



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UN
SISTEMA DE POTABILIZACIÓN CON
FILTRACIÓN GRUESA ASCENDENTE Y
FILTRACIÓN RÁPIDA DESCENDENTE: UNA
ALTERNATIVA DE TRATAMIENTO PARA
PEQUEÑAS COMUNIDADES**

Autor(es)

Maria Camila Grueso Domínguez

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021



Evaluación y optimización de un sistema de potabilización con filtración gruesa ascendente y filtración rápida descendente: una alternativa de tratamiento para pequeñas comunidades

Maria Camila Grueso Domínguez

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Ambiental

Asesores (a):

Camilo César Castro Jiménez

Ingeniero Sanitario y Magister en Ingeniería

Mauricio Andrés Correa Ochoa

Ingeniero Sanitario y Magister en Ingeniería Ambiental

Línea de Investigación:

Tratamiento de aguas

Grupo de Investigación:

Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental- GIGA

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	6
1 Preguntas de investigación	11
2 Objetivos	11
2.1.1 Objetivo general	11
2.1.2 Objetivos específicos.....	11
3 MARCO CONCEPTUAL	12
3.1 Generalidades de la calidad del agua	12
3.2 Desafíos en el diseño de plantas de potabilización	16
3.3 Operaciones y procesos aplicados en la potabilización convencional	17
3.3.1 Coagulación	19
3.3.2 Floculación	21
3.3.3 Sedimentación.....	23
3.3.4 Filtración.....	24
3.4 Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención hidráulica	27
4 ASPECTOS METODOLÓGICOS	28
4.1 Sistema de potabilización a escala piloto	28
4.2 Métodos analíticos estandarizados.....	29
4.3 Agua sintética de alimentación.....	30
4.4 Ensayos de jarras.....	31
4.5 Evaluación hidráulica del sistema.....	32
4.6 Diseño experimental	33
4.7 Análisis estadístico	36
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
5.1 Evaluación hidráulica del sistema.....	37
5.2 Ensayos de jarras.....	44
5.3 Tratamientos experimentales.....	48
5.4 Análisis estadístico	55
6 CONCLUSIONES.....	61
7 TRABAJO DE INVESTIGACIÓN FUTURO.....	63
8 REFERENCIAS.....	63
9 ANEXOS	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Principales parámetros propuestos para evaluar la calidad del agua para consumo humano.....	14
Tabla 2. Condiciones para la realización de los ensayos de trazadores.....	33
Tabla 3 . Descripción de los tratamientos	34
Tabla 4. Descripción de los ensayos adicionales	36
Tabla 5 .Variables relacionadas en la curva de concentración del trazador	37
Tabla 6. Resultados de la aplicación del modelo simplificado Wolf-Resnick	42
Tabla 7. Resultados del análisis de la curva de tendencia	43
Tabla 8. Resultados ensayo de jarras, PAC, agua Tipo I	44
Tabla 9. Resultados ensayo de jarras, PAC, agua Tipo II	45
Tabla 10. Resultados ensayo de jarras, sulfato férrico, agua Tipo I	46
Tabla 11. Resultados ensayo de jarras, sulfato férrico, agua Tipo II	46
Tabla 12. Resultados de turbiedad para efluentes FGAC y del sistema de potabilización (FRA) en los tratamientos realizados.....	48
Tabla 13. Resultados de pH, Temperatura y conductividad del efluente del sistema de potabilización obtenidos durante los ensayos realizados.	51
Tabla 14. Resultados de las pruebas de normalidad y de igualdad de varianza en los datos de porcentaje de remoción de turbiedad del diseño experimental.....	56
Tabla 15. Efectos estimados para el porcentaje de remoción de turbiedad.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Desglose de los recursos hídricos de la tierra, ilustrando los componentes de agua dulce por porcentaje. Adaptado de (Nalco Water, 2018).....	6
Figura 2. Población rural con acceso a agua potable en el departamento de Antioquia. Adaptado de (Departamento Administrativo de Planeación, 2017)	8
Figura 3. Tipos de partículas presentes en el agua según su tamaño. Tomada de (Naranjo, 2009)	19
Figura 4. Esquema del sistema de potabilización a escala de laboratorio. (Fuente: elaboración propia)	29
Figura 5. Sistema de potabilización a escala de laboratorio.....	29
Figura 6. Curva de calibración para la turbiedad.....	31
Figura 7 .Equipo para ensayo de jarras	32
Figura 8. Variación de la concentración del trazador en el efluente del FGAC. Caudal 1,0 m ³ /d	38
Figura 9. Curva de 1-F(t). Cantidad de trazador que permanece en el FGAC, Caudal 1,0 m ³ /d	39
Figura 10. Variación de la concentración del trazador en el efluente del FGAC. Caudal 0,5 m ³ /d	39
Figura 11. Curva de 1-F(t). Cantidad de trazador que permanece en el FGAC, Caudal 0,5 m ³ /d	40
Figura 12. Variación de la concentración del trazador en el efluente del FRA. Carga hidráulica: Caudal 1,0 m ³ /d	41

