

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA OPERATIVA DE LOS FILTROS RÁPIDOS EN LA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTAP) DE AGUACHICA- CESAR

ELIS FRANCISCO FUENTES RODRÍGUEZ

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR-SECCIONAL AGUACHICA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
AGUACHICA CESAR

2025

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA OPERATIVA DE LOS FILTROS RÁPIDOS EN LA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTAP) DE AGUACHICA- CESAR

PRÁCTICA ACADÉMICA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL Y
SANITARIO

ELIS FRANCISCO FUENTES RODRÍGUEZ

DIRECTOR

Ing. BRAYAN ALEXIS PARRA OROBIO, MSc, PhD

CO DIRECTOR

Ing. PABLO ALBERTO HERRERA, Esp

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
SANEAMIENTO BÁSICO

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR–SECCIONAL AGUACHICA
FACULTAD INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
AGUACHICA CESAR

2025

NOTA DE APROBACIÓN

El trabajo de grado de Elis Francisco Fuentes Rodríguez, titulado “*Evaluación de la eficiencia operativa de los filtros rápidos en la planta de tratamiento de agua potable (ptap) de Aguachica Cesar*”, ha sido aprobado por los jurados, quien no se hace responsable de su contenido, pero lo ha encontrado correcto en su calidad y en su forma de presentación por lo que en fe de lo cual firman.

LUIS HERNANDO MONTOYA

ARMENTA

EVALUADOR 1

YENY PAOLA CASALLAS ZAPATA

EVALUADOR 2

BRAYAN ALEXIS PARRA OROBIO

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

PABLO ALBERTO HERRERA

CODIRECTOR DEL TRABAJO DE

GRADO

DEDICATORIA

Primeramente, a DIOS por brindarme la oportunidad de cumplir tan maravilloso sueño y ser fiel a su palabra, a mi madre Gilma Rodríguez por ser ese motor que me impulsa a seguir luchando cada día, a Alba Estrada por haber sido ese pilar que me sostuvo en este proceso, a mis amigos Camilo Guerrero, William Solera y Jaime García que jugaron un papel fundamental en mi formación como profesional. Gracias por ese apoyo incondicional y por último a mi 911 por haber creído en mí.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica y cada uno de los docentes por sembrar aprendizajes y conocimientos a lo largo de la carrera.

Al docente Brayan Alexis Parra Orobio, por tenerme paciencia y aportar tanto conocimiento a mi proceso, al ingeniero y docente Pablo Alberto Herrera por formar parte de esta magnífica experiencia, a todos y cada uno de mis compañeros que de una u otra forma hicieron parte de este proceso, gracias por compartir tantos momentos que de seguro no olvidaré nunca.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE ANEXOS.....	X
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
1. INTRODUCCIÓN	14
2. INFORMACIÓN DE LA EMPRESA	16
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
4. JUSTIFICACIÓN	19
5. OBJETIVOS	20
5.1 OBJETIVO GENERAL	20
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
6. MARCO TEÓRICO.....	21
7. MARCO LEGAL.....	24
8. ESTADO DEL ARTE.....	27
9. METODOLOGÍA.....	30
9.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	30
9.2 DESARROLLO METODOLÓGICO	31
9.2.1 Tipo de investigación.....	31
9.2.2 Población.....	32
9.2.3 Muestra	32
9.2.4 Metodología para la recolección y análisis de muestras	32
9.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS	35
10. RESULTADOS Y ANÁLISIS	37
10.1 ANÁLISIS CUALITATIVO Y DIAGNÓSTICO	37
10.2 ANÁLISIS DE PRUEBAS REALIZADAS Y EFICIENCIA EN LA PTAP.....	44
10.3 PROPUESTA DE MEJORAMIENTO EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LOS FILTROS RÁPIDOS.....	56
11. CONCLUSIONES	58
12. RECOMENDACIONES.....	59

13.	OTRAS ACTIVIDADES ASOCIADAS A LA PRÁCTICA.....	60
14.	BIBLIOGRAFÍA	62
15.	ANEXOS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la PTAP del Municipio de Aguachica, Cesar.....	31
Figura 2. Comportamiento de la turbiedad (UNT). Período I, II y III.....	43
Figura 3. Determinación del tiempo óptimo de lavado de un filtro.....	46
Figura 4. Determinación de la calidad del filtrado inicial	48
Figura 5. Determinación de la expansión del lecho filtrante	50
Figura 6. Correlación agua sedimentada vs agua filtrada	52
Figura 7. Consumo Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$ año 2023 - PTAP	54
Figura 8. Evidencia fotográfica recolección de muestras, prueba determinación del tiempo óptimo de lavado de un filtro	66
Figura 9. Evidencia Fotográfica, Recolección y Análisis de Muestras, Prueba Calidad del Filtrado Inicial.....	66
Figura 10. Prueba de porcentaje de expansión	67
Figura 11. Labores de mantenimiento en la PTAR vía Puerto Mosquito y Lagunas de Oxidación de Jerusalén.....	68
Figura 12. Manejo de archivos y base de datos de la PTAR vía Puerto Mosquito.....	68
Figura 13. Acompañamiento Corpocesar, toma de coordenadas en los caños El Cristo y Pital	69
Figura 14. Toma de coordenadas, vertimientos sobre los caños El Cristo y Pital.....	69
Figura 15. Inventario PTAR vía Puerto Mosquito.....	70
Figura 16. Actualización de las bitácoras y registros de operación de la PTAR vía Puerto Mosquito	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Marco legal	24
Tabla 2. Comportamiento de la turbiedad en los períodos I, II y III	39
Tabla 3. Tiempo de proceso de lavado	45
Tabla 4. Calidad del filtrado inicial	47
Tabla 5. Expansión del Lecho Filtrante	50
Tabla 6. Correlación Agua Sedimentada vs Agua Filtrada.....	51
Tabla 7. Consumo Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$ año 2023 PTAP	53
Tabla 8. Seguimiento Fase de Operación.....	56
Tabla 9. Seguimiento Fase de Mantenimiento.....	57
Tabla 10. Actividades Asociadas a la Práctica	60

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Cálculo de la tasa de filtración	64
Anexo 2. Evidencias fotográficas	64

GLOSARIO

Agua potable: es agua que cumple con los requisitos de calidad para ser segura para el consumo humano, es decir, agua que no contiene sustancias nocivas o peligrosas para la salud en concentraciones superiores a las establecidas por las autoridades de salud pública (Organización Mundial de la Salud, 2019).

Evaluación: es un proceso que busca determinar el valor o mérito de algo, ya sea un programa, un proyecto, una política o una intervención, mediante la recopilación y análisis de datos y la emisión de juicios informados (Stufflebeam & Shinkfield, 2007).

Filtración: es un proceso físico que implica la separación de partículas suspendidas o coloidales de un fluido mediante la utilización de un filtro que presenta una resistencia selectiva al paso de las partículas (Metcalf & Eddy, 2018).

Indicador: es una variable o medida que se utiliza para evaluar o medir el logro de un objetivo, meta o resultado específico, y que proporciona información sobre el progreso o desempeño de un sistema, programa o proceso (Organización de las Naciones Unidas, 2019).

Mantenimiento: es el conjunto de actividades y tareas destinadas a conservar y reparar los activos, equipos y sistemas para mantener su funcionamiento óptimo, prevenir fallas y prolongar su vida útil (Association for Maintenance Professionals, 2019).

Muestra: es un subconjunto representativo de una población o universo, seleccionado mediante métodos estadísticos para estimar características o parámetros de la población (American Statistical Association, 2019).

Parámetro: es una cantidad que se utiliza para describir una propiedad de una distribución de probabilidad o una relación entre variables, y que se estima mediante métodos estadísticos (Cassella, g., & Berger, r. L., 2002).

Turbiedad: es una medida de la cantidad de partículas suspendidas en el agua que pueden afectar su claridad y transparencia, y que puede ser utilizada como indicador de la calidad del agua (Organización Mundial de la Salud, 2019).

RESUMEN

Una planta de tratamiento de agua potable es un conjunto de unidades convenientemente dispuestas y en una sucesión adecuada para obtener agua de calidad garantizada y apta para el consumo humano. La producción de agua clara y cristalina es prerequisite para el suministro de agua segura y requiere de la filtración. La filtración es un proceso físico en el que se hace pasar una mezcla sólido-fluido por un medio relativamente poroso, donde se atrapan los sólidos y se deja pasar el fluido. Si se quiere que el agua tenga una calidad satisfactoria, entonces hay que incluir dentro del proceso el uso de un filtro. Se encuentran los filtros rápidos de arena cuyas partes principales son: cámara del filtrado (tanque), medio filtrante (arena), soporte de grava, sistema de drenaje y canaletas de lavado.

En la planta de tratamiento de agua potable de Aguachica, la filtración remueve el material suspendido, medido en la práctica como turbiedad, compuesto de floculo, suelo, metales oxidados y microorganismos. El aporte de la práctica fue “Evaluar la eficiencia operativa de los filtros rápidos en la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) de Aguachica Cesar”; Se realizó un estudio en la PTAP, ubicada en Aguachica, Cesar, que abastece agua a la población local. Se tomaron muestras, se recolectaron datos y se hizo seguimiento a la turbiedad para poder evaluar las unidades de filtración, la tasa de filtración, la calidad del filtrado inicial y la expansión del lecho filtrante.

Se obtuvo como resultados los siguientes aspectos: La tasa de filtración no cumple con la normatividad colombiana ya que se encontró una tasa de $300,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ mientras que la que se exige debe estar entre $180\text{-}250 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$. No obstante, la calidad del filtrado inicial es favorable, pero la expansión de los lechos filtrantes es extremadamente alta y llegan incluso al 100%. Aunado a lo anterior, los filtros rápidos de la PTAP de Aguachica presentan un estado regular. Aunque la calidad del filtrado inicial es buena, la tasa de filtración y la expansión del lecho filtrante son problemáticas.

Palabras claves: Agua potable, evaluación filtros rápidos, filtración, lecho filtrante, muestra, parámetros, tratamiento, turbiedad.

1. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua potable es fundamental para la salud y bienestar de la población. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que cada año, más de 3,4 millones de personas mueren debido a enfermedades relacionadas con el agua, lo que subraya la importancia de garantizar la calidad del agua para consumo humano (Organización Mundial de la Salud, 2021).

La planta de tratamiento de agua potable (PTAP) juega un papel crucial en la eliminación de contaminantes y patógenos presentes en el agua cruda, garantizando la calidad del agua para consumo humano. Dentro de la PTAP, los filtros rápidos son una etapa clave en el proceso de tratamiento, ya que eliminan partículas suspendidas y sedimentables que pueden afectar la calidad del agua (Jaramillo Rendón, 2024).

Los filtros rápidos son diseñados para operar a altas tasas de filtración, lo que permite tratar grandes volúmenes de agua de manera eficiente. Sin embargo, la eficiencia de los filtros rápidos puede verse afectada por factores como: i) La calidad del agua cruda, ii) La tasa de filtración, iii) El mantenimiento y operación de los filtros y iv) la edad y estado de los filtros (Solsona & Méndez, 2002).

En la actualidad, se evidencia que la planta de tratamiento de agua potable de Aguachica, Cesar, no tiene estudios recientes que detallen la optimización de la planta; en el mismo orden de ideas, no cuenta con estudios de eficiencia operativa y el último registro encontrado corresponde al año 2016. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar la eficiencia operativa de los filtros rápidos en la PTAP de Aguachica, Cesar, identificando oportunidades de mejora y recomendaciones para optimizar su funcionamiento. Este estudio se centró en: la evaluación de la tasa de filtración; la calidad del filtrado inicial; la expansión del lecho filtrante; la correlación entre la turbiedad del agua sedimentada y filtrada.

La evaluación de la eficiencia de los filtros rápidos en la PTAP de Aguachica, Cesar, contribuirá a: Garantizar la calidad del agua potable para la población, Reducir los riesgos para la salud

pública, Optimizar el funcionamiento de la PTAP, Identificar oportunidades de mejora y recomendaciones para futuras intervenciones.

Este estudio se desarrolló mediante un enfoque metodológico que combina la revisión de la literatura, la observación directa y la recopilación de datos en la PTAP de Aguachica, Cesar.

2. INFORMACIÓN DE LA EMPRESA

La Empresa de Servicios Públicos de Aguachica ESPA E.S.P.; se dedica a la organización y prestación de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado en el municipio, posee una planta de tratamiento de agua potable, la cual se encuentra ubicada a 250,3 m.s.n.m.; esta es de tipo convencional y fue puesta en marcha en el año 1983. La empresa cuenta con un organigrama el cual está compuesto principalmente por una junta directiva en cabeza del señor Gerente, seguido de un control interno, un personal distribuido de la siguiente manera: asistente de salud ocupacional y recursos humanos, secretaria, el mensajero, servicios generales, celadores y conductores.

La empresa está organizada en dependencias denominadas Departamentos dentro de los que se encuentra el departamento operativo que está a cargo de un profesional universitario operativo, desde aquí se lideran todas las funciones operativas de la compañía, dentro de este departamento encontramos una subdivisión que corresponde al departamento ambiental, desde aquí se coordinan todos los procesos ambientales, este grupo está compuesto por un profesional universitario ambientalista, un químico, operadores de planta y ayudantes de plantas; y otra subdivisión la cual está conformada por el inspector de redes, sectorizador, plomeros y operadores de lagunas de oxidación.

El anterior departamento fue donde se desarrollaron las practicas, ya que es donde se encuentra todo lo relacionado con la parte ambiental y sanitaria respectivamente.

En ese orden de idea la empresa cuenta con los departamentos administrativos tales como: departamento de sistemas, analista de facturación y cartera, analista presupuestal y tesorería, almacén y el departamento comercial, el cual tiene unas dependencias llamadas técnico comercial y técnico PQR.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Aguachica la planta de tratamiento de agua potable PTAP (módulo antiguo), está ubicada a 250,3 m.s.n.m., es de tipo convencional y fue puesta en marcha en el año 1983. La planta trabaja las 24 horas del día y está conformada por todos los procesos de tratamiento convencionales (mezcla rápida, canal de distribución de agua cruda a un sistema de floculación tipo hidráulico horizontal con 6 tramos, tres módulos de sedimentación, 6 baterías de filtración de tasa declinante ascendente y desinfección). Anteriormente en época de lluvias, cuando las aguas que ingresaban presentaban altos niveles de turbiedad, se detenía la planta, ya que no se contaba con el mecanismo para tratar aguas con esa carga tan elevada de sólidos; es así que, se construyó una cámara de quietamiento, una canaleta Parshall, un canal de conducción de agua cruda hasta tres módulos de floculadores tipo Alabama con 12 cámaras cada uno, tres módulos de sedimentación, 4 baterías de filtración de tasa declinante ascendente (Findeter, 2016).

