lectura de equipos medidores de presión. En esta fase, se procede a registrar y analizar los datos obtenidos a través de los instrumentos de medición previamente instalados en los puntos de monitoreo de la red de acueducto como se detalla a continuación:
- Se debe asegurar de que el ensamble y el manómetro este firmemente acoplado a la tubería.
 - Después de acoplados los ensambles con el manómetro, se procede hacer apertura del servicio de agua en la red del municipio.
 - Se registra en el formato la hora y se procede a abrir la llave de la válvula la cual debe abrirse lentamente para evitar cambios bruscos en la presión del manómetro.
 - Se debe permanecer con el manómetro y observar la lectura en la pantalla. Se procede a tomar registro fotográfico y registrar en el formato la presión en la tubería.
 - Se cierra la llave de la válvula, y si es el caso, se retira el manómetro de la tubería de prueba asegurándose que quede bien sellado como se muestra en la figura 36.

Figura 35

Mediciones de presión en los puntos establecidos



Fuente: autores.

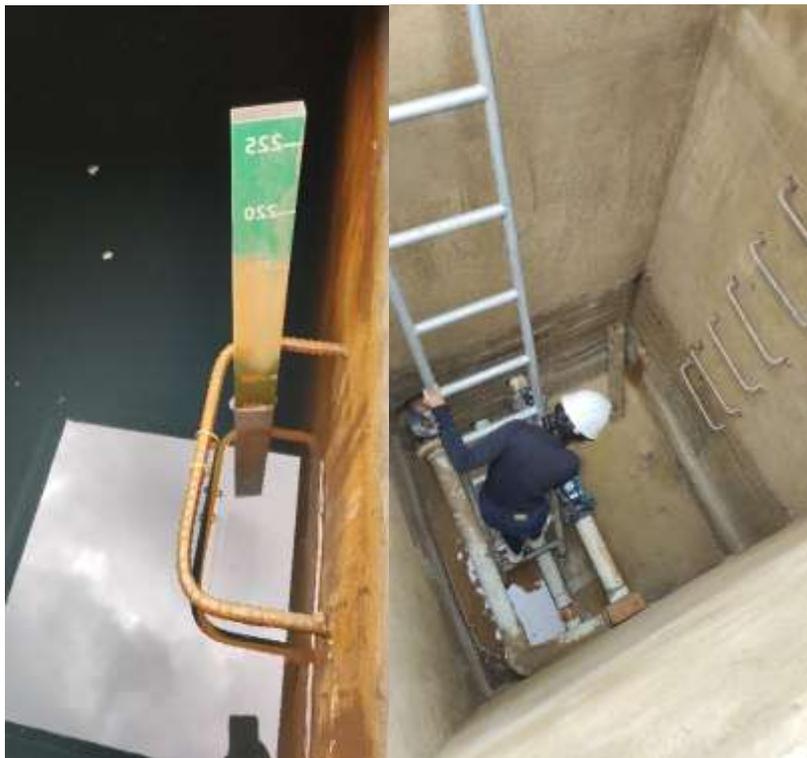
4. Lectura del caudal de demanda. Durante esta etapa, se procede a medir y registrar con precisión el caudal de agua demandado directamente en el tanque de almacenamiento.

Para la determinación de la altura de lámina de agua en los dos tanques, se realizó tomas cada hora durante las 24 horas el siguiente procedimiento:

- El proceso se inicia con la cubicación del tanque (LxAxH).
- Por facilidad en la toma de la medida se tomaron lecturas midiendo desde el borde inferior de la tapa del tanque hasta la superficie de la lámina de agua, esta medida se descontó de la altura del tanque.
- Se toman lecturas cada hora, en la figura 36 se presenta el registro fotográfico de esta etapa dejándolas registradas en el formato respectivo.

Figura 36

Medición de lámina de agua en los tanques de almacenamiento



Fuente: autores.

5. Resultados obtenidos ensayo de Pitometría. Una vez realizado el ensayo de Pitometría se procede hacer el análisis de resultados para consolidar la información de manera clara y comprensible, se hace referencia a la tabla 37 que condensa de manera sistemática los datos recopilados de las mediciones de lámina de agua en el tanque de almacenamiento durante el ensayo. Adicionalmente, entre las figuras 38-44 se presenta un enfoque visual y organizado facilita la interpretación de patrones, fluctuaciones y cualquier anomalía observada en las lecturas de presión. La descripción y el análisis de los resultados permiten identificar tendencias, áreas críticas y comportamientos inesperados en el sistema hidráulico.

Tabla 36*Mediciones de lámina de agua en el tanque de almacenamiento*

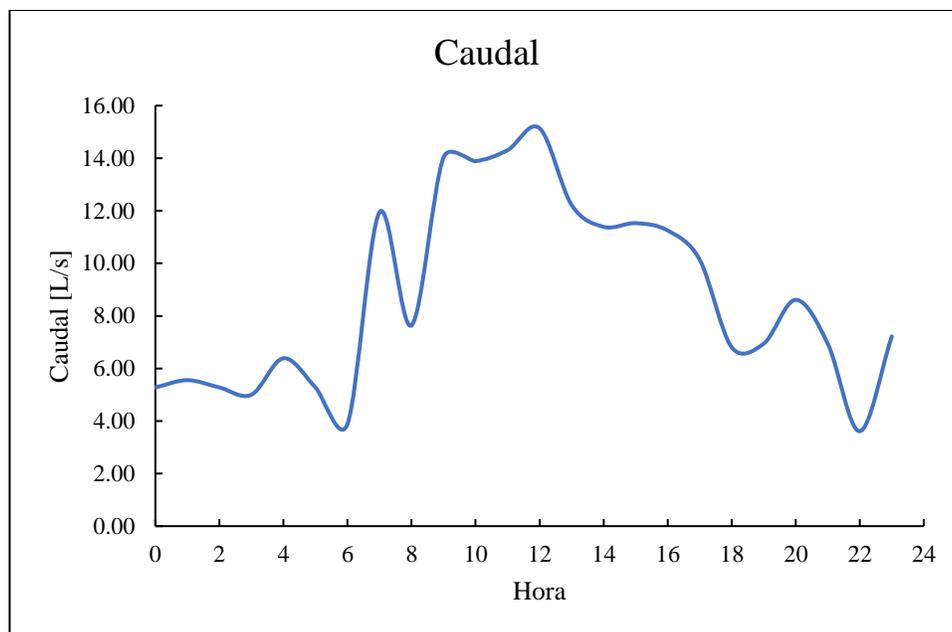
Hora de medición	Tanque 1			Tanque 2		Tanque 3		Volumen Total (m3)	Caudal (L/s)
	Lectura	Volumen (m3)	Lámina de agua (m)	Lectura	Volumen (m3)	Lectura	Volumen (m3)		
12:00	43990			90		190			
13:00	44027	37	4.23	86	4	187	3	44	12.22
14:00	44062	35	4.00	84	2	183	4	41	11.39
15:00	44087	25	2.86	78	6	172.5	10.5	41.5	11.53
16:00	44120	33	3.77	76	2	167	5.5	40.5	11.25
17:00	44149	29	3.31	74.5	1.5	161	6	36.5	10.14
18:00	44170	21	2.40	74	0.5	158	3	24.5	6.81
19:00	44193	23	2.63	74	0	156	2	25	6.94
20:00	44223	30	3.43	74	0	155	1	31	8.61
21:00	44247	24	2.74	74	0	154	1	25	6.94
22:00	44260	13	1.49	74	0	155	-1	13	3.61
23:00	44286	26	2.97	74	0	160	-5	26	7.22
0:00	44305	19	2.17	78	-4	162	-2	19	5.28
1:00	44325	20	2.29	79	-1	165	-3	20	5.56
2:00	44344	19	2.17	80.5	-1.5	170	-5	19	5.28
3:00	44362	18	2.06	80.5	0	172	-2	18	5.00
4:00	44385	23	2.63	81	-0.5	175	-3	23	6.39
5:00	44404	19	2.17	81	0	180	-5	19	5.28
6:00	44418	14	1.60	81	0	181	-1	14	3.89

7:00	44445	27	3.09	76	5	170	11	43	11.94
8:00	44464	19	2.17	72.5	3.5	165	5	27.5	7.64
9:00	44493	29	3.31	66	6.5	150	15	50.5	14.03
10:00	44527	34	3.89	60	6	140	10	50	13.89
11:00	44572	45	5.14	57.5	2.5	136	4	51.5	14.31
12:00	44620	48	5.49	55	2.5	132	4	54.5	15.14
									8.76

Fuente: autores.

Figura 37

Curva de consumo



Fuente: autores.

En esta figura se puede observar que las horas en las que disminuye la lámina de agua están entre las 8:00 y 9:00 am y las 12:00 – 2:00 pm a razón que esas son las horas en las que más demanda tiene la red con el gasto destinado a baños y labores del hogar y al medio día sufre de nuevo una disminución a razón del retorno al hogar con las respectivas pérdidas. Con lo cual se determina que a medida que aumenta la presión, la altura de la lámina de agua disminuye.

En la siguiente tabla se presenta la topología considerando los siguientes puntos del sistema de acueducto:

Tabla 37*Topología de los puntos de muestreo*

	Latitud	Longitud	Altura
PTAP			
Ginua	5°41'13.75"N	73°13'20.21"O	2652
Tanque 1	5°41'14.12"N	73°13'20.92"O	2650
P_210	5°41'18.16"N	73°14'7.85"O	2552
P_209	5°41'19.40"N	73°13'46.16"O	2564
P_207	5°41'20.98"N	73°13'30.79"O	2597
P_211	5°41'50.88"N	73°13'25.85"O	2562
P_203	5°41'27.03"N	73°13'41.49"O	2565
P_212	5°41'27.06"N	73°14'17.02"O	2577

Fuente: autores.

La tabla presenta datos de presión expresados en bares y metros de columna de agua (m.c.a) en función de las horas del día. Cada fila corresponde a una hora específica, Las columnas entre 210 y 212 hace referencia a los puntos de monitoreo denominados de la misma forma como se nombran en las cajas de muestreo de calidad. Se identifica una variación en la presión a lo largo del día, lo que sugiere posibles patrones o tendencias. Este conjunto de datos se presta para un análisis detallado de cómo la presión fluctúa durante las diferentes horas del día, proporcionando información valiosa para comprender su comportamiento a lo largo del tiempo.

Tabla 38*Presiones en cada punto de muestreo*

Hora	Bares						m.c. a					
	210	209	207	211	203	212	210	209	207	211	203	212
0	4.1	3.4	2.6	5.9	3.0	0.90	41	34	26	59	30	9
1	3.9	3.1	2.3	6.0	3.1	0.90	39	31	23	60	31	9
2	4.0	3.1	2.3	6.0	3.0	0.90	40	31	23	60	30	9
3	3.9	3.1	2.3	5.9	3.0	0.90	39	31	23	59	30	9
4	3.9	3.1	2.3	5.9	2.9	1.00	39	31	23	59	29	10

5	3.9	3.1	2.4	5.8	2.7	1.00	39	31	24	58	27	10
6	3.9	3.0	2.3	5.7	2.8	0.95	39	30	23	57	28	10
7	3.8	2.7	2.2	5.5	2.5	0.85	38	27	22	55	25	9
8	3.7	2.4	2.1	5.0	2.3	0.80	37	24	21	50	23	8
9	3.6	2.4	2.1	4.4	2.1	0.75	36	24	21	44	21	8
10	3.7	2.3	2.0	5.0	1.9	0.50	37	23	20	50	19	5
11	3.5	2.2	2.0	4.9	1.8	0.50	35	22	20	49	18	5
12	3.4	2.1	2.0	4.9	1.8	0.50	34	21	20	49	18	5
13	3.9	2.6	2.4	5.5	2.6	1.10	39	26	24	55	26	11
14	4.1	2.7	2.5	5.8	2.7	1.20	41	27	25	58	27	12
15	4.1	3.0	2.5	5.6	2.7	1.20	41	30	25	56	27	12
16	4.1	3.1	2.5	5.8	2.7	1.20	41	31	25	58	27	12
17	4.1	3.0	2.6	5.9	2.9	1.20	41	30	26	59	29	12
18	4.1	3.1	2.6	6.1	3.0	1.20	41	31	26	61	30	12
19	4.2	3.1	2.6	6.2	3.0	1.20	42	31	26	62	30	12
20	4.1	3.1	2.6	6.1	2.9	1.10	41	31	26	61	29	11
21	4.1	3.1	2.6	6.2	3.1	1.10	41	31	26	62	31	11
22	4.1	3.3	2.6	6.3	3.1	1.20	41	33	26	63	31	12
23	4.1	3.4	2.7	6.3	3.3	1.20	41	34	27	63	33	12

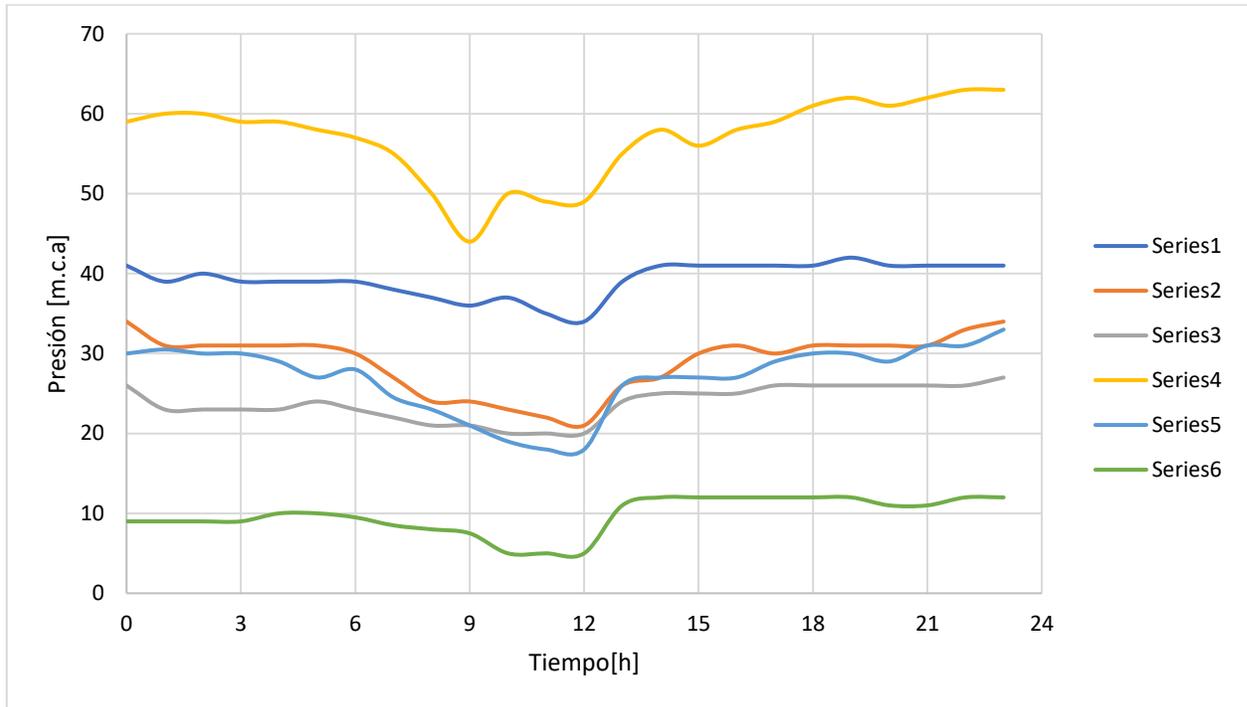
Fuente: autores.

En la figura 38 se presenta un consolidado de la variación de la presión a lo largo del día en los seis puntos de muestreo.

Para proporcionar una visualización más detallada y comprensible de los resultados obtenidos en la fase de Pitometría, se han elaborado las figuras 40 a 45. Estas representaciones gráficas permiten una interpretación más intuitiva y exhaustiva de las mediciones de presión.

Figura 38

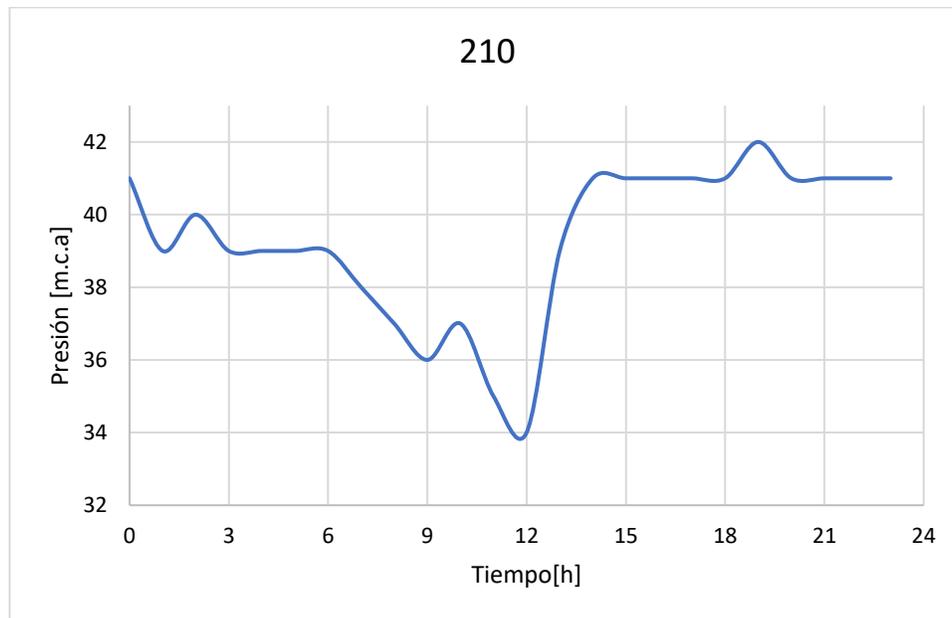
Variación de la presión en el transcurso de las 24 horas de muestreo



Fuente: autores

Figura 39

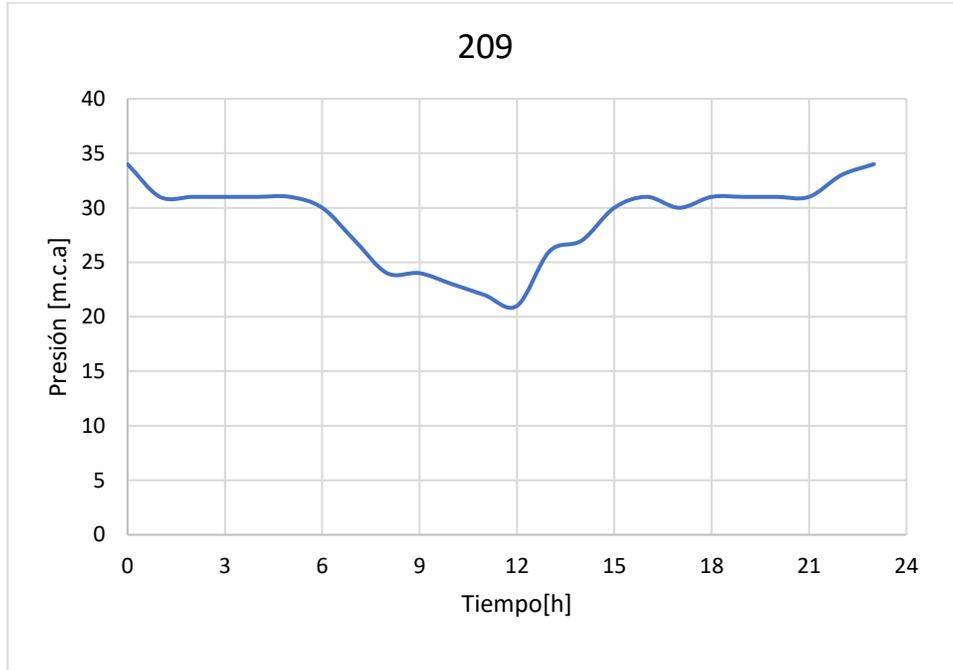
Presión de punto 210



Fuente: autores.

Figura 40

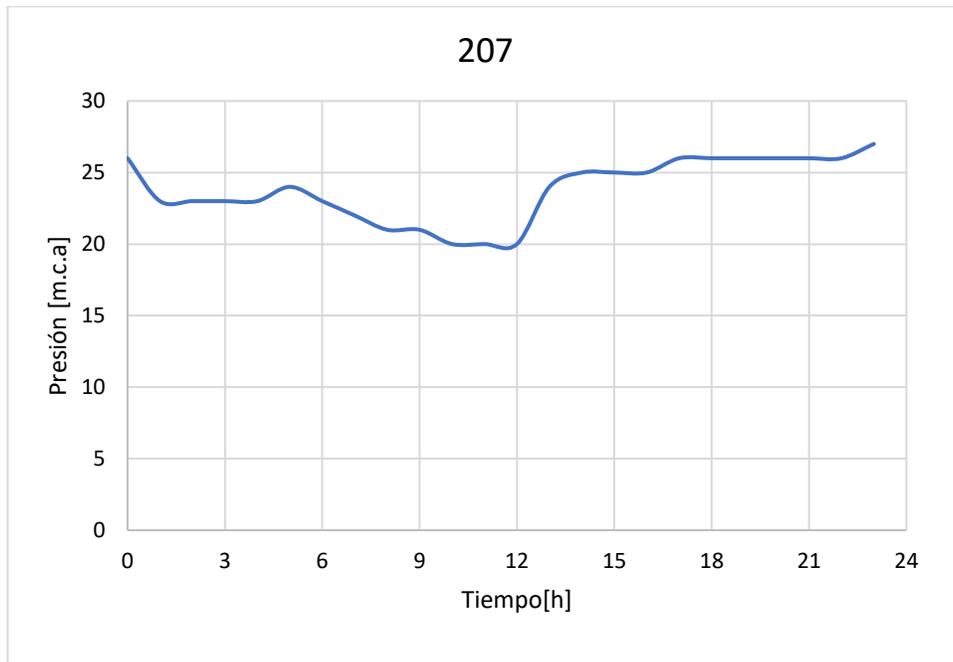
Presión de punto 209



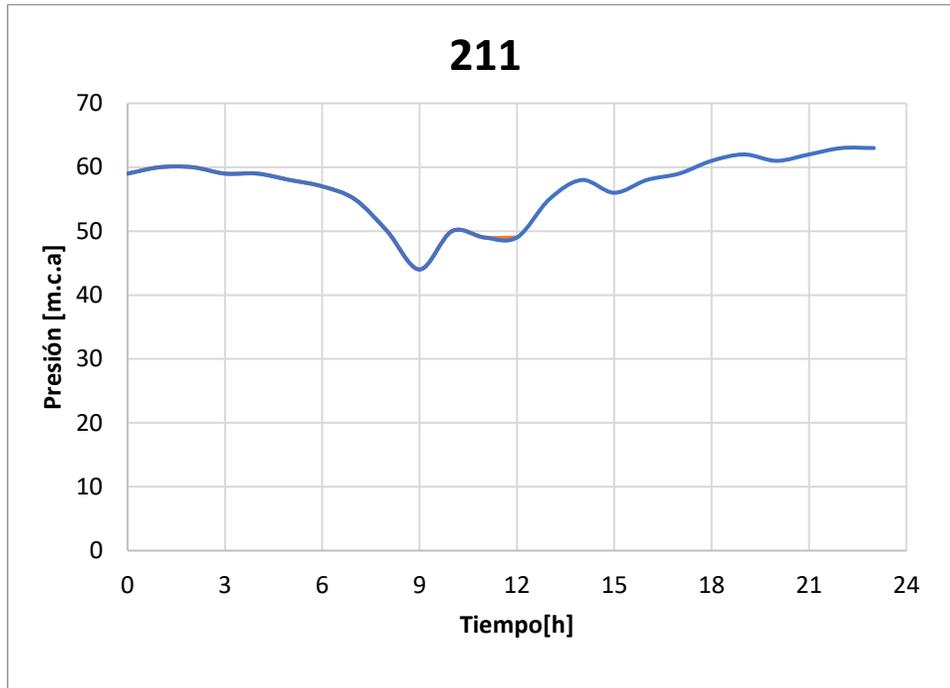
Fuente: autores.