Figura 13. Curva de 1-F(t). Cantidad de trazador que permanece en el FRA, Caudal 1,0 m ³ /d	41
Figura 14. Variación de la concentración del trazador en el efluente del FRA. Caudal 0,5 m ³ /d	42
Figura 15. Curva de 1-F(t). Cantidad de trazador que permanece en el FRA, Caudal 0,5 m ³ /d	42
Figura 16. Porcentaje de remoción de turbiedad vs dosis de coagulante, agua Tipo I.	47
Figura 17. Porcentaje de remoción de turbiedad vs dosis de coagulante, agua Tipo I.	47
Figura 18. Resultados del porcentaje remoción promedio de turbiedad en los tratamientos evaluados vs los blancos.	50
Figura 19. Variabilidad y tendencia de a) conductividad; b) pH y c) temperatura medidas en el efluente del sistema de potabilización durante los ensayos realizados.	52
Figura 20. Resultados del ensayo para evaluación de remoción de microorganismos.	54
Figura 21. Resultados para la evaluación del aumento en el caudal de operación.	55
Figura 22. Gráfica de cubos (medias ajustadas) para remoción de turbiedad (%) en el FGAC	59
Figura 23. Gráfica de cubos (medias ajustadas) para remoción de turbiedad (%) en el efluente del sistema, FRA	60
Figura 24. Comportamiento en el tiempo de la turbiedad, el pH y la conductividad eléctrica para las condiciones óptimas de operación del sistema.....	61

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 .Fichas técnicas de los coagulantes.....	68
Anexo 2. Tabla A1. Resultados Tratamiento 1	70
Anexo 3. Tabla A2. Resultados Tratamiento 2	71
Anexo 4. Tabla A3. Resultados Tratamiento 3.....	72
Anexo 5. Tabla A4. Resultados Tratamiento 4.....	73
Anexo 6. Tabla A5. Resultados Tratamiento 5.....	74
Anexo 7. Tabla A6. Resultados Tratamiento 6.....	75
Anexo 8. Tabla A7. Resultados Tratamiento 7.....	76
Anexo 9. Tabla A8. Resultados Tratamiento 8.....	77
Anexo 10. Tabla A9. Resultados Tratamiento 9.....	78
Anexo 11. Tabla A10. Resultados Tratamiento 10	79
Anexo 12. Tabla A11. Resultados Tratamiento 11	80
Anexo 13. Tabla A12. Resultados Tratamiento 12	81
Anexo 14. Tabla A13. Resultados Tratamiento 13.....	82
Anexo 15. Tabla A14. Resultados Tratamiento 14.....	83
Anexo 16. Tabla A15. Resultados Tratamiento 15.....	84
Anexo 17. Tabla A16. Resultados Tratamiento 16.....	85
Anexo 18. Tabla A17. Resultados Blanco, agua Tipo I	86
Anexo 19. Tabla A18. Resultados Blanco, agua Tipo II	87
Anexo 20. Tabla A19. Resultados Tratamiento con Microorganismos	88
Anexo 21. Tabla A20. Resultados 200% del caudal mayor.....	89
Anexo 22. Tabla A21. Resultados 300% del caudal mayor.....	89
Anexo 23. Tabla A22. Resultados con turbiedad de 50 UNT	90