Sin embargo, hasta la fecha, la PTAP no cuenta con estudios recientes que detallen la optimización del acueducto. Aunque se han realizado investigaciones en el pasado, el último registro relevante encontrado corresponde al año 2016. Además, no se han llevado a cabo estudios de eficiencia operativa recientes que permitan evaluar y mejorar el funcionamiento actual del sistema. Esta falta de datos actualizados y análisis detallados dificulta la implementación de mejoras y la optimización del acueducto, lo que podría resultar en ineficiencias operativas y una gestión menos efectiva del recurso hídrico (Superservicios, 2016).

La planta cuenta con dos secciones de filtración compuesta por 10 filtros rápidos de lecho mixto compuestos por (Grava, arena y antracita) con un área total de filtrado de 130,82 m². Todos los filtros tienen grava de diferente granulometría, las cuales sirven como capas de soporte y de transición, tanto para mejorar la distribución del agua durante el proceso de lavado como también para evitar la obstrucción de las ranuras por el material filtrante que está compuesto por una capa de arena de 20 cm, y 48 cm de antracita, respectivamente. Estas unidades de filtración no han sido reemplazadas desde el año 2008, es decir, que el lecho filtrante tiene alrededor de 17 años en uso y en la actualidad se desconoce las condiciones operativas de los mismos.

Pregunta de investigación: ¿La eficiencia de los filtros del Sistema de Tratamiento de Agua Potable de la empresa de servicios públicos de Aguachica ESPA ESP., da cumplimiento a la normatividad ambiental vigente para el filtrado de agua para consumo humano?

3.1 HIPÓTESIS

3.1.1 Positiva

¿La eficacia de los filtros del sistema de tratamiento de agua potable de la Empresa de Servicios Públicos de Aguachica-ESPA E.S.P., cumple con los valores máximos permisibles según la normatividad ambiental vigente?

3.1.2 Negativa

¿La eficacia de los filtros del sistema de tratamiento de agua potable de la Empresa de Servicios Públicos de Aguachica-ESPA E.S.P., no cumple con los valores máximos permisibles según la normatividad ambiental vigente?

4. JUSTIFICACIÓN

La eficiencia operativa de los filtros rápidos en plantas de tratamiento de agua potable es un aspecto crucial para garantizar la calidad y disponibilidad del recurso hídrico. En la PTAP de Aguachica, Cesar, no se han realizado estudios recientes que evalúen el desempeño y optimización de estos filtros, lo que representa una oportunidad significativa para mejorar el funcionamiento del sistema.

La realización de este trabajo tiene como objetivo principal contribuir al conocimiento y desarrollo de mejores prácticas operativas en la PTAP de Aguachica. Al evaluar la eficiencia operativa de los filtros rápidos, se busca identificar posibles áreas de mejora, implementar soluciones innovadoras y garantizar un suministro de agua potable que cumpla con los estándares de calidad requeridos.

Este trabajo no solo beneficiará directamente a la PTAP de Aguachica al proporcionar datos y análisis actualizados, sino que también servirá como referencia para otras plantas de tratamiento de agua en la región y el país. La implementación de las recomendaciones derivadas de este estudio podrá contribuir a la optimización de procesos, reducción de costos operativos y mejoramiento de la gestión del recurso hídrico en contextos similares.

La relevancia y pertinencia de este trabajo se fundamentan en la creciente demanda de soluciones eficientes y sostenibles para el tratamiento de agua potable, así como en la necesidad de contar con sistemas de operación que garanticen la calidad del agua suministrada a la población. En este sentido, la evaluación de la eficiencia operativa de los filtros rápidos constituye una contribución valiosa y necesaria para el sector.

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia operativa de los filtros rápidos en la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) de Aguachica Cesar.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer el estado actual de los filtros rápidos en la PTAP de Aguachica, identificando posibles deficiencias o áreas de mejora en su operación y mantenimiento.
- Analizar la eficiencia operativa de los filtros rápidos mediante la realización de pruebas físicas que permitan determinar su desempeño y capacidad para cumplir con los estándares de calidad del agua potable.
- Proponer alternativas de mejoramiento para la optimización de la operación de los filtros rápidos que aseguren su eficiencia y sostenibilidad en el tiempo.

6. MARCO TEÓRICO

La producción de agua clara y cristalina es prerequisite para el suministro de agua segura y requiere de la filtración. Aunque cerca del 90% de la turbiedad y el color son removidos por la coagulación y la sedimentación, una cierta cantidad de flóculo pasa al tanque de sedimentación y requiere su remoción. Por ello, para lograr la clarificación final se usa la filtración a través de medios porosos; generalmente dichos medios son grava o arena y antracita (Froylan, 2016).

La filtración es un proceso físico en el que se hace pasar una mezcla sólido-fluido por un medio relativamente poroso, en donde se atrapan los sólidos y se deja pasar el fluido. Si se quiere que el agua tenga una calidad satisfactoria, entonces hay que incluir dentro del proceso el uso de un filtro. Existen diferentes tipos de filtros en función de, por ejemplo, la materia que se quiere separar, el mecanismo de retención, el tipo de flujo, la velocidad de filtración, etc. Dentro de estos últimos, se encuentran los filtros rápidos de arena cuyas partes principales son: cámara del filtrado (tanque), medio filtrante (arena), soporte de grava, sistema de drenaje y canaletas de lavado (Marco & Spuhler, 2018).

El objetivo básico de la filtración es separar las partículas y microorganismos objetables que no han quedado retenidos en los procesos de coagulación y sedimentación. En consecuencia, el trabajo que los filtros desempeñan depende directamente de la mayor o menor eficiencia de los procesos preparatorios (Reyes, 2004).

La filtración puede efectuarse de muchas formas: con baja carga superficial (filtros lentos) o con alta carga superficial (filtros rápidos); en medios porosos (pastas arcillosas, papel de filtro) o en medios granulares (arena, antracita, granate combinados); con flujo ascendente de abajo hacia arriba o descendente de arriba hacia abajo, así como mixto (parte ascendente y parte descendente). Por último, el filtro puede trabajar a presión o por gravedad, según sea la magnitud de la carga hidráulica que exista sobre el lecho filtrante (Reyes, 2004).

Según el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (2004), los factores que determinan la eficiencia de filtración y su relación con la eficiencia de funcionamiento del filtro:

- Tipo de suspensión: Las características físicas y químicas de la suspensión afectan el comportamiento de los filtros, pudiendo llegar a ser más importante que el tamaño y clase de lecho filtrante:
 - ❖ Tamaño de partículas: Existe un tamaño crítico de partículas ($1\ \mu\text{m}$) que genera menos contacto entre las partículas suspendidas, dejando pasar la turbiedad, por eso es importante el proceso de coagulación y floculación, para mejorar la eficiencia del filtro.
 - ❖ Propiedad del agua afluyente: la existencia de algas en el afluyente influye en la formación de curvas de pérdida de carga más acentuada, disminuyendo la eficiencia del filtro, comparado con casos en que el afluyente solo posee partículas coaguladas de arcilla o sílice.
 - ❖ Dureza del flóculo: Los flóculos débiles tienden a fragmentarse y penetrar el medio, aumentando la turbiedad. En cambio, los flóculos resistentes no se fragmentan, pero producen una pérdida de carga mayor.
 - ❖ Temperatura: A menor temperatura, es más lenta la remoción del flóculo porque disminuye la energía termodinámica de las partículas, existiendo menor retención en el filtro por mecanismo de difusión.

- Lecho filtrante: Las características del medio filtrante que influyen en la eficiencia de filtración, son: tipo de medio, granulometría y peso específico del material filtrante y espesor de la capa filtrante. Estas características deben seleccionarse de acuerdo con la calidad que se desea para el agua filtrada, los costos, la facilidad de adquisición de los materiales, y la existencia de personal calificado para operar las instalaciones. Adicionalmente, debe tenerse en cuenta la duración de la carrera de filtración (capacidad de retención) y la facilidad de lavado.

- Tasa de filtración: A tasas muy altas (mayores a 20 m/h), disminuye eficiencia del filtro.

- Carrera de filtración: La duración de la carrera dependerá de la carga hidráulica disponible del filtro, cuando estas son mayores, las carreras de filtración resultan más largas. La duración de la carrera es típicamente de 24 a 60 horas. Las carreras más largas permiten ahorrar en el agua de lavado, pero alientan el crecimiento bacteriano en el lecho filtrante. Por lo tanto, es deseable restringir los largos máximos de funcionamiento a 48 horas en temperaturas de agua tibia y a 60 horas en temperaturas de agua fría.
- Lavado: Cualquier aumento apreciable en la frecuencia de lavado por encima del valor de diseño reduciría la producción por debajo del nivel de diseño.

7. MARCO LEGAL

La tabla 1 resume la descripción de la normativa para efectos de este trabajo, al igual que se explica de qué manera se aplica en el mismo.

Tabla 1. Normatividad

Norma	Alcance
Ley 142 de 1994	Ley de Servicios Públicos Domiciliarios en Colombia, en la que se establecen las normas para la prestación de servicios públicos, incluyendo el suministro de agua potable cuya verificación estará sujeta a la comprobación de la idoneidad técnica por parte de las autoridades competentes.
Ley 373 de 1997	Ley de Agua en Colombia, en la que se establecen los lineamientos para la protección, conservación, uso sostenible y manejo integral de los recursos hídricos en el país. Esta ley promueve el uso eficiente y ahorro del agua, relevante para la eficiencia operativa de los filtros rápidos.
Ley 1333 de 2009	Establece el régimen sancionatorio en materia ambiental relevantes para la gestión de la PTAP, lo que implica que cualquier incumplimiento en la operación de sistemas de filtración podría conllevar sanciones.
Decreto 1575 de 2007	Por el cual se establece el Sistema Único de Acreditación en Salud y se dictan otras disposiciones, en relación con los requisitos de calidad y seguridad de los sistemas de tratamiento de agua potable aplicable a la PTAP. Este decreto establece el sistema para la protección y control de la calidad del agua para disminuir los riesgos para la salud. Esta ley aplica para todas las personas que distribuyan agua de consumo humano, direcciones territoriales de salud y usuarios.
Decreto 4741 de 2005	Por el cual se reglamenta la calidad del agua y se dictan otras disposiciones sobre el control y vigilancia de la calidad del agua para consumo humano. Además, regula la gestión de residuos peligrosos, importante para el manejo de productos químicos en la PTAP.
Resolución 2115 de 2007	Por la cual se establecen los parámetros y valores límite permisibles de calidad de agua potable para consumo humano importantes para la evaluación de los filtros rápidos y se dictan otras disposiciones relacionadas con los sistemas de tratamiento.

<p>Reglamento Técnico sobre el Sistema General de Seguridad Industrial en el uso de productos químicos en el tratamiento de agua (Resolución 003023 de 2014)</p>	<p>Reglamenta la seguridad industrial en el uso de productos químicos. Regula el uso de productos químicos que pueden ser parte del proceso de filtración.</p>
<p>Resolución 844 de 2018</p>	<p>La Resolución 844 de 2018 tiene como objeto establecer el procedimiento para la evaluación y gestión de riesgos en los sistemas de abastecimiento de agua potable y saneamiento básico en Colombia. Su alcance abarca todos los sistemas de acueducto y alcantarillado, y busca garantizar la calidad del agua, prevenir riesgos a la salud pública y promover el uso sostenible de los recursos hídricos. La resolución también incluye lineamientos para la identificación, evaluación y control de riesgos, así como la implementación de planes de acción y mejora continua. Define parámetros y valores máximos de calidad del agua potable a ser mantenidos en la PTAP.</p>
<p>Resolución 1096 de 17 de noviembre de 2000</p>	<p>Se adopta el RAS (Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico). Señala los requisitos técnicos que deben cumplir los diseños, las obras y procedimientos que pertenecen al sector del agua potable y saneamiento básico, así como sus actividades. Estos tienen que ver con los procesos que involucran la conceptualización, diseño, construcción, supervisión técnica, puesta en marcha, operación y el mantenimiento de los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo en Colombia esencial para mejoras en la eficiencia de los filtros para garantizar el funcionamiento adecuado, de calidad y sostenibilidad.</p>
<p>Resolución 0799 09 dic 2021 “por la cual se modifica la resolución 0330 de 2017”</p>	<p>Cuyo objeto es regular el cumplimiento de los requisitos de calidad del agua potable en Colombia. Su alcance se extiende a las empresas de servicios públicos de acueducto, estableciendo directrices sobre el monitoreo, control y manejo de la calidad del agua con relevancia para la operatividad de la PTAP. La resolución busca fortalecer los procesos de gestión y garantizar que el agua potable cumpla con los estándares establecidos para proteger la salud pública. Además, se incluyen disposiciones sobre la presentación de informes y la comunicación de resultados a las autoridades competentes. El alcance de esta resolución define especificaciones técnicas que deben cumplir los sistemas de filtración para asegurar su efectividad en la eliminación de contaminantes.</p>

Norma	Técnica	Esta norma establece los requisitos, métodos de ensayo y directrices técnicas para la implementación de sistemas de filtración en plantas de tratamiento de agua potable útiles para evaluar y mejorar la eficiencia.
--------------	----------------	---

Fuente: Autor, 2024.

8. ESTADO DEL ARTE

Los sistemas de filtración en plantas de tratamiento de agua potable juegan un papel crucial en la eliminación de partículas, sólidos suspendidos, microorganismos y compuestos químicos del agua para asegurar su potabilidad. En los últimos años, se ha observado un avance significativo en el desarrollo de investigaciones relacionadas con tecnologías de filtración más eficientes y sostenibles. A modo de ejemplo, se encuentra la investigación en Perú (Vargas, 2004). Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. El texto está orientado principalmente al personal profesional que trabaja en las plantas de tratamiento de agua para consumo humano. El manual sintetiza los conceptos teóricos más recientes sobre la calidad del agua de fuentes superficiales y los procesos utilizados en su purificación. Se busca proporcionar una explicación profunda y accesible de los complejos procesos de tratamiento, con el objetivo de que profesionales de diversas formaciones (ingenieros sanitarios, civiles, químicos, biólogos, geógrafos, arquitectos, entre otros) puedan comprender el tema y, a través del estudio y dedicación, convertirse en especialistas en el área.

El texto proporciona información detallada sobre varios aspectos de los sistemas de filtración, incluyendo diferentes tipos de filtración, como la filtración ascendente, descendente y ascendente-descendente, así como los métodos de control operacional, que incluyen tasas constantes y niveles variables, tasas y niveles constantes, y tasas declinantes. Así mismo, se describen los diferentes tipos de filtros, como los filtros de lecho simple y múltiple, así como la filtración a presión. Esto incluye una discusión sobre las características hidráulicas, la tasa de filtración, la carga hidráulica disponible y la calidad del efluente. También se mencionan las plantas de filtración rápida y lenta, así como la clasificación de las plantas de filtración rápida según el tipo de tecnología utilizada, incluyendo sistemas convencionales y de alta tasa.