Figura 41

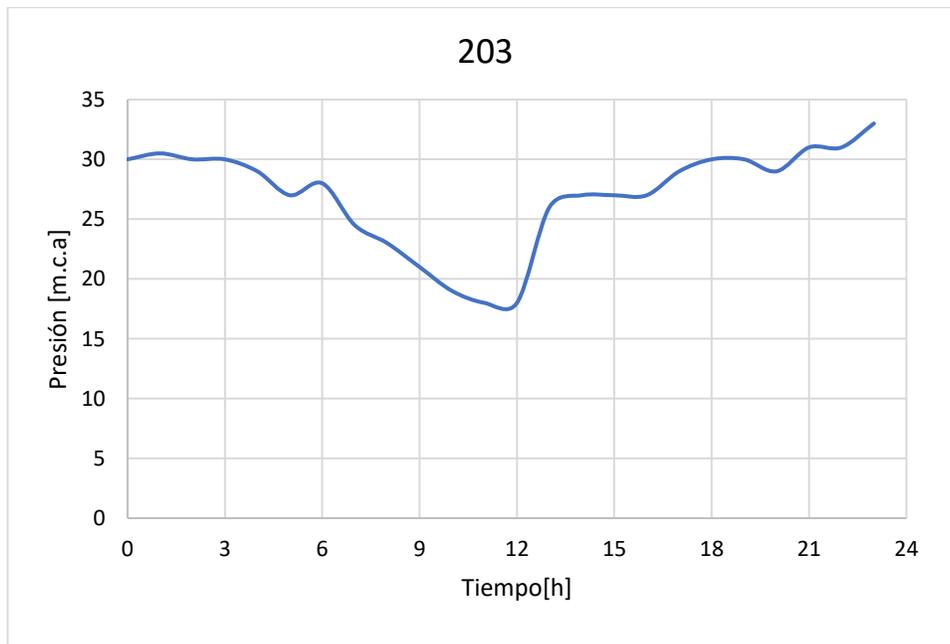
Presión de punto 207



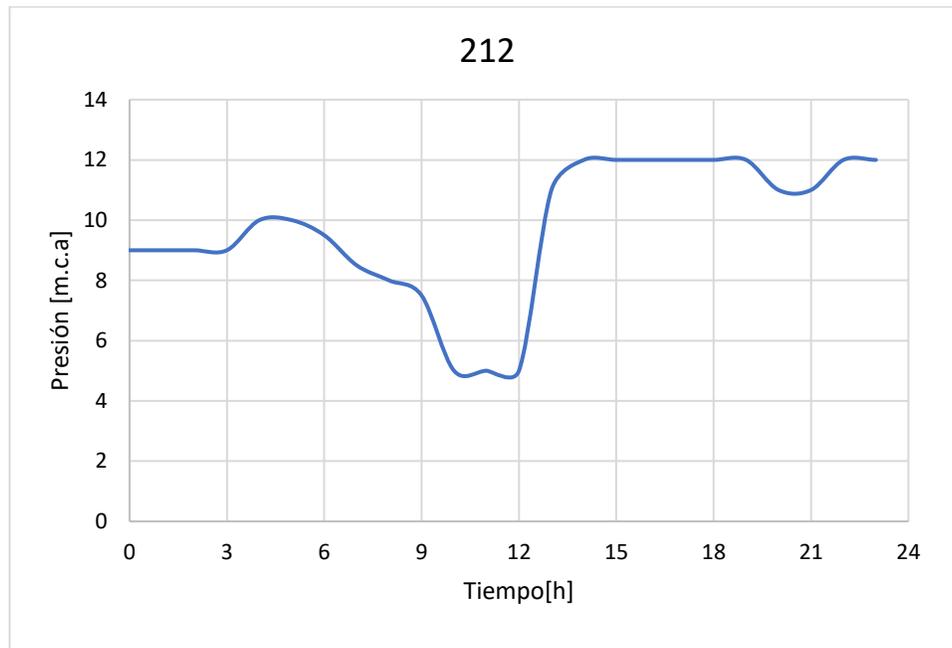
Fuente: autores

Figura 42*Presión de punto 211*

Fuente: autores.

Figura 43*Presión de punto 213*

Fuente: autores.

Figura 44*Presión de punto 212*

Fuente: autores.

De acuerdo a los resultados de las mediciones de presión se puede identificar una tendencia similar en los seis puntos de monitoreo, sobre el medio día se presenta una mayor demanda de agua por ende las presiones en las tuberías disminuyen mientras que en la noche sucede el evento contrario y las presiones en las tuberías aumentan considerablemente. Teniendo en cuenta las especificaciones técnicas en cuanto a presiones en tuberías a tubo lleno de la resolución 0330 de 2017, se puede identificar que el punto de monitoreo **212** presenta fallas de presión por debajo de los 10 m.c.a., en el punto **211** se observan presiones por encima de los 60 m.c.a. y los demás puntos de monitoreo se encuentran dentro del rango establecido por la normatividad vigente.

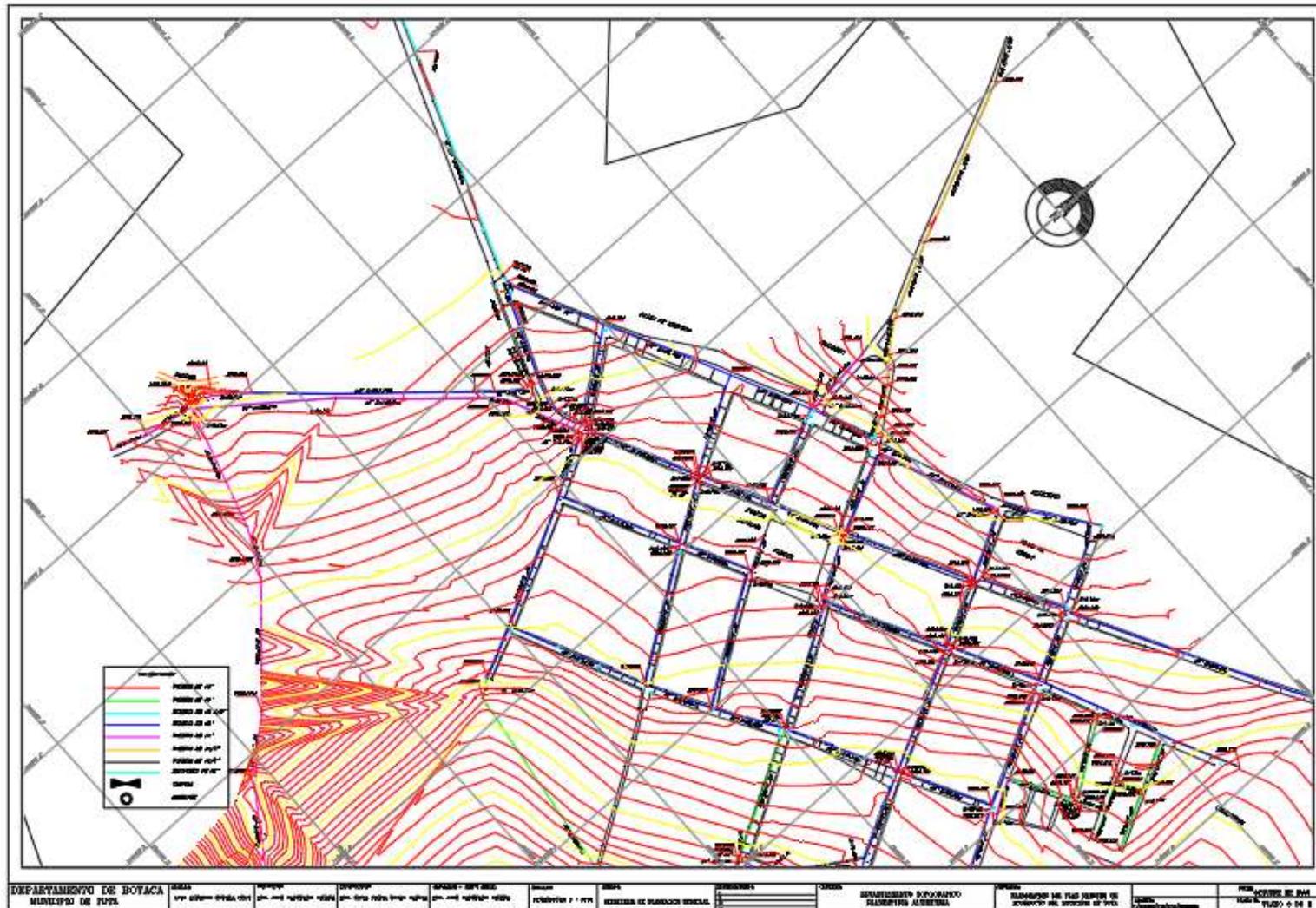
Modelación hidráulica de la red de distribución. Con el propósito de realizar la evaluación hidráulica de la red de distribución se implementa la modelación de la misma partiendo del principio del conjunto de expresiones que describen la cantidad de energía que se requiere para transportar una masa de fluido a lo largo de cierta longitud, a través de un conducto cerrado. Dicha energía depende de un conjunto de propiedades, las cuales se encuentran

directamente relacionadas con el fluido que se desea transportar (densidad, viscosidad), el conducto a través del cual está siendo transportado (radio hidráulico, rugosidad, longitud) y del tipo de flujo que se desarrolle (laminar o turbulento).

Topología de la red de Aducción y Conducción. Se uso información compartida por el municipio en cuanto al levantamiento topográfico dado que fueron datos de entrada para la modelación en el software WaterGEMS. Dicha información especifica la longitud y diámetro de toda la red de distribución como se observa en la siguiente figura:

Figura 45

Topografía del sistema de acueducto urbano Tuta



Fuente: Unidad de Servicios Públicos Tuta. (2008). *Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado*. Alcaldía Municipal de Tuta.

Se realizó un modelo hidráulico en el software WaterGEMS, en el cual se asignaron valores de diámetro y longitud a la tubería, elevación y asignación de la demanda en los nodos, así como de los componentes del sistema: reservorio y tanques de almacenamiento existentes en el sistema, esto con el objetivo de determinar el caudal que conduce la red, en la tabla 40 se presentan los resultados de la asignación de demanda para cada nodo en los dos escenarios temporales uno actual para el año 2022 y el otro futuro para el año 2047 de acuerdo a la proyección de población.

Para la asignación de la demanda en cada uno de los nodos se empleó la herramienta Thiessen Polygon con un coeficiente de 0.00021864. Esta metodología proporciona una distribución ponderada de la demanda entre los nodos, considerando la proximidad geográfica y la influencia relativa de cada punto de monitoreo. Este enfoque es esencial para lograr simulaciones hidráulicas y análisis de la red que reflejen de manera asertiva las condiciones del sistema en situaciones de demanda real. La elección del coeficiente específico también juega un papel importante en la precisión de la asignación, permitiendo adaptar el método a las características particulares del sistema y garantizar resultados confiables. Los resultados de esta asignación se presentan en la siguiente sección.

Tabla 39

Asignación de demanda en cada nodo

ID	NODO	DEMANDA 2022	DEMANDA 2047
654	J-309	0.216	0.143
65	J-34	0.022	0.014
160	J-129	0.053	0.035
182	J-151	0.06	0.04
46	J-15	0.015	0.01
227	J-196	0.075	0.05
222	J-191	0.073	0.049
94	J-63	0.031	0.021
226	J-195	0.075	0.049
336	J-305	0.111	0.074
335	J-304	0.111	0.073
334	J-303	0.111	0.073
333	J-302	0.11	0.073
332	J-301	0.11	0.073
331	J-300	0.11	0.072

330	J-299	0.109	0.072
329	J-298	0.109	0.072
328	J-297	0.109	0.072
327	J-296	0.108	0.072
326	J-295	0.108	0.071
325	J-294	0.108	0.071
324	J-293	0.107	0.071
323	J-292	0.107	0.071
322	J-291	0.107	0.071
321	J-290	0.106	0.07
320	J-289	0.106	0.07
319	J-288	0.106	0.07
318	J-287	0.105	0.07
317	J-286	0.105	0.069
316	J-285	0.105	0.069
315	J-284	0.104	0.069
314	J-283	0.104	0.069
313	J-282	0.104	0.069
312	J-281	0.103	0.068
311	J-280	0.103	0.068
310	J-279	0.103	0.068
309	J-278	0.102	0.068
308	J-277	0.102	0.067
307	J-276	0.102	0.067
306	J-275	0.101	0.067
305	J-274	0.101	0.067
304	J-273	0.101	0.067
303	J-272	0.1	0.066
302	J-271	0.1	0.066
301	J-270	0.1	0.066
300	J-269	0.099	0.066
299	J-268	0.099	0.065
298	J-267	0.099	0.065
297	J-266	0.098	0.065
296	J-265	0.098	0.065
295	J-264	0.098	0.065
294	J-263	0.097	0.064
293	J-262	0.097	0.064
292	J-261	0.097	0.064
291	J-260	0.096	0.064
290	J-259	0.096	0.064
289	J-258	0.096	0.063
288	J-257	0.095	0.063
287	J-256	0.095	0.063

286	J-255	0.095	0.063
285	J-254	0.094	0.062
284	J-253	0.094	0.062
283	J-252	0.094	0.062
282	J-251	0.093	0.062
281	J-250	0.093	0.062
280	J-249	0.093	0.061
279	J-248	0.092	0.061
278	J-247	0.092	0.061
277	J-246	0.092	0.061
276	J-245	0.091	0.06
275	J-244	0.091	0.06
272	J-241	0.09	0.06
270	J-239	0.089	0.059
269	J-238	0.089	0.059
268	J-237	0.089	0.059
267	J-236	0.088	0.058
266	J-235	0.088	0.058
265	J-234	0.088	0.058
264	J-233	0.087	0.058
263	J-232	0.087	0.058
262	J-231	0.087	0.057
261	J-230	0.086	0.057
260	J-229	0.086	0.057
259	J-228	0.086	0.057
258	J-227	0.085	0.057
257	J-226	0.085	0.056
256	J-225	0.085	0.056
255	J-224	0.084	0.056
254	J-223	0.084	0.056
253	J-222	0.084	0.055
252	J-221	0.083	0.055
251	J-220	0.083	0.055
250	J-219	0.083	0.055
249	J-218	0.082	0.055
248	J-209	0.082	0.054
247	J-216	0.082	0.054
246	J-215	0.081	0.054
245	J-214	0.5	0.054
244	J-213	0.081	0.053
243	J-212	0.08	0.053
242	J-211	0.08	0.053
241	J-210	0.08	0.053
240	J-209	0.079	0.053

239	J-208	0.079	0.052
238	J-207	0.079	0.052
237	J-206	0.078	0.052
236	J-205	0.078	0.052
235	J-204	0.078	0.051
234	J-203	0.077	0.051
233	J-202	0.077	0.051
232	J-201	0.077	0.051
231	J-200	0.076	0.051
230	J-199	0.076	0.05
660	J-315	0.218	0.145
228	J-197	0.075	0.05
658	J-313	0.218	0.144
657	J-312	0.217	0.144
656	J-311	0.217	0.144
224	J-193	0.074	0.049
223	J-192	0.074	0.049
653	J-308	0.216	0.143
652	J-307	0.216	0.143
220	J-189	0.073	0.048
219	J-188	0.072	0.048
218	J-187	0.072	0.048
217	J-186	0.072	0.048
216	J-185	0.071	0.047
215	J-184	0.071	0.047
214	J-183	0.071	0.047
213	J-182	0.071	0.047
212	J-181	0.07	0.046
211	J-180	0.07	0.046
210	J-179	0.07	0.046
209	J-178	0.069	0.046
208	J-177	0.069	0.046
207	J-176	0.069	0.045
206	J-175	0.068	0.045
205	J-174	0.068	0.045
204	J-173	0.068	0.045
203	J-172	0.067	0.044
202	J-171	0.067	0.044
201	J-170	0.067	0.044
200	J-169	0.066	0.044
199	J-168	0.066	0.044
198	J-167	0.066	0.043
197	J-166	0.065	0.043
196	J-165	0.065	0.043

195	J-164	0.065	0.043
194	J-163	0.064	0.042
193	J-162	0.064	0.042
192	J-161	0.064	0.042
191	J-160	0.063	0.042
190	J-159	0.063	0.042
189	J-158	0.063	0.041
188	J-157	0.062	0.041
187	J-156	0.062	0.041
186	J-155	0.062	0.041
185	J-154	0.061	0.041
184	J-153	0.061	0.04
183	J-152	0.061	0.04
221	J-190	0.073	0.048
181	J-150	0.06	0.04
180	J-149	0.06	0.039
179	J-148	0.059	0.039
178	J-147	0.059	0.039
177	J-146	0.059	0.039
176	J-145	0.058	0.039
175	J-144	0.058	0.038
174	J-143	0.058	0.038
173	J-142	0.057	0.038
172	J-141	0.057	0.038
171	J-140	0.057	0.037
170	J-139	0.056	0.037
169	J-138	0.056	0.037
168	J-137	0.056	0.037
167	J-136	0.055	0.037
166	J-135	0.055	0.036
165	J-134	0.055	0.036
164	J-133	0.054	0.036
163	J-132	0.054	0.036
162	J-131	0.054	0.035
161	J-130	0.053	0.035
225	J-194	0.074	0.049
159	J-128	0.053	0.035
158	J-127	0.052	0.035
157	J-126	0.052	0.034
156	J-125	0.052	0.034
155	J-124	0.051	0.034
154	J-123	0.051	0.034
153	J-122	0.051	0.034
152	J-121	0.05	0.033

151	J-120	0.05	0.033
150	J-119	0.05	0.033
149	J-118	0.049	0.033
148	J-117	0.049	0.032
147	J-116	0.049	0.032
146	J-115	0.048	0.032
145	J-114	0.048	0.032
144	J-113	0.048	0.032
143	J-112	0.047	0.031
651	J-306	0.215	0.143
141	J-110	0.047	0.031
140	J-109	0.046	0.031
139	J-108	0.046	0.03
229	J-198	0.076	0.05
137	J-106	0.045	0.03
136	J-105	0.045	0.03
135	J-104	0.045	0.03
134	J-103	0.044	0.029
133	J-102	0.044	0.029
132	J-101	0.044	0.029
131	J-100	0.043	0.029
130	J-99	0.043	0.028
129	J-98	0.043	0.028
128	J-97	0.042	0.028
127	J-96	0.042	0.028
126	J-95	0.042	0.028
125	J-94	0.041	0.027
124	J-93	0.041	0.027
123	J-92	0.041	0.027
122	J-91	0.04	0.027
121	J-90	0.04	0.026
120	J-89	0.04	0.026
119	J-88	0.039	0.026
118	J-87	0.039	0.026
117	J-86	0.039	0.026
116	J-85	0.038	0.025
115	J-84	0.038	0.025
114	J-83	0.038	0.025
113	J-82	0.037	0.025
112	J-81	0.037	0.025
111	J-80	0.037	0.024
110	J-79	0.036	0.024
109	J-78	0.036	0.024
108	J-77	0.036	0.024

107	J-76	0.035	0.023
106	J-75	0.035	0.023
105	J-74	0.035	0.023
104	J-73	0.034	0.023
103	J-72	0.034	0.023
102	J-71	0.034	0.022
101	J-70	0.033	0.022
100	J-69	0.033	0.022
99	J-68	0.033	0.022
98	J-67	0.032	0.021
97	J-66	0.032	0.021
96	J-65	0.032	0.021
95	J-64	0.031	0.021
655	J-310	0.217	0.143
93	J-62	0.031	0.02
92	J-61	0.03	0.02
91	J-60	0.03	0.02
90	J-59	0.03	0.02
89	J-58	0.029	0.019
88	J-57	0.029	0.019
87	J-56	0.029	0.019
86	J-55	0.028	0.019
85	J-54	0.028	0.019
84	J-53	0.028	0.018
83	J-52	0.027	0.018
82	J-51	0.027	0.018
81	J-50	0.027	0.018
80	J-49	0.026	0.018
79	J-48	0.026	0.017
78	J-47	0.026	0.017
77	J-46	0.025	0.017
76	J-45	0.025	0.017
75	J-44	0.025	0.016
74	J-43	0.024	0.016
73	J-42	0.024	0.016
72	J-41	0.024	0.016
71	J-40	0.024	0.016
70	J-39	0.023	0.015
69	J-38	0.023	0.015
68	J-37	0.023	0.015
67	J-36	0.022	0.015
66	J-35	0.022	0.014
138	J-107	0.046	0.03
64	J-33	0.021	0.014

63	J-32	0.021	0.014
62	J-31	0.021	0.014
61	J-30	0.02	0.013
60	J-29	0.02	0.013
59	J-28	0.02	0.013
58	J-27	0.019	0.013
57	J-26	0.019	0.012
56	J-25	0.019	0.012
55	J-24	0.018	0.012
54	J-23	0.018	0.012
53	J-22	0.018	0.012
52	J-21	0.017	0.011
51	J-20	0.017	0.011
50	J-19	0.017	0.011
49	J-18	0.016	0.011
48	J-17	0.016	0.011
47	J-16	0.016	0.01
659	J-314	0.218	0.144
45	J-14	0.015	0.01
44	J-13	0.015	0.01
43	J-12	0.014	0.009
42	J-11	0.014	0.009
41	J-10	0.014	0.009
40	J-9	0.013	0.009
39	J-8	0.013	0.009
38	J-7	0.013	0.008
37	J-6	0.012	0.008
36	J-5	0.012	0.008
35	J-4	0.012	0.008
34	J-3	0.011	0.007
142	J-111	0.047	0.031
TOTAL		20.872	13.533

Fuente: autores.

Escenario Actual (2022). La modelación hidráulica del acueducto urbano de Tuta, sin calibración, se realizó empleando un enfoque inicial basado en datos y parámetros predeterminados. En esta fase, no se llevó a cabo un proceso de calibración para ajustar el modelo a las condiciones específicas del sistema. Se utilizaron datos teóricos, geométricos y de diseño para configurar la red y asignar las demandas a los nodos correspondientes.