INTRODUCCIÓN

A pesar de que un gran porcentaje de nuestro planeta está cubierto por agua, la mayor parte no es utilizable en la forma en la que se encuentra. Para uso humano, se puede dividir el recurso en agua dulce o fresca y en agua salada. El uso humano se centra en el agua dulce, que comprende solo alrededor del 2.5% del agua que se encuentra en la tierra. El 97.5% restante es mar o agua salada, la cual no es considerada apta para la industria, la agricultura o el uso doméstico, sin antes someterse a tratamientos avanzados y costosos (Grueso et al., 2019). Cuando se estudian los recursos de agua dulce en la tierra, se encuentra que aproximadamente el 68.7% está confinado en capas de hielo y glaciares, lo que hace que esta porción del recurso este fuera de alcance. Tan solo el 31.3 % restante es el agua superficial y subterránea utilizable. Esta última fracción de los recursos hídricos de la tierra es compatible con toda la vida terrestre, la industria y la agricultura. La Figura 1 ilustra el panorama antes mencionado (Nalco Water, 2018).

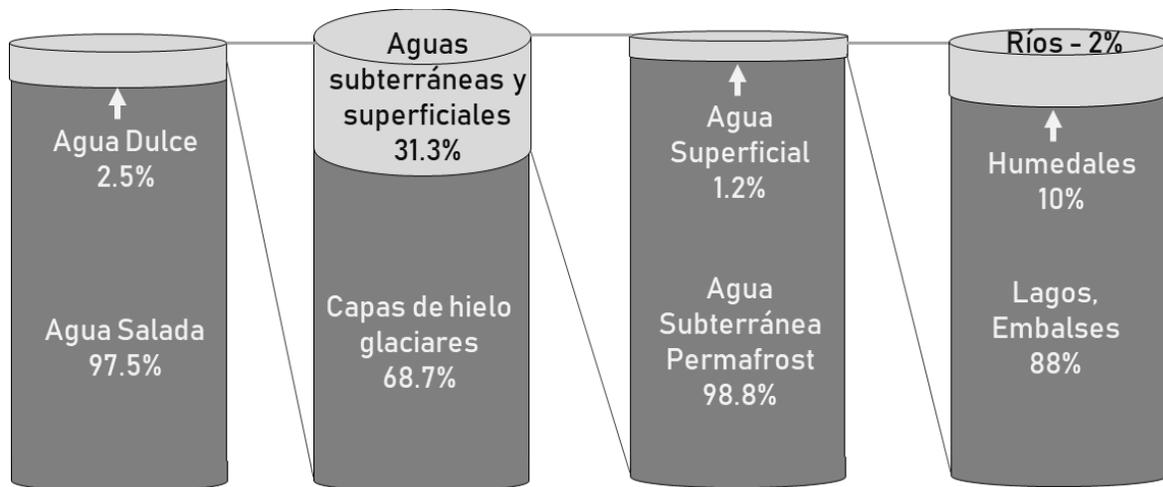


Figura 1. Desglose de los recursos hídricos de la tierra, ilustrando los componentes de agua dulce por porcentaje. Adaptado de (Nalco Water, 2018)

Los recursos de agua dulce en el mundo no se dividen de manera uniforme; a nivel regional, América del Norte y del Sur cuentan con la mayor cantidad de agua,

mientras que África y Oriente Medio tienen la menor cantidad. A nivel de países, aproximadamente la mitad de los recursos de agua dulce del mundo se encuentran en Brasil, Canadá, China, Colombia, Indonesia, Perú, Rusia y Estados Unidos (Margat & Vallée, 2014).

Las dinámicas globales cambiantes están ejerciendo una presión creciente sobre la disminución de los suministros de agua dulce del mundo (Hoslett et al., 2018); además, a pesar de que el agua es fundamental para la vida, la agricultura y la industria, aproximadamente el 40% de la población mundial vive bajo estrés hídrico, es decir, tienen graves deficiencias para ser abastecidos con agua potable, especialmente en las zonas rurales (Nalco Water, 2018).

De acuerdo con el sexto Objetivo de Desarrollo Sostenible, se deberá lograr para el año 2030, el acceso universal y equitativo al agua potable y al saneamiento básico, especialmente para las comunidades más pobres y vulnerables (Medeiros et al., 2020) y aunque el acceso a servicios de acueducto ha mejorado en los últimos años a nivel mundial, sigue existiendo una inequidad entre las zonas urbanas y rurales, debido principalmente a las condiciones de prestación de estos servicios (Fuller et al., 2016).