A medida que avanza la tecnología, esta va siendo aprovechada en todos los aspectos de la vida de los seres humanos y se profundiza en el estudio de hacer más y mejores descubrimientos para su beneficio. Esto atraviesa hasta nuevos sistemas para mejorar la calidad del agua que se consume. Este hecho se comprueba en el trabajo “Planta de tratamiento de agua potable” (Araque Arellano, 2022), realizado en Ecuador. Centra su trabajo en el diseño y construcción de plantas de

tratamiento de agua potable, abordando aspectos técnicos y normativos necesarios para garantizar la calidad del agua destinada al consumo humano. Se incluyen objetivos específicos como la remoción de elementos peligrosos, la corrección de características estéticas del agua y la optimización de costos en la construcción y mantenimiento de las plantas. Además, se discuten los procesos de tratamiento que deben implementarse, como aireación, coagulación, floculación, sedimentación, filtración y corrección de dureza, así como la importancia de considerar el volumen de emergencia y las normativas técnicas para el diseño de reservorios.

El documento menciona que la filtración es un proceso clave en las plantas de tratamiento de agua potable, utilizado para remover partículas coloidales y suspendidas en un medio acuoso mediante un medio poroso. Este proceso se ubica después de la coagulación y antes de la cloración en el tratamiento del agua. Se describen varios aspectos importantes sobre la filtración en el contexto general de tratamiento de agua y se pueden considerar algunas tendencias y tecnologías emergentes que están siendo exploradas y aplicadas en la filtración de agua como la filtración por membranas que incluye procesos como la microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, que utilizan membranas semipermeables para remover partículas, microorganismos y contaminantes del agua; Filtración de Carbono Activado que utiliza para eliminar compuestos orgánicos, cloro y otros contaminantes, mejorando el sabor y olor del agua. Las tecnologías de carbono activado pueden incluir filtros de carbón granular y sistemas de adsorción.

Igualmente, el documento menciona que se están desarrollando materiales filtrantes a nanoescala que pueden mejorar la eficiencia de remoción de contaminantes y aumentar la capacidad de retención de partículas; Sistemas de Filtración Biológica: Estos sistemas utilizan microorganismos para descomponer contaminantes en el agua, siendo una opción sostenible y efectiva para el tratamiento de aguas residuales y potables; Tecnologías de Filtración Inteligente: Estas incluyen sensores y sistemas automatizados que monitorean la calidad del agua y ajustan el proceso de filtración en tiempo real para maximizar la eficiencia. Finalmente, filtración por Gravedad y Sistemas de Filtración Rápida que se están optimizando para mejorar la eficiencia y reducir el consumo de energía, utilizando nuevos diseños y materiales. Este trabajo también resalta la influencia de factores naturales y antropogénicos en la calidad del agua y la necesidad de cumplir con estándares establecidos por organismos internacionales como la OMS y la OPS.

Ya desde un contexto nacional, cabe destacar que también se han llevado a cabo estudios que demuestran el avance no sólo en tecnología sino en conocimientos que ha logrado Colombia. El trabajo “Sistema De Tratamiento De Agua Para Consumo Humano En Pequeñas Comunidades” (González Reino y Pinedo Espitia, 2021), se centra en describir los sistemas de tratamiento de agua implementados en pequeñas comunidades, con el objetivo de garantizar que el agua sea apta para el consumo humano. Se aborda la revisión bibliográfica de parámetros de calidad del agua, así como la identificación de los sistemas de tratamiento utilizados y su relación costo-beneficio, para determinar cuál es más eficiente para la población. Además, se examinan las diferentes fuentes de recolección de agua y las enfermedades que pueden surgir por el consumo de agua sin tratamiento previo, abarcando información de varios países de América Latina, como Perú, Ecuador, México, Colombia y Venezuela, en un periodo de los últimos cinco años (2015-2020).

El documento menciona que existen varios sistemas de filtración utilizados en comunidades rurales, tales como filtros lentos de arena, filtros de velas cerámicas, filtros de membrana y ollas cerámicas. Se destaca que los filtros lentos de arena son un sistema sencillo y eficiente para el tratamiento de agua, con un costo bajo, lo que los hace ideales para zonas rurales. Sin embargo, se enfatiza que, para garantizar su buen funcionamiento y la efectiva desinfección a lo largo del tiempo, es necesario un adecuado mantenimiento y operación del sistema. Además, se reportan estudios que han evaluado la viabilidad de diferentes tecnologías de filtración en comunidades rurales, y se menciona un estudio específico realizado en Colombia que evaluó filtros de membrana y filtros de olla cerámica impregnada de plata coloidal, indicando que estos sistemas han sido operados durante cortos periodos de tiempo.

9. METODOLOGÍA

9.1 ÁREA DE ESTUDIO

La planta de tratamiento de agua potable PTAP del Municipio de Aguachica, cuya fuente abastecedora es la quebrada “Buturama” se encuentra ubicada en las siguientes coordenadas geográficas: 8°20'39.42” N – 73°35'72” O; a una altura de 250,3 m.s.n.m.; esta es de tipo convencional y fue puesta en marcha en el año 1983.

La planta está conformada por todos los procesos de tratamiento (mezcla rápida, canal de distribución de agua cruda a un sistema de floculación tipo hidráulico horizontal con 6 tramos, tres módulos de sedimentación, 6 baterías de filtración de tasa declinante ascendente y desinfección). La planta trabaja las 24 horas del día. Anteriormente en épocas de invierno cuando las aguas crudas que ingresaban eran muy turbias, se detenía la planta, ya que no se contaba con el mecanismo para tratar aguas con alta turbidez; es así como se construyó una cámara de aquietamiento, canaleta parshall, un canal de conducción de agua cruda hasta tres módulos de floculadores tipo Alabama con 12 cámaras cada uno, tres módulos de sedimentación, 4 baterías de filtración de tasa declinante ascendente (Findeter, 2016).

Es importante mencionar que la planta de tratamiento de agua potable ha sido objeto de inversión y mejora en los últimos años, con proyectos como la optimización y ampliación de la planta, financiados por el sistema general de regalías del municipio.

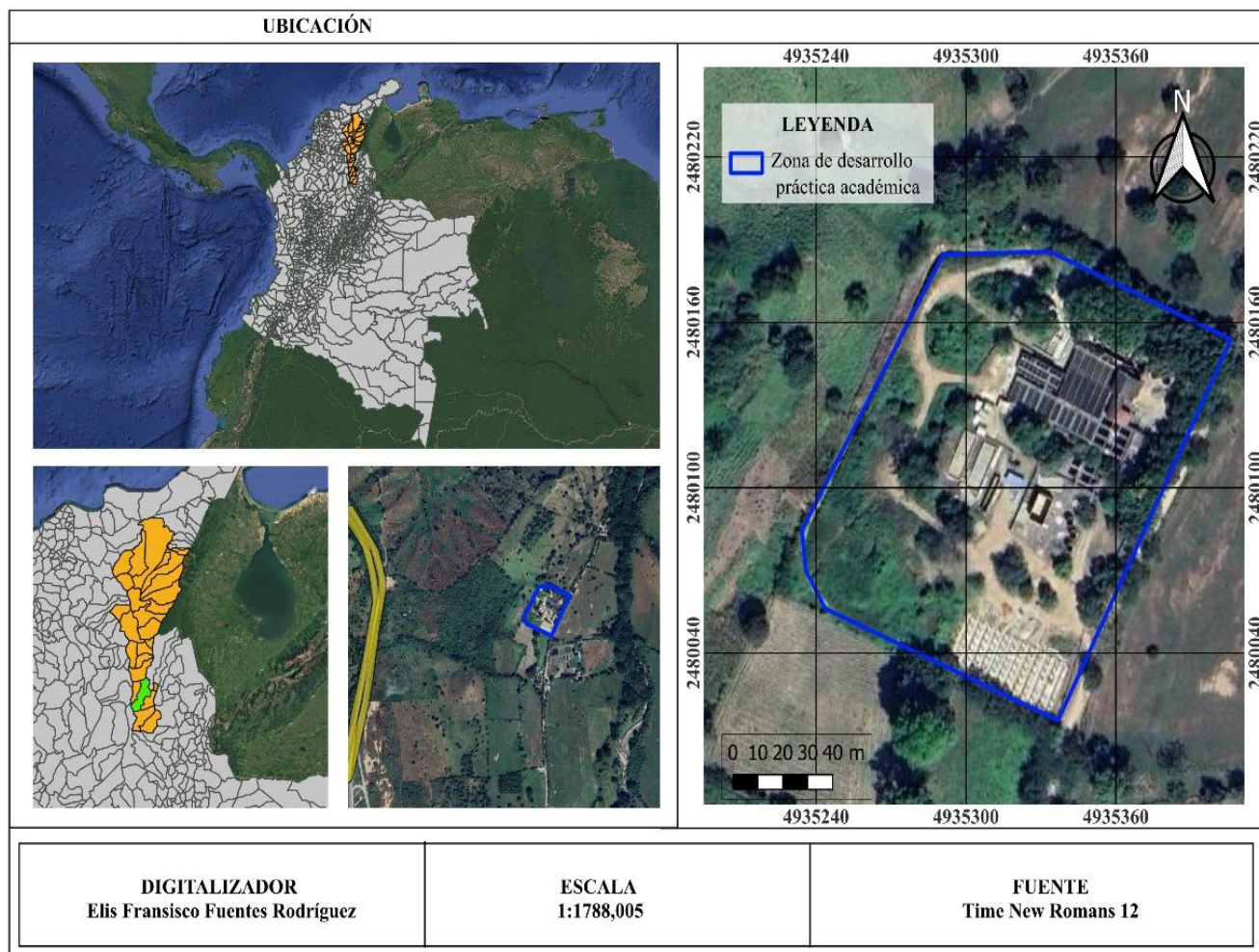


Figura 1. Ubicación geográfica de la PTAP del Municipio de Aguachica, Cesar.
Fuente: Autor, 2024.

9.2 DESARROLLO METODOLÓGICO

9.2.1 Tipo de investigación

Este proyecto corresponde a una investigación descriptiva, basado en un diseño no experimental, ya que los datos serán recolectados en un solo momento, directamente de la zona de estudio, tal como se dan en su contexto natural, sin manipular los datos obtenidos. De este modo, se podrá determinar la situación actual del lugar de estudio (Hernández Sampieri et al., 2006).

9.2.2 Población

La población de este proyecto abarca las diez (10) unidades de filtración del sistema de tratamiento de agua potable (STAP) existentes en la PTAP operada por la empresa de servicios públicos de Aguachica ESPA E.S.P.

9.2.3 Muestra

Las muestras seleccionadas para este proyecto fueron seis (6) unidades de filtración de manera aleatoria del sistema de tratamiento de agua potable ubicados en la PTAP.

9.2.4 Metodología para la recolección y análisis de muestras

El método propuesto para darle cumplimiento a los objetivos del plan de trabajo estuvo dividido por las siguientes fases:

➤ Fase 1: Revisión bibliográfica

Esta fase permitió obtener información y revisión en bases de datos en diferentes literaturas a nivel mundial orientada a los sistemas de filtración rápida en plantas de tratamiento de agua potable, dicha búsqueda se realizó en el mes 1 del periodo de prácticas, la búsqueda debe ser detallada y precisa; la cantidad de documentos revisados fueron 250 de los cuales 10 fueron los que se tuvieron en cuenta para tenerlos como referencia en el presente desarrollo de este trabajo.

Para la clasificación de dicha información se tuvieron en cuenta criterios de inclusión como documentos publicados a partir del año 2018, accediendo a bases de datos como Scopus®, ProQuest, Pubmed, Google Académico, entre otros. Mediante Tsauro hacer una búsqueda filtrada a partir de palabras claves como: “Filtración Rápida”, “Sistemas de Filtración”, “Tratamiento de Agua Potable”, “Eficiencia de Filtración” y “Normatividad”. Se excluyeron criterios como:

estudios que no proporcionaban información relevante e investigaciones con poca claridad en los diferentes sistemas de filtración.

En cuanto a la normativa vigente se consultó y revisó detalladamente el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento básico, RAS 2017; específicamente la sección 3, Tecnologías y procesos unitarios de tratamiento; Artículo 109 (Tipos y procesos unitarios de potabilización, tabla número 4 la cual hace referencia a las características físicas). El artículo 14 Filtración convencional, en la tabla número 10 (Características de filtración convencional) y la tabla número 11 (Rangos de tasa de filtración), artículo 115 Filtros de lecho profundos de alta tasa (filtración optimizada). Por otra parte, se consultó la Resolución 2115 de 2007, en su capítulo II Características físicas y químicas del agua para el consumo humano, en su cuadro número I el cual hace referencia a las características físicas, donde se consultó los valores máximos aceptables de: color aparente: el cual es de 15 UPC (Unidades de Platino Cobalto) y para la turbiedad: 2 UNT (Unidades Nefelométricas de turbiedad).

También se revisaron los manuales de procesos para la realización de actividades. Es necesario tener muy claro cada uno de los procesos que se deben realizar en el proceso de tratabilidad del agua.

➤ **Fase 2: Realización de pruebas que ayuden a determinar la eficiencia de los filtros**

En esta fase se buscó determinar la eficiencia de los filtros basado en los resultados obtenidos en las pruebas ejecutadas en la PTAP, es decir; calcular la tasa de filtración, mediante la cual se puede realizar seguimiento continuo a la turbiedad como una medida indirecta a la cantidad de partículas que pueden pasar las capas del lecho filtrante. Para conocer esta información se hace imperativo el cálculo de la tasa de filtración y a su vez conocer el caudal máximo para cada filtro y área total de las unidades de filtración de la PTAP. Estos cálculos se pueden consultar en el anexo 1.

El caudal de diseño, caudal medio diario, caudal máximo diario, son valores registrados en el informe realizado por Findeter; el caudal promedio de agua que ingresa a la PTAP esta valor fue tomado de las bitácoras que se llevan en la planta para el control de dicho ingreso de agua, mientras que para la tasa máxima de filtración y el factor de mayoración fueron datos suministrados según

lo establecido en el RAS 2021 y la población del municipio de Aguachica Cesar se consultó y se tomó este dato del DANE.

También se hizo un seguimiento diario por tres meses equivalente a 90 días, a algunas características físicas del agua como: la turbiedad del agua, para hacer seguimiento al comportamiento operativo de los filtros en este periodo de prácticas, dichos datos fueron digitados y sintetizados en una hoja de cálculo de Excel para analizar las diferentes características y comportamientos de estos conjuntos de datos, para los diferentes análisis estadísticos descriptivos.