Para establecer un mayor entendimiento al lector, a continuación, se detalla la escala de colores en los nodos y las tuberías.

Presión en los nodos

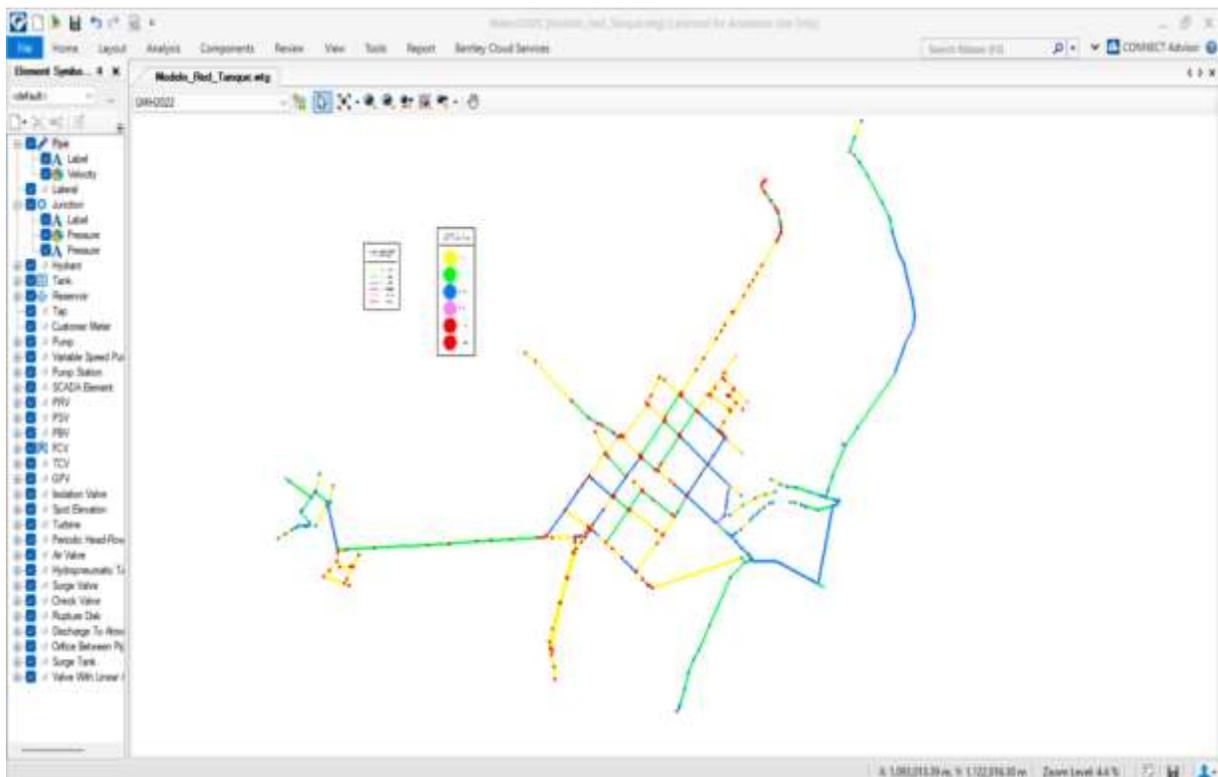
- Baja Presión: Azul
- Presión Normal: El verde representa presiones normales.
- Alta Presión: El naranja y el rojo, indican presiones elevadas.

Velocidad en las tuberías:

- Baja Velocidad: Azul claro
- Velocidad Normal: Verde representa velocidades normales.
- Alta Velocidad: Rojo indica velocidades altas.

Figura 46

Modelación hidráulica acueducto urbano Tuta - sin calibración



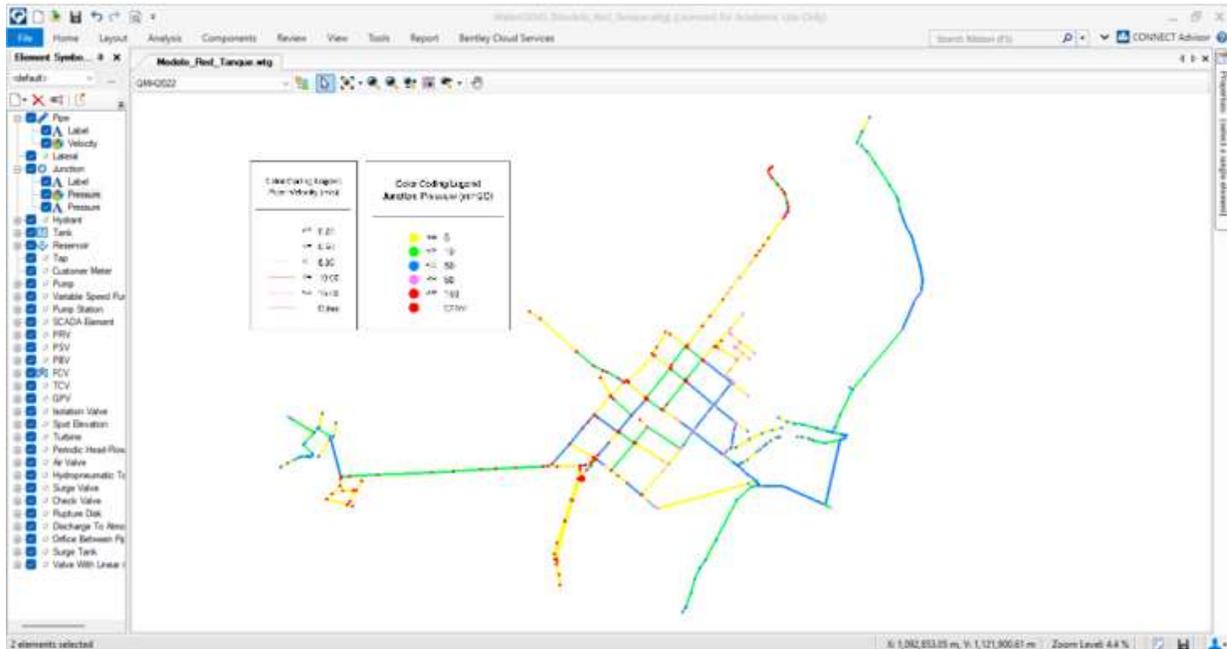
Fuente: autores

Calibración del modelo en condiciones reales. Con el objetivo de mejorar la precisión del modelo hidráulico y ajustarlo a las condiciones reales del sistema de acueducto, se llevó a cabo un proceso de calibración utilizando la metodología "CIACUA" desarrollada por la Universidad de los Andes. Esta calibración se basó en los datos observados durante el ensayo de Pitometría, donde se obtuvieron mediciones precisas de la presión en diferentes puntos de la red.

La calibración se realizó en dos etapas. En primer lugar, se llevó a cabo una calibración de masas de manera manual, ajustando la demanda en áreas críticas con importantes necesidades de caudal. Se consideraron zonas clave, como el hospital, la planta de beneficio animal, el colegio y la plaza de mercado, teniendo en cuenta la estructuración económica del municipio. Este enfoque permitió afinar la distribución de la demanda para reflejar de manera más precisa los patrones de consumo del sistema.

Posteriormente, se realizó una calibración automática de energía utilizando la herramienta Darwin Calibrator. Esta herramienta asigna coeficientes de rugosidad específicos según la longitud de la tubería y las pérdidas menores por accesorios, ajustando así los parámetros del modelo para que se alineen más estrechamente con el comportamiento hidráulico real de la red.

Este proceso de calibración integral se traduce en un modelo hidráulico más preciso y confiable, mejorando la capacidad del sistema para simular condiciones diversas y proporcionar resultados que se ajusten de manera óptima a la operación del acueducto en el municipio.

Figura 47*Modelación Hidráulica acueducto urbano Tuta - Con Calibración*

Fuente: autores

Optimización de la red. Luego de validar el modelo hidráulico mediante mediciones de campo, se busca mejorar la eficiencia del sistema de distribución de agua, asegurando capacidad, continuidad y cobertura adecuadas. A través de un proceso de ensayo y error, se identificaron dos modificaciones clave en la red para optimizar su funcionamiento.

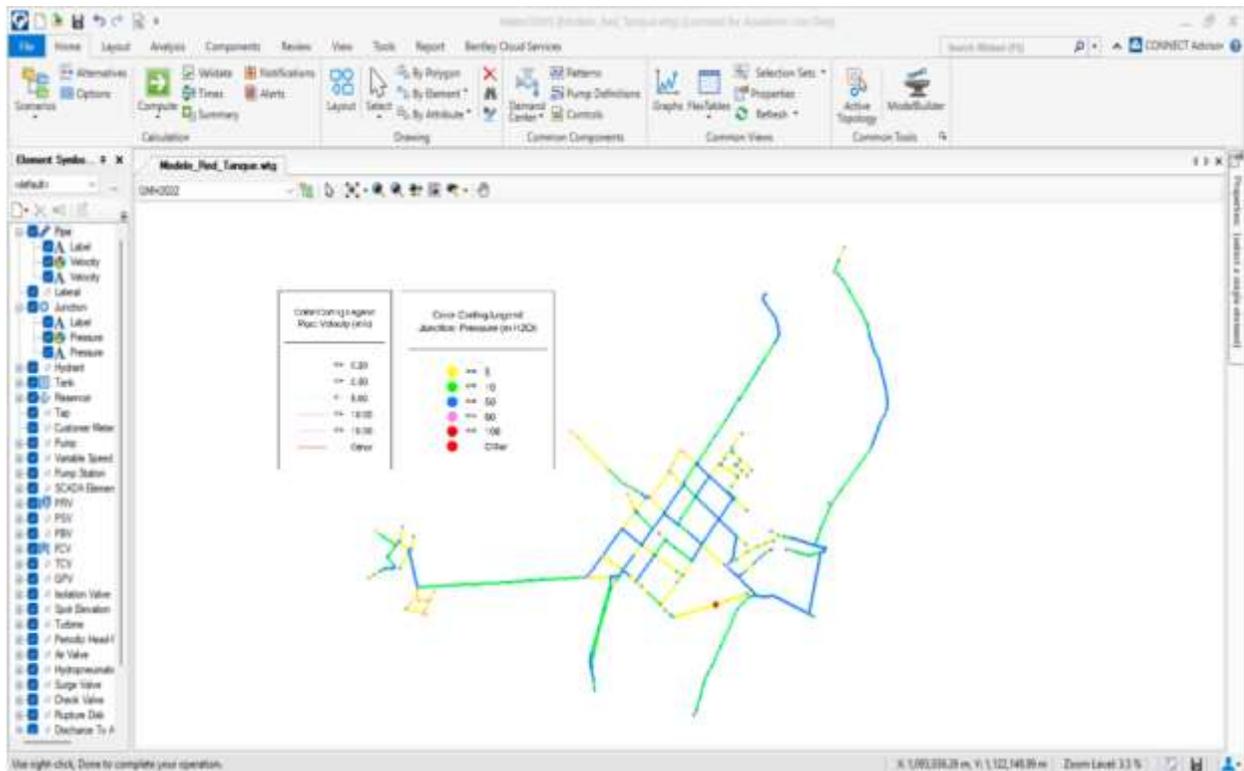
En primer lugar, se propone la instalación de una válvula reductora de presión en las tuberías P-98. Esta medida tiene como objetivo controlar y mantener la presión en niveles óptimos, evitando posibles problemas como fluctuaciones excesivas que podrían afectar la integridad de la red y los usuarios finales.

En segundo lugar, se sugiere la instalación de una válvula reguladora de caudal en la tubería P-18. Esta intervención tiene el propósito de ajustar y mantener un flujo constante en la tubería, contribuyendo a una distribución más equitativa del agua a lo largo de la red. Esta mejora no solo optimizará el rendimiento hidráulico, sino que también impactará positivamente en la continuidad del servicio para los usuarios conectados a esa línea específica.

Estas modificaciones buscan no solo corregir posibles deficiencias identificadas durante la validación del modelo, sino también mejorar la eficiencia operativa de la red de distribución, garantizando un suministro de agua confiable y eficiente para la comunidad.

Figura 48

Modelación hidráulica acueducto urbano Tuta - con optimización



Fuente: autores.

Escenario Futuro (2047). La modelación para un escenario futuro (2047) proporciona una visión prospectiva de cómo la red hidráulica podría comportarse bajo condiciones que difieren de las actuales especialmente en el aumento del caudal producto de la proyección de población.

Figura 49

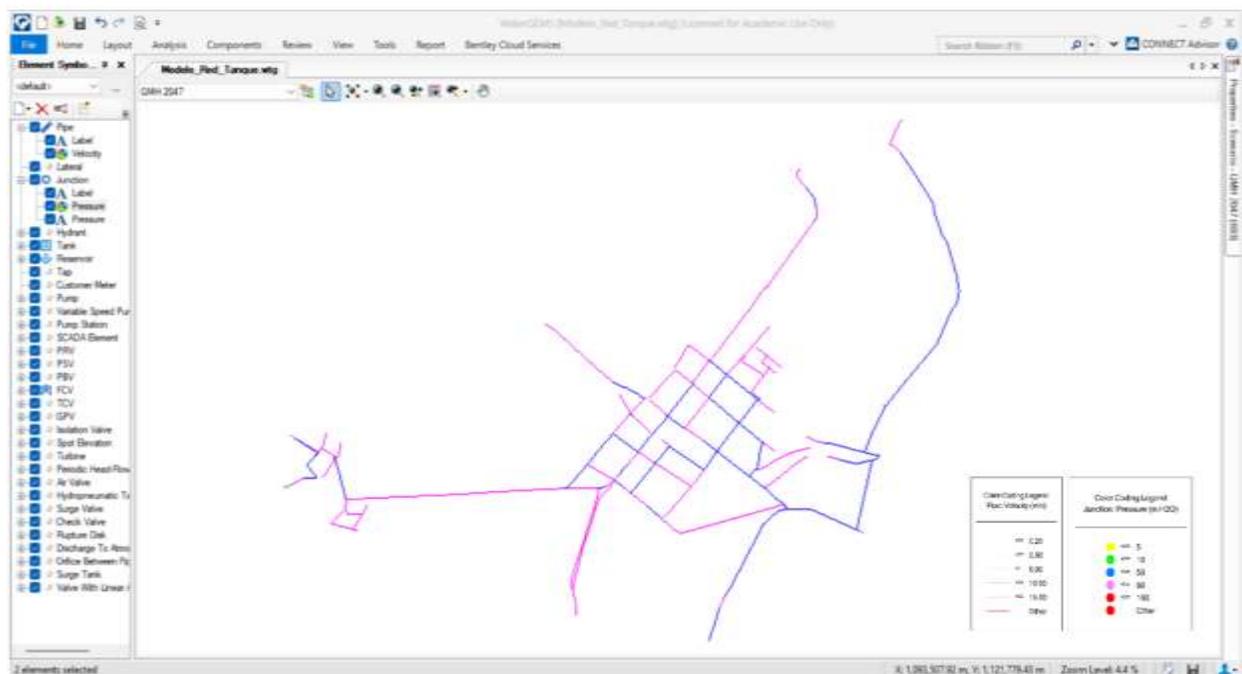
Modelación hidráulica acueducto urbano Tuta sin optimización



Fuente: autores.

Figura 50

Modelación hidráulica acueducto urbano Tuta con optimización



Fuente: autores.

Si bien el escenario futuro presenta menos fallas en la red en cuanto a velocidad y presión debido a que para el escenario futuro se disminuyen las perdidas por ende el caudal que ingresa a la red es menor; es decir debido a la configuración de la red de distribución está capacitada para transportar un caudal de 13.53 l/s de acuerdo a la evaluación hidráulica realizada en el software Water GEMS.

A continuación, se presentan los resultados y características de cada elemento modelado en el programa:

Tabla 40

Características de la tubería

ID	Label	Length (Scaled) (m)	Start Node	Stop Node	Diameter (mm)	Material	Hazen- Williams C	Flow (L/s)	Velocity (m/s)	Headloss Gradient (m/m)
337	P-1	8	J-1	J-2	103.42	PVC	150	8.278	0.99	0.01
339	P-3	16	J-265	J-271	54.58	PVC	150	1.434	0.61	0.009
340	P-4	13	J-271	J-272	54.58	PVC	150	1.399	0.6	0.009
341	P-5	7	J-272	J-273	54.58	PVC	150	1.364	0.58	0.008
342	P-6	9	J-273	J-274	54.58	PVC	150	1.329	0.57	0.008
344	P-8	18	J-275	J-282	54.58	PVC	150	0.902	0.39	0.004
345	P-9	42	J-282	J-283	54.58	PVC	150	0.866	0.37	0.004
346	P-10	92	J-283	J-284	54.58	PVC	150	0.83	0.35	0.003
347	P-11	62	J-284	J-286	54.58	PVC	150	0.757	0.32	0.003
348	P-12	187	J-286	J-287	54.58	PVC	150	0.72	0.31	0.003
349	P-13	105	J-287	J-288	30.2	PVC	150	0.683	0.95	0.044
350	P-14	33	J-288	J-289	30.2	PVC	150	0.646	0.9	0.039
351	P-15	37	J-289	J-290	30.2	PVC	150	0.609	0.85	0.035
352	P-16	46	J-290	J-291	30.2	PVC	150	0.572	0.8	0.031
353	P-17	62	J-291	J-292	30.2	PVC	150	0.534	0.75	0.028
354	P-18	40	J-292	J-293	30.2	PVC	150	0.497	0.69	0.024
355	P-19	14	J-293	J-294	30.2	PVC	150	0.459	0.64	0.021
356	P-20	19	J-294	J-295	30.2	PVC	150	0.422	0.59	0.018
357	P-21	63	J-295	J-296	30.2	PVC	150	0.384	0.54	0.015
358	P-22	29	J-296	J-297	30.2	PVC	150	0.346	0.48	0.013
359	P-23	11	J-297	J-298	30.2	PVC	150	0.308	0.43	0.01
360	P-24	46	J-298	J-299	30.2	PVC	150	0.27	0.38	0.008
361	P-25	84	J-299	J-300	30.2	PVC	150	0.232	0.32	0.006
362	P-26	47	J-300	J-301	30.2	PVC	150	0.193	0.27	0.004
363	P-27	26	J-301	J-302	30.2	PVC	150	0.155	0.22	0.003
364	P-28	17	J-302	J-303	30.2	PVC	150	0.116	0.16	0.002
365	P-29	42	J-303	J-304	21.81	PVC	150	0.078	0.21	0.004

366	P-30	52	J-304	J-305	21.81	PVC	150	0.039	0.1	0.001
367	P-31	50	J-265	J-266	21.81	PVC	150	0.173	0.46	0.018
368	P-32	41	J-266	J-267	21.81	PVC	150	0.139	0.37	0.012
369	P-33	15	J-267	J-268	21.81	PVC	150	0.104	0.28	0.007
370	P-34	21	J-268	J-269	21.81	PVC	150	0.07	0.19	0.004
371	P-35	16	J-269	J-270	21.81	PVC	150	0.035	0.09	0.001
372	P-36	19	J-275	J-276	21.81	PVC	150	0.355	0.95	0.066
373	P-37	37	J-276	J-277	21.81	PVC	150	0.319	0.86	0.054
374	P-38	44	J-277	J-278	21.81	PVC	150	0.284	0.76	0.044
375	P-39	31	J-278	J-279	21.81	PVC	150	0.108	0.29	0.008
376	P-40	22	J-279	J-280	21.81	PVC	150	0.072	0.19	0.004
377	P-41	32	J-280	J-281	21.81	PVC	150	0.036	0.1	0.001
378	P-42	21	J-2	J-3	103.42	PVC	150	6.637	0.79	0.007
379	P-43	112	J-3	J-4	103.42	PVC	150	6.633	0.79	0.007
380	P-44	22	J-4	J-5	103.42	PVC	150	6.629	0.79	0.007
381	P-45	47	J-5	J-6	103.42	PVC	150	6.625	0.79	0.007
382	P-46	22	J-6	J-7	103.42	PVC	150	6.62	0.79	0.007
383	P-47	5	J-7	J-254	21.81	PVC	150	0.37	0.99	0.071
384	P-48	21	J-254	J-255	30.2	PVC	150	0.337	0.47	0.012
385	P-49	64	J-255	J-256	30.2	PVC	150	0.303	0.42	0.01
386	P-50	147	J-256	J-257	30.2	PVC	150	0.27	0.38	0.008
387	P-51	73	J-257	J-258	30.2	PVC	150	0.237	0.33	0.006
388	P-52	31	J-258	J-259	30.2	PVC	150	0.203	0.28	0.005
389	P-53	39	J-259	J-260	30.2	PVC	150	0.17	0.24	0.003
390	P-54	48	J-260	J-261	21.81	PVC	150	0.136	0.36	0.011
391	P-55	48	J-261	J-262	21.81	PVC	150	0.102	0.27	0.007
392	P-56	5	J-262	J-263	21.81	PVC	150	0.068	0.18	0.003
393	P-57	13	J-263	J-264	21.81	PVC	150	0.034	0.09	0.001
394	P-58	4	J-7	J-8	103.42	PVC	150	6.246	0.74	0.006
395	P-59	8	J-8	J-150	80.42	PVC	150	0.063	0.01	0
396	P-60	10	J-150	J-151	80.42	PVC	150	0.042	0.01	0
397	P-61	25	J-151	J-152	103.42	PVC	150	0.021	0	0
399	P-63	10	J-153	J-154	80.42	PVC	150	-0.021	0	0
400	P-64	9	J-154	J-155	80.42	PVC	150	-0.043	0.01	0
401	P-65	23	J-155	J-156	54.58	PVC	150	-0.064	0.03	0
402	P-66	30	J-156	J-157	54.58	PVC	150	-0.086	0.04	0
403	P-67	60	J-157	J-158	21.81	PVC	150	-0.108	0.29	0.008
404	P-68	38	J-158	J-159	54.58	PVC	150	-0.13	0.06	0
405	P-69	27	J-159	J-147	54.58	PVC	150	-0.152	0.06	0
406	P-70	29	J-147	J-160	54.58	PVC	150	0.331	0.14	0.001
407	P-71	31	J-160	J-161	21.81	PVC	150	0.309	0.83	0.051
408	P-72	27	J-161	J-162	30.2	PVC	150	0.287	0.4	0.009
410	P-74	25	J-163	J-164	54.58	PVC	150	0.242	0.1	0
411	P-75	13	J-164	J-165	30.2	PVC	150	0.22	0.31	0.006