Según el Plan Director de Agua y Saneamiento Básico de 2018, en Colombia, se tiene una cobertura del 97.8% en acueducto en la zona urbana. Para la zona rural se tiene una cobertura del 73,2%, la cual incluye soluciones alternativas de acceso a agua (acarreo desde pilas públicas o dispositivos móviles de almacenamiento, abasto directamente desde la fuente, dispositivos intradomiciliarios, entre otros). Se debe mencionar que la existencia de un acueducto o solución alternativa no garantiza el acceso a agua con calidad óptima para el consumo humano, ya que dentro de la cobertura de acueducto se consideran soluciones individuales en las que comúnmente no se realiza ningún tratamiento al agua para potabilizarla. (Departamento Nacional de Planeación - DNP, 2005). Al consultar la información de calidad del agua reportada ante la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios SSPD, de los datos de cobertura registrados, el 86% de la población

urbana cuenta con suministro de agua apta para el consumo humano (IRCA sin riesgo, Resolución 2115 de 2007), y tan solo el 42% (del 73,2% que tiene cobertura de acueducto) de la población rural del país cuenta con agua potable (Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico, 2018).

En el caso del Departamento de Antioquia, de acuerdo con el Departamento Administrativo de Planeación, se registra un 98,1% de viviendas urbanas con agua potable y tan solo un 27.7% de viviendas rurales con agua potable. (Departamento Nacional de Planeación, 2017). En la Figura 2 se muestran los porcentajes de agua potable en zonas rurales para las diferentes subregiones del departamento.

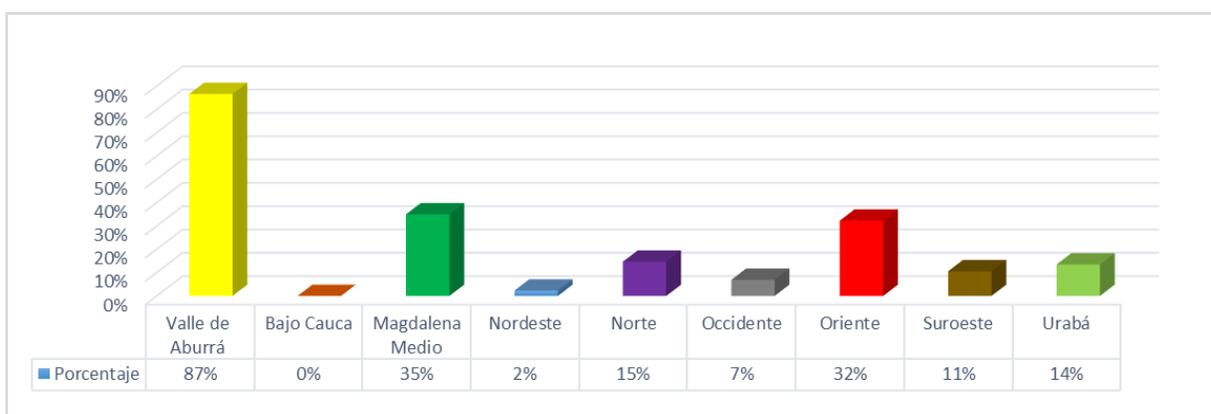


Figura 2. Población rural con acceso a agua potable en el departamento de Antioquia. Adaptado de (*Departamento Administrativo de Planeación, 2017*)

El panorama frente al déficit de cobertura de acueductos y suministro de agua potable en las zonas rurales del departamento de Antioquia puede atribuirse a diferentes factores, entre los que se resalta:

- Difícil implementación de sistemas de tratamiento centralizados, debido a la dispersión de las poblaciones rurales (Souza & Sabogal, 2020).
- La predilección de sistemas de potabilización convencionales de difícil implementación en las pequeñas comunidades (Castro, 2009).
- Abandono de los sistemas de tratamiento por los altos costos de operación y mantenimiento (Castro, 2009).

Un punto de vista interesante y de cuidado, está asociado con las acciones referentes al suministro de agua potable en comunidades rurales, pues en estas zonas, deben centrarse en tecnologías simples y de bajo costo, adaptadas al contexto local (Medeiros et al., 2020), ya que los recursos financieros son limitados y la falta de energía eléctrica impide la implementación de plantas de potabilización convencionales (String et al., 2020).