En busca de establecer indicadores de eficiencia que ayuden a determinar las condiciones operativas de los filtros se midieron los siguientes parámetros: Seguimiento a la turbiedad como medida indirecta de la cantidad de partículas que pueden pasar a través del filtro; cálculo de la tasa de filtración aplicando la fórmula que se puede observar en el anexo 1; definición de la duración del proceso de lavado (Es de suma importancia determinar el tiempo óptimo de lavado de un filtro; para la realización de esta prueba el número mínimo de muestras recolectadas fueron 13, tomadas cada una con intervalos de 1 minuto entre cada muestra). Por tal razón, se recolectó los datos necesarios puntuales para determinar dicho tiempo, (los datos tenidos en cuenta fueron el tiempo en que se tomó cada muestra y la respectiva turbiedad).

Para esto se estableció realizar la prueba tomando agua directamente de la canaleta de filtrado en recipientes de 210 mL c/u para proceder a determinar la turbiedad y graficar e identificar dicho tiempo, en el laboratorio con ayuda de un turbidímetro se medirán estos parámetros como indicador.

Para determinar la calidad del filtrado inicial, (una vez se detiene el lavado del filtro y son abiertas las válvulas se procedió en recolectar muestras de agua filtrada en el canal de salida antes de que esta se mezcle con el agua procedentes de las demás unidades de filtración, dichas muestras serán tomadas una cada minuto una de otra hasta completar los primero 12 minutos de trabajo de la unidad.

Respecto a la expansión del lecho filtrante, Inicialmente se determinó la profundidad de las dos capas superficiales de los filtros, los cuales son la antracita y la arena; conociendo estos valores, se colocó una herramienta en la superficie del lecho filtrante y se da inicio al proceso de lavado.

El objetivo fue determinar el porcentaje de expansión el cual una vez finalice el lavado se retira la varilla cuidadosamente y poder observar hasta que altura encontramos área y antracita, teniendo identificada la distancia de mide y se aplica la siguiente formula medida cm (a) / profundidad de la arena y antracita (b) *100) este ejercicio se hizo con cada unidad de filtración y dichos valores serán digitalizados para proceder a realizar el respectivo análisis del mismo.

Para establecer una correlación entre la turbiedad del agua sedimentada y el agua filtrada, fue necesario tener recolectados datos de aproximadamente un año para que estos valores sean significativos, por tal razón se propuso trabajar con los datos del año 2023 contemplando los 12 meses de dicho año; con esta información en la base de datos fue establecida la respectiva correlación entre estas dos secciones del proceso de potabilización del agua en la PTAP; esta prueba nos ayudó a establecer la relación y comportamiento de la turbiedad.

➤ **Fase 3: Proponer una estrategia de mejoramiento en la operación y/o mantenimiento como alternativa para la optimización de la operación de los filtros**

Teniendo en cuenta las condiciones operativas de los filtros rápidos actualmente en la planta de tratamiento de agua potable de Aguachica se propone una estrategia de mejoramiento de operación y/o mantenimiento, la cual mediante la observación u realización de pruebas constantes ayudará a mantener la información actualizada sobre las condiciones en la cual se encuentra operando la planta.

Es de suma importancia mantener capacitados a los operarios de la planta ya que ellos son los encargados de vigilar el respectivo funcionamiento de la misma.

9.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS

En este periodo de prácticas se utilizó estadística descriptiva para el procesamiento y análisis de dicha información. Para obtener una mejor interpretación y comportamiento de la información

recolectada, se utilizó software como Excel y R Studio. Las ventajas de estos softwares es que permiten resumir grandes conjuntos de datos, ayudan a identificar patrones y tendencias, y pueden ser sensibles a valores atípicos

10.RESULTADOS Y ANÁLISIS

10.1 ANÁLISIS CUALITATIVO Y DIAGNÓSTICO

Para tener claridad de muchos aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de la ejecución de las actividades propuestas, se realizó una búsqueda exhaustiva de información que pudo ser crucial en este periodo de prácticas, haciendo uso de bases de datos y buscadores como Scopus®, ProQuest, Pubmed y Google Académico entre otros.

Donde se encontraron en total 252 artículos de interés, se encontraron 112 documentos al incluir palabras como “Filtración rápida”, 100 artículos con la palabra “tratamiento de agua potable” y 38 artículos con la palabra “Eficiencia de filtración “.

Para la clasificación de dicha información se tuvieron en cuenta criterios de inclusión como documentos publicados a partir del año 2018, donde fueron seleccionados 10 documentos en total. En cuanto a la normativa vigente se consultó y revisó detalladamente el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento básico, RAS 2021; específicamente la sección 3, Tecnologías y procesos unitarios de tratamiento; Artículo 109 (Tipos y procesos unitarios de potabilización, Tabla 2 la cual hace referencia a las características físicas). El artículo 14 Filtración convencional, en la tabla número 10 (Características de filtración convencional) y la tabla número 11 (Rangos de tasa de filtración), artículo 115 Filtros de lecho profundos de alta tasa (filtración optimizada).

Por otra parte, se consultó la Resolución 2115 de 2007, en su capítulo II Características físicas y químicas del agua para el consumo humano, en su cuadro número I el cual hace referencia a las características físicas, donde se consultó los valores máximos aceptables de: color aparente: el cual es de 15 UPC (Unidades de Platino Cobalto) y para la turbiedad: 2 UNT (Unidades Nefelométricas de turbiedad).

También se revisaron los manuales de procesos para la realización de actividades. Es necesario tener muy claro cada uno de los procesos que se deben realizar en el proceso de tratabilidad del agua.

Conjunto a lo anterior se realizaron varias visitas con la intención de hacer una inspección visual de la planta y los procesos de tratamiento de agua potable, en dicho recorrido guiado por los operarios de turno se lograron determinar posibles fallas en el sistema, las cuales se lograrán determinar con las futuras pruebas realizadas en la PTAP.

Dadas las condiciones actuales en la planta solo se realizó el monitoreo constante de la turbiedad como parámetro físico y caudal, en la base de datos se lleva el registro puntual del caudal de ingreso a la planta y la turbiedad, se mide este parámetro en 3 secciones del proceso del tratamiento del agua: Cruda, Sedimentada y tratada, manejando un caudal promedio de 339,64 L/s. El primer punto donde se tomó la muestra fue en el ingreso del recurso a la planta, por tanto, corresponde a agua cruda, la cual aún no se le ha aplicado Sulfato de Aluminio.

Con la información obtenida durante el periodo de prácticas se logró tabular el comportamiento de la turbiedad en estos tres puntos en tres diferentes períodos que fueron tenidos en cuenta. En la Tabla 2, se pueden apreciar los comportamientos de la turbiedad según los datos obtenidos en los periodos de práctica.

Tabla 2. Comportamiento de la turbiedad en los períodos I, II y III

Parámetro	Período I	Período II	Período III
Turbiedad (A. Cruda - UNT)			
Número de Datos	446	369	395
Límite Mínimo	1,13	1,43	0,95
Límite Máximo	4870	621	752
Promedios T	91,63	9,54	6,35
Desviación Estándar	289,05	49,12	41,08
Turbiedad (A. Sedimentada - UNT)			
Número de Datos	444	370	394
Límite Mínimo	1,46	0,40	0,66
Límite Máximo	122	7	7,84
Promedios T	5,69	2,94	1,97
Desviación Estándar	5,96	1,34	1,16
Turbiedad (A. Tratada - UNT)			
Número de Datos	444	370	395
Límite Mínimo	0,17	0,37	0,25
Límite Máximo	4	2	1,77
Promedios T	0,74	0,95	0,54
Desviación Estándar	0,42	0,39	0,22
Caudal (L/s)			
Número de Datos	444	370	395
Límite Mínimo	280	340	340
Límite Máximo	340	340	340
Promedios T	339,64	340	340
Desviación Estándar	4,44	0,00	0

Fuente: Autor, 2024.

Para el primer período en el primer punto, se obtuvo un registro de una turbiedad promedio de 91,63 UNT con una desviación estándar de 289,05. Se logra evidenciar turbiedades extremadamente altas, estas superan 4.800 UNT, estas altas turbiedades son producto de las lluvias que se presentaron en la parte alta de la quebrada; por tal razón, cuando los niveles de turbiedad son altos se suspende el servicio de potabilización en la planta como medida preventiva, ya que estas turbiedades pueden afectar fuertemente todos los procesos dentro de la planta.

La segunda muestra se tomó en la sección de los sedimentadores, en esta sección presenta un registro de 5,69 UNT, es evidente una disminución en los niveles de turbiedad teniendo en cuenta

las condiciones iniciales. Los datos obtenidos en este primer periodo muestran una disminución significativa de la turbiedad en relación al agua cruda, aunque en este periodo se presentaron varias lluvias, su comportamiento se mantuvieron estables a excepción dos picos, cuya turbiedad fueran altas en comparación del resto. Estos dos picos son exactamente los dos días de mayor lluvia en la cuenca, razón por la cual se suspendieron labores en la PTAP.

El tercer punto de referencia se trata del agua después del proceso de filtración y se denominó agua tratada, aquí al igual que los dos puntos de referencia anteriores se mide la turbiedad para observar detalladamente su comportamiento y eficiencia después de ser filtrada, las lluvias afectan la turbiedad significativamente. Razón por la cual se presentaron interrupciones en la prestación del servicio de agua potable en diferentes días, esto se debió a los altos niveles de turbiedad fue necesario suspender el servicio de agua en el municipio hasta que los niveles de turbiedad se estabilizaran. El tercer punto es en el agua tratada, después del proceso de cloración. En esta sección los niveles de turbiedad promedio son de 0,74 UNT, el cual se encuentra dentro del nivel aceptable según la Resolución 2115 de 2007; la cual establece un valor máximo aceptable de 2 UNT.

Se puede denotar un dato que esta por fuera del valor máximo permisible, según especificaciones del RAS 2021, el cual establece un máximo de 2 UNT, los demás datos se encuentran en un rango de 0,11 UNT como valor mínimo encontrado en este periodo y 1,85 UNT en algunos casos.

A diferencia del primer periodo de prácticas, el segundo contó con presencia de lluvias en diferentes días y que afecto directamente la calidad del agua manifestando una turbiedad extremadamente alta y suspensiones en el servicio, en el segundo periodo no se registraron lluvia y el comportamiento de la turbiedad fue estable excepto los últimos días que se incrementó la turbiedad por labores de limpieza realizadas en la parte alta de la quebrada. Según los datos recopilados en esta sección se tiene registro de una turbiedad promedio de 9,54 UNT, con una desviación estándar de 41,08.

La segunda muestra correspondió a la sección de los sedimentadores, en esta sección se obtuvo un registro de 2,94 UNT, con una desviación estándar de 1,16. Es notable, que este valor se encuentra

por fuera del valor máximo permisible según la resolución y el hecho de que la desviación estándar sea 1,16 sugiere que la turbidez presenta cierta variabilidad. Esto podría indicar que en ciertos momentos se detectan fluctuaciones en la calidad del agua, lo que podría requerir monitoreo adicional.

El tercer punto fue en el agua tratada, después del proceso de cloración. Con un promedio de 0,95 UNT y una desviación estándar de 0,22, la turbidez del agua se mantiene en niveles bajos y relativamente estables. Esto podría sugerir un buen control en los procesos de tratamiento de agua. Este nivel de turbidez está muy por debajo de los límites que se establecen en muchas normativas, lo cual es una señal de que el agua cumple con los estándares de calidad y es apta para consumo, aunque siempre dependerá de otros factores, como la presencia de microorganismos o contaminantes químicos.

El comportamiento de estos datos está relacionados directamente a una disminución a las lluvias en la parte alta de la quebrada, como resultado tenemos unos niveles excelentes de turbiedad del agua filtrada.

Ya para el tercer período, los datos revelaron unos registros notablemente cambiantes según los datos recopilados en la primera sección. El promedio de 6,35 UNT sugiere que la turbidez está fuera de los límites aceptables en términos de calidad para agua potable. Este nivel de turbidez indica que hay una mayor cantidad de partículas suspendidas en el agua, lo que puede afectar la claridad del agua y también puede ser un indicio de la presencia de contaminantes orgánicos o inorgánicos, lo que podría representar un riesgo para la salud si no se toman medidas.

La desviación estándar extremadamente alta de 41,08 UNT es un indicador de que hay grandes fluctuaciones, lo que implica que la turbidez es altamente inestable. Esta alta variabilidad puede significar que la turbidez está oscilando de manera significativa, lo cual podría estar relacionado con que, al inicio del periodo en estudio se presentaron fuertes lluvias.

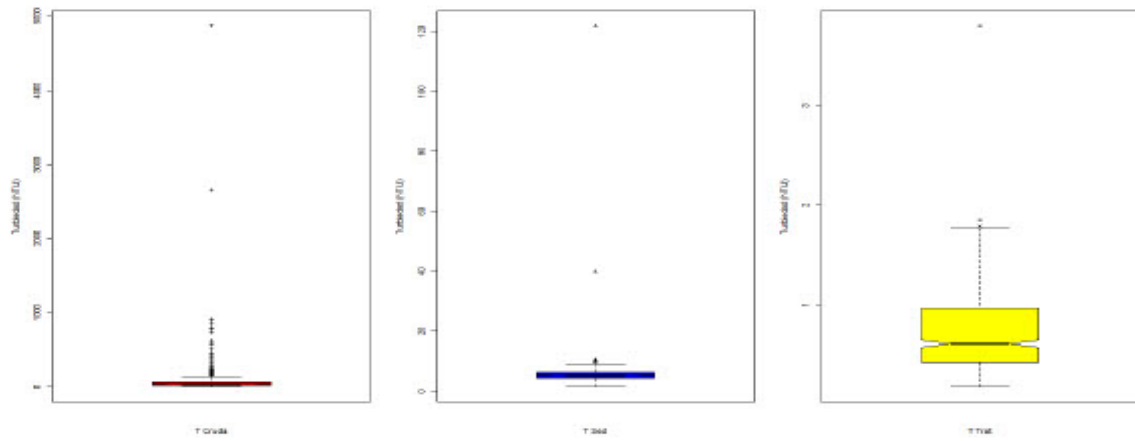
La segunda muestra se tomó en la sección de los sedimentadores; no obstante, en esta sección ya se tuvo un registro de 1,97 UNT, con una desviación estándar de 1,16. En esta parte de la toma de muestras y seguimiento a la turbiedad encontramos dos momentos importantes, a mediados de este

periodo gran parte del territorio nacional fue azotado por el fenómeno del niño, como resultado de este fenómeno cesaron las lluvias.