412	P-76	70	J-165	J-166	30.2	PVC	150	0.197	0.27	0.005
413	P-77	71	J-166	J-167	30.2	PVC	150	0.174	0.24	0.004
414	P-78	126	J-167	J-168	30.2	PVC	150	0.151	0.21	0.003
415	P-79	8	J-168	J-169	30.2	PVC	150	0.128	0.18	0.002
416	P-80	117	J-147	J-141	21.81	PVC	150	-0.504	1.35	0.127
417	P-81	67	J-141	J-132	54.58	PVC	150	-1.025	0.44	0.005
418	P-82	3	J-132	J-133	54.58	PVC	150	0.038	0.02	0
419	P-83	34	J-133	J-134	54.58	PVC	150	0.019	0.01	0
420	P-84	5	J-141	J-142	54.58	PVC	150	0.102	0.04	0
421	P-85	101	J-142	J-143	54.58	PVC	150	0.082	0.03	0
423	P-87	28	J-144	J-145	54.58	PVC	150	0.041	0.02	0
424	P-88	101	J-145	J-146	21.81	PVC	150	0.021	0.05	0
425	P-89	18	J-8	J-9	103.42	PVC	150	6.179	0.74	0.006
426	P-90	33	J-9	J-10	103.42	PVC	150	6.174	0.73	0.006
427	P-91	21	J-10	J-11	103.42	PVC	150	6.169	0.73	0.006
428	P-92	21	J-11	J-12	103.42	PVC	150	6.164	0.73	0.006
429	P-93	5	J-12	J-13	103.42	PVC	150	5.4	0.64	0.004
430	P-94	12	J-13	J-14	103.42	PVC	150	5.395	0.64	0.004
431	P-95	35	J-14	J-15	103.42	PVC	150	5.39	0.64	0.004
432	P-96	5	J-15	J-16	103.42	PVC	150	5.384	0.64	0.004
433	P-97	13	J-16	J-17	80.42	PVC	150	0.006	0	0
435	P-99	52	J-18	J-114	21.81	PVC	150	0.529	1.42	0.139
436	P-100	16	J-114	J-115	54.58	PVC	150	0.512	0.22	0.001
437	P-101	44	J-115	J-116	54.58	PVC	150	0.495	0.21	0.001
438	P-102	8	J-116	J-117	54.58	PVC	150	0.478	0.2	0.001
439	P-103	5	J-117	J-119	54.58	PVC	150	1.374	0.59	0.008
440	P-104	54	J-119	J-120	54.58	PVC	150	1.356	0.58	0.008
441	P-105	7	J-120	J-121	54.58	PVC	150	1.339	0.57	0.008
442	P-106	3	J-121	J-123	54.58	PVC	150	0.036	0.02	0
443	P-107	73	J-123	J-124	21.81	PVC	150	0.018	0.05	0
444	P-108	11	J-18	J-19	54.58	PVC	150	-1.745	0.75	0.013
445	P-109	63	J-19	J-20	54.58	PVC	150	-1.751	0.75	0.013
446	P-110	36	J-20	J-21	54.58	PVC	150	-1.757	0.75	0.013
447	P-111	5	J-21	J-37	54.58	PVC	150	3.131	1.34	0.039
448	P-112	26	J-37	J-38	54.58	PVC	150	3.123	1.33	0.039
449	P-113	60	J-38	J-39	54.58	PVC	150	3.115	1.33	0.039
450	P-114	27	J-39	J-61	54.58	PVC	150	2.91	1.24	0.034
452	P-116	6	J-62	J-63	54.58	PVC	150	2.888	1.23	0.034
453	P-117	7	J-63	J-64	54.58	PVC	150	2.877	1.23	0.033
454	P-118	61	J-64	J-68	54.58	PVC	150	1.503	0.64	0.01
455	P-119	8	J-68	J-69	54.58	PVC	150	1.492	0.64	0.01
456	P-120	63	J-69	J-99	54.58	PVC	150	0.061	0.03	0
457	P-121	17	J-99	J-100	54.58	PVC	150	0.046	0.02	0
458	P-122	58	J-100	J-101	54.58	PVC	150	0.031	0.01	0

459	P-123	24	J-101	J-102	54.58	PVC	150	0.015	0.01	0
460	P-124	7	J-39	J-40	54.58	PVC	150	0.197	0.08	0
461	P-125	62	J-40	J-41	54.58	PVC	150	0.008	0	0
462	P-126	7	J-40	J-42	21.81	PVC	150	0.18	0.48	0.019
463	P-127	19	J-42	J-43	21.81	PVC	150	0.172	0.46	0.017
464	P-128	14	J-43	J-44	21.81	PVC	150	0.163	0.44	0.016
465	P-129	25	J-44	J-45	80.42	PVC	150	0.155	0.03	0
466	P-130	37	J-45	J-46	80.42	PVC	150	0.146	0.03	0
467	P-131	7	J-46	J-47	80.42	PVC	150	0.037	0.01	0
468	P-132	70	J-47	J-48	80.42	PVC	150	0.028	0.01	0
469	P-133	5	J-48	J-49	80.42	PVC	150	0.019	0	0
470	P-134	26	J-49	J-50	80.42	PVC	150	0.009	0	0
471	P-135	30	J-46	J-51	80.42	PVC	150	0.1	0.02	0
472	P-136	29	J-51	J-53	80.42	PVC	150	0.081	0.02	0
473	P-137	7	J-53	J-54	80.42	PVC	150	0.01	0	0
474	P-138	3	J-53	J-55	80.42	PVC	150	0.062	0.01	0
475	P-139	18	J-55	J-56	80.42	PVC	150	0.052	0.01	0
476	P-140	4	J-56	J-57	80.42	PVC	150	0.041	0.01	0
477	P-141	36	J-57	J-58	80.42	PVC	150	0.021	0	0
478	P-142	9	J-58	J-59	80.42	PVC	150	0.01	0	0
479	P-143	59	J-57	J-60	80.42	PVC	150	0.011	0	0
480	P-144	29	J-51	J-52	80.42	PVC	150	0.01	0	0
481	P-145	7	J-16	J-30	54.58	PVC	150	5.373	2.3	0.11
482	P-146	18	J-30	J-31	54.58	PVC	150	5.366	2.29	0.109
483	P-147	7	J-31	J-29	54.58	PVC	150	5.359	2.29	0.109
484	P-148	18	J-29	J-32	54.58	PVC	150	0.038	0.02	0
485	P-149	51	J-32	J-33	54.58	PVC	150	0.03	0.01	0
486	P-150	45	J-33	J-34	54.58	PVC	150	0.023	0.01	0
487	P-151	34	J-34	J-35	54.58	PVC	150	0.015	0.01	0
488	P-152	32	J-35	J-36	54.58	PVC	150	0.008	0	0
489	P-153	13	J-29	J-28	54.58	PVC	150	5.314	2.27	0.107
490	P-154	41	J-28	J-27	54.58	PVC	150	5.308	2.27	0.107
491	P-155	19	J-27	J-26	54.58	PVC	150	5.301	2.27	0.107
492	P-156	11	J-26	J-24	54.58	PVC	150	5.294	2.26	0.107
493	P-157	44	J-24	J-25	54.58	PVC	150	0.006	0	0
494	P-158	10	J-24	J-23	54.58	PVC	150	5.281	2.26	0.106
495	P-159	76	J-23	J-22	54.58	PVC	150	5.275	2.25	0.106
496	P-160	9	J-22	J-21	54.58	PVC	150	5.269	2.25	0.106
497	P-161	113	J-21	J-105	21.81	PVC	150	0.375	1	0.073
498	P-162	6	J-105	J-106	54.58	PVC	150	0.359	0.15	0.001
499	P-163	3	J-106	J-107	54.58	PVC	150	0.727	0.31	0.003
500	P-164	57	J-107	J-108	54.58	PVC	150	0.711	0.3	0.003
501	P-165	5	J-108	J-109	54.58	PVC	150	0.695	0.3	0.002
502	P-166	1	J-109	J-110	54.58	PVC	150	-0.563	0.24	0.002

503	P-167	64	J-110	J-111	54.58	PVC	150	0.033	0.01	0
504	P-168	4	J-111	J-112	54.58	PVC	150	0.017	0.01	0
505	P-169	116	J-112	J-113	30.2	PVC	150	0.017	0.02	0
506	P-170	23	J-117	J-118	54.58	PVC	150	-0.913	0.39	0.004
507	P-171	96	J-118	J-106	54.58	PVC	150	-0.93	0.4	0.004
508	P-172	7	J-106	J-104	54.58	PVC	150	-1.313	0.56	0.008
510	P-174	57	J-64	J-65	54.58	PVC	150	0.034	0.01	0
511	P-175	79	J-65	J-66	54.58	PVC	150	0.023	0.01	0
512	P-176	62	J-66	J-67	54.58	PVC	150	0.011	0	0
513	P-177	9	J-69	J-70	54.58	PVC	150	0.791	0.34	0.003
514	P-178	78	J-70	J-71	54.58	PVC	150	0.71	0.3	0.003
515	P-179	40	J-71	J-72	54.58	PVC	150	0.698	0.3	0.002
516	P-180	68	J-72	J-73	54.58	PVC	150	0.686	0.29	0.002
517	P-181	26	J-73	J-74	54.58	PVC	150	0.674	0.29	0.002
518	P-182	20	J-74	J-75	54.58	PVC	150	0.662	0.28	0.002
519	P-183	43	J-75	J-76	54.58	PVC	150	0.649	0.28	0.002
520	P-184	5	J-76	J-77	54.58	PVC	150	0.637	0.27	0.002
521	P-185	57	J-77	J-78	54.58	PVC	150	0.625	0.27	0.002
522	P-186	32	J-78	J-79	54.58	PVC	150	0.612	0.26	0.002
523	P-187	20	J-79	J-80	54.58	PVC	150	0.599	0.26	0.002
524	P-188	21	J-80	J-81	54.58	PVC	150	0.586	0.25	0.002
525	P-189	29	J-81	J-82	54.58	PVC	150	0.573	0.25	0.002
526	P-190	80	J-82	J-83	54.58	PVC	150	0.56	0.24	0.002
527	P-191	9	J-83	J-84	54.58	PVC	150	0.547	0.23	0.002
528	P-192	14	J-84	J-85	21.81	PVC	150	0.534	1.43	0.142
529	P-193	7	J-85	J-86	30.2	PVC	150	0.52	0.73	0.026
530	P-194	12	J-86	J-87	30.2	PVC	150	0.507	0.71	0.025
531	P-195	13	J-87	J-88	30.2	PVC	150	0.493	0.69	0.024
532	P-196	28	J-88	J-89	21.81	PVC	150	0.479	1.28	0.116
533	P-197	7	J-89	J-90	21.81	PVC	150	0.465	1.25	0.11
534	P-198	11	J-90	J-91	21.81	PVC	150	0.451	1.21	0.103
535	P-199	23	J-91	J-92	21.81	PVC	150	0.437	1.17	0.097
536	P-200	28	J-92	J-93	21.81	PVC	150	0.423	1.13	0.092
537	P-201	12	J-93	J-94	21.81	PVC	150	0.409	1.09	0.086
538	P-202	13	J-94	J-95	21.81	PVC	150	0.394	1.05	0.08
539	P-203	9	J-95	J-96	21.81	PVC	150	0.38	1.02	0.075
540	P-204	4	J-96	J-97	21.81	PVC	150	0.365	0.98	0.069
541	P-205	8	J-97	J-98	21.81	PVC	150	0.35	0.94	0.064
542	P-206	76	J-69	J-103	54.58	PVC	150	0.628	0.27	0.002
543	P-207	10	J-103	J-110	54.58	PVC	150	0.613	0.26	0.002
544	P-208	120	J-109	J-122	54.58	PVC	150	1.241	0.53	0.007
545	P-209	3	J-122	J-121	54.58	PVC	150	1.224	0.52	0.007
546	P-210	6	J-121	J-135	54.58	PVC	150	2.509	1.07	0.026
547	P-211	67	J-135	J-136	54.58	PVC	150	2.49	1.06	0.025

548	P-212	64	J-136	J-137	54.58	PVC	150	1.879	0.8	0.015
549	P-213	6	J-137	J-138	54.58	PVC	150	1.86	0.79	0.015
550	P-214	46	J-138	J-148	54.58	PVC	150	0.368	0.16	0.001
551	P-215	54	J-148	J-149	21.81	PVC	150	0.347	0.93	0.063
553	P-217	5	J-182	J-183	54.58	PVC	150	0.457	0.2	0.001
554	P-218	11	J-183	J-184	54.58	PVC	150	0.432	0.18	0.001
555	P-219	15	J-184	J-185	54.58	PVC	150	0.407	0.17	0.001
556	P-220	7	J-185	J-186	54.58	PVC	150	0.382	0.16	0.001
557	P-221	19	J-186	J-187	21.81	PVC	150	0.357	0.96	0.067
558	P-222	9	J-187	J-192	54.58	PVC	150	0.614	0.26	0.002
559	P-223	6	J-192	J-193	54.58	PVC	150	0.588	0.25	0.002
560	P-224	27	J-193	J-194	54.58	PVC	150	0.562	0.24	0.002
561	P-225	72	J-194	J-195	54.58	PVC	150	0.536	0.23	0.002
562	P-226	71	J-195	J-196	54.58	PVC	150	0.51	0.22	0.001
563	P-227	76	J-196	J-197	54.58	PVC	150	0.483	0.21	0.001
564	P-228	37	J-197	J-198	30.2	PVC	150	0.457	0.64	0.021
565	P-229	17	J-198	J-199	30.2	PVC	150	0.43	0.6	0.019
566	P-230	17	J-199	J-200	30.2	PVC	150	0.404	0.56	0.017
567	P-231	35	J-200	J-201	30.2	PVC	150	0.377	0.53	0.015
568	P-232	34	J-201	J-202	30.2	PVC	150	0.35	0.49	0.013
569	P-233	14	J-18	J-125	21.81	PVC	150	1.211	3.24	0.68
570	P-234	39	J-125	J-126	54.58	PVC	150	1.193	0.51	0.006
571	P-235	16	J-126	J-127	54.58	PVC	150	1.175	0.5	0.006
572	P-236	60	J-127	J-128	54.58	PVC	150	0.018	0.01	0
573	P-237	9	J-127	J-129	54.58	PVC	150	1.138	0.49	0.006
574	P-238	75	J-129	J-130	54.58	PVC	150	1.12	0.48	0.006
575	P-239	38	J-130	J-131	54.58	PVC	150	1.101	0.47	0.006
576	P-240	6	J-131	J-132	54.58	PVC	150	1.082	0.46	0.005
577	P-241	3	J-141	J-140	54.58	PVC	150	0.4	0.17	0.001
578	P-242	55	J-140	J-139	54.58	PVC	150	0.38	0.16	0.001
579	P-243	5	J-139	J-138	54.58	PVC	150	0.36	0.15	0.001
580	P-244	84	J-138	J-176	54.58	PVC	150	1.833	0.78	0.014
581	P-245	12	J-176	J-177	54.58	PVC	150	1.809	0.77	0.014
582	P-246	5	J-182	J-181	54.58	PVC	150	-0.155	0.07	0
583	P-247	87	J-181	J-180	54.58	PVC	150	-0.179	0.08	0
584	P-248	73	J-187	J-188	54.58	PVC	150	-0.282	0.12	0
585	P-249	23	J-188	J-190	54.58	PVC	150	-0.307	0.13	0.001
586	P-250	78	J-136	J-170	54.58	PVC	150	0.591	0.25	0.002
587	P-251	14	J-170	J-171	21.81	PVC	150	0.568	1.52	0.159
588	P-252	9	J-174	J-173	54.58	PVC	150	-0.024	0.01	0
589	P-253	60	J-173	J-172	54.58	PVC	150	-0.24	0.1	0
590	P-254	3	J-172	J-171	54.58	PVC	150	-0.287	0.12	0.001
591	P-255	78	J-171	J-177	54.58	PVC	150	0.257	0.11	0
592	P-256	31	J-177	J-178	54.58	PVC	150	2.042	0.87	0.018

593	P-257	27	J-178	J-179	54.58	PVC	150	2.018	0.86	0.017
594	P-258	65	J-179	J-180	54.58	PVC	150	1.993	0.85	0.017
595	P-259	87	J-180	J-189	54.58	PVC	150	1.79	0.76	0.014
596	P-260	9	J-189	J-190	54.58	PVC	150	1.764	0.75	0.013
597	P-261	7	J-190	J-191	54.58	PVC	150	1.431	0.61	0.009
598	P-262	67	J-172	J-175	30.2	PVC	150	0.024	0.03	0
599	P-263	22	J-173	J-203	21.81	PVC	150	0.192	0.51	0.021
600	P-264	43	J-203	J-204	21.81	PVC	150	0.165	0.44	0.016
601	P-265	13	J-204	J-205	21.81	PVC	150	0.138	0.37	0.012
602	P-266	34	J-205	J-206	21.81	PVC	150	0.111	0.3	0.008
603	P-267	73	J-206	J-207	21.81	PVC	150	0.083	0.22	0.005
604	P-268	158	J-207	J-208	21.81	PVC	150	0.055	0.15	0.002
605	P-269	41	J-208	J-209	21.81	PVC	150	0.028	0.07	0.001
606	P-270	16	J-191	J-210	66.07	PVC	150	1.405	0.41	0.003
607	P-271	88	J-210	J-211	66.07	PVC	150	1.377	0.4	0.003
608	P-272	64	J-211	J-212	66.07	PVC	150	1.349	0.39	0.003
609	P-273	47	J-212	J-213	66.07	PVC	150	1.321	0.39	0.003
610	P-274	89	J-213	J-214	66.07	PVC	150	1.293	0.38	0.004
611	P-275	71	J-214	J-215	66.07	PVC	150	1.118	0.33	0.002
612	P-276	175	J-215	J-216	66.07	PVC	150	1.089	0.32	0.002
613	P-277	91	J-216	J-209	66.07	PVC	150	1.061	0.31	0.002
614	P-278	28	J-209	J-218	66.07	PVC	150	1.032	0.3	0.002
615	P-279	7	J-218	J-219	66.07	PVC	150	0.43	0.13	0
616	P-280	23	J-219	J-220	54.58	PVC	150	0.401	0.17	0.001
617	P-281	37	J-220	J-221	54.58	PVC	150	0.164	0.07	0
618	P-282	24	J-221	J-222	54.58	PVC	150	0.135	0.06	0
619	P-283	70	J-222	J-223	54.58	PVC	150	0.105	0.05	0
620	P-284	17	J-223	J-224	54.58	PVC	150	0.03	0.01	0
621	P-285	13	J-223	J-225	54.58	PVC	150	0.046	0.02	0
622	P-286	41	J-225	J-226	54.58	PVC	150	0.017	0.01	0
623	P-287	36	J-226	J-227	54.58	PVC	150	0.135	0.06	0
624	P-288	17	J-220	J-229	54.58	PVC	150	0.208	0.09	0
625	P-289	34	J-229	J-228	54.58	PVC	150	0.178	0.08	0
626	P-290	10	J-228	J-226	54.58	PVC	150	0.148	0.06	0
627	P-291	136	J-218	J-230	21.81	PVC	150	0.399	1.07	0.082
628	P-292	10	J-230	J-231	54.58	PVC	150	0.091	0.04	0
629	P-293	3	J-231	J-232	54.58	PVC	150	0.061	0.03	0
630	P-294	45	J-232	J-233	54.58	PVC	150	0.031	0.01	0
631	P-295	10	J-230	J-234	54.58	PVC	150	0.062	0.03	0
632	P-296	66	J-234	J-235	54.58	PVC	150	0.031	0.01	0
633	P-297	45	J-230	J-236	54.58	PVC	150	0.215	0.09	0
634	P-298	6	J-236	J-237	54.58	PVC	150	0.062	0.03	0
635	P-299	46	J-237	J-238	54.58	PVC	150	0.031	0.01	0
636	P-300	4	J-236	J-239	54.58	PVC	150	0.122	0.05	0

637	P-301	14	J-239	J-240	54.58	PVC	150	0.091	0.04	0
638	P-302	48	J-240	J-241	54.58	PVC	150	0.032	0.01	0
639	P-303	85	J-240	J-242	54.58	PVC	150	0.06	0.03	0
640	P-304	86	J-242	J-243	30.2	PVC	150	0.324	0.45	0.011
641	P-305	52	J-243	J-244	30.2	PVC	150	0.324	0.45	0.011
643	P-307	6	J-245	J-246	21.81	PVC	150	0.26	0.7	0.037
644	P-308	9	J-246	J-247	21.81	PVC	150	0.228	0.61	0.029
645	P-309	10	J-247	J-248	21.81	PVC	150	0.196	0.52	0.022
646	P-310	17	J-248	J-249	21.81	PVC	150	0.163	0.44	0.016
647	P-311	10	J-249	J-250	21.81	PVC	150	0.131	0.35	0.011
648	P-312	17	J-250	J-251	21.81	PVC	150	0.098	0.26	0.006
649	P-313	24	J-251	J-252	21.81	PVC	150	0.066	0.18	0.003
650	P-314	27	J-252	J-253	21.81	PVC	150	0.033	0.09	0.001
661	P-315	7	J-12	J-306	66.07	PVC	150	0.759	0.22	0.001
662	P-316	10	J-306	J-307	66.07	PVC	150	0.684	0.2	0.001
663	P-317	18	J-307	J-308	66.07	PVC	150	0.608	0.18	0.001
664	P-318	41	J-308	J-309	66.07	PVC	150	0.533	0.16	0.001
665	P-319	13	J-309	J-310	66.07	PVC	150	0.457	0.13	0
666	P-320	15	J-310	J-311	66.07	PVC	150	0.381	0.11	0
667	P-321	11	J-311	J-312	66.07	PVC	150	0.305	0.09	0
668	P-322	17	J-312	J-313	66.07	PVC	150	0.229	0.07	0
669	P-323	23	J-313	J-314	66.07	PVC	150	0.153	0.04	0
670	P-324	10	J-314	J-315	66.07	PVC	150	0.076	0.02	0
678	P-325	7	J-1	T-1	103.42	PVC	150	-8.278	0.99	0.01
685	P-327	10	J-284	J-285	21.81	PVC	150	0.037	0.1	0.001
688	P-328	7	R-1	T-1	103.43	PVC	150	22.794	2.71	0.068
690	P-329	7	R-2	T-2	103.43	PVC	150	23.937	2.85	0.075
735	P-73(1)	7	J-162	FCV-3	30.2	PVC	150	0.265	0.37	0.008
736	P-73(2)	13	FCV-3	J-163	30.2	PVC	150	0.265	0.37	0.008
738	P-216(1)	10	J-149	FCV-4	54.58	PVC	150	0.326	0.14	0.001
739	P-216(2)	3	FCV-4	J-182	54.58	PVC	150	0.326	0.14	0.001
741	P-86(1)	8	J-143	FCV-5	54.58	PVC	150	0.062	0.03	0
742	P-86(2)	17	FCV-5	J-144	54.58	PVC	150	0.061	0.03	0
744	P-115(1)	77	J-61	FCV-6	54.58	PVC	150	2.899	1.24	0.034
745	P-115(2)	4	FCV-6	J-62	54.58	PVC	150	2.899	1.24	0.034
747	P-173(1)	57	J-104	FCV-7	54.58	PVC	150	-1.329	0.57	0.008
748	P-173(2)	25	FCV-7	J-64	54.58	PVC	150	-1.329	0.57	0.008
750	P-326(1)	2	J-242	FCV-8	54.58	PVC	150	-0.265	0.11	0.001
751	P-326(2)	5	FCV-8	T-2	54.58	PVC	150	-0.265	0.11	0
753	P-306(1)	4	J-244	FCV-9	30.2	PVC	150	0.292	0.41	0.009
754	P-306(2)	36	FCV-9	J-245	30.2	PVC	150	0.292	0.41	0.009
756	P-2(1)	207	J-2	FCV-10	54.58	PVC	150	1.641	0.7	0.012
757	P-2(2)	10	FCV-10	J-265	54.58	PVC	150	1.641	0.7	0.012
760	P-7(1)	8	J-274	FCV-12	54.58	PVC	150	1.293	0.55	0.007