Los sistemas de potabilización convencionales combinan procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración mediante conjuntos de estructuras, equipos y reactivos químicos que requieren altas inversiones económicas, grandes extensiones de terreno, personal técnico permanente para la operación y el mantenimiento y redes de distribución extensas. A pesar de que las tecnologías convencionales de potabilización han sido ampliamente estudiadas, la transferencia de estas hacia zonas rurales aun es bastante reducida (Naranjo, 2009).

De otro lado, algunos autores han referenciado la filtración en múltiples etapas, como un proceso que permite una alternativa de tratamiento robusta para las fuentes de agua superficial de calidad variable en comunidades rurales, con bajos costos de operación y mantenimiento (Mushila et al., 2016). La coagulación-floculación, basada en sales metálicas hidrolizantes ha mostrado numerosos resultados en la eliminación de partículas coloidales suspendidas, materia orgánica y turbiedad (Wu et al., 2013). Con el enfoque en poblaciones rurales y pequeñas comunidades, la implementación de pequeños sistemas de potabilización que involucren procesos de doble filtración que permitan integrar la floculación y sedimentación en una sola unidad, permitirá reducir las unidades de tratamiento, disminuir los costos de inversión y el área requerida, facilitar la operación y el mantenimiento de los sistemas, y garantizar agua de calidad para estas poblaciones. Estudios han demostrado que los métodos simples y relativamente económicos de potabilización de agua para pequeñas comunidades, pueden contribuir de manera positiva en la calidad del agua potable y reducir los riesgos de enfermedades (Mwabi et al., 2015).

Estos pequeños sistemas de potabilización sostenibles y semi-centralizados son una opción viable para pequeñas comunidades en zonas rurales, porque presentan simplicidad operacional, escaso mantenimiento, buena integración medioambiental, bajos costos de construcción y consumo energético (Peter-varbanets et al., 2012), (Lu et al., 2019), (Schumann et al., 2020). Dichos sistemas influyen en el desarrollo de las comunidades, fomentando los procesos de participación comunitaria, aumentando los conocimientos técnicos de sus habitantes y creando apropiación de las tecnologías. Es importante resaltar que las tecnologías aplicadas solo son útiles si la comunidad se apropia de ellas y es capaz de operarlas, mantenerlas y sostenerlas a través del tiempo con un apoyo mínimo de instituciones externas (Morató et al., 2006). Los resultados exitosos en la implementación de sistemas de potabilización con alternativas sostenibles y descentralizadas, incluyen trabajos como los presentados por Fabiszewski et al., 2012, quienes adaptaron el proceso de filtración lento en arena a una alternativa en el punto de uso a pequeña escala (45 L/h), a través de un diseño simple con pocas inversiones de operación y mantenimiento, con reducciones hasta de 1,33 log para *E. coli*. En el caso de Medeiros, et al., 2020, se evaluó un filtro lento de arena con un filtro dinámico de grava como pretratamiento, para el tratamiento de 45 L/d, encontrando remociones de turbiedad superiores al 60% y una remoción de *E.coli* de hasta 1,78 log. Y el estudio realizado por Lugo et al., 2020, en el cual plantearon alternativas no convencionales para el tratamiento del agua, mediante el uso de coagulantes naturales y filtros de bioarena y carbón activado, con remociones de turbiedad del 98,4% y del 76,9% de coliformes totales.

El objetivo de este trabajo fue evaluar hidráulicamente y optimizar el funcionamiento de un sistema de potabilización a escala piloto compuesto por unidades de filtración gruesa ascendente y filtración rápida descendente, empleando diferentes cargas superficiales de filtración, evaluando la eficiencia en remoción de turbiedad en aguas sintéticas con diferentes características y utilizando diferentes coagulantes.

Para estudiar a profundidad el sistema bajo las condiciones planteadas, se desarrolló un diseño experimental que permitió identificar efectos individuales y/o

de interacción de las características fisicoquímicas del agua de alimentación, el tipo de coagulante y la carga superficial de filtración sobre las características fisicoquímicas del caudal tratado.

Con este trabajo se pretende hacer un aporte al planteamiento de alternativas de tratamiento basadas en evidencia científica que permitan mejorar la cobertura, cantidad, calidad y acceso a agua potable en zonas rurales y pequeñas comunidades, a través de un sistema eficiente, con facilidad de instalación, manejo y operación, que cumpla a su vez, con criterios de bajo costo (operación y mantenimiento) y con la normatividad vigente para la política pública de agua potable en Colombia (Ministerio de la Protección Social, 2007).