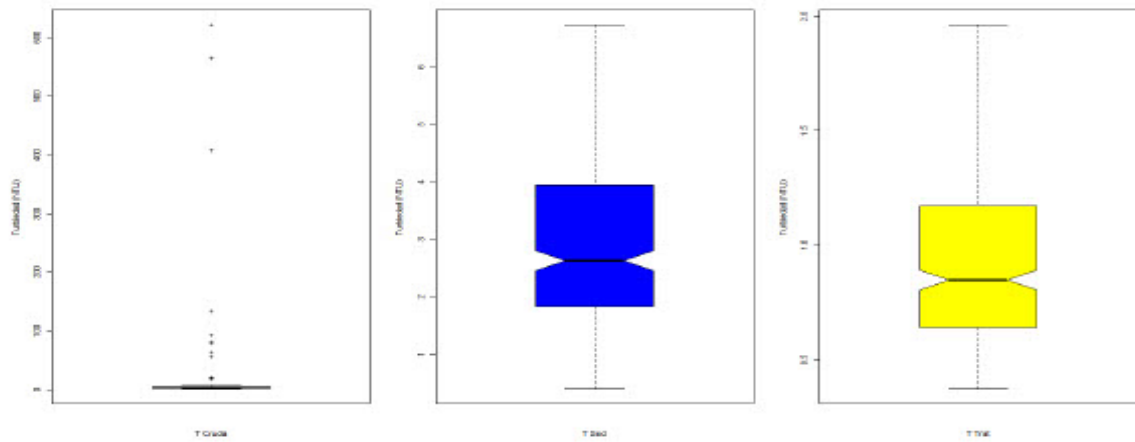
En contraste con el punto de toma de muestras anterior, se pudo observar que estos valores bajan la turbiedad significativamente a tal punto de encontrarse dentro de los valores aceptables según el RAS 2021, motivo por el cual se dejó de aplicar sulfato de aluminio.

Ya en el agua tratada, los niveles de turbiedad promedio fueron de 0,54 UNT, con una desviación estándar de 0,22. Como resultado del fenómeno del niño en esta zona del país, los niveles de turbiedades bajaron a tal punto que se registraron los niveles más bajos de turbiedad a comparación de los dos periodos anteriores. Como se puede apreciar en la figura 2.

A. Seguimiento a la Turbiedad periodo I



B. Seguimiento a la Turbiedad periodo II



C. Seguimiento a la Turbiedad periodo III

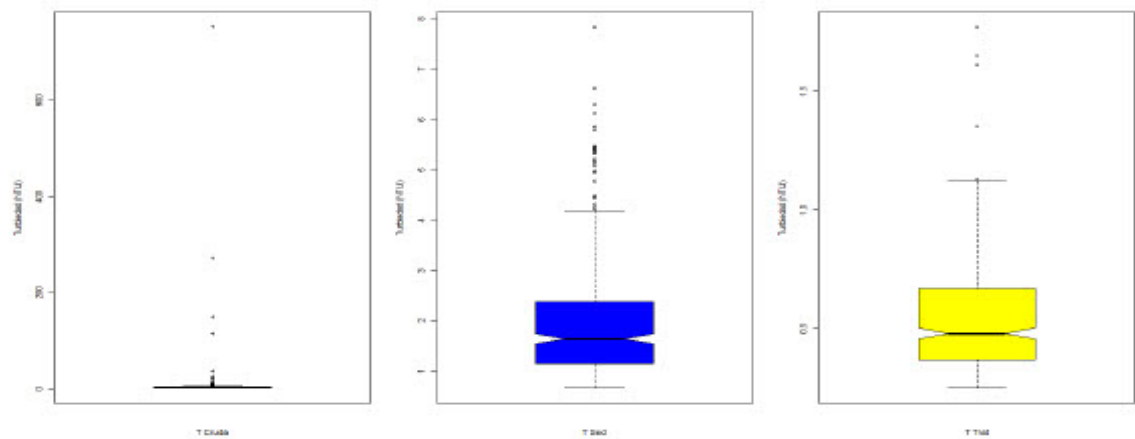


Figura 2. Comportamiento de la turbiedad (UNT). Período I, II y III

Fuente: Autor, 2024.

10.2 ANÁLISIS DE PRUEBAS REALIZADAS Y EFICIENCIA EN LA PTAP

- **CÁLCULO DE LA TASA DE FILTRACIÓN**

Para determinar y chequear la tasa de filtración fue necesario usar variables establecidas en la Resolución 0330 de 2017 las cuales se relacionan con el QMD, área total de los tanques de filtración y el tiempo, dando como resultado una tasa de $300,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$. (Ver Anexo 1)

Un valor de $300,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ y según las especificaciones del RAS 2021, en su Artículo 114, en la tabla número 7 establece: que la tasa de filtración máxima debe estar comprendida entre 180 a $250 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ – esto para filtración rápida con lecho mixto. Es decir; que NO CUMPLE.

Este comportamiento viene asociado al estado actual del sistema de filtración de la planta, ya que el último mantenimiento realizado data del año 2008, hasta la fecha no se han realizado mantenimientos preventivo ni correctivos, como tampoco se tiene un estudio actualizado del funcionamiento de la PTAP. Por otro lado, influye el comportamiento en las variaciones en turbiedad, las cuales en los periodos de lluvia son muy altas y como consecuencia de ello se han suspendido las operaciones en la planta este tipo de sucesos contribuye a obstrucciones en el lecho filtrante.

La profundidad del medio (m) para la antracita debe ser de 0,4 a 0,6 y la arena 0,15 a 0,3; en el caso de los filtros de la PTAP la antracita tiene una profundidad de 0,5 m y la arena 0,25 m, es decir que SI CUMPLE.

- **DETERMINACIÓN DE LA DURACIÓN DEL PROCESO DE LAVADO**

La turbiedad inicial M-1 fue de 879 UNT, para el minuto 2 en la muestra M-2 la turbiedad descendió significativamente a 235 UNT, y a medida que transcurría el tiempo siguió disminuyendo, logrando llegar en la muestra 13 M-13 a una turbiedad de 8,44 UNT.

Con la información registrada en la Tabla 3 se realizó la figura 3, entre Turbiedad Vs Tiempo y se pudo determinar el punto de inflexión inferior en el eje horizontal.

Tabla 3. Tiempo de proceso de lavado

	FILTRO N.º	N.º DE LA MUESTRA	TIEMPO EN MINUTOS	TURBIEDAD (UNT)
PTAP - AGUACHICA	F - 1	M-1	1	879
		M-2	2	235
		M-3	3	170
		M-4	4	143
		M-5	5	95,3
		M-6	6	84,0
		M-7	7	24,9
		M-8	8	19,9
		M-9	9	13,8
		M-10	10	13,2
		M-11	11	13,2
		M-12	12	10,0
		M-13	13	8,44

Fuente: Autor, 2024.

El tiempo óptimo de lavado para el filtro en este caso es en 7 minutos, tiempo en el cual se puede observar una disminución significativa y constante en la turbiedad, se debe tener presente que en estos momentos no se está aplicando Sulfato de Aluminio, ya que las turbiedades que se están presentando son bajas en comparación a periodos de lluvia que suelen ser extremadamente altos; después de este tiempo no se obtiene ningún beneficio con prolongar el tiempo de lavado.

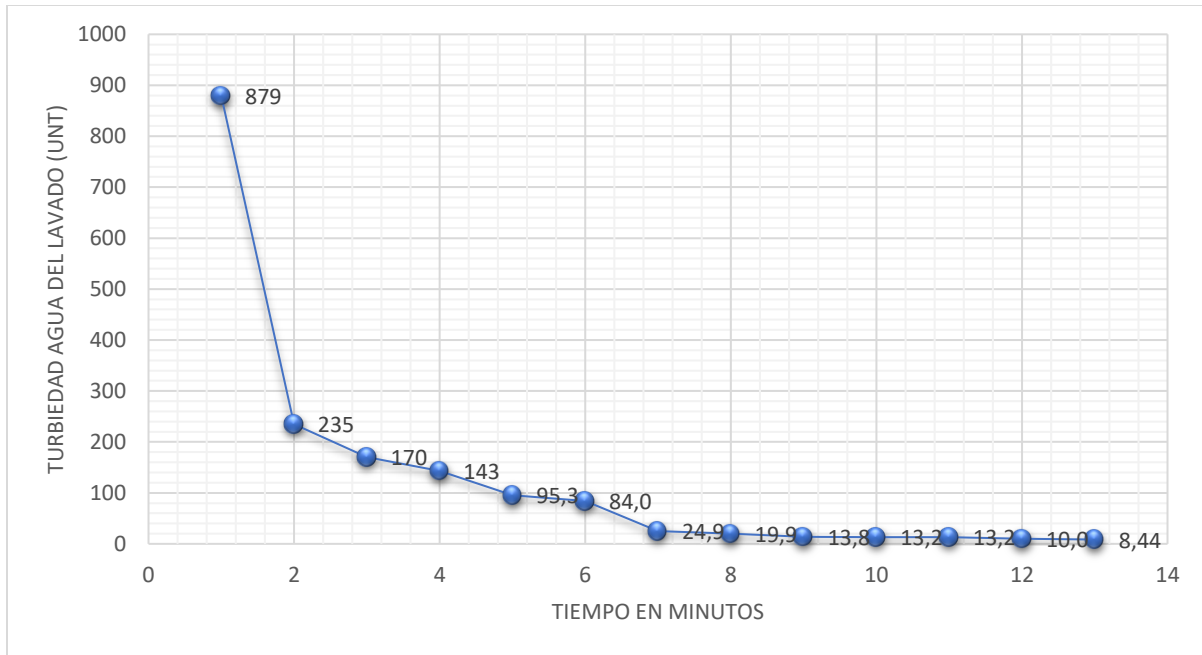


Figura 3. Determinación del tiempo óptimo de lavado de un filtro

Fuente: Autor, 2024.

- **CALIDAD DEL FILTRADO INICIAL**

Posterior al lavado del filtro y puesto en funcionamiento, se procedió a detectar el comportamiento del medio filtrante para poder determinar el tiempo que demora el filtro en alcanzar la turbiedad aceptable, la cual establece la resolución 2115 de 2007 un valor máximo aceptable de 2 UNT.

Al ser puesto en funcionamiento después del proceso de lavado, se obtuvo un efluente con turbiedades más altas que durante el resto de la carrera del filtro. Esto se debe en cierta proporción a todas esas partículas que se desprendieron durante el proceso de lavado que han quedado retenidas; es decir, cuando más descuidada sea la operación del filtro y más deteriorado se encuentre el lecho filtrante, peor será la calidad del efluente inicial producido por el filtro.

Los resultados obtenidos en esta prueba fueron los siguientes:

El primer valor tenido en esta prueba fue de 0,92 UNT, y cada minuto transcurrido fue evidente dicha disminución, obteniendo así un último resultado de 0,53 UNT correspondiente a los 12

minutos. Se logró evidenciar que esos valores obtenidos están dentro del requerimiento de la normal, el cual establece un valor máximo aceptable de 2 UNT según la Resolución 2115 del 2007.

Después de los lavados de los filtros, es normal que se presenten altos niveles de turbiedad en los primeros minutos de monitoreo. Esto se debe al desprendimiento de partículas retenidas en el lecho filtrante, pero al pasar los minutos estos niveles de turbiedad se estabilizan logrando obtener valores adecuados y aceptables de 2 UNT según la Resolución 2115 del 2007.

En otras palabras, se puede afirmar que la calidad del filtrado inicial es buena, ya que se encuentra en un rango favorable de 0,92 UNT a 0,53 UNT, manteniéndose dentro del rango establecido y aceptable según la resolución 2115 del 2007.

Los anteriores datos se pueden evidenciar a detalle en la Tabla 4.

Tabla 4. Calidad del filtrado inicial

	Nº DE LA MUESTRA	TIEMPO EN MINUTOS	TURBIEDAD (UNT)
	M-1	1	0,92
	M-2	2	0,80
	M-3	3	0,75
	M-4	4	0,71
	M-5	5	0,70
PTAP - AGUACHICA	M-6	6	0,68
	M-7	7	0,67
	M-8	8	0,66
	M-9	9	0,66
	M-10	10	0,65
	M-11	11	0,62
	M-12	12	0,53

Fuente: Autor, 2024.

Con los datos obtenidos se realizó la figura 4, para hacer la respectiva comparación y observar el comportamiento de la calidad del filtrado inicial; el cual fue muy favorable, ya que los valores de las muestras son aceptables y están dentro del rango establecidos por la Resolución 2115 del 2007,

la cual establece en su capítulo II, artículo 2º características físicas un valor máximo aceptable de 2 UNT para la turbiedad.

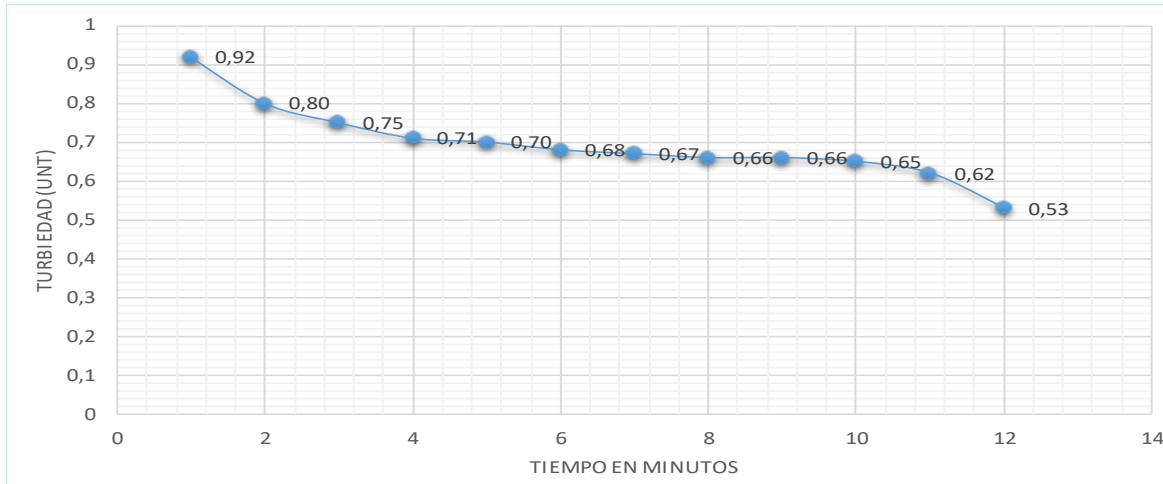


Figura 4. Determinación de la calidad del filtrado inicial

Fuente: Autor, 2024.