761	P-7(2)	20	FCV-12	J-275	54.58	PVC	150	1.293	0.55	0.008
-----	--------	----	--------	-------	-------	-----	-----	-------	------	-------

Fuente: autores

Tabla 41

Características de los nodos

Demand (L/s)	Hidraulic Grade (m)	Pressure (m H2O)
0	2648.93	6
0	2648.85	10
0.004	2648.71	12
0.004	2647.98	12
0.004	2647.83	16
0.004	2647.52	17
0.004	2647.38	2
0.005	2647.36	23
0.005	2647.26	24
0.005	2647.06	28
0.005	2646.94	32
0.005	2646.82	41
0.005	2646.8	44
0.005	2646.75	47
0.005	2646.59	50
0.005	2646.57	50
0.006	2646.57	36
0.006	2622.62	41
0.006	2622.75	41
0.006	2623.58	40
0.006	2624.05	40
0.006	2624.98	39
0.006	2633	43
0.006	2634.11	42
0.006	2634.11	34
0.007	2635.27	42
0.007	2637.32	43
0.007	2641.72	47
0.007	2643.09	46
0.007	2645.78	51
0.007	2643.86	49
0.007	2643.09	43
0.007	2643.08	42
0.008	2643.08	38
0.008	2643.08	34
0.008	2643.08	30

0.008	2623.86	20
0.008	2622.86	39
0.008	2620.54	37
0.008	2620.54	35
0.008	2620.54	28
0.008	2620.41	36
0.009	2620.08	37
0.009	2619.85	38
0.009	2619.85	39
0.009	2619.85	39
0.009	2619.85	40
0.009	2619.85	43
0.009	2619.85	44
0.009	2619.85	44
0.009	2619.85	38
0.01	2619.85	37
0.01	2619.85	40
0.01	2619.85	41
0.01	2619.85	40
0.01	2619.85	40
0.01	2619.85	39
0.01	2619.85	41
0.01	2619.85	42
0.011	2619.85	36
0.011	2619.63	38
0.011	2616.88	39
0.011	2616.69	41
0.011	2616.46	43
0.011	2616.46	42
0.011	2616.46	37
0.011	2616.46	32
0.011	2615.86	47
0.012	2615.77	49
0.082	2615.75	48
0.012	2615.55	47
0.012	2615.45	44
0.012	2615.29	40
0.012	2615.23	39
0.012	2615.19	38
0.012	2615.09	39
0.013	2615.08	39
0.013	2614.97	39
0.013	2614.91	40
0.013	2614.87	41

0.013	2614.83	42
0.013	2614.78	42
0.013	2614.65	42
0.013	2614.64	42
0.013	2612.68	41
0.014	2612.5	42
0.014	2612.21	44
0.014	2611.88	46
0.014	2608.67	44
0.014	2607.93	44
0.014	2606.79	44
0.014	2604.58	42
0.014	2602.06	40
0.014	2601.07	40
0.015	2600.05	39
0.015	2599.35	38
0.015	2599.1	39
0.35	2598.61	39
0.015	2615.77	55
0.015	2615.77	57
0.015	2615.77	57
0.015	2615.77	57
0.016	2615.62	50
0.016	2615.82	43
0.016	2615.77	42
0.016	2615.76	44
0.016	2615.75	45
0.016	2615.61	48
0.016	2615.6	49
0.016	2615.6	50
0.016	2615.6	55
0	2615.6	47
0.017	2615.59	52
0.017	2615.37	37
0.017	2615.34	39
0.017	2615.29	39
0.017	2615.28	41
0.017	2615.37	42
0.017	2615.24	43
0.017	2614.79	44
0.018	2614.74	45
0.018	2614.76	46
0.018	2614.74	47
0.018	2614.72	51

0.018	2613.31	32
0.018	2613.05	15
0.018	2612.95	33
0.018	2612.95	34
0.019	2612.9	34
0.019	2612.46	36
0.019	2612.25	37
0.019	2612.21	39
0.019	2612.21	38
0.019	2612.21	40
0.019	2614.59	45
0.019	2612.88	43
0.019	2611.91	43
0.02	2611.83	44
0.02	2611.84	42
0.02	2611.88	40
0.02	2611.88	40
0.02	2611.88	39
0.02	2611.88	35
0.02	2611.88	33
0.02	2611.88	34
0.021	2611.84	17
0.021	2597.04	27
0.021	2611.8	44
0.021	2608.37	41
0.021	2647.36	24
0.021	2647.36	25
0.021	2647.36	25
0.021	2596.58	10
0.021	2596.58	13
0.022	2596.58	15
0.022	2596.58	14
0.022	2596.58	19
0.022	2597.03	23
0.022	2597.04	24
0.022	2597.02	9
0.022	2595.43	28
0.022	2595.19	31
0.022	2595.03	33
0.023	2595.02	34
0.023	2594.94	35
0.023	2594.63	36
0.023	2594.37	36
0.023	2594.01	38

0.128	2593.99	37
0.023	2612.74	48
0.023	2610.51	46
0.024	2610.5	47
0.024	2610.48	47
0.024	2610.48	48
0.024	2610.5	52
0.024	2610.64	47
0.024	2610.47	47
0.024	2609.92	47
0.024	2609.47	48
0.024	2608.38	50
0.025	2608.36	43
0.025	2608.36	42
0.025	2608.35	43
0.025	2608.34	43
0.025	2608.33	27
0.025	2608.32	45
0.025	2607.02	45
0.025	2607.06	51
0.025	2607.18	50
0.026	2607.07	34
0.026	2607.01	53
0.026	2607.01	45
0.026	2606.99	46
0.026	2606.95	48
0.026	2606.84	49
0.026	2606.74	50
0.026	2606.64	51
0.027	2605.88	50
0.027	2605.57	48
0.027	2605.28	47
0.027	2604.77	46
0.35	2604.34	44
0.027	2610	50
0.027	2609.3	52
0.027	2609.15	52
0.027	2608.88	53
0.028	2608.53	54
0.028	2608.23	55
0.028	2608.2	56
0.028	2606.95	53
0.028	2606.66	52
0.028	2606.46	46

0.028	2606.31	46
0.175	2605.92	49
0.028	2605.76	53
0.029	2605.39	53
0.029	2605.2	52
0.204	2605.15	52
0.029	2605.14	53
0.029	2605.12	51
0.029	2605.12	50
0.029	2605.11	49
0.029	2605.11	51
0.03	2605.11	52
0.03	2605.11	52
0.03	2605.11	53
0.135	2605.1	53
0.03	2605.11	52
0.03	2605.12	51
0.03	2594.01	30
0.03	2594.01	32
0.03	2594.01	33
0.031	2594.01	37
0.031	2594.01	32
0.031	2594.01	35
0.031	2594	20
0.031	2594	19
0.031	2594	16
0.031	2594	20
0	2594	19
0.032	2594	19
0	2594	2
0	2593.05	18
0.032	2592.47	17
0.032	2592.1	22
0.032	2591.87	20
0.032	2591.62	19
0.032	2591.4	18
0.032	2591.13	17
0.033	2591.02	16
0.033	2590.91	14
0.033	2590.84	14
0.033	2590.82	13
0.033	2646.99	21
0.033	2646.74	22
0.033	2646.12	21

0.033	2644.94	27
0.033	2644.48	34
0.034	2644.33	40
0.034	2644.2	40
0.034	2643.65	43
0.034	2643.32	44
0.034	2643.3	46
0.034	2643.29	46
0.034	2646.32	18
0.034	2645.44	19
0.035	2644.96	22
0.035	2644.85	23
0.035	2644.77	26
0.035	2644.76	25
0.035	2646.18	17
0.035	2646.07	19
0.035	2646.01	21
0.035	2645.94	22
0.035	2645.73	23
0.036	2644.5	23
0.036	2642.49	23
0.176	2640.55	30
0.036	2640.31	33
0.036	2640.23	31
0.036	2640.21	36
0.036	2645.66	23
0.036	2645.51	28
0.036	2645.2	35
0.037	2645.19	36
0.037	2645.02	40
0.037	2644.54	55
0.037	2639.95	52
0.037	2638.65	51
0.037	2637.34	48
0.037	2635.89	46
0.037	2634.18	41
0.038	2633.2	37
0.038	2632.9	33
0.038	2632.57	32
0.038	2631.62	29
0.038	2631.25	26
0.038	2631.14	24
0.038	2630.77	26
0.038	2630.26	30

0.038	2630.05	39
0.039	2629.98	34
0.039	2629.95	37
0.039	2629.77	40
0.039	2629.73	49
0.075	2646.82	41
0.076	2646.81	39
0.076	2646.79	39
0.076	2646.77	38
0.076	2646.76	37
0.076	2646.76	37
0.076	2646.75	36
0.076	2646.75	35
0.076	2646.75	34
0.076	2646.75	32

Fuente: autores.

En las tablas anteriores, se exponen detalladamente los resultados y características de cada elemento que ha sido objeto de modelado dentro del software. Este análisis abarca diversos aspectos fundamentales para comprender el funcionamiento hidráulico del sistema. Se detallan parámetros como las presiones en diferentes nodos, velocidades en las tuberías, caudales, entre otros.

En relación con las tuberías, se evalúan aspectos como la rugosidad, el diámetro, y las pérdidas de carga, elementos para comprender la eficiencia del transporte del agua a lo largo de la red. Además, se analizan los nodos de conexión, considerando aspectos como la demanda, la presión en cada punto y la disponibilidad de caudal.

Este enfoque detallado en cada elemento modelado proporciona una visión integral y precisa de la hidráulica del sistema, lo que resulta esencial para la toma de decisiones informada en el diseño, operación y gestión de la red de distribución de agua. Estos datos constituyen una valiosa herramienta para evaluar la eficiencia actual del sistema y orientar las estrategias de mejora para optimizar su rendimiento y prepararse para escenarios futuros.

Macro perfiles hidráulicos

La obtención de información a una escala más detallada de los perfiles hidráulicos de la red de distribución del municipio de Tuta a partir de WaterGEMS puede llevarse a cabo

mediante la generación y análisis de macros. Para este caso en específico, se empleó el lenguaje de programación Python específicamente con las librerías: pandas, numpy y matplotlib.pyplot. A continuación, se describe la metodología empleada:

Generación de perfiles hidráulicos.

- Se utiliza WaterGEMS para modelar la red de distribución del municipio de Tuta, asegurándose de que la simulación hidráulica esté correctamente calibrada y validada.
- Se define y ajusta los elementos de la red, como tuberías, nodos, bombas, etc., según la información disponible y la topología de la red.
- Desarrollo de macro para extracción de datos: Utiliza funciones y métodos disponibles en la interfaz de WaterGEMS para acceder y extraer información específica de los perfiles hidráulicos. Esto podría incluir datos sobre presiones, velocidades, caudales, y otras variables relevantes.

Iteración y almacenamiento.

- Implementa bucles y estructuras de control en tu macro para iterar a través de los elementos de la red seleccionados.
- Almacena los datos extraídos en un formato estructurado (por ejemplo, una hoja de cálculo o una base de datos) para su posterior análisis y visualización.

Figura 51*Código perfiles hidráulicos*

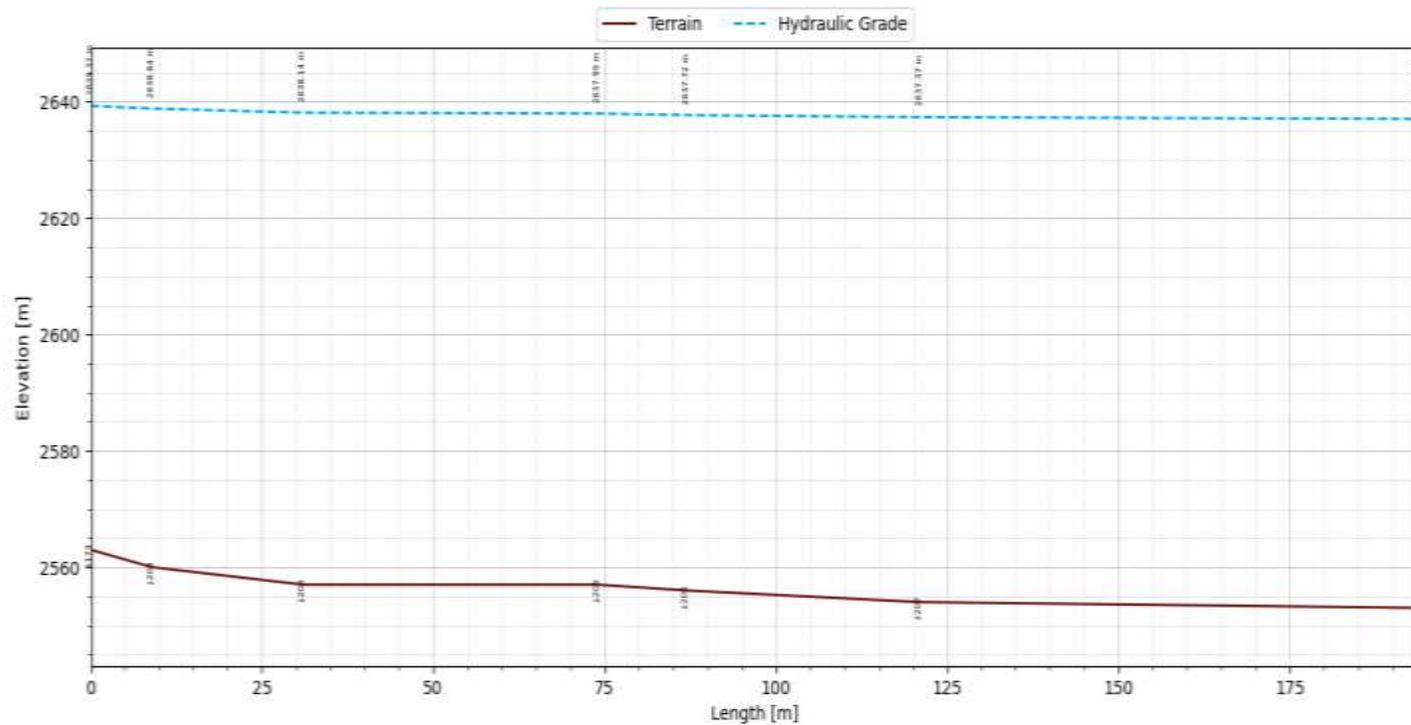
```
Red_Totapy
1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 def pipes(ruta):
6     pipes = pd.read_csv(ruta + '\\pipes.csv')[['Length (Scaled)\n(m)', 'Stop Node', 'Diameter\n(mm)',
7         'Flow\n(l/s)', 'Velocity\n(m/s)']]
8     pipes.columns = ['Length', 'Node', 'Diameter [mm]', 'Flow [l/s]', 'Velocity [m/s]']
9     return pipes
10 def nodos(ruta):
11     nodos = pd.read_csv(ruta + '\\nodos.csv')[['Label', 'Elevation\n(m)', 'Hydraulic Grade\n(m)', 'Pressure\n(m H2O)']]
12     nodos.columns = ['Node', 'Elevation [m]', 'Hydraulic Grade [m]', 'Pressure [m H2O]']
13     return nodos
14
15 ruta = r'D:\Usuario\Desktop\02Tesis_Sanitaria\Info_2023\Prueba'
16 rutaGuardado = r'D:\Usuario\Desktop\02Tesis_Sanitaria\Info_2023\Prueba'
17 nodos = nodos(ruta)
18 pipes = pipes(ruta)
19
20 df = pd.merge(nodos, pipes, on='Node')
21 vals = [173, 203, 204, 205, 206, 207, 208]
22 junction = ['J-' + str(vals[j]) for j in range(0, len(vals))]
23
24 dfFiltrada = df[df['Node'].str.strip().isin(junction)]
25 print(dfFiltrada)
26 x = dfFiltrada['Length'].values[0:len(junction)-1]
27 x = np.insert(x, 0, 0)
28 xAcum = np.cumsum(x)
29 cotas = dfFiltrada['Elevation [m]'].values
30 gradiente = dfFiltrada['Hydraulic Grade [m]'].values
```

Fuente: autores.

Visualización y análisis. Utiliza herramientas como hojas de cálculo como información de alimentación del código para visualizar y analizar los datos obtenidos.

Figura 52

Perfil hidráulico tramo (173,203,204,205,206,207,208)



Fuente: autores.

Las líneas de código escritas en Python permiten al usuario evaluar un tramo específico de la red de distribución en este caso específico estamos evaluando el tramo [173,203,204,205,206,207,208], como se observa en la figura 52.

Resumen del diagnóstico hidráulico del sistema de acueducto

En la siguiente tabla se presenta el resumen de los hallazgos identificadas según el diagnóstico hidráulico de cada uno de los componentes del sistema, así mismo se presentan las propuestas de soluciones a partir de las cuales se hará el análisis de alternativas para la optimización del sistema:

Tabla 42

Tabla resumen del diagnostico

Componente	Problemas y necesidades	Propuestas de solución
De acuerdo a las proyecciones de población y demandas de agua para el período de diseño, la fuente Rio de Piedras es suficiente para abastecer la población		
Fuente de agua	La fuente de abastecimiento está siendo contaminada por las actividades agropecuarias que se desarrollan alrededor.	Realizar programas de conservación de la cuenca, que garantice una protección a la ronda hídrica, que incluya compra de predios, reforestación, control de agroquímicos y saneamiento.
Bocatoma Desarenador	y - Se encuentra operando de manera inadecuada e ineficiente, se encuentran en estado obsoleto. - Las estructuras existentes, tienen más de 25 años de construcción de los cuales las labores de mantenimiento han sido mínimas. - La estructura de captación no tiene un adecuado control de caudal que permita captar sólo lo que realmente necesita la población.	- Se debe realizar el diseño y construcción de estas estructuras.
Aducción	- La red de aducción tiene un tiempo de construcción de 40 años aproximadamente, por lo que actualmente se	- Se debe realizar mantenimiento a la red e instalar válvulas con el fin de

Planta de potabilización	<p>presentan fugas significativas.</p> <p>- La PTAP está operando con el caudal máximo para el cual fue diseñada, lo que provoca que el filtro se colmate más seguido y sea necesario hacerle retrolavado dos veces al día lo que se resume en pérdidas.</p> <p>- Ya que la capacidad de la planta no da abasto con la demanda de la población, esta necesita periodos de recuperación hecho que limita la continuidad del servicio.</p>	<p>reducir la presión y así evitar rupturas en la tubería</p> <p>Implementar un sistema de recirculación del agua producto del retrolavado</p>
Tanque de almacenamiento	<p>- Se encuentra en buenas condiciones cuenta con macromedidor</p>	<p>- Mantenimiento general a la estructura.</p>
Red de distribución	<p>- Hacen falta válvulas de regulación de presión y de caudal para compensar las zonas donde las presiones son más bajas.</p>	<p>- Instalar válvulas estratégicamente en la red de distribución según la necesidad.</p>

Fuente: autores

Análisis de las alternativas planteadas para la optimización del sistema de acueducto

El diagnóstico realizado permite inferir que, para optimizar el sistema de acueducto urbano del municipio de Tuta, existen varias alternativas por tal motivo, el análisis se restringirá a determinar las obras y medidas que requiere cada solución para que funcionen eficientemente durante todo el horizonte de diseño del Proyecto (25 años).

Entre las opciones para solucionar la problemática presentadas en el sistema de abastecimiento de agua potable en el área urbana, existen 2 alternativas viables las cuales varían de acuerdo a si se utiliza la infraestructura existente o se construye un nuevo sistema. A continuación, se presenta una descripción detallada de las alternativas junto con su valoración según la matriz multicriterio para definir cuál es la más viable a implementar. Estas alternativas están encaminadas a aumentar la cobertura, calidad y continuidad del servicio.

Alternativa 1: Construcción de bocatoma, desarenador y optimización de red de distribución

El objetivo de esta alternativa es la construcción de la bocatoma y desarenador, estas estructuras se diseñarán con el caudal proyectado al año 2047, de esta manera se garantiza el abastecimiento a la población en los dos escenarios; adicional a esto se plantea la reducción de pérdidas de la red de aducción y la red de distribución con el cambio de diámetro en las tuberías y la instalación de válvulas que regulen no solo la presión sino también el flujo en las tuberías, disminuyendo significativamente las rupturas y fugas.

Tabla 43

Matriz multicriterio captación y desarenador – alternativa 1

Matriz Multicriterio Captación y Desarenador				
Componente	Factor	Criterio	Peso	
Socio-económico 45%	Acceso a bienes y servicios (15%)	Transporte de materiales y equipos electromecánicos al punto de captación	5 si hay buen acceso al punto de captación; 3 si hay acceso regular y 1 si debe abrir camino	4
		Distancia del punto de captación al centroe	5 cercano, 1 lejano	2

		de la comunidad a atender		
		Acceso a energía eléctrica o fuente alterna	5 si hay disponibilidad de servicio de energía eléctrica interconectado, 3 si debe llevarse la red de baja tensión hasta el punto de captación, 1 si no hay disponibilidad de servicio	1
	Aceptabilidad social (10%)	Aceptabilidad de la comunidad frente a la solución tecnológica.	10 si la comunidad acepta la solución que se plantee, 5 si hay posiciones encontradas y 1 si no la aceptan	10
	Administración (20%)	Propiedad del terreno y servidumbres donde se ubicará la captación y desarenador	5 del municipio o del operador que tenga los certificados al día, 3 predios privados o permiso explícito de la comunidad, 1 privado, no se sabe o no hay título de propiedad)	5
		Necesidad de personal especializado para las actividades de operación y mantenimiento	5 si no necesita personal especializado, 3 necesita personal especializado	5
		Disponibilidad a nivel local o regional de soporte técnico para los equipos e infraestructura de captación asociada a la fuente.	10 si hay soporte a nivel local, 6 si no hay soporte técnico a nivel local	10
	Operación y mantenimiento (30)	Evalúe la complejidad de operación y mantenimiento del sistema de captación requerido por parte de la comunidad	15 si el sistema es por gravedad, 5 el sistema requiere bombeo	15

		Estado de protección del punto de captación para garantizar la calidad y cantidad: protección física de acceso	15 si no requiere ningún tipo de protección; 6 si requiere algún tipo de protección; 3 si se requiere infraestructura más compleja por el tipo de equipos electromecánicos que deben instalarse	6
Ambiental (25%)		Riesgo de afectación de la posible zona de captación frente a amenazas por calidad y continuidad del agua y vulnerabilidades identificadas	10 si la microcuenca está dentro de áreas protegidas o tiene bosque nativo, 5 si ya hay evidencia de deforestación y pastoreo, 1 si la microcuenca está altamente intervenida	5
		Estabilidad del terreno para captación del agua de forma segura y continua	15 si no se presentan movimientos de remoción en masa; 10 cuando es un fenómeno de remoción en masa tipo reptaciones y 5 se presenta evidencia de cárcavas y desprendimientos.	15
		TOTAL (valoración total de la alternativa)		78

Fuente: autores.