1 Preguntas de investigación

Las preguntas que se plantearon en esta investigación fueron: i) ¿Es viable la evaluación hidráulica y optimización de la operación de un sistema de tratamiento a escala piloto compuesto por procesos de filtración gruesa ascendente y filtración rápida descendente, que integre a su vez procesos de coagulación, floculación y sedimentación? ii) ¿Cuál es el efecto de las características fisicoquímicas del agua de alimentación del sistema, la carga superficial, y el tipo de coagulante sobre las características fisicoquímicas del caudal tratado? iii) ¿Cuáles son las condiciones óptimas de operación del sistema de tratamiento?

2 Objetivos

2.1.1 Objetivo general

Evaluar el funcionamiento de un sistema de tratamiento a escala piloto, compuesto por unidades de filtración gruesa ascendente y filtración rápida descendente, que integre procesos de coagulación, floculación y sedimentación en sus unidades.

2.1.2 Objetivos específicos

- Determinar el tiempo de retención hidráulica y la distribución de flujos a través de una prueba de trazadores, para establecer el comportamiento hidráulico del sistema de tratamiento diseñado
- Establecer el tipo de coagulante y la dosis óptima a evaluar en el sistema de tratamiento, mediante un ensayo de jarras
- Analizar el efecto individual de las características fisicoquímicas del agua de alimentación, el tipo de coagulante y la carga superficial, y la interacción de los mismos sobre las características fisicoquímicas del caudal tratado, a través de un diseño factorial y su respectivo análisis
- Identificar las condiciones óptimas de operación del sistema de tratamiento a escala piloto

3 MARCO CONCEPTUAL

3.1 Generalidades de la calidad del agua

El agua, considerada como una sustancia químicamente pura, solamente existe a nivel de laboratorio. En la naturaleza, la composición original del agua se ve alterada debido a fenómenos naturales como la escorrentía superficial y subterránea y la erosión de suelos, los cuales generan arrastre de diferentes tipos de materiales y su posterior incorporación al fluido; la influencia de elementos o sustancias derivadas de las actividades humanas como la agricultura, la minería, las industrias y los vertimientos de aguas residuales y residuos sólidos, dan origen a cambios significativos en las características del agua (Alley, 2007).

Gracias a su naturaleza polar, su capacidad de formar enlaces o puentes de hidrogeno, su condición de solvente universal, entre otras propiedades importantes, el agua es un medio esencial de vida que juega un papel crucial en la dinámica ambiental y en los usos domésticos e industriales. Evaluar la calidad del agua en términos de parámetros físicos, químicos y microbiológicos, permite verificar si la calidad del recurso cumple con las condiciones para los usos requeridos (Sierra, 2011). La calidad del recurso puede analizarse de acuerdo a su estado, haciendo

en este caso distinción entre agua cruda, agua tratada (potable) y agua residual, esta última no será objeto de estudio en este trabajo.

El termino agua cruda hace referencia a aquella que se encuentra en el ambiente y que no ha recibido ningún tratamiento ni modificación en su estado natural (Ministerio de la Protección Social, 2007). Entre las principales fuentes de agua con potencial de utilización para el consumo humano en los países en desarrollo, se incluyen las fuentes superficiales (quebradas, ríos, embalses y lagos), las aguas subterráneas y las aguas lluvias (Castro, 2009). Dado que esta investigación se enfoca en alternativas de potabilización para fuentes superficiales, en adelante solo se considerarán los aspectos concernientes a esta fuente.

Se entiende por agua tratada aquella a la cual se le han cambiado sus características físicas, químicas y microbiológicas con el propósito de darle algún uso específico, como el consumo humano. La calidad requerida del agua para consumo humano depende de la regulación de cada país. En el caso de Colombia, actualmente las normas vigentes para la calidad de agua para consumo humano están reguladas por la Resolución 2115 de 2007 emitida por el Ministerio de Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, “por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano”.

La evaluación de calidad del agua está relacionada con la necesidad de verificar si el recurso cumple con las condiciones para los usos requeridos, con la determinación de las tendencias de la calidad del ambiente acuático y las afectaciones que este sufre por el vertimiento de contaminantes, el diagnóstico de los procesos de tratamiento y el cumplimiento de la normatividad. Existen diversas maneras de agrupar las impurezas o contaminantes en las fuentes de agua, por ejemplo, por diferentes rangos de concentraciones, por rangos de solubilidad de los materiales o por tipo de material, como compuestos inorgánicos y orgánicos (Nalco Water, 2018). De acuerdo a esta clasificación, existen gran cantidad de

contaminantes y la forma más simple de abordarlos es a partir de su unificación en parámetros de tipo físico, químico y microbiológico.