- **EXPANSIÓN DEL LECHO FILTRANTE**

Como resultado de esta prueba, se logró evidenciar varios factores: inicialmente los porcentajes de expansión son extremadamente altos, lo cual está inducido por la velocidad y el caudal que son empleados en el momento de hacer dichos lavados. Los porcentajes de expansión en los lechos de filtración están establecidos según el fabricante y también el tipo de lecho, para filtros de lecho mixtos compuestos por (Grava, arena y antracita) los porcentajes aceptables de expansión se encuentran entre 10% y 30%, para asegurar un movimiento adecuado de las partículas del medio filtrante (Pérez, León, & Delgadillo, 2013).

Esta prueba ayuda a graduar dichas condiciones para posteriores lavados en la planta, aun así, la antracita que es la capa más superficial del lecho, no logra ascender hasta el canal de desagüe de lavado. Este comportamiento viene directamente relacionado a los periodos de lavado anteriores como también los años en operaciones de estas unidades de filtración este periodo data del año 2008 que fue el último mantenimiento realizado a las unidades de filtración. En la actualidad, no se han hecho cambios en estos lechos; por tal razón, tanto la arena como la antracita han perdido

con el paso de los años su densidad. Es por esta razón que los porcentajes de expansión son mayores a lo recomendado, los cuales para este tipo de filtros oscila entre un 10% y 30% según (Pérez, León, & Delgadillo, 2013).

En esta prueba se obtuvo un porcentaje de expansión de 96% que fue el menor valor registrado y en el mayor de los casos un porcentaje del 147%.

Como consecuencia al anterior comportamiento en los porcentajes de expansión se tiene que:

1. Reducción de la eficiencia de filtración: ya que un porcentaje de expansión excesivo puede provocar una distribución desigual de los medios filtrantes dentro del lecho. Esto puede resultar en canales de flujo preferenciales que reducen la eficiencia de la filtración al permitir que el agua pase a través del lecho sin ser adecuadamente tratada (Pérez de la Cruz & Urrea Mallebrera, 2011).
2. Arrastre de sólidos: un porcentaje de expansión alto puede causar la liberación de partículas sólidas retenidas durante el proceso de filtración. Estas partículas pueden ser arrastradas por el agua tratada, lo que reduce la calidad del efluente y puede causar problemas en la distribución del agua potable (Rodríguez , 2008).
3. Mayor consumo de agua de lavado: un porcentaje de expansión elevado puede requerir un aumento en la frecuencia o la duración de los ciclos de lavado para mantener la eficiencia del lecho de filtración. Esto resulta en un mayor consumo de agua y energía, lo cual puede aumentar los costos operativos de la planta de tratamiento (Pérez, León, & Delgadillo, 2013).
4. Desgaste prematuro de los medios filtrantes: la expansión excesiva puede causar una mayor abrasión y desgaste de los medios filtrantes, lo que reduce su vida útil y aumenta la necesidad de reemplazo (Pérez, León, & Delgadillo, 2013).

En resumen, un porcentaje de expansión muy alto en las unidades de filtración puede llegar a comprometer la calidad del agua tratada, aumentar los costos operativos y reducir la vida útil de ellos medios filtrantes; por lo tanto, es importante monitorear y controlar cuidadosamente este parámetro para garantizar un funcionamiento eficiente del proceso de tratamiento de agua potable.

En la Tabla 5, se pueden evidenciar dichos porcentajes de expansión.

Tabla 5. Expansión del Lecho Filtrante

	<i>FILTRO N.º</i>	<i>EXPANSIÓN MEDIDA - cm (a)</i>	<i>PROFUNDIDAD DE LA ARENA/ANTRACITA - cm (b)</i>	<i>% DE EXPANSIÓN - a/b *100</i>
PTAP - AGUACHICA	F-1	80	68	118
	F-2	70	68	103
	F-3	75	68	110
	F-4	100	68	147
	F-5	65	68	96
	F-6	75	68	110
	F-7	80	68	118
	F-8	85	68	125
	F-9	95	68	140
	F-10	65	68	96

Fuente: Autor, 2024.

En la figura 5 se puede observar el comportamiento de los porcentajes de expansión obtenidos.

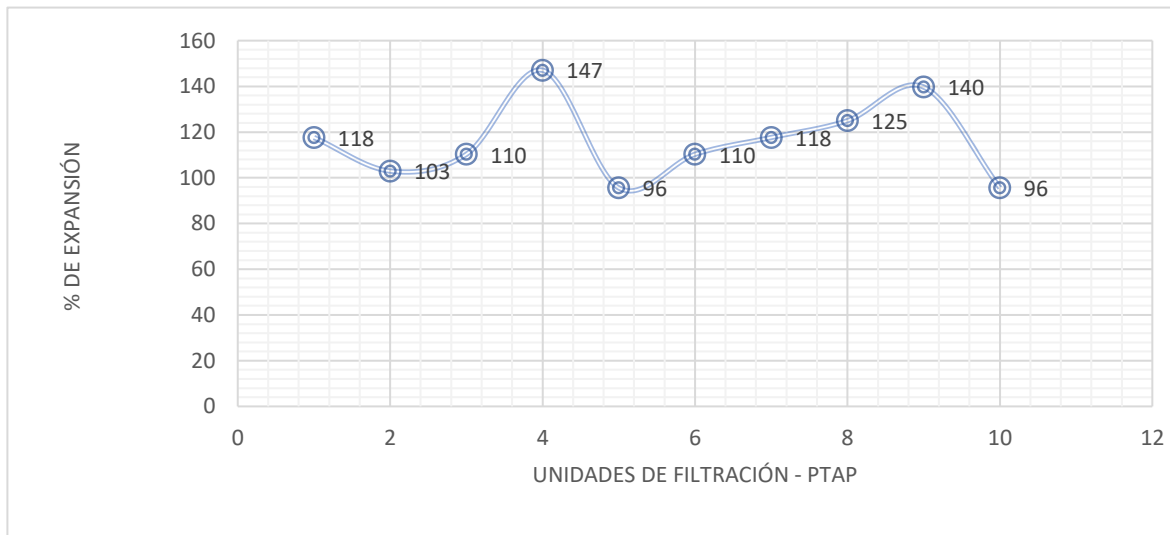


Figura 5. Determinación de la expansión del lecho filtrante

Fuente: Autor, 2024.

- **CORRELACIÓN TURBIEDAD AGUA SEDIMENTADA – TURBIEDAD AGUA FILTRADA**

Se realizó la respectiva correlación entre la turbiedad del agua sedimentada vs la turbiedad del agua filtrada; el propósito de esto es determinar la capacidad de reducción de turbiedad de un filtro y su eficiencia en relaciones al comportamiento y factores que pueden afectar dicha eficiencia. Esta correlación se realizó con datos obtenidos de todo un año, es decir se trabajó con datos correspondiente a los meses de enero a diciembre del año 2023. Como se puede observar en la Tabla 7.

Tabla 6. Correlación Agua Sedimentada vs Agua Filtrada

ITEM	MES	SEDIMENTACIÓN			FILTRACIÓN		
		Turbiedad Promedio Sedimentada	Turbiedad Máxima Sedimentada	Turbiedad Mínima Sedimentada	Turbiedad Promedio Filtrada	Turbiedad Máxima Filtrada	Turbiedad Mínima Filtrada
1	ENERO	2,35	6,86	0,91	0,64	1,48	0,26
2	FEBRERO	1,26	6,80	0,06	0,36	1,74	0,19
3	MARZO	2,43	11,10	0,19	0,46	1,69	0,16
4	ABRIL	2,97	10,10	0,30	0,59	4,76	0,15
5	MAYO	4,35	25,5	1,54	0,42	1,49	0,14
6	JUNIO	3,79	9,69	1,57	0,96	3,30	0,24
7	JULIO	3,66	81,0	1,58	0,78	1,71	0,26
8	AGOSTO	2,83	9,66	0,85	0,60	1,86	0,16
9	SEPTIEMBRE	3,10	9,76	0,99	0,63	1,83	0,15
10	OCTUBRE	5,40	13,7	1,46	0,76	1,95	0,17
11	NOVIEMBRE	5,45	12,20	1,68	0,93	1,96	0,23
12	DICIEMBRE	2,62	7,84	0,64	0,80	1,77	0,25
Total:		40,21	81,00	0,06	7,93	4,76	0,14
Coefficiente de Correlación		0,56	-0,17	0,30			

Fuente: Autor, 2024.

Cuando el coeficiente de correlación se encuentra dentro del rango (-1 a 1) o un valor cercano a 1 esto indica una relación positiva directa muy fuerte. En este caso para los datos analizados el coeficiente de correlación es de 0,56, lo cual indica que existe una relación directa muy fuerte entre la turbiedad del agua tratada y la turbiedad del agua sedimentada, según el comportamiento de la turbiedad en estas dos secciones del proceso de potabilización del agua.

El valor obtenido de dicha correlación viene dado debido en que en los meses de mayo, octubre y noviembre se presentaron constantes lluvias, lo cual afecto directamente los procesos de tratabilidad por alta turbiedad y así mismo se registraron turbiedades de 4,35 UNT en el mes de mayo, 5,40 UNT correspondiente al mes de octubre y 5,45 UNT en el mes de noviembre respectivamente, también se logró evidenciar un consumo de sulfato de aluminio alto en relación al resto de meses del año 2023.

Dichos puntos se encuentran dispersos en la gráfica en comparación del resto de datos de los otros meses de este año. Como se puede observar en la figura 6.

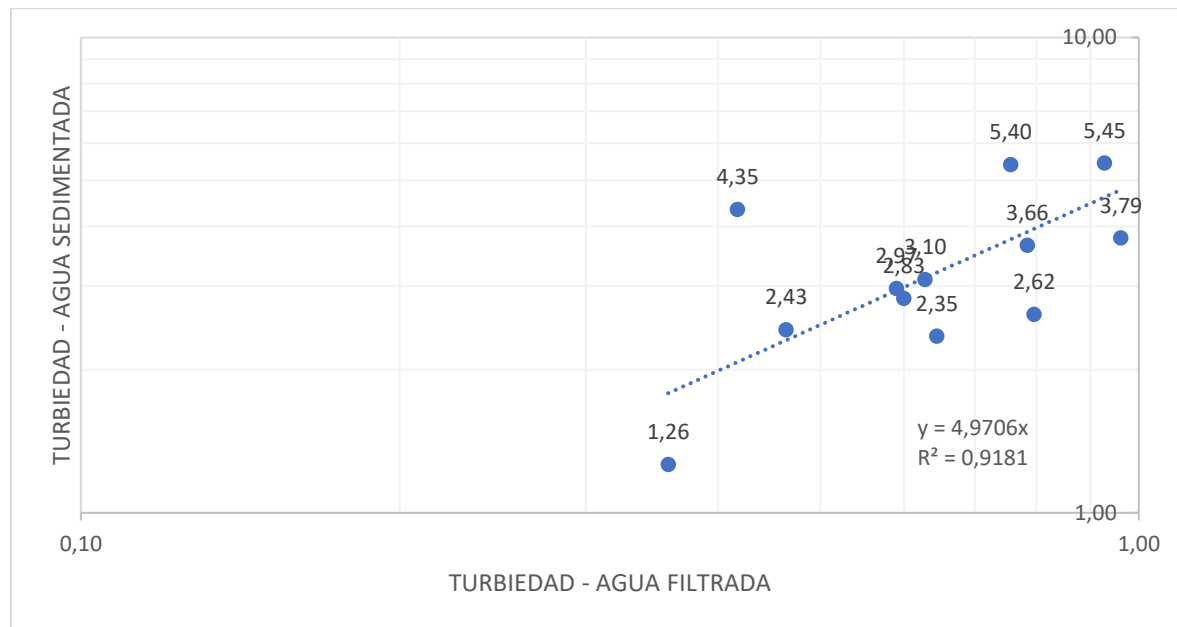


Figura 6. Correlación agua sedimentada vs agua filtrada

Fuente: Autor, 2024.

Para efectos de referencia según el comportamiento de los datos en la figura 7 se tiene soporte según el consumo de Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$ para el año en estudio los cuales se pueden observar en la Tabla 7.

Tabla 7. Consumo Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$

<i>ITEM</i>	<i>MES</i>	<i>SULFATO DE ALUMINIO TIPO B (Kg)</i>
<i>1</i>	<i>Enero</i>	<i>2.675</i>
<i>2</i>	<i>Febrero</i>	<i>750</i>
<i>3</i>	<i>Marzo</i>	<i>5.675</i>
<i>4</i>	<i>Abril</i>	<i>7.325</i>
<i>5</i>	<i>Mayo</i>	<i>15.525</i>
<i>6</i>	<i>Junio</i>	<i>14.250</i>
<i>7</i>	<i>Julio</i>	<i>2.800</i>
<i>8</i>	<i>Agosto</i>	<i>6.325</i>
<i>9</i>	<i>Septiembre</i>	<i>10.000</i>
<i>10</i>	<i>Octubre</i>	<i>23.300</i>
<i>11</i>	<i>Noviembre</i>	<i>16.250</i>
<i>12</i>	<i>Diciembre</i>	<i>2.075</i>
	<i>TOTAL:</i>	<i>106950</i>

Fuente: Autor, 2024.

Representando gráficamente el consumo de Sulfato de Aluminio, se puede observar en la figura 10 los meses en que se usó mayor cantidad de este producto, lo cual corresponde a los meses de mayo (15.525 kg), junio (14.250 kg), octubre (23.300 kg) y noviembre (26.250 kg) para el año 2023 en total se usó en la PTAP 106.950 kg de Sulfato de Aluminio, se debió a que en estos meses se presentaron lluvias en la parte alta de la quebrada lo cual originó incremento en los niveles de turbiedad.

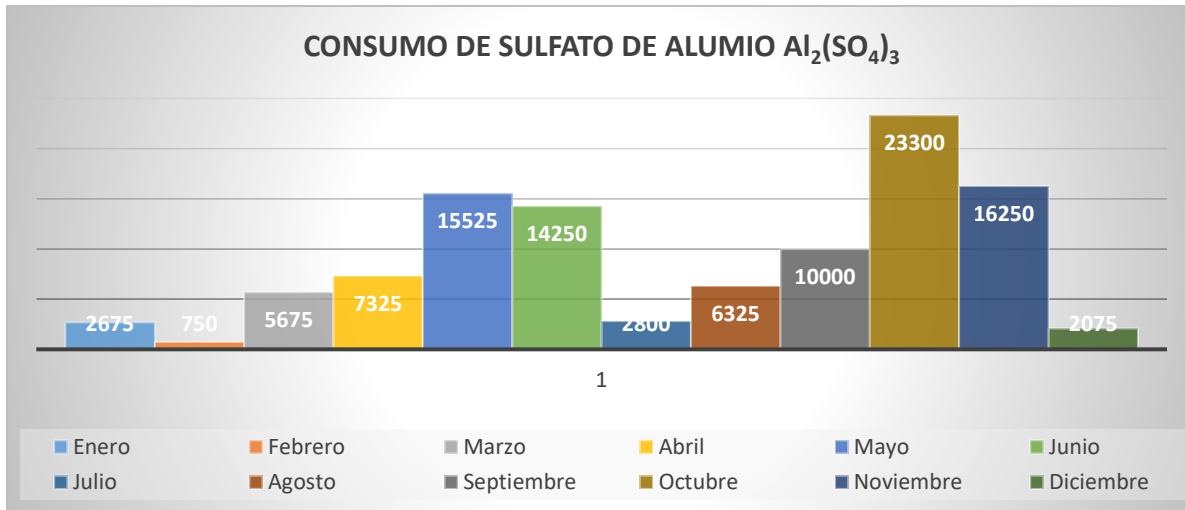


Figura 7. Consumo Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$

Fuente: Autor, 2024.