Alternativa 2: Construcción de PTAP en Rio de Piedras

En esta alternativa se plantea la construcción de la planta de tratamiento en el sector de Rio de Piedras, junto con la bocatoma y desarenador; con esta alternativa lo que se busca es eliminar las zonas de baja presión en el área urbana puesto que todo el sistema funcionara por gravedad, adicional a esto la red de aducción que es uno de los componentes que representa mayores pérdidas quedara en estado obsoleto.

Tabla 44*Matriz multicriterio captación y desarenador – alternativa 2*

Matriz Multicriterio Captación y Desarenador				
Componente	Factor	Criterio	Peso	
Socio-económico 45%	Acceso a bienes y servicios (15%)	Transporte de materiales y equipos electromecánicos al punto de captación	5 si hay buen acceso al punto de captación; 3 si hay acceso regular y 1 si debe abrir camino	3
		Distancia del punto de captación al centroide de la comunidad a atender	5 cercano, 1 lejano	1
		Acceso a energía eléctrica o fuente alterna	5 si hay disponibilidad de servicio de energía eléctrica interconectado, 3 si debe llevarse la red de baja tensión hasta el punto de captación, 1 si no hay disponibilidad de servicio	1
	Aceptabilidad social (10%)	Aceptabilidad de la comunidad frente a la solución tecnológica.	10 si la comunidad acepta la solución que se plantee, 5 si hay posiciones encontradas y 1 si no la aceptan	10
	Administración (20%)	Propiedad del terreno y servidumbres donde se ubicará la captación y desarenador	5 del municipio o del operador que tenga los certificados al día, 3 predios privados o permiso explícito de la comunidad, 1 privado, no se sabe o no hay título de propiedad)	5
		Necesidad de personal especializado para las actividades de operación y mantenimiento	5 si no necesita personal especializado, 3 necesita personal especializado	5
		Disponibilidad a nivel local o regional de soporte técnico para los	10 si hay soporte a nivel local, 6 si no hay soporte técnico a nivel local	10

		equipos e infraestructura de captación asociada a la fuente.		
	Operación y mantenimiento (30)	Evalúe la complejidad de operación y mantenimiento del sistema de captación requerido por parte de la comunidad	15 si el sistema es por gravedad, 5 el sistema requiere bombeo	15
		Estado de protección del punto de captación para garantizar la calidad y cantidad: protección física de acceso	15 si no requiere ningún tipo de protección; 6 si requiere algún tipo de protección; 3 si se requiere infraestructura más compleja por el tipo de equipos electromecánicos que deben instalarse	15
	Ambiental (25%)	Riesgo de afectación de la posible zona de captación frente amenazas por calidad y continuidad del agua y vulnerabilidades identificadas	10 si la microcuenca está dentro de áreas protegidas o tiene bosque nativo, 5 si ya hay evidencia de deforestación y pastoreo, 1 si la microcuenca está altamente intervenida	5
		Estabilidad del terreno para captación del agua de forma segura y continua	15 si no se presentan movimientos de remoción en masa; 10 cuando es un fenómeno de remoción en masa tipo reptaciones y 5 se presenta evidencia de cárcavas y desprendimientos.	15
		TOTAL (valoración total de la alternativa)		85

Fuente: autores.

Tabla 45*Matriz multicriterio sistemas de tratamiento - PTAP*

Matriz Multicriterio sistemas de tratamiento				
Componente	Factor	Criterio	Peso	
Socio-económico (50%)	Acceso a Bienes y Servicios (30%)	Oferta regional/local de materiales requeridos para la construcción o implementación de la alternativa	5 si se consiguen los materiales requeridos para la construcción o implementación de la alternativa, 1 si no se consiguen	5
		Oferta de mano de obra calificada a nivel regional/local para la construcción o implementación de la alternativa.	5 si no necesita personal especializado para la construcción, 1 si necesita personal especializado	1
		Oferta energética para el funcionamiento de la alternativa	5 si hay disponibilidad de servicio de energía eléctrica interconectado, 2 si debe llevarse la red de baja tensión hasta el punto de captación, 1 si no hay disponibilidad de servicio	5
		Área requerida para la construcción de la alternativa planteada	10 lo toma la alternativa que tenga la menor área requerida, 1 la alternativa que requiere la mayor área, las otras alternativas toman un puntaje proporcional a su área requerida	1
		Oferta de recolección de residuos asociados a partes, componentes o subproductos relacionados con la	5 si existe si existe oferta de recolección y 1 si no existe	5

		alternativa de tratamiento		
	Aceptabilidad Social (10%)	Compatibilidad de la alternativa desde las costumbres, conductas o cosmovisiones de los beneficiarios	5 si la comunidad acepta la solución que se plantee, 3 si hay posiciones encontradas y 1 si no la aceptan	5
		Capacidad y disponibilidad de pago	5 si la comunidad tiene la capacidad y disponibilidad a pagar, 3 si hay posiciones encontradas y 1 si no tiene capacidad no disponibilidad de pago	3
	Administración (10%)	Necesidades de personal adicionales al operador que se requieren para mantener el sistema de tratamiento operando	5 si no necesita personal adicional al operador, 1 si necesita más personal	5
		Costos administrativos relacionados con la tecnología: requerimientos de área, celaduría, laboratorios y servicios públicos	5 si no necesita costos administrativos adicionales a la operación del acueducto, 1 si requiere algo adicional (celaduría, mantenimientos rutinarios, controles, etc.)	3
Técnico-operativo (50%)	Ambiental (12%)	Generación de residuos tales como partes cambiadas o subproductos (lodos y salmueras, en el caso de tratamiento de aguas saladas) que	4 si genera residuos y 1 si no los genera	4

		requieran una disposición o manejo especial		
		Complejidad del tratamiento de los subproductos	4 si el tratamiento de los subproductos es simple y 1 si los tratamientos son complejos.	1
		Impactos ambientales generados por el sistema energético (ejemplo en el caso de generadores el problema de ruidos, contaminación de aire, olores y generación de desechos)	4 si no genera impactos de este tipo y 1 si los genera	3
	Flexibilidad (10%)	capacidad del sistema para operar con variaciones notorias en la calidad de la fuente, de los parámetros básicos, tales como turbiedad.	5 si el sistema propuesto no tiene problemas en funcionamiento frente a variaciones del parámetro en un 10% por encima del promedio; 3 si el sistema propuesto no tiene problemas en funcionamiento frente a variaciones del parámetro en un 5% por encima del promedio.	3
		Si el sistema requiere respaldo energético	5 a menor cantidad de KW que requiera para respaldo energético; 1 punto para la tecnología que necesite mayor cantidad de KW, las otras alternativas toman un puntaje proporcional a sus necesidades de energía	5

	Operación y mantenimiento (20)	Necesidades de mano de obra calificada para la operación de la alternativa	4 si no necesita personal especializado para la operación, 1 si necesita personal especializado	1
		Requerimiento de capacitación especializada para la operación y mantenimiento de la alternativa	4 si no necesita capacitación especializada, 1 si la necesita	1
		Requerimientos energéticos para el funcionamiento de la alternativa.	4 a menor cantidad de KW que requiera para funcionar la alternativa; 1 punto para la tecnología que necesite mayor cantidad de KW, las otras alternativas toman un puntaje proporcional a sus necesidades de energía	4
		Necesidades de cambio y periodicidad de uso de elementos consumibles (repuestos, reactivos, entre otros) que demanda la alternativa	4 si no necesita consumibles; 1 la alternativa que requiera más consumibles expresados en costos estimados; las otras alternativas toman un puntaje proporcional a sus necesidades de consumibles	1
		Qué tipo de operación rutinario requeriría	4 si la alternativa presenta el menor mantenimiento rutinario; 1 la alternativa que presenta el mayor mantenimiento rutinario; las otras alternativas toman un puntaje proporcional a sus necesidades de mantenimiento rutinario	1
	Servicio/Respaldo (8%)	Oferta local y regional de	8 si existe soporte local para la operación y mantenimiento	8

		insumos, partes y materiales para mantenimiento y operación de la alternativa	de la tecnología y 1 si no lo hay.	
				65
Matriz multicriterio dispositivos de potabilización				
Componente	Factor	Criterio		Peso
Socio-Económico (40%)	Acceso a Bienes y Servicios (20%)	Requerimiento de materiales e insumos. Materiales de cantera para obras civiles o qué tipo de materiales. Ejemplo filtro de arena		5
		Facilidad para transportar el dispositivo hacia el lugar del proyecto en términos de vías, dimensiones y precauciones.		3
		Oferta de recolección de residuos asociados al dispositivo o subproductos del tratamiento.		3
		Requerimiento de energía para el funcionamiento del dispositivo		5
	Aceptabilidad social (20%)	Facilidad de operación para la población objetivo		8
		Aceptabilidad de la comunidad respecto al uso del dispositivo de tratamiento.		10
Técnico- Operativo (60%)	Ambiental (10%)	Valoración de requerimientos de disposición final especial (1 todos los componentes, 3 algunos se pueden reusar, 5 no requiere)		3
		Valore si generan subproductos del tratamiento que requieran una disposición especial		5
	Operación y mantenimiento (30%)	Vida útil estimada de la alternativa para las condiciones de operación normales definidas para el dispositivo.		10
		Complementariedad con trenes de tratamiento planteados		10
		Tipo de mantenimiento rutinario requerido		10

	Administración (10%)	Tiempo estimado de cambios de repuestos o partes - acotarla bien	10
	Servicio/ Respaldo de la tecnología (10%)	Oferta regional o local de insumos para reparaciones al sistema de tratamiento	5
		Oferta regional o local de capacitación ofrecida por proveedores	5
TOTAL (valoración total de la alternativa)			92

Fuente: autores.

Por variables como costos, facilidad, tiempo de implementación de la alternativa se selecciona la **Alternativa 1**, puesto que impacta los problemas más significativos en la actualidad y da espacio para seguir en las labores de mantenimiento y optimización de los demás componentes, se plantea de esta manera dado que el municipio no cuenta con el presupuesto suficiente para realizar una alta inversión.

Predimensionamiento de la alternativa seleccionada

Dado que la alternativa de optimización del sistema de acueducto corresponde al predimensionamiento de la bocatoma y desarenador a continuación se presentan los cálculos del diseño hidráulico y planos respectivos de cada infraestructura.

Diseño de la bocatoma

Parámetros de diseño

Caudal de diseño: 8.45 L/s

Velocidad a través de la rejilla: 0.3 – 3 m/s

Separación entre barrotes: 20 a 40 mm

Ancho de la quebrada: 6 m

Diseño de la presa

Ancho de la presa

Ancho de la presa = 80% * Ancho de la quebrada

Ancho de la presa = 4 m

$$H = \left(\frac{QMD}{1.84L} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$H = \left(\frac{0.0085}{1.84 * 4} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$H = 0.01096m = 1.1 \text{ cm}$$

La corrección por las dos contracciones laterales es:

$$L' = L - 0.2 H$$

$$L' = 4 m - (0.2 * 0.01096)$$

$$L' = 4 m$$

La velocidad del río sobre la presa:

$$Vr = \frac{QMD}{L' * H}$$

$$Vr = \frac{2 * 0.0085 \text{ m}^3/\text{s}}{4 m * 0.01096 m}$$

$$Vr = 0.386 \text{ m/s OK}$$

La velocidad del agua sobre la presa debe estar 0.3 m/s – 3 m/s, para este caso la velocidad es de 0.22 m/s, está por debajo del rango debido al bajo caudal captado, sin embargo, la diferencia no resulta muy significativa

Diseño de la rejilla y canal de aducción

Ancho canal de aducción

Xs = Alcance filo superior (m)

$$Xs = 0.36 Vr^{\frac{2}{3}} + 0.60 H^{\frac{4}{7}}$$

$$Xs = 0.36 (0.38)^{\frac{2}{3}} + 0.60 (0.01096)^{\frac{4}{7}}$$

$$Xs = 0.24 m$$

X_i = Alcance filo inferior (m)

$$X_i = 0.18 Vr^{\frac{4}{7}} + 0.74 H^{\frac{3}{4}}$$

$$X_i = 0.18 (0.38)^{\frac{4}{7}} + 0.74 (0.01096)^{\frac{3}{4}}$$

$$X_i = 0.13 \text{ m}$$

B = Ancho canal de aducción

$$B = X_s + 0.10$$

$$B = 0.24 - m + 0.10 = 0.34 \text{ m}$$

El ancho mínimo de la rejilla debe ser de 0.40 m para facilitar la operación y limpieza; para este diseño el ancho se asumirá de 0.40 m.

Longitud de la rejilla y número de orificios

Cálculo de la Rejilla:

La velocidad efectiva de flujo a través de la rejilla se asume de 0.15 m/s, con el fin evitar el arrastre de materiales flotantes. La separación entre barrotes debe estar entre 20 mm y 40 mm para ríos caracterizados con gravas finas.

Velocidad a través de la rejilla = 0.15 m/s

Ancho de las Barras (b) = 0.0254 m.

Separación entre barras (a) = 0.02 m.

Caudal de diseño ($2 \cdot Q_{MD}$) = 0.01351 m³/s

$$A_{neta} = a * B * N$$

Donde:

Área n = Área Neta de la rejilla (m²)

a = Separación entre barrotes (m)

N = Número de orificios entre barrotes

Siendo b el diámetro de cada barrote, la superficie total de rejilla es aproximadamente:

$$A_{total} = (a + b) * B * N$$

Haciendo relación entre área neta y área total, se obtiene:

$$\frac{A_{neta}}{A_{total}} = \frac{a}{a+b}$$

$$A_{neta} = \frac{a}{a+b} * A_{total}$$

Y reemplazando el área total en función de la longitud de la rejilla, Lr:

$$A_{neta} = \frac{a}{a+b} * B * Lr$$

Por otra parte, el caudal a través de la rejilla es:

$$Q = K * A_{neta} * Vb$$

Donde: $K = 0.9$ para flujo paralelo a la sección

$Vb =$ Velocidad entre los barrotes (máximo de 0.20 m/s), se adopta 0.15 m/s

Con el Caudal de diseño QMD, calculamos el área neta de la rejilla y el largo de la misma.

Área neta de la rejilla

$$A_n = \frac{QMD}{K * Vb}$$

$$A_n = \frac{0.0085 \text{ m}^3/\text{s}}{0.9 * 0.15 \text{ m/s}}$$

$$A_n = 0.125 \text{ m}^2$$

Longitud de la rejilla

$$Lr = \frac{A_n * (a + b)}{(a * B)}$$

$$Lr = \frac{0.125 * (0.02 + 0.0127)}{(0.02 * 0.40)}$$

$$Lr = 0.8 m$$

Corrección de Lr y An

El largo de la rejilla es de 0.8 m (**Corrección de Longitud de la rejilla**)

$$A_{neta} = \frac{a}{a+b} * A_{total}$$

$$A_{total} = B * Lr$$

$$A_{neta} = \frac{a}{a+b} * B * Lr$$

$$An = \frac{0.02m}{0.02m + 0.0127} * 0.40m * 0.80m$$

$$An = 0.076 m^2$$

Número de orificios

Para esta área de la rejilla se calcula el número de orificios entre los barrotes

$$N = \frac{An}{a * B}$$

$$N = \frac{0.171m^2}{0.02m * 0.40m}$$

$$N = 15.29 \text{ orificios}$$

Condiciones finales de la rejilla

Se adoptan 15 orificios separados 0.02 m entre sí, con la cual se tienen las siguientes condiciones finales para el área neta:

$$A_{neta} = a * B * N$$

$$A_{neta} = 0.02m * 0.40m * 15$$

$$A_{neta} = 0.075 \text{ m}^2$$

Velocidad entre barrotes V_b

$$V_b = \frac{QMD}{K * A_n}$$

$$V_b = \frac{0.0085 \text{ m}^3/\text{s}}{0.9 * 0.075 \text{ m}^2}$$

$$V_b = 0.25 \text{ m/s}$$

Longitud real L_r (Verificación de la longitud de la rejilla)

$$L_r = \frac{A_n * (a + b)}{(a * B)}$$

$$L_r = \frac{0.168 \text{ m}^2 * (0.02 \text{ m} + 0.0127 \text{ m})}{(0.02 \text{ m} * 0.40 \text{ m})}$$

$$L_r = 0.49 \text{ m}$$

Niveles de agua en el canal de aducción aguas abajo

Para que la entrega a la cámara de recolección se haga en descarga libre, se debe cumplir que:

$$h_e = h_c$$

$$h_c = \left(\frac{QMD^2}{g * B^2} \right)^{1/3}$$

Aguas abajo

$$h_e = h_c = \left(\frac{(0.0085 \text{ m}^3/\text{s})^2}{9.81 \text{ m/s}^2 * (0.40\text{m})^2} \right)^{1/3}$$

$$h_e = 0.078 \text{ m}$$

Aguas arriba

Niveles de agua en el canal de aducción **aguas arriba**, se adopta una pendiente del canal (i) de 3% y ancho de canal de 0,3m

$$L_{\text{canal}} = L_{\text{rejilla}} + \text{espesor del muro}$$

$$L_c = 0.69\text{m} + 0.30\text{m} = 0.99 \text{ m}$$

$$h_o = \left[2 * h_e^2 + \left(h_e - \frac{i * L_c}{3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{2}{3} * i * L_c \right)$$

$$h_o = \left[2 * 0.078^2 + \left(0.078 - \frac{0.03 * 0.99}{3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{2}{3} * 0.03 * 0.99 \right)$$

$$h_o = 0.1141 \text{ m}$$

La altura total de los muros del canal de aducción es: (se adopta un borde libre de 0.15 m)

$$H_o = h_o + B.L.$$

$$H_o = 0.0086 + 0.15\text{m}$$

$$H_o = 0.26$$

Altura del canal aguas abajo, se adoptará un borde libre de 0.15 m

$$H_e = H_o + iL_c$$

$$He = 0.16 + (0.26 * 0.70)$$

$$He = 0.29m$$

Velocidad del agua al final del canal

$$Ve = \frac{QMD}{B * he}$$

$$Ve = \frac{0.0085 \text{ m}^3/s}{0.40 \text{ m} * 0.078 \text{ m}}$$

$$Ve = 0.87 \frac{m}{s}$$

$$0.3 \frac{m}{s} < 0.43 \frac{m}{s} < 3.0 \text{ m/s} - \text{Cumple la condición}$$

Diseño de la cámara de recolección

$$Xi = 0.18 Ve^{\frac{4}{7}} + 0.74 H^{\frac{3}{4}}$$

$$Xi = 0.18 * (0.87)^{\frac{4}{7}} + 0.74 * (0.01096)^{\frac{3}{4}}$$

$$Xi = 0.2 \text{ m}$$

$$Xs = 0.36 Ve^{\frac{2}{3}} + 0.60 H^{\frac{4}{7}}$$

$$Xs = 0.36 * (0.87)^{\frac{2}{3}} + 0.60 * (0.01096)^{\frac{4}{7}}$$

$$Xs = 0.4 \text{ m}$$

Ancho cámara de recolección

$$B = Xs + 0,30$$

$$B = 0.37 + 0.30 = 0.7 \text{ m}$$

Para facilidad de acceso y mantenimiento, se adopta una caja cuadrada de 0.60 m * 0.60 m y una altura de 0.70 m. Con un borde libre de 0.2 m.

Cálculo del orificio de control de caudal (Desagüe del caudal de excesos T)

El cálculo del orificio de control de caudal, nos permite determinar el diámetro y la altura por descarga libre del caudal otorgado en la concesión de aguas y/o calculado al año de proyección de la estructura; este orificio se ubicará en la caja de salida en una pantalla construida controlando el exceso de caudal mediante una tubería de rebose.

Por construcción se asume un orificio control de caudal de un diámetro, este depende de la cabeza hidráulica calculada que se ajuste al diseño de la caja de salida del sistema de captación y que sea fácil su construcción o adecuación en la misma.

$$Q = Cd A \sqrt{2gh}$$

Donde:

A = Área del Orificio (m²)

H = Altura sobre el Orificio (m)

Cd = Constante

Q = QMD = Caudal de diseño

Se despeja H para determinar la altura de lámina de agua

$$h = \frac{\left(\frac{Q}{Cd * A}\right)^2}{2 * g}$$

Se asume un diámetro del Orificio de 1 1/2" de diámetro.

$$A = \frac{\pi * d^2}{4}$$

Reemplazando

$$A = \frac{\pi * (0.0381 \text{ m})^2}{4} = 0.00317 \text{ m}^2$$

Para conocer el valor del coeficiente de gasto se hace el siguiente procedimiento:

d = diámetro del orificio (Tubería de RED21 PVC)

e = espesor del muro (0.12m)

Cd: e/d (Buscar valor en la tabla 6.2)

$$Cd = \frac{e}{d}$$

$$Cd = \frac{0.12}{0.0381}$$

$$Cd = 1.89$$

En el anexo 4 se puede observar la tabla 6.2 de los coeficientes de gasto para los diferentes orificios de pared gruesa (SOTELO ÁVILA, G. (1997). Hidráulica General, Volumen 1, Fundamentos. *Editorial Limusa*. Pág. 221), para este caso el valor de Cd es 0.82.

Finalmente se despeja H para determinar la altura de lámina de agua

$$h = \frac{\left(\frac{Q}{Cd * A}\right)^2}{2 * g}$$

$$h = \frac{\left(\frac{0.0085 \text{ m}^3/\text{s}}{0.82 * 0.00114 \text{ m}^2}\right)^2}{2 * 9.81 \text{ m/s}^2} = 0.6 \text{ m}$$

Para tener una altura de lámina de agua de 0.6 cm se empleará una tubería con diámetro de 4 pulgadas.