De acuerdo al alcance de este proyecto, se especifican las principales características del agua para consumo humano. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los principales parámetros propuestos para evaluar la calidad del agua, y los valores máximos aceptables establecidos por la legislación vigente de agua para consumo humano.

Tabla 1. Principales parámetros propuestos para evaluar la calidad del agua para consumo humano

Parámetro	Tipo	Descripción	Valor máximo aceptable- Resolución 2115 de 2007
Coliformes Totales	Microbiológico	Prueba inicial para detectar la posible presencia de contaminación fecal en el agua suministrada, así como para evaluar la efectividad del tratamiento del agua y la integridad del sistema de distribución.	Ausencia- 0 UFC/100 cm ³
<i>E. coli</i>	Microbiológico	Indicador específico que el cuerpo de agua está contaminado con materia orgánica de origen fecal, ya sea por humanos o animales.	Ausencia- 0 UFC/100 cm ³
Color Aparente	Físico	El color en el agua resulta de la presencia de diferentes sustancias orgánicas e inorgánicas, como iones metálicos, humus, restos vegetales, etc; incluye materia en suspensión. Ocasionalmente, las floraciones excesivas de algas o el crecimiento de microorganismos acuáticos también pueden impartir color.	15 UPC
Turbiedad	Físico	La presencia de material suspendido como arcilla, limo, material orgánico finamente dividido, plancton y otro material en partículas en el agua se conoce como turbiedad. La arcilla u otras partículas inertes suspendidas en sí mismas pueden no afectar	2 UNT

Parámetro	Tipo	Descripción	Valor máximo aceptable- Resolución 2115 de 2007
		negativamente a la salud, pero el agua que contiene tales partículas puede requerir tratamiento para que sea adecuada para la desinfección. En general, la turbidez reduce la eficiencia de desinfección al consumir el desinfectante y proteger los microorganismos.	
pH	Físico	Expresa la magnitud de acidez o alcalinidad. Es una forma de expresar la concentración de los iones hidrogeno. Es importante en la coagulación química, la desinfección, el ablandamiento de aguas y el control de la corrosión.	6,5- 9,0 Unidades de pH
Conductividad eléctrica	Físico	Es un indicativo de las sales disueltas en el agua y mide la cantidad de iones especialmente de Ca, Mg, Na, P, bicarbonatos, cloruros y sulfatos. Es una medida indirecta de los sólidos disueltos.	1000 microsiemens/cm
Alcalinidad	Químico	Medida de los efectos de la combinación de sustancias asociadas a los carbonatos y bicarbonatos. Debido a las variaciones que producen en el pH se generan reacciones secundarias rompiendo el ciclo ecológico en un cuerpo de agua. Se expresa como la concentración de carbonato de calcio.	200 mg/L CaCO ₃
Hierro total	Químico	Aguas con altos contenidos de este metal, al entrar en contacto con el aire, se puede precipitar, originando sólidos sedimentables, y coloración de las aguas.	0,3 mg/L Fe
Aluminio	Químico	El sulfato de aluminio se usa en la potabilización del agua como floculante. Valores mayores de 1,5 mg/L constituye un tóxico peligroso en los ambientes marinos.	0,2 mg/L Al ³⁺

Adaptada de: (Mackenzie, 2020), (Sierra, 2011), (Ministerio de la Protección Social, 2007)

3.2 Desafíos en el diseño de plantas de potabilización

El diseño de sistemas de potabilización de agua y su continuo desarrollo desde principios del siglo XX, ha estado marcado por la búsqueda de técnicas que permitan asegurar la eliminación o inactivación de organismos patógenos en los suministros de agua potable. Desde esta época, la filtración con pretratamiento adecuado y la cloración han sido aplicadas con resultados satisfactorios (Alley, 2007).