EVALUACIÓN DE LAS UNIDADES DE FILTRACIÓN

Las características aplicadas a los filtros determinan la calidad del efluente principalmente a través de la concentración, naturaleza, tamaño y propiedades de adherencia de las partículas. Un filtro bien proyectado y operado satisfactoriamente puede producir un efluente de mejor calidad trabajando con una tasa tan elevada como unos $400 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$; mientras que un filtro que trabaja a unos $120 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$, con un tratamiento inadecuado, produce un efluente de peor calidad. De modo general, se ha observado que la calidad del efluente no sufre sensiblemente alteración para velocidades hasta de 300 a $360 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$.

La tasa de filtración en la PTAP tiene un valor de $300,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ y según las especificaciones de la Resolución 0799 de 2021, en su Artículo 114, tabla 7. Características de filtración convencional establece: que la tasa de filtración máxima debe estar comprendida entre 180 a $250 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ – esto para filtración rápida con lecho mixto. Por lo anterior, se puede decir que el filtro no cumple con lo establecido en la resolución previamente citada.

Lo anterior, viene asociado al estado actual del sistema de filtración de la planta, ya que el último mantenimiento realizado data del año 2008, hasta la fecha no se han realizado mantenimientos preventivo ni correctivos, como tampoco se tiene un estudio actualizado del funcionamiento de la

PTAP. Por otro lado, influye el comportamiento en las variaciones en turbiedad, las cuales en los periodos de lluvia son muy altas y como consecuencia de ello, se han suspendido las operaciones en la planta este tipo de sucesos contribuye a obstrucciones en el lecho filtrante.

En términos generales, las secciones de filtros rápidos de la planta de tratamiento de agua potable de Aguachica se encuentran en estado regular, ya que se logró comprobar mediante la aplicación de diferentes pruebas, seguimientos y monitoreos constante que la eficiencia operativa de los filtros está presentando una serie de comportamiento inusuales en su operación; en el periodo I se encontró una eficiencia en su operación del 87,01%, mientras que en el periodo II la eficiencia fue del 67,7% y para el periodo III fue del 72,6%; las causas de la disminución de la eficiencia en los periodos II y III están relacionadas a la falta de mantenimientos en las unidades de filtración.

Aunado a lo anterior, se obtuvo que el tiempo de lavado óptimo para las unidades de filtración se encuentran entre 7 y 10 minutos, cabe resaltar que estas pruebas fueron realizadas en periodos sin presencia de lluvias, lo cual nos indica que este resultado puede variar en periodo de invierno cuando se presente un aumento significativo en la turbiedad.

En los resultados obtenidos en la prueba de expansión del lecho filtrante si se encontraron datos un tanto alarmantes en cuanto a los altos niveles de expansión de los lechos, por tal razón, es de vital importancia seguir realizando este tipo de pruebas en la planta, lo cual ayudará a tener una mejor noción de este comportamiento, y esto se debe básicamente a la antigüedad de estos lechos, ya que sus registros datan del año 2008. En la actualidad no se les ha hecho ningún tipo de mantenimiento o cambio, razón de por la cual han perdido sus propiedades considerablemente, aunque aún siguen haciendo bien su filtración, ya que por mucho que se expanden aun no logran subir hasta la canaleta de lavado.

Con respecto a los datos utilizados para la determinación de la correlación establecida entre la turbiedad del agua sedimenta y agua filtrada correspondiente al año 2023, se encontró que en tres meses de este año se presentaron prolongadas temporadas de lluvias lo cual afecto directamente los procesos de potabilización en la PTAP, presentando así altos niveles en la turbiedad y por consiguiente altos consumos de Sulfato de Aluminio lo cual se logró determinar en la gráfica obtenida de este ejercicio.

10.3 PROPUESTA DE MEJORAMIENTO EN LA OPTIMIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LOS FILTROS RÁPIDOS

En busca de proponer alternativas de mejoras para la optimización en la operación de los filtros rápidos se propone la siguiente estrategia; basada en el seguimiento continuo en las fases de operación y manteniendo en la PTAP; el cual estará dividido en dos partes como se puede observar en la tabla 8 y 9:

A. Operación

Tabla 8. Seguimiento Etapa de Operación.

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
Identificación del caudal de entrada a la planta	Se debe hacer seguimiento a las variaciones y comportamiento del caudal, se deben tomar lecturas con intervalos de 1 hora.
Determinación de parámetros físicos (Color Aparente y turbiedad) y parámetro químico (pH)	Se deben tomar muestras y realizar su respectivo análisis para observar variaciones en estos (diario, preferiblemente con intervalos de 1 hora).
Registrar datos de operación y calidad del agua	Se debe llevar un registro puntual de los datos de operación y calidad del agua, tales como resultados de los parámetros físicos y químico contemplado en el punto anterior, estos datos deben estar registrados en la bitácora y digitalizados para efectos de seguimiento de la empresa, esta información se debe llenar a diario, preferiblemente con intervalos de 1 hora. (en dicha bitácora se debe registrar cualquier acontecimiento relacionado con la operación en la planta; incluido resultado de ensayos y suspensión del servicio por altos niveles de turbiedad).
En caso de tener que suspender el servicio de agua repentinamente, se debe dar aviso de inmediato a la comunidad de dicha suspensión del servicio.	
Nota: El servicio solo se debe suspender en caso de:	
❖ Cuando se efectúen labores de lavado, mantenimiento o reparaciones	
❖ Por daños en la conducción del agua cruda	
❖ Cuando se presenten altos niveles en la turbiedad	

Fuente: Autor, 2024.

B. Mantenimiento

Tabla 9. Seguimiento Etapa de Mantenimiento

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
<p>Actividades de mantenimiento</p>	<p>Tener en cuenta los cambios en la calidad del agua cruda, especialmente relacionados con el caudal, turbiedad y los sedimentos de gran tamaño.</p> <hr/> <p>Realizar pruebas mensuales como:</p> <p>Cálculo de la tasa de filtración: aplicando lo descrito en el apartado 9.2 Desarrollo metodológico, en la fase 2, aplicando la ecuación (1) para la determinación de la tasa de filtración.</p> <p>Determinación del proceso de lavado: Para la ejecución se necesita un Turbidímetro, un Cronometro y 13 recipientes de 210 ml c/u.</p> <p>Inicialmente se deben numerar cada recipiente como (Muestra Turbiedad T. Lavado) y los respectivos números del 1 al 13, se debe usar un recipiente por cada minuto de lavado, para esta prueba se deben tomar el tiempo con intervalos de un minuto hasta llegar al minuto 13.</p> <p>Una vez se cerradas las válvulas de ingreso al filtro e iniciado el proceso de lavado, se debe descender hasta la canaleta del filtro; tan pronto empiece a caer el agua de lavado se pone en marcha el cronometro y se toma la muestra M-1 dentro de la canaleta, este proceso se debe ejecutar cada minuto hasta tomar las 13 muestras respectivamente.</p> <p>Cada muestra deber ser analizada en el turbidímetro, los resultados deben ser tabulados para su posterior análisis y realización de gráficas y determinar cuál es el tiempo optimo del respectivo lavado de cada filtro.</p> <p>Determinación de la calidad del filtrado inicial: Para la ejecución de esta prueba se necesitaron los siguientes materiales: 12 recipientes de 210 ml c/u rotulados previamente como (Muestra Turbiedad Calidad de Filtrado), un cronometro y un Turbidímetro.</p> <p>Las muestras deben ser recolectadas en la salida del filtro una vez puesto en funcionamiento la unidad de filtración y antes de que se mezcle con el agua filtrada proveniente de las otras unidades. Las muestras se recolectaron una cada minuto hasta completar los 12 minutos.</p> <p>Cada muestra deber ser analizada en el turbidímetro, los resultados deben ser tabulados para su posterior análisis y realización de gráficas y determinar la calidad del filtrado inicial.</p> <p>Expansión del lecho filtrante: Para esta prueba se debe usar una varilla de 3/8" de 3 metros aproximadamente con tapas de gaseosa ancladas por los costados ubicadas a 0,5 cm una de otra.</p> <p>Al cerrar las compuertas de ingreso de fluido al batería de filtración, una vez empiece a bajar el nivel de la lámina de agua se procede a introducir el extremo inferior de la varilla encima del lecho filtrante, y se prosigue con el lavado de la unidad de filtración normalmente; pasado el tiempo del lavado, se extrae la varilla y se toman las medidas de la distancia entre la tapa más alta que contenga arena o antracita y el extremo inferior de la varilla a este le llamaremos delta h, ya para la respectiva determinación del porcentaje de expansión se debe usar la siguiente formula:</p> <p>$\% \text{ expansión} = \text{delta } h/h * 100$ donde h es la altura del lecho filtrante.</p> <p>Para tener un panorama general del funcionamiento de los filtros es recomendable realizar las pruebas anteriormente descritas a todas las unidades de filtración.</p> <hr/> <p>Interrumpir el servicio cuando los niveles en la turbiedad sean igual o superior a 1.000 UNT o tenga mucho lodo e informar de manera inmediata al encargado de la planta sobre la situación.</p>

Nota: las pruebas se recomiendan hacerse mensualmente, y llevar un historial de dichos resultados para poder alertar sobre cualquier anomalía en el comportamiento de las unidades de filtración.

Fuente: Autor, 2024.

11. CONCLUSIONES

En términos generales, las secciones de filtros rápidos de la planta de tratamiento de agua potable de Aguachica se encuentran en estado regular, ya que se logró comprobar mediante la aplicación de diferentes pruebas, seguimientos y monitoreos constante que la eficiencia operativa de los filtros en el periodo fue del 87,01%, mientras que en el periodo II la eficiencia fue del 67,7% y para el periodo III fue del 72,6%; las causas de la disminución de la eficiencia en los periodos II y III están relacionadas a la falta de mantenimientos en las unidades de filtración.

No se ha realizado el cambio de estos medios filtrantes desde su instalación, razón por la cual se encontró un comportamiento inusual en las unidades de filtración, los cuales fueron notorias en las pruebas de expansión del lecho filtrante, en algunos casos teniendo una expansión de hasta el 100% cuando lo recomendable según diversas fuentes bibliográficas estudiadas contemplan valores que se encuentran del 10% al 30%; adicional a lo anterior se determinó que la tasa de filtración fue de $300,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$ valor que está fuera del valor máximo permisible según la normativa 0799 del 2021; no obstante, también se les atribuye participación en obstrucciones de las unidades de filtración las cuales disminuyen su capacidad y la eficiencia de las unidades de filtración.

Se logró proponer una estrategia basada en el seguimiento continuo de operación y mantenimiento como alternativa de mejoramiento en la optimización de las operaciones en las unidades de filtración; detallando las actividades correspondientes en cada etapa, buscando con esto mantener información actualizada de las unidades de filtración.

12.RECOMENDACIONES

Solicitar un estudio donde se detallen las condiciones actuales en general de cómo se encuentra la planta de tratamiento de agua potable de Aguachica – PTAP; enfatizando el estado actual de las secciones de filtración.

Establecer un programa de capacitación a los operarios de la planta en temas como: mantenimientos preventivos y correctivos; control de calidad, aseguramiento y regulaciones; análisis de agua; parámetros de calidad del agua (pH, turbidez, conductividad) y normas de calidad de agua, es de vital importancia mantener informados a las personas que operan en este sitio, ya que los procesos pueden ser afectados por múltiples factores que en la mayoría de los casos estas personas desconocen.

Establecer un cronograma de realización de pruebas en la planta, esto ayudará a tener datos de manera constante y de este modo hacer un seguimiento al comportamiento de los diferentes procesos en la planta.

Es recomendable lo más pronto posible realizar un estudio detallado sobre las propiedades del lecho filtrante de las unidades de filtración, ya que los porcentajes de expansión hallados en las pruebas realizadas son alarmantes. De momento se seguirán haciendo pruebas constantemente bajo recomendación del Químico encargado de la planta para tener un mayor número de resultados y poder determinar que está fallando en esta sección del proceso de potabilización.

13.OTRAS ACTIVIDADES ASOCIADAS A LA PRÁCTICA

A continuación, en la Tabla 10, se relaciona las actividades extras al plan de trabajo más relevantes durante el periodo de prácticas en la Empresa de Servicios Públicos de Aguachica ESPA ESP.

Tabla 10. Actividades Asociadas a la Práctica

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
<p>Apoyo en el Seguimiento a las actividades de operación y mantenimiento del sistema de tratamiento de Aguas Residuales de las lagunas de Oxidación de Jerusalén y la PTAR Vía Puerto Mosquito.</p>	<p>Se llevó a cabo diferentes funciones propias de las actividades realizadas en la planta, desde seguimiento al personal, verificando de cada actividad por parte de los operarios encargados, así como su calidad y el cumplimiento de los estándares de seguridad; hasta adecuaciones e inventario, manejo de bases de datos, control de vertimientos entre otras.</p>
<p>Manejo de base de datos en la PTAR con información sobre los vertimientos de agua residual.</p>	<p>Se realizan informes de seguimiento de las actividades de operación y mantenimiento, incluyendo el control del archivo en físico y en medio digital sobre los vertimientos que se llevan a cabo en la planta de agua residual – PTAR vía Puerto Mosquito.</p>
<p>Acompañamiento a un equipo enviado por CORPOCESAR a la toma de coordenadas en la planta de tratamiento de agua residual PTAR vía Puerto Mosquito y las lagunas de Oxidación de Jerusalén.</p>	<p>Se realizó acompañamiento a la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR) en toma de coordenadas en los puntos de vertimientos en los caños el Cristo y Pital, y en los puntos de vertimientos de la planta de tratamiento de agua residual vía Puerto Mosquito y Laguna de oxidación Jerusalén.</p>
<p>Toma de coordenadas en los puntos de vertimiento directo sobre el caño “El Cristo” y “El Pital”.</p>	<p>Se realizó una salida de campo cuyo fin fue hacer un recorrido sobre los caños El cristo y Pital para la identificación y toma de coordenadas de los diferentes puntos de vertimientos de aguas residuales domesticas las cuales son vertidas en estos caños directamente. Dichas coordenadas fueran tabuladas en una base de datos para la realización del respectivo informe de seguimiento.</p>
<p>Inventario en la Plan de Tratamiento de Aguas Residuales - PTAR Vía Puerto Mosquito.</p>	<p>Se realiza un inventario por órdenes de Gerencia y del Departamento de Procesos Ambientales de la compañía, esto con fin de verificar el estado actual y existencia de los muebles e inmuebles que se encuentran en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales PTAR, Vía Puerto Mosquito, debido a que se viene desarrollando actividades de empalme con la nueva Administración Municipal.</p> <p>Se realizó una actualización en las bases de datos de las bitácoras y registros de operación en el Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales – STAR vía Puerto Mosquito, dicha actualización está relacionada con los registros de lo Aireadores, los registros de los Agitadores y los respectivos registros de caudales; que</p>

Actualización de las bitácoras y registros de operación – STAR vía Puerto Mosquito.

son los que en la actualidad se encuentran operando. Estos registros se encontraban desactualizados desde el mes de marzo del año en curso y se necesitaba de carácter urgente tener esta información al día por temas de empalme con la nueva Administración Municipal.