Tabla 46

Dimensiones propuestas de diseño bocatoma

Dimensionamiento de Bocatoma	
Ancho de la presa	6 m
Altura de muros de contención	0,5 m
Ancho del canal de aducción	0,4 m
Ancho del canal de conducción	0,6 m
Ancho de la caja de recolección	0,7 m
Longitud de la caja de recolección	0,6 m

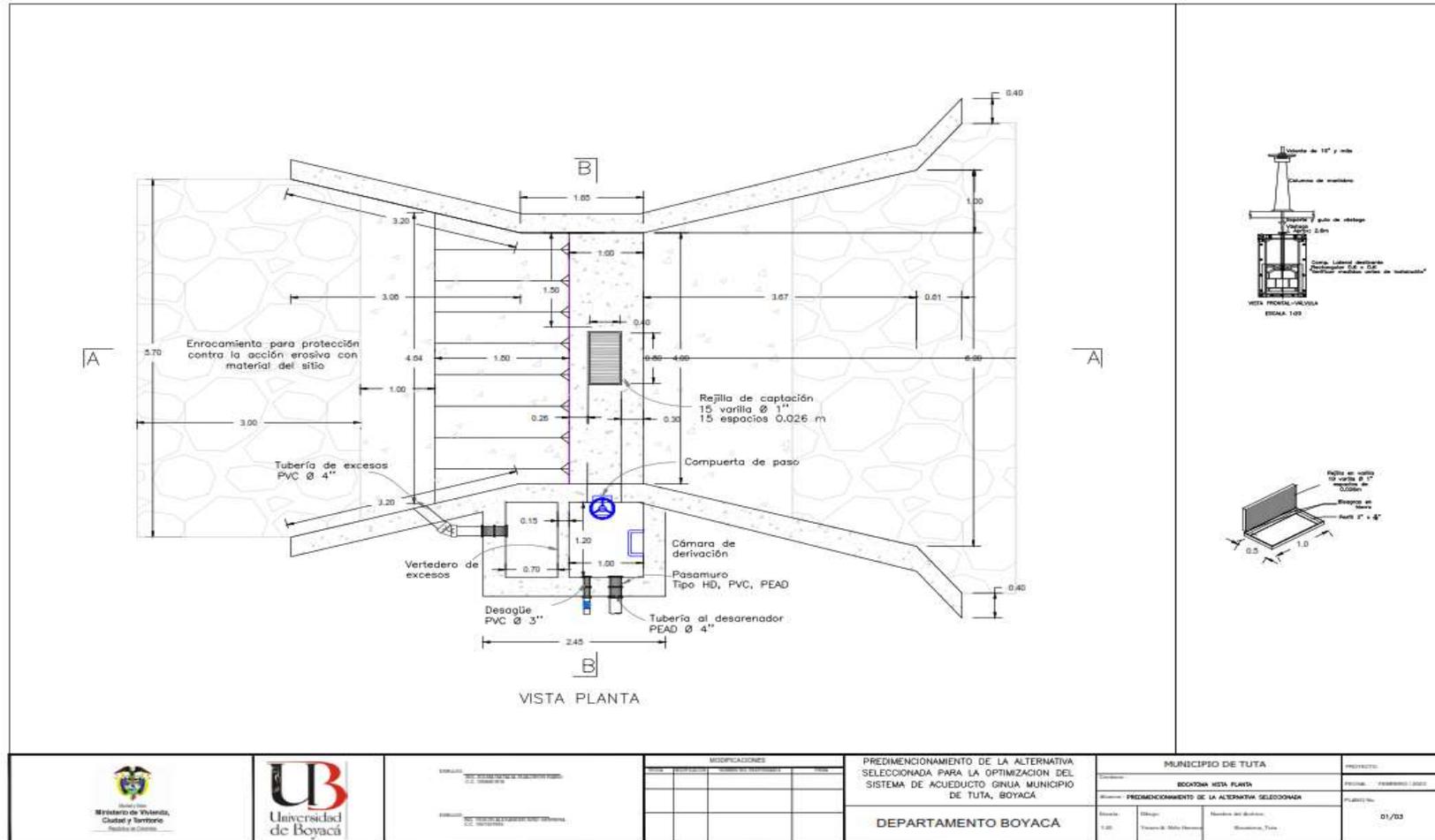
Longitud de la rejilla	0,8 m
Ancho de la rejilla	0,40 m
Numero de barrotes	15
Diámetro de barrotes	1 in
Separación de barrotes	0,02 m

Fuente: autores.

Planos bocatoma

Figura 53

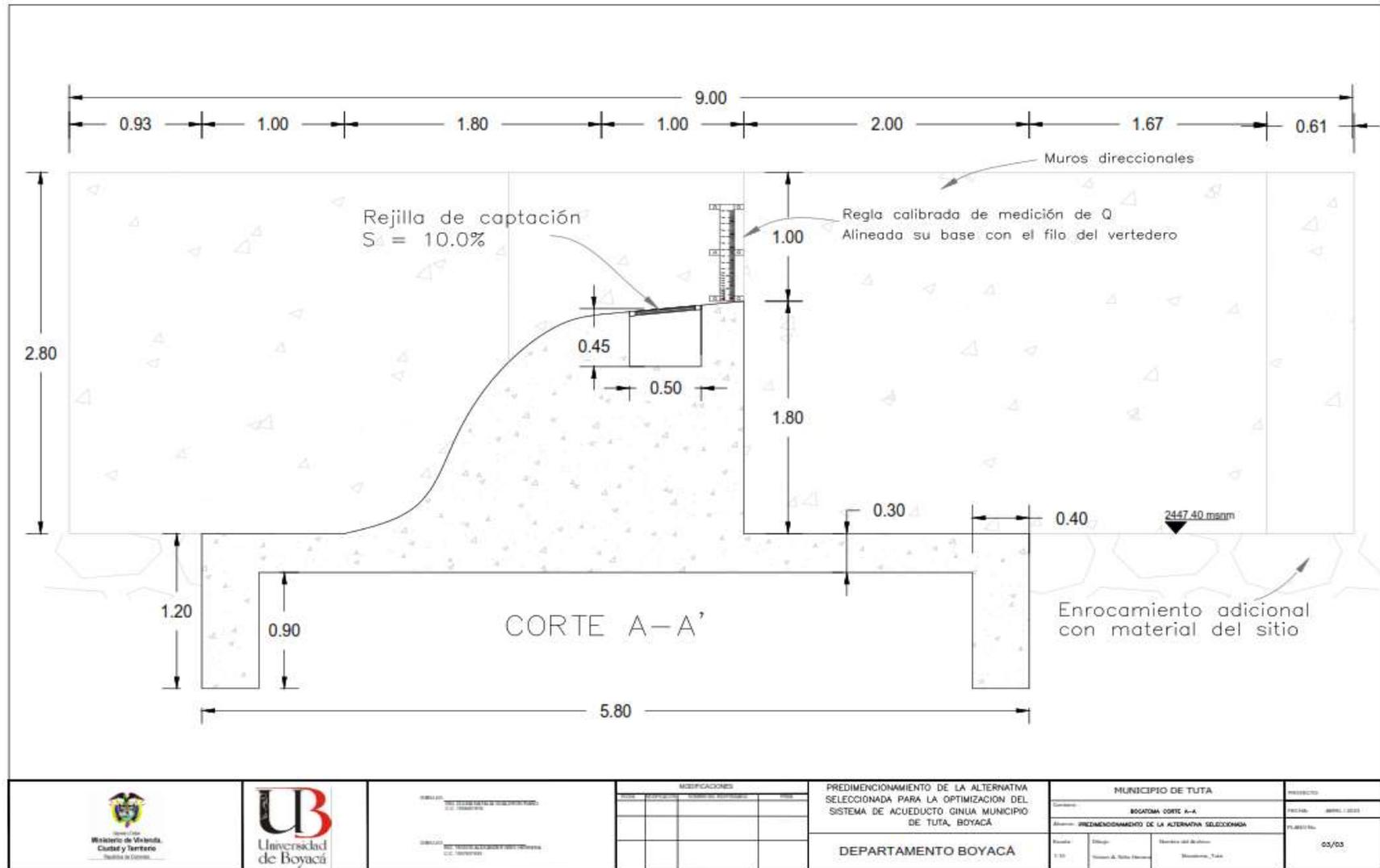
Predimensionamiento bocatoma vista en planta



Fuente: autores.

Figura 54

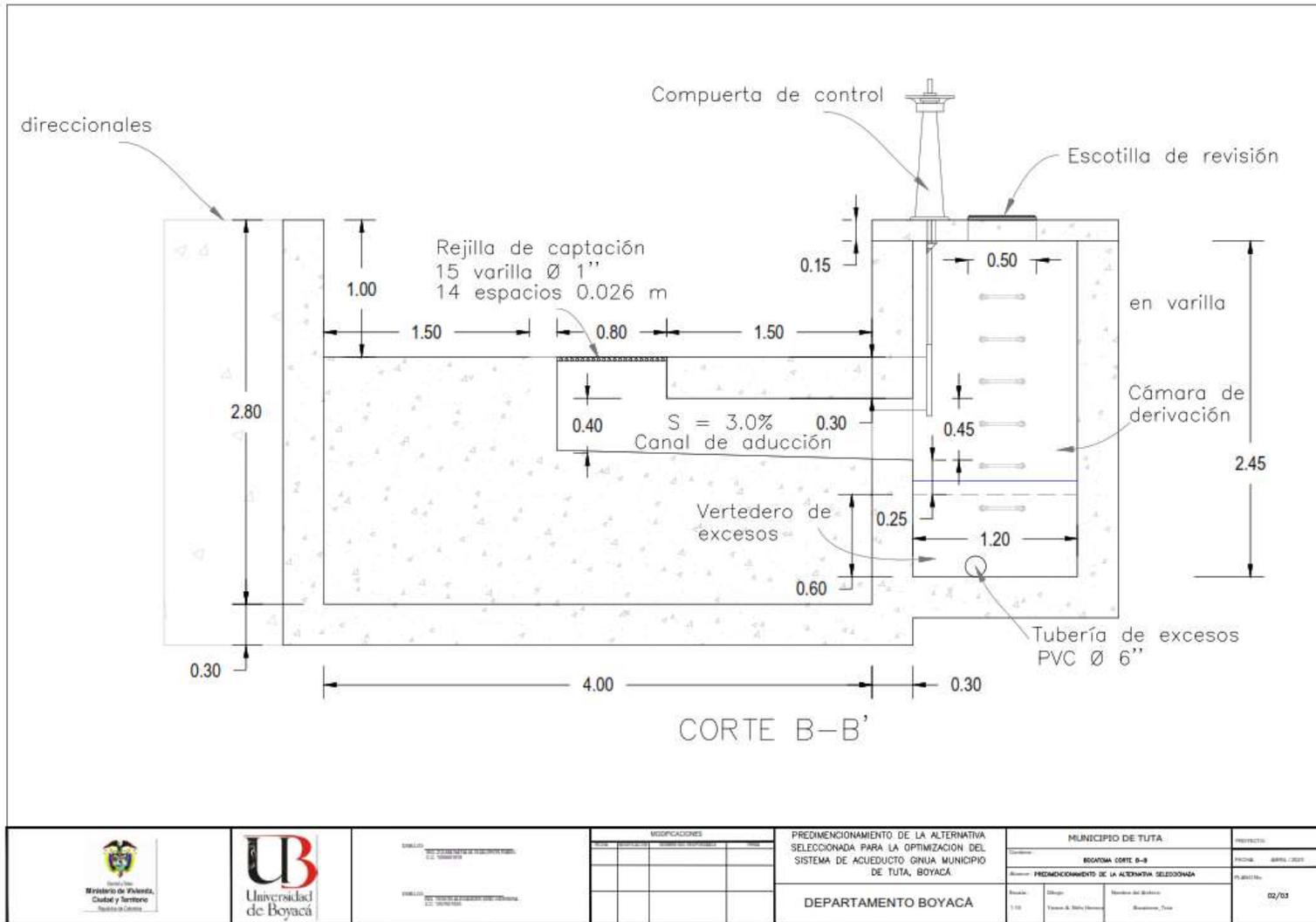
Bocatoma vista perfil



Fuente: autores.

Figura 55

Detalle canal de aducción bocatoma



Fuente: autores.

Diseño del desarenador

Los desarenadores son obras hidráulicas que sirven para separar (decantar) y remover (evacuar) después, el material sólido que lleva el agua de un canal, se ubican a continuación de una captación de agua y que permiten remover arenas arcillas, gravas finas y material Y orgánico de cierto tamaño contenidas en el agua que ingresa de una fuente superficial, es una estructura casi obligada y el objetivo principal es proteger la línea de conducción, equipos y accesorios instalados aguas debajo de la captación, evitando problemas de erosión y/o acumulación de materiales que pueden producir desgastes en el sistema.

La sedimentación de las partículas en suspensión es debida a la acción de la gravedad y se facilita por la disminución de la velocidad horizontal en el tanque desarenador.

Componentes: Esta unidad se puede dividir en cuatro partes o zonas.

- I. Zona de entrada: tiene como función el conseguir una distribución uniforme de las líneas de flujo dentro de la unidad, uniformizando a su vez la velocidad.
- II. Zona de des arenación: parte de la estructura en la cual se realiza el proceso de depósito de partículas por acción de la gravedad.
- III. Zona de salida: conformada por un vertedero de rebose diseñado para mantener una velocidad que no altere el reposo de la arena sedimentada.
- IV. Zona de depósito y eliminación de la arena sedimentada: constituida por una tolva con pendiente mínima de 10% que permita el deslizamiento de la arena hacia el canal de limpieza de los sedimentos.

Parámetros de diseño:

Caudal de diseño: Caudal máximo diario QMD (8.5 l/s)

Peso específico de las partículas de arenas: 2.65 gr/cm

Relación larga: ancho 3:1 Velocidad máxima horizontal: 0.25 m/s

Diámetro de partículas: >0,1 mm

Eficiencia de remoción: 87.5%

La carga superficial máxima: 1000 m³/m²/día

Relación entre la longitud útil del desarenador y la profundidad efectiva para almacenamiento de arena sea 10 a 1

Temperatura del agua: 15 °C

Viscosidad cinemática: 1.14610 m/s

Ancho mínimo: 0.7 m

Profundidad efectiva: 1.5 m

Reynolds <1.0

Tiempo de retención: >20 min

Velocidad de sedimentación: 0.3 m/s

Se adoptan dos unidades para garantizar el tratamiento preliminar cuando se realice mantenimiento de una de ellas

Dimensionamiento:

Velocidad de sedimentación

$V_s = (\rho_s - \rho) d^2 g / 18 \nu$

$$V_s = \frac{(\rho_s - \rho) * d^2 * g}{18 * \nu}$$

Donde:

V_s = Velocidad de sedimentación (m/s).

ρ_s = Densidad de la partícula de arena (kg/m³)

ρ = Densidad del agua (kg/m³).

d = Diámetro de la partícula de arena (m).

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

ν = Viscosidad cinemática del agua (m/s).

$$V_s = \frac{((2650 \text{ kg/m}^3 - 999.19 \text{ kg/m}^3) * (0.005 \text{ m})^2 * 9.81 \text{ m/s}^2)}{18 * 1.146 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$

$$V_s = 0.196$$

Numero de Reynolds

$$Re = \frac{0.196 \frac{cm}{s} * 0.005cm}{0.01146 cm^2/s}$$

$$Re = 0.009$$

Tiempo de retención

$$t = \frac{H}{V_s}$$

La profundidad efectiva para el almacenamiento de arena en el desarenador debe estar comprendida entre 0.75 m y 1.50 m, se adopta un valor de 1.5 m.

$$t = \frac{120 cm}{0.196 cm/s}$$

$$t = 765s$$

Periodo de retención hidráulico

De acuerdo al grado de remoción del desarenador se tiene la siguiente relación:

$$\frac{\theta}{t} = 2.75$$

$$\theta = 2.75 * t$$

$$\theta = 2.75 * 765 s$$

$$\theta = 0.85 h$$

Volumen del tanque

$$V = \theta * Q$$

$$V = 0.85h * 0.0085 m^3/s$$

$$V = 26 m^3$$

Área superficial del tanque

$$As = \frac{V}{H}$$

$$As = \frac{20.8m^3}{1.5 m}$$

$$As = 17.33 m^2$$

Relación largo: ancho 4:1

$$A = B * L$$

$$L = 3 * B$$

$$A = 4 * B^2$$

$$B = \sqrt{\frac{A}{4}}$$

$$B = \sqrt{\frac{17.33 m^2}{3}}$$

$$B = 2m$$

Se asume un ancho de 2m

$$L = 4 * 2m = 8m$$

Carga hidráulica superficial

$$q = \frac{Q}{As}$$

$$q = \frac{0.0085 m^3/s}{17.33 m^2}$$

$$Vo = 0.049 cm/s$$

$$q = 42.37 m^3/m^2/d$$

La carga superficial debe estar entre 15 y 80 m/d y es equivalente a la velocidad de sedimentación crítica.

Diámetro crítico

$$do = \sqrt{\frac{Vo * 18 * \mu}{g * (\rho_s - \rho)}}$$

$$do = \sqrt{\frac{0.049 m/s * 18 * 1.146 * 10^{-6} m^2/s}{9.81m/s^2 * (2650 kg/m^3 - 999.19 kg/m^3)}}$$

$$do = 0.03mm$$

Velocidad horizontal

$$Vh = \frac{Vo * L}{H}$$

$$Vh = \frac{0.0049 \frac{cm}{s} * 8m}{1.3 m}$$

$$Vh = 0.34 \text{ cm/s}$$

Velocidad horizontal máxima

$$Vh_{max} = 20 * Vh$$

$$Vh_{max} = 20 * 0.34 \text{ cm/s}$$

$$Vh_{max} = 3.92 \frac{cm}{s} \rightarrow 0.0392 \text{ m/s}$$

Vertedero de salida

Altura lámina de agua

$$Hv = \left(\frac{Q}{1.84 * B} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$Hv = \left(\frac{0.0085 \text{ m}^3/\text{s}}{1.84 * 2m} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$Hv = 0.017 \text{ m}$$

Velocidad en el vertedero

$$Vv = \frac{Q}{B * Hv}$$

$$Vv = \frac{0.0085 \text{ m}^3/\text{s}}{1 \text{ m} * 0.017 \text{ m}}$$

$$Vv = 0.24 \text{ m/s}$$

Alcance del chorro

$$Xs = 0.36 * (Vv)^{\frac{2}{3}} + 0.60 * (Hv)^{\frac{4}{7}}$$

$$Xs = 0.36 * (0.24)^{\frac{2}{3}} + 0.60 * (0.017)^{\frac{4}{7}}$$

$$X_s = 0.20 \text{ m}$$

Cámara de quietamiento

Profundidad de la cámara

$$H_a = \frac{H}{3}$$

$$H_a = \frac{1.5 \text{ m}}{3}$$

$$H_a = 0.5 \text{ m}$$

Se adopta un largo de la cámara de quietamiento de 0.5m y un ancho equivalente a las unidades desarenadoras

Pantalla de entrada

Profundidad de la pantalla

$$H_e = \frac{H}{2}$$

$$H_a = \frac{1.5 \text{ m}}{2}$$

$$H_a = 0.75 \text{ m}$$

0.75 + 0.2 m (borde libre)

Distancia a cámara de quietamiento

$$D_e = \frac{L}{4}$$

$$D_e = \frac{8\text{m}}{4}$$

$$D_e = 2$$

Pantalla de salida

Profundidad de la pantalla

$$H_s = \frac{H}{2}$$

$$H_a = \frac{1.5 \text{ m}}{2}$$

$$H_a = 0.75 \text{ m}$$

Distancia al vertedero de salida

$$D_s = 15 * H_v$$

$$D_s = 15 * 0.017 \text{ m}$$

$$D_e = 0.25 \text{ m}$$

Pantalla deflectora

Velocidad de paso a través del orificio, de acuerdo a la guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores OPS/CEPIS, la velocidad en los orificios no debe ser mayor de 0,15 m/s para no crear turbulencias.

$$\text{Área Efectiva de orificios} = 0.015 \text{ m}^2$$

$$\text{Diámetro de orificios} = 1.5''$$

$$\text{Área cada orificio} = 0.00114 \text{ m}^2$$

Numero de Orificios (N)

$$N = \frac{A_e}{A_o}$$

$$N = \frac{0.015 \text{ m}^2}{0.00114 \text{ m}^2}$$

$$N = 13 \text{ orificios}$$

Almacenamiento de lodos

Altura de almacenamiento de lodos

Se recomienda que la relación entre la longitud útil del desarenador y la profundidad efectiva para almacenamiento de arena sea 10 a 1.

$$H_L = \frac{L}{10}$$

$$H_L = \frac{8m}{10}$$

$$H_L = 0.83m$$

Longitud de cámara de salida a cámara de quietamiento

$$L_s = \frac{L}{3}$$

$$L_s = \frac{8m}{3}$$

$$L_s = 2.6m$$

Pendiente en la sección

$$p_i = \frac{0.05}{L_s}$$

$$p_i = \frac{0.05m}{8m}$$

$$p_i = 2.4\%$$

Longitud de salida al vertedero de salida

$$L_v = \frac{2L}{3}$$

$$L_s = \frac{2 * 8m}{3}$$

$$L_s = 5.3m$$

Pendiente en la sección

$$p_i = \frac{0.05}{L_v}$$

$$p_i = \frac{0.05m}{2m}$$

$$p_i = 2.5\%$$

Tabla 47*Dimensionamiento del desarenador*

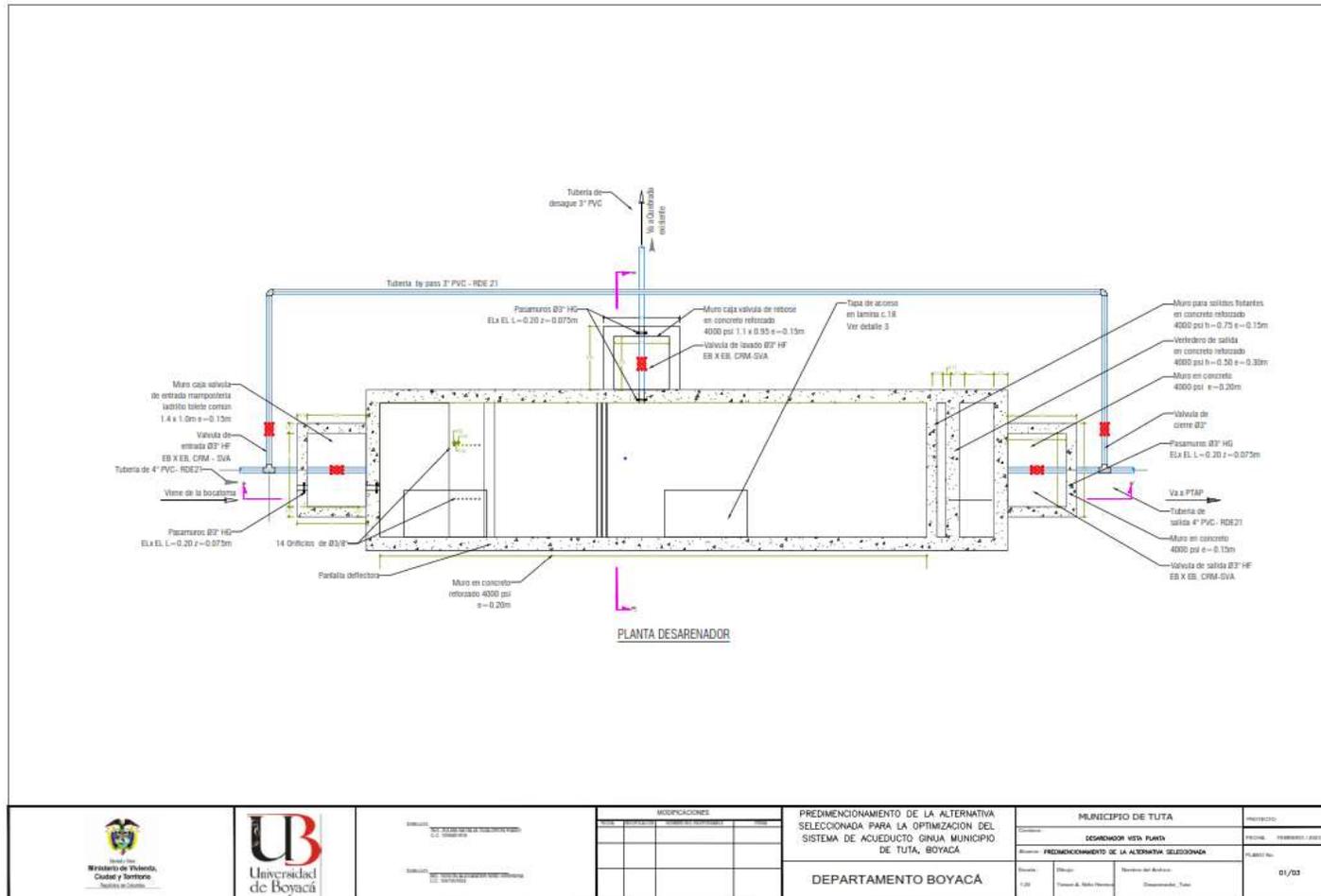
Dimensionamiento del desarenador	
Ancho del desarenador	2m
Longitud del desarenador	8m
Profundidad efectiva	1.5m
Cámara de aquietamiento	
Ancho cámara	1m
Largo de cámara	1m
Profundidad de la cámara	0.4m
Vertedero de salida	
Ancho del vertedero	1m
Largo del vertedero	0.5m
Profundidad del vertedero	0.5m
Zona de lodos	
Profundidad efectiva de lodos	0.5m
Longitud desde la zona de entrada	3m
Pendiente de sección	5%
Longitud a zona de salida	2m
Pendiente de sección	2.5%

Fuente: autores.