Fuente. Autor, 2024.

14. BIBLIOGRAFÍA

- Araque Arellano, M. (2022). *Planta de tratamiento de agua potable*. In: *Diseño hidráulico de plantas de tratamiento de agua potable [online]*. Obtenido de <https://doi.org/10.7476/9789978108208.0004>.
- Association, American Water Works. (2002). Obtenido de AWWA – American Water Works Association, Water Quality and Treatment, vol. Quinta. 1999
- De Vargas , L. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. Manual I: Teoría*. Perú: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS/OPS). Obtenido de http://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1_tomo1_indice.pdf
- Findeter, (2016). *Estudio para la actualización del plan maestro de acueducto y el catastro de redes y diseño de detalle para la optimización del informe final*. *findeter.gov.co*. Obtenido de <https://www.findeter.gov.co/convocatorias/paf-atf-c-035-2015>
- Froylan Rocha, J., & Sánchez Quiroz , J. (2016). *Diseño de un sistema de lavado de filtros rápidos por aire para la planta EPSAS - Achachicala*. [Tesis de pregrado, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia]. Obtenido de <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/9227/PG-1656-Froylan%20Rocha%2c%20Jorge.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- González Reino, A. P., & Pinedo Espitia, T. D. (2021). *Sistema de tratamiento de agua para consumo humano en pequeñas comunidades*. [Tesis de pregrado, Universidad de Córdoba]. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://repositorio.unicordoba.edu.co/bitstreams/5d261b06-aba7-40a2-bc86-a408028083e2/download>

- Jaramillo Rendón, J. D. (2024). *Diseño del sistema de tratamiento de los subproductos generados en una planta de potabilización rural del municipio de Palestina (Caldas) (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia)*. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/86340>
- Marco, B., & Spuhler, D. (2018). *Guía de orientación en saneamiento básico para alcaldías de municipios rurales y pequeñas comunidades*. Lima (Perú): Organización Panamericana de la Salud (OPS)/Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *Agua para el consumo humano*. Obtenido de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Pérez de la Cruz, F., & Urrea Mallebrera, M. A. (2011). *Abastecimiento de agua. . Tema 8 Filtracion* . Cartagena, España.
- Pérez, C., León, F., & Delgadillo, G. (2013). Tratamiento de aguas. *Tratamiento de aguas*.
- Reyes, G. (2004). *Evaluación del proceso de filtración de la planta rehabilitada de agua potable Santa Luisa de la empresa municipal de agua (EMPAGUA) de la ciudad de Guatemala*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio Institucional. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2493_C.pdf
- Rodríguez , D. C. (2008). *Abastecimientos y saneamientos urbanos, potabilización del agua*. Obtenido de <https://www.eoi.es/sites/default/files/savia/documents/componente45469.pdf>
- Romero. P. (2007). *“Evaluación del Proceso de Filtración, Caso: Segunda etapa de la Batería de Filtros*
- Solsona , F., & Méndez , J. P. (2002). *Desinfección del agua (No. OPS/CEPISIPUB/02. 83)*. OPS. Obtenido de <https://iris.paho.org/handle/10665.2/52807>

15.ANEXOS

ANEXO 1. Cálculos de la tasa de filtración

$$Tasa\ de\ filtración = \frac{QMD * 86400\ s}{AF\ total} = \frac{m^3}{m^2 * día} \quad (1)$$

Donde:

QMD: Caudal máximo diario ($\frac{m^3}{s}$)

AF total: Área total de las unidades de filtración de la PTAP (m^2)

para realizar esta prueba se deben conocer antemano ciertos datos, los cuales son:

- El área de cada sección de filtración y el área de total de estas, los cuales se pueden determinar mediante las siguientes ecuaciones:

1. Determinación del área para cada sección de filtración:

$$AF = Ancho(m) * Longitud (m) = m^2 \quad (2)$$

Donde:

AF: corresponde al área del filtro (m^2) esta operación debe aplicarse a cada filtro de cada sección.

2. Determinación del área total del sistema de filtración de la PTAP

$$AF\ Total = \Sigma S1 + \Sigma S2 = m^2 \quad (3)$$

Donde:

AF Total: corresponde al área total de las unidades de filtración (m^2)

$\Sigma S1$ = sumatoria de la sección 1 (m^2)

$\Sigma S2$ = sumatoria de la sección 2 (m^2)

- Caudal máximo para cada filtro, esta caudal se puede obtener mediante la siguiente formula:

$$Q_{max} = \frac{AF \text{ total } m^2 * q_{max} \frac{m^3}{m^2} \cdot dia}{86400 \text{ s}} = \frac{m^3}{m^2 * día} \quad (4)$$

Donde:

AF total m^2 , es el área total de la sección de filtración, $q_{max} m^3/m^2 * día$ es el caudal máximo que establece la resolución, el cual según especificaciones del RAS 2021 es de $250 m^3/m^2 * día$, y como unidad de conversión tenemos 86400 segundo equivalentes a un día.

El caudal Máximo Diario (QMD) ($494,93 \text{ L/s} = 0,45493 m^3/s$), el área total de los tanques de filtración= $130,82 m^2$ respectivamente y el tiempo en segundos 86400 segundos = 1 día) como resultado de hacer la anterior operación se obtuvo

$$Tasa \text{ de } filtración = \frac{0,45493 \frac{m^3}{s} * 86400 \text{ s}}{130,82 m^2} = 300,5 \frac{m^3}{m^2 * día} \quad (5)$$

ANEXO 2. EVIDENCIA FOTOGRÁFICA



Figura 8. Evidencia fotográfica recolección de muestras, prueba determinación del tiempo óptimo de lavado de un filtro.

Fuente: Autor, 2024.



Figura 9. Evidencia Fotográfica, Recolección y Análisis de Muestras, Prueba Calidad del Filtrado Inicial.

Fuente: Autor, 2024.

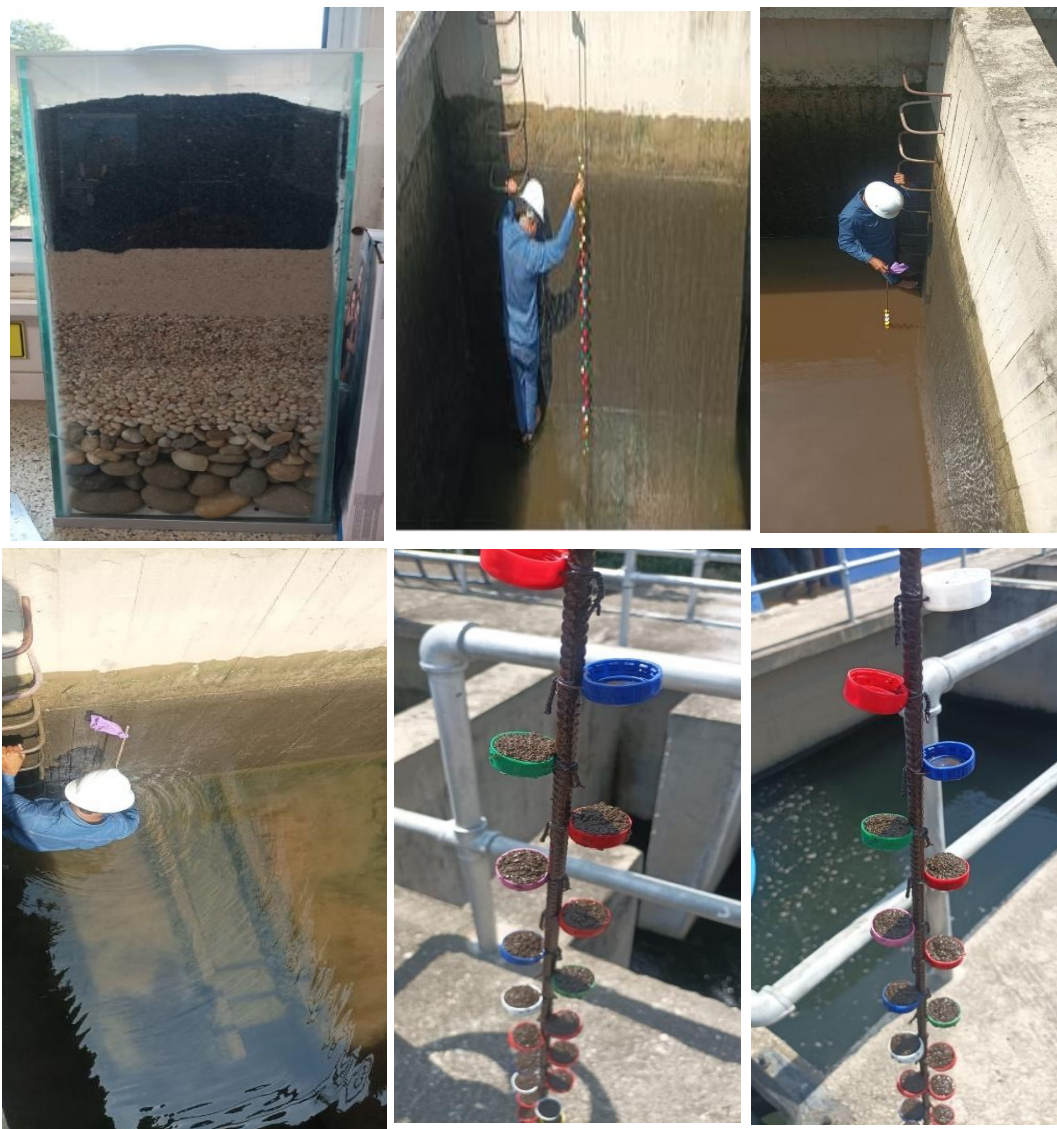


Figura 10. Prueba de porcentaje de expansión

Fuente: Autor, 2024.



Figura 11. Labores de mantenimiento en la PTAR vía Puerto Mosquito y Lagunas de Oxidación de Jerusalén

Fuente: Autor, 2024.

ITEM	EMPRESA RESPONSABLE	CONTRATISTA	FECHA DE INGRESO	HORA DE ENTREGA	CONDUCTOR	PLACA VEHICULO	RAZÓN SOCIAL	DIRECCIÓN
1	EMPRESA DE SERVICIOS PUBLICOS DE AGUACANDIA	E.S.P.A.	15-sep-23	3:00 p. m.		LUW 284		ESPA
2	VEOLIA	ALBERTO S.A.S. E.S.P.	9-sep-23	8:00 p. m.	NEISSON RODRIGUEZ VALENCIA	XMC 176	PAREX RESOURCES COLOMBIA LTDA SUCURSAL	CALLE 113 7 26 TO 4 OF 611 BOGOTA
3	VEOLIA	ALBERTO S.A.S. E.S.P.	30-sep-23	3:00 p. m.	NEISSON RODRIGUEZ VALENCIA	XMC 176	PAREX RESOURCES COLOMBIA LTDA SUCURSAL	CALLE 113 7 26 TO 4 OF 611 BOGOTA
							PAREX RESOURCES	CALLE 113 7 26 TO 4 OF 611 BOGOTA

Figura 12. Manejo de archivos y base de datos de la PTAR vía Puerto Mosquito

Fuente: Autor, 2024



Figura 13. Acompañamiento Corpocesar, toma de coordenadas en los caños El Cristo y Pital

Fuente: Autor, 2024

a.

b.



Figura 14. Toma de coordenadas, vertimientos sobre los caños a. El Cristo y b. Pital

Fuente: Autor, 2024.



Figura 15. Inventario PTAR vía Puerto Mosquito

Fuente: Autor, 2024.

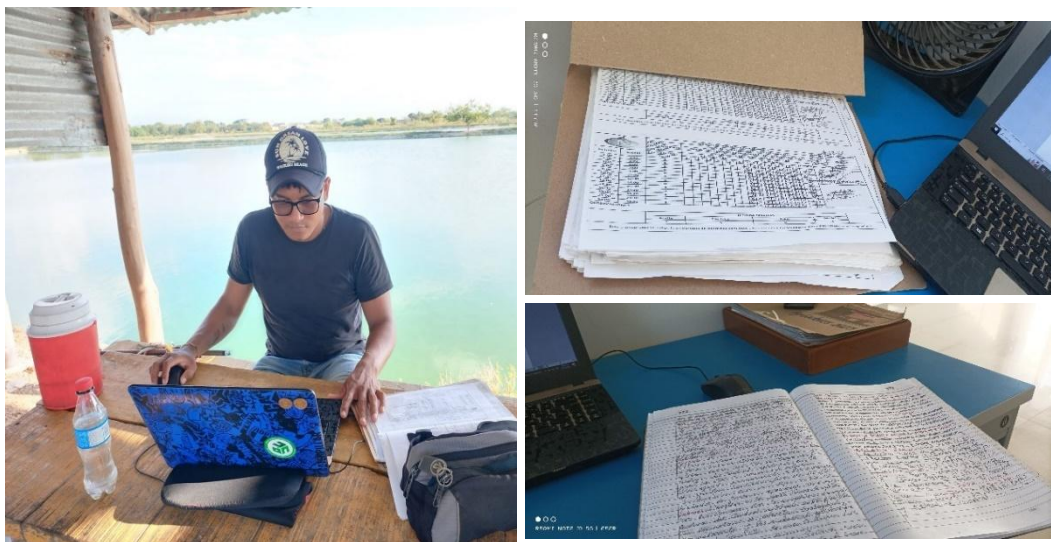


Figura 16. Actualización de las bitácoras y registros de operación de la PTAR vía Puerto Mosquito

Fuente: Autor, 2024.