Planos desarenador

Figura 56

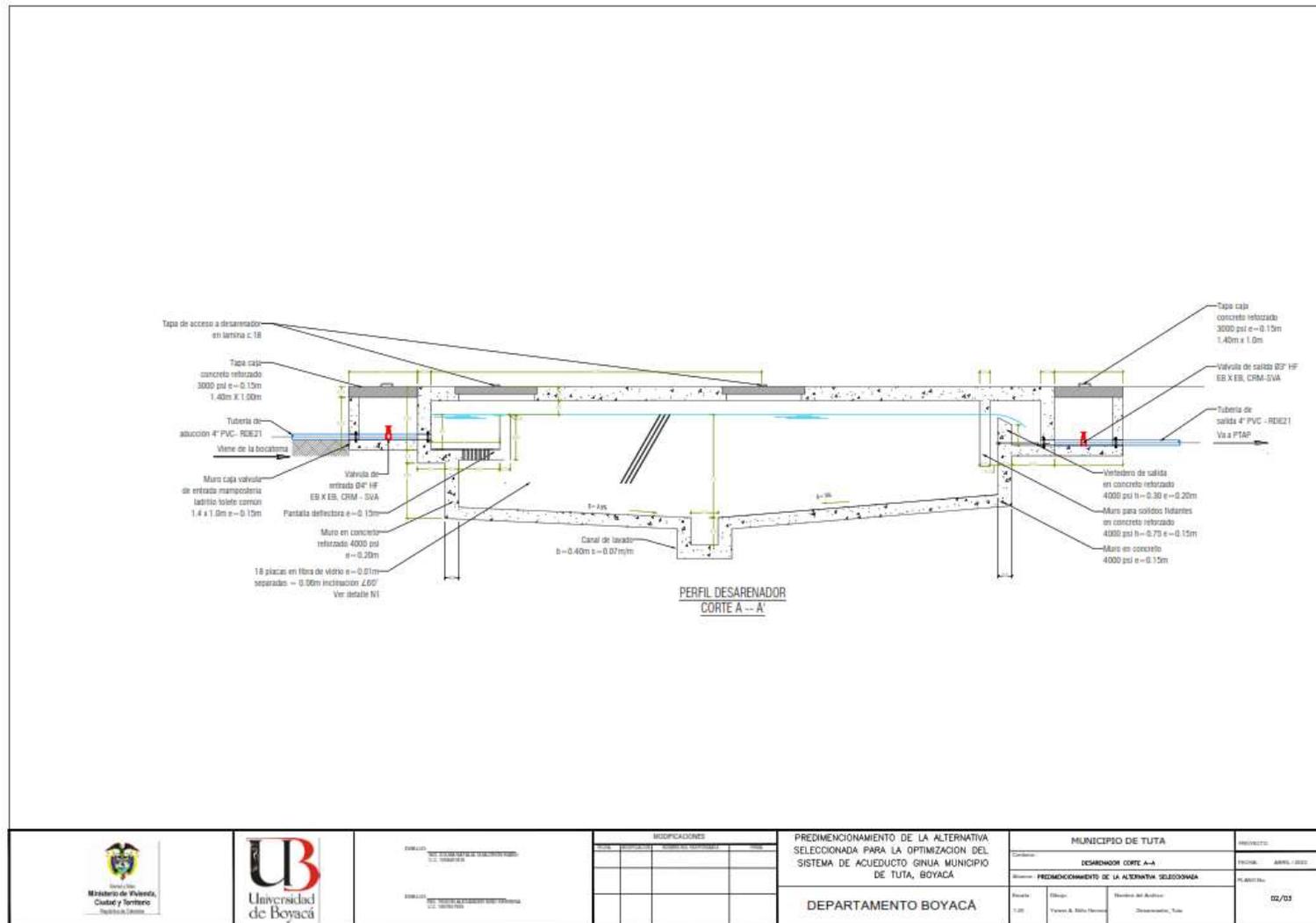
Desarenador vista en planta



Fuente: autores.

Figura 57

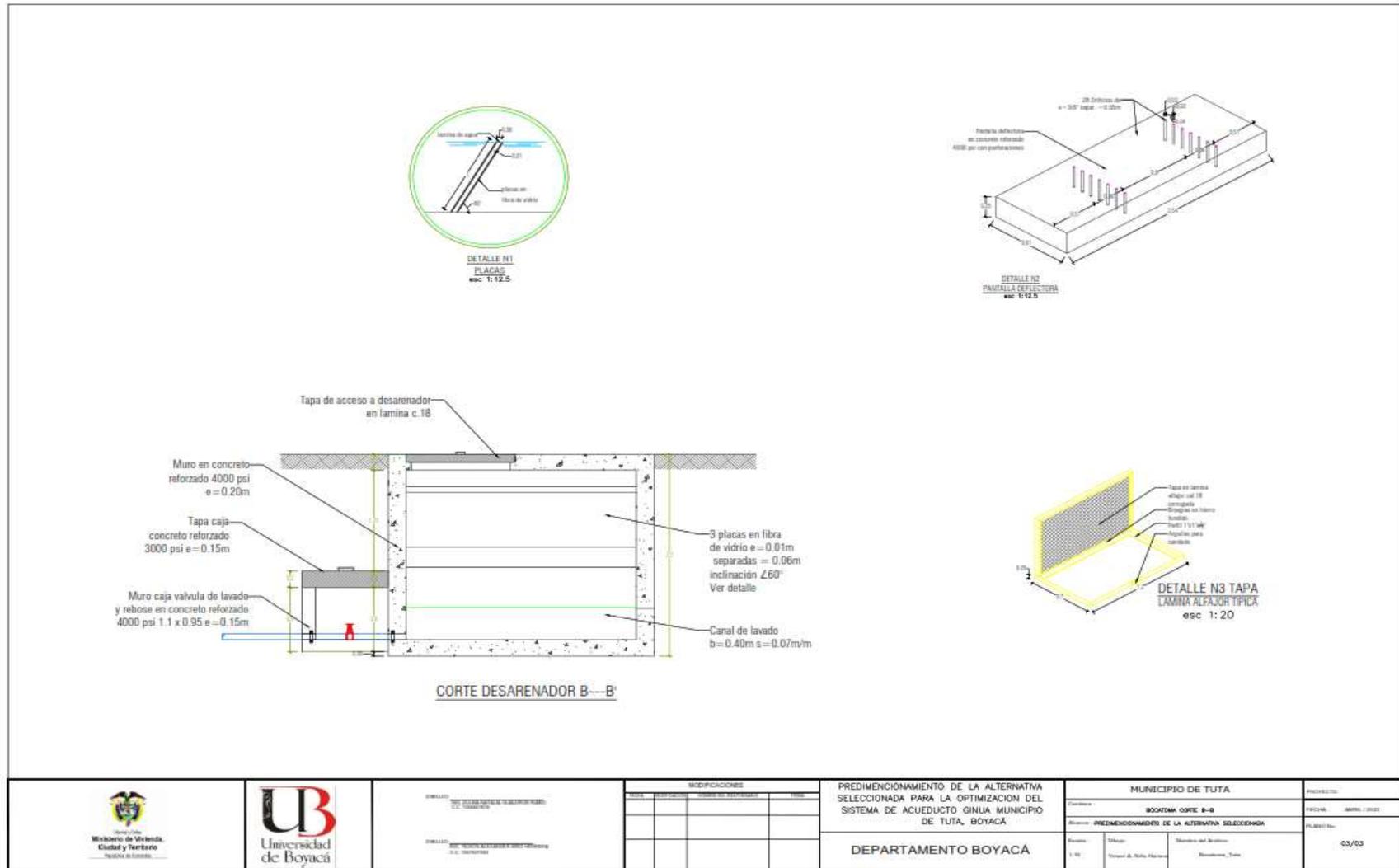
Desarenador vista en perfil



Fuente: autores.

Figura 58

Desarenador detalles



<p>Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio República de Colombia</p>	<p>Universidad de Boyacá</p>	DISEÑADO POR: INGENIERO EN SISTEMAS DE AGUAS Y SANEAMIENTO D.E. CARRASQUIN DISEÑADO POR: INGENIERO EN SISTEMAS DE AGUAS Y SANEAMIENTO D.E. CARRASQUIN	MEDICIONES	PREDIMENSIONAMIENTO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA PARA LA OPTIMIZACION DEL SISTEMA DE ACUEDUCTO GIJUA MUNICIPIO DE TUTA, BOYACÁ DEPARTAMENTO BOYACÁ	MUNICIPIO DE TUTA		PROYECTO:
			FECHA:		BOGOTÁ CORTE B-B	FECHA: 08/01/2021	
DISEÑO:				PREDIMENSIONAMIENTO DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA	PLANO:	03/03	ESCALA:
1:50				Diseñado por:	Revisado por:	03/03	03/03

Fuente: autores.

Conclusiones

El diagnóstico hidráulico del sistema de acueducto urbano del municipio de Tuta revela fallas en los diseños de la infraestructura existente. De acuerdo a la verificación hidráulica de la bocatoma del diseño original se puede identificar que el diseño no cumple con la velocidad sobre la presa, la altura de muro y el área de la rejilla. Por otro lado, en el desarenador, de acuerdo a la verificación hidráulica del desarenador se identificó que no cumple con el tiempo hidráulico de retención y la velocidad horizontal por ende la eficiencia de remoción es baja, en cuanto a la demás infraestructura que compone la planta potabilizadora y la red de aducción cumple con los criterios establecidos por la normatividad legal vigente.

En resumen, el diagnóstico hidráulico del sistema de acueducto urbano en Tuta reveló deficiencias críticas en componentes clave. Dos alternativas viables para mejorar el sistema fueron consideradas: la Alternativa 1 propone el diseño de una nueva bocatoma y desarenador, junto con la optimización de la red de distribución implementando válvulas reguladoras de presión en el sistema. Por otro lado, la Alternativa 2 sugiere el diseño de una planta de tratamiento en cerca de la fuente de captación Rio de Piedras. Tras evaluar variables como costos y facilidad de implementación, aspectos técnicos y de operación, se seleccionó la Alternativa 1 debido a su capacidad para abordar problemas inmediatos, siendo la opción más viable dada la infraestructura existente.

Considerando los parámetros técnicos delineados en el RAS 2000 y en concordancia con las directrices de la Resolución 0330 de 2017, se procedió al diseño de la bocatoma y desarenador. Este diseño se llevó a cabo considerando un caudal de 8.45 l/s, proyectado para atender las necesidades de la población estimada al año 2047.

En la calibración del modelo realizado en este estudio y la simulación de la red del sistema de acueducto en el casco urbano del municipio de Tuta, se observa una buena correlación para las presiones observadas y las presiones producto de la simulación realizada. Con la calibración del modelo se tiene un nivel de confiabilidad alto donde se demuestra la capacidad de éste para poder modelar bajo diferentes escenarios es decir modelar con diversas demandas en cada nodo y poder obtener un acercamiento a la realidad hidráulica del Sistema Objeto del estudio.

El ensayo de pitometría resulta una metodología eficiente y acertada a la hora de calibrar un modelo en WaterGEMS, dado que este ensayo es una técnica utilizada para medir la presión en los nodos de la red, permitiendo que la calibración se ajuste muy bien a la realidad, ya que permite obtener datos precisos sobre la presión del flujo de agua en diferentes puntos de la red.

Es de gran importancia tener estas herramientas de validación de los modelos ya que son muy útiles para la planeación de proyectos, para la determinación de fallas en el Sistema, sectorización de las redes y hasta la detección de fugas lo cual es un detonante en las redes de acueducto ya que en muchos de los casos carecen de herramientas como estas para poder optimizarlas.

Referencias

- Alfaro Tolentino, J. C., y Rodríguez Polo, O. D. (2021). *Propuesta de diseño de un sistema de agua potable y alcantarillado sanitario para el caserío el progreso, aplicando fórmulas matemáticas y el uso del software watergems y sewergems*. (Trabajo de Grado, Universidad Privada Antenor Orrego).
<https://repositorio.upao.edu.pe/handle/20.500.12759/7385>
- Aquavida. (2015). *Componentes de un sistema de acueducto*.
<http://aquavidasena.blogspot.com/>
- Araque Fuentes, D. A. (2006). *Optimización de redes de acueducto con el fin de uniformizar el estado de presiones*. (Trabajo de Grado, Universidad de los Andes).
<https://pavcowavin.com.co/optimizacion-de-redes-de-acueducto>
- Bentley, E. (2008). *Bentley on Brecht*. Northwestern University Press.
- Bocek A. (2020). *Introducción a la captación de agua*.
<https://ag.arizona.edu/azaqua/AquacultureTIES/publications/Spanish%20WHAP/GT3%20Water%20Harvesting.pdf>
- Cainaba Mojica, J. S. y Buitrago Mora, S. A. (2021). *Identificación y diagnóstico de puntos críticos en la red primaria de abastecimiento de Yopal mediante modelación hidráulica en EPANET*. (Trabajo de Grado, Universidad de la Salle).
https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/965
- Calvache Castillo, F. (2018). *Evaluación del agua no contabilizada en municipio de sexta categoría en el Departamento de Boyacá*. (Trabajo de Grado, Universidad Santo Tomas de Aquino).
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/33245/2018%2cfredycalvache.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Caracol Radio. (2022). *Boyacá emitió alerta por desmejoramiento en calidad de agua para consumo*. https://caracol.com.co/emisora/2022/06/09/tunja/1654774869_204585.html
- Castañeda Castaño, Y. (2020). *Herramientas de modelación hidráulica y espacial para mejorar la operación de sistemas de distribución en acueductos veredales, caso de estudio acueducto San Isidro*. (Trabajo de Grado, Universidad de Antioquia).
<https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/17213>

- Castro Cárdenas A.F., Olivares Calderón M. A., Rozos Muñoz O. V. (2019). *Evaluación del sistema de lavado de los desarenadores convencional y dufour mediante el cálculo de volumen muerto a través de modelos hidráulicos*. (Trabajo de Grado, Universidad Cooperativa de Colombia). <http://hdl.handle.net/20.500.12494/11252>
- Castro Sánchez, C. J., Moreno Vanegas, A. J., y Hernández Sánchez, V. D. (2021). *Optimización de la red de distribución de agua potable del municipio de Villeta–Cundinamarca*. (Trabajo de Grado, Universidad Piloto de Colombia). <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/10750>
- Cifuentes-Cifuentes, G. y Godoy-Álvarez, A. F. (2018). *Mejoramiento de la red de distribución del sistema de acueducto Auacact en la localidad de Ciudad Bolívar mediante modelación en Epanet - Bogotá D.C.* (Trabajo de Grado, Universidad Católica de Colombia). <https://hdl.handle.net/10983/22578>
- Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Congreso de la Republica. (1994). Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones. [Ley 0142 de 1994]. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/0142%20-%201994.pdf>
- Cruz Lasso, O. I. (2015). *Estudio de caso para la optimización del sistema de acueducto del municipio de Paipa departamento de Boyacá y búsqueda de fuentes alternativas para el abastecimiento de agua*. (Trabajo de Grado, Universidad Libre de Colombia). <https://hdl.handle.net/10901/8119>
- Cualla López, R. A. (2008). *Elementos de diseño para acueducto y alcantarillado*. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- De Azevedo, J. M., y Acosta, G. (1976). *Manual de Hidráulica*. HARLA.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE). (2020). *Censo Nacional de Población y Vivienda*. <https://www.dane.gov.co/index.php/60-espanol/demograficas/censos>
- Díaz Correa, A. P. (2021). *Alternativas de Diseño Preliminar para la Red de Agua Potable en la Vereda los Gómez en el Sector Barrio Nuevo, en el Municipio de Itagüí*. (Trabajo de Grado, Universidad de Antioquia). <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/25418>

- Díaz-Romero, O A. y Garavito-Romero, M. A. (2020). *Modelación y calibración de la red de distribución del acueducto urbano del municipio de Machetá Cundinamarca*. (Trabajo de Grado, Universidad Católica de Colombia). <https://hdl.handle.net/10983/24997>
- Empresas Públicas de Medellín. (2013). *Normas de Diseño de Sistemas de Acueducto de las Empresas Públicas de Medellín E. S. P.* https://www.epm.com.co/site/Portals/0/centro_de_documentos/normatividad_y_legislacion/agua/Norma_Disenio_Acueducto_2013.pdf
- Enríquez Zapata, S. (2007). *Pitometría*. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/15020?show=full>
- Galeano-Mateus, J. A. y Ramírez-Espitia, H. A. (2021). *Evaluación y optimización planta de tratamiento de agua potable del municipio de Vélez en el departamento de Santander*. (Trabajo de Grado, Universidad Católica de Colombia). <https://hdl.handle.net/10983/27058>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2002). *Guía ambiental para sistemas de acueducto*. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/005574/cartillas/sistemasacueducto/Sistemasacueducto2.pdf>
- Lara Navarro, J. L. (2019). *Apoyo técnico a la empresa de servicios públicos en el proceso de mejoramiento del sistema de alcantarillado y acueducto en el municipio de Aguachica Cesar*. (Trabajo de Grado, Universidad Pontificia Bolivariana). <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/6367?locale-attribute=en>
- Leal Villarreal, F. (2003). *Metodología para la calibración de redes de distribución bajo ambiente de fugas*. (Trabajo de Grado, Universidad de los Andes). <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/7da1fe5b-c707-430e-910d-b3ae06495d26/content>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Protección Social. Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano [Resolución 2115 de 2007]. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/2115%20-%202007.pdf>

- Ministerio de la Protección Social. (2007). Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano [Decreto 1575 de 2007]. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/1575%20-%202007.pdf>
- Ministerio de Salud. (2015). *ABECÉ del agua y saneamiento básico*. <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/abc-agua.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS [Resolución 0330 de 2017]. <https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/resolucion-0330-2017.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). Por la cual se modifica la Resolución 0330 de 2017 [Resolución 0799 de 2021]. https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/0799_2021.pdf
- Montiel Peralta, J. L., y Pacheco Ruíz, C. D. (2010). *Diagnóstico y evaluación técnica del sistema de acueducto urbano del municipio de Sampués, Sucre*. (Trabajo de Grado, Universidad de Sucre). <https://repositorio.unisucre.edu.co/handle/001/328>
- Naciones Unidas. (2022). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/waterand-sanitation/>
- Procuraduría. (2022) *El agua potable y el saneamiento básico en los planes de desarrollo*. https://www.procuraduria.gov.co/portal/media/file/parte3_agua.pdf
- Ramírez, C. (2016). *Guía técnica acueducto y alcantarillado*. Universidad católica de Colombia. (Trabajo de Grado, Universidad Católica de Colombia). <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/8b65c49e-dcb7-4805-95c9-3ded57e7143c>
- Rivera-López, E. F. y Suárez-Rodríguez, V. M. (2018). *Propuesta para la optimización del sistema de acueducto del municipio de Tena (Cundinamarca)*. (Trabajo de Grado, Universidad Católica de Colombia). <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/22858>
- Rojas Llanos, A. M., y Meneses Toro, D. (2017). *Actualización del catastro y evaluación de la red matriz del acueducto veredal Arvudea en Acacias, Meta*. (Trabajo de Grado, Universidad de la Salle). https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/132

- Saldarriaga, J. (2021). *Hidráulica de tuberías*. Marcombo.
- Sandoval, M. E., y Parrado, G. A. (2018). *Optimización del diseño hidráulico del acueducto veredal del alto del ramo de municipio de Chipaque Cundinamarca*. (Trabajo de Grado, Universidad Católica de Colombia) <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/8bb2ec50-83fc-4940-b693-bb9c728c6211>
- Sarmiento-Huertas, L. S. y Silva-Díaz, R. (2017). *Modelación y optimización de la red de acueducto urbano del municipio de Tibaná-Boyacá*. (Trabajo de Grado, Universidad Católica de Colombia). <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/15487>
- Unidad de Servicios Públicos Tuta. (2008). *Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado*. Alcaldía Municipal de Tuta.
- Unidad de Servicios Públicos Tuta. (2008). *Programa de Uso Eficiente y Ahorro de Agua*. Alcaldía Municipal de Tuta.
- Varela-Pineda, I. C. (2018). *Diagnóstico, evaluación y propuesta de mejora del sistema de acueducto del municipio de Apulo, Cundinamarca*. (Trabajo de Grado, Universidad Católica de Colombia). <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/ca5e16f5-2520-4244-9d39-a41a786a39e5>
- Vélez Arcila, L. C., Montes Bermúdez, D., Andrés David, C. L., Orlando, N. M., y Alberto, D. (2014). *Diagnóstico técnico del acueducto comunitario de San Fernando del municipio de Dosquebradas*. (Trabajo de Grado, Universidad Libre de Colombia). <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/17061/DIAGN%20T%20COMUNITARIO%20DE%20SAN%20FERNANDO%20DEL%20MUNICIPIO%20DE%20DOSQUEBRADA%20COMPLETO%20%284%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>