El principal desafío para los profesionales en el tratamiento del agua, desde los años sesenta, fue la implementación de sistemas simples y eficientes al costo total más bajo posible, garantizando rentabilidad económica. En los años ochenta surgió una nueva preocupación sobre el agua potable: los riesgos potenciales para la salud a largo plazo generados por pequeñas cantidades de compuestos orgánicos presentes en el agua, incluidos los subproductos de desinfección, trihalometanos, productos químicos orgánicos sintéticos y productos químicos orgánicos volátiles; y en la década de los noventa, la preocupación se centró en la contaminación microbiológica (The American Water Works Association, 2011). En respuesta a estas preocupaciones, los ingenieros del campo de tratamiento del agua consideraron nuevas tecnologías y procesos como la coagulación, la adsorción con carbón activado, el tratamiento con membranas, además de la protección de fuentes hídricas y la optimización de los sistemas de tratamiento.

Actualmente se enfrentan muchos desafíos, nuevos y pasados, impulsados por la selección de los procesos de tratamiento y el constante desarrollo de las plantas de tratamiento. Algunos de los desafíos más importantes son: (The American Society of Civil Engineers, 2012)

- **Recurso hídrico limitado:** el aumento en la demanda de los recursos hídricos ha obligado a tener un mayor enfoque en la selección de procesos de

tratamiento más eficientes, reúso del agua, empleo de fuentes de menor calidad y recuperación de acuíferos.

- **Sistemas de tratamiento sostenibles:** es necesario optimizar la infraestructura y los materiales existentes, reducir las huellas ambientales de las instalaciones, minimizar el uso de productos químicos, incorporar fuentes alternativas de energía y desarrollar planes para gestionar económicamente los residuos de manera ambientalmente racional.
- **Cambio climático:** las preocupaciones sobre el cambio climático están estrechamente relacionadas con los desafíos de los recursos hídricos limitados y la necesidad de diseñar plantas sostenibles.
- **Nuevas tecnologías:** el estado del arte del diseño de sistemas de potabilización de agua cambia continuamente a medida que surgen nuevas tecnologías, ofreciendo nuevos procesos unitarios para el tratamiento del agua o haciendo que los procesos utilizados actualmente sean más eficientes o económicos.
- **Equipos multidisciplinarios:** la complejidad de los proyectos y de la legislación de agua potable requiere un enfoque mucho más multidisciplinar. Se requieren ingenieros sanitarios y civiles, ingenieros de proceso, ingenieros electrónicos, especialistas en operaciones de planta, especialistas en salud, científicos ambientales, especialistas en permisos ambientales y trabajadores sociales. Las decisiones importantes de diseño hoy en día ya no son tomadas unilateralmente por el equipo del proyecto. Es necesario llegar a un consenso después de la participación de los miembros del equipo de diseño y de personas ajenas al equipo, incluidos propietarios, operadores, autoridades ambientales y el público en general.

3.3 Operaciones y procesos aplicados en la potabilización convencional

La potabilización del agua, independiente de su origen, responde a la necesidad de ajustar sus características físicas, químicas y biológicas a unos valores o intervalos establecidos por la legislación nacional, para que sea un agua apta para el consumo humano (Lin et al., 2015). La selección de los procesos unitarios apropiados y la

integración de estos en una planta de tratamiento de agua implica la consideración de factores como: la calidad del agua de origen, el cumplimiento normativo, la fiabilidad y flexibilidad del proceso, la construcción inicial y los costos anuales de operación y mantenimiento e impactos ambientales.

Una de las principales consideraciones para seleccionar las fuentes de abastecimiento es la provisión de una cantidad adecuada para satisfacer las demandas del sistema en una amplia gama de condiciones. Otros factores que deben considerarse son el costo para extraer y transportar el agua hasta el punto de uso y las características de calidad del agua que afectan las necesidades de tratamiento (The American Society of Civil Engineers, 2012). La complejidad de estos problemas varía según la ubicación. En algunos lugares, se encuentran disponibles suministros adecuados de agua de alta calidad en una proximidad razonable al área a ser servida, mientras que otros involucran vastos sistemas de transporte.

El diseño de un sistema de potabilización parte del tipo de partículas que se requieren remover de la fuente de abastecimiento, las cuales, según su tamaño pueden clasificarse en: disueltas, coloidales y suspendidas, como se presenta en la Figura 3. Cada una de estas clasificaciones aporta diferentes características fisicoquímicas al agua, cuya determinación completa es de vital importancia para escoger el tipo de tratamiento que se debe aplicar (Naranjo, 2009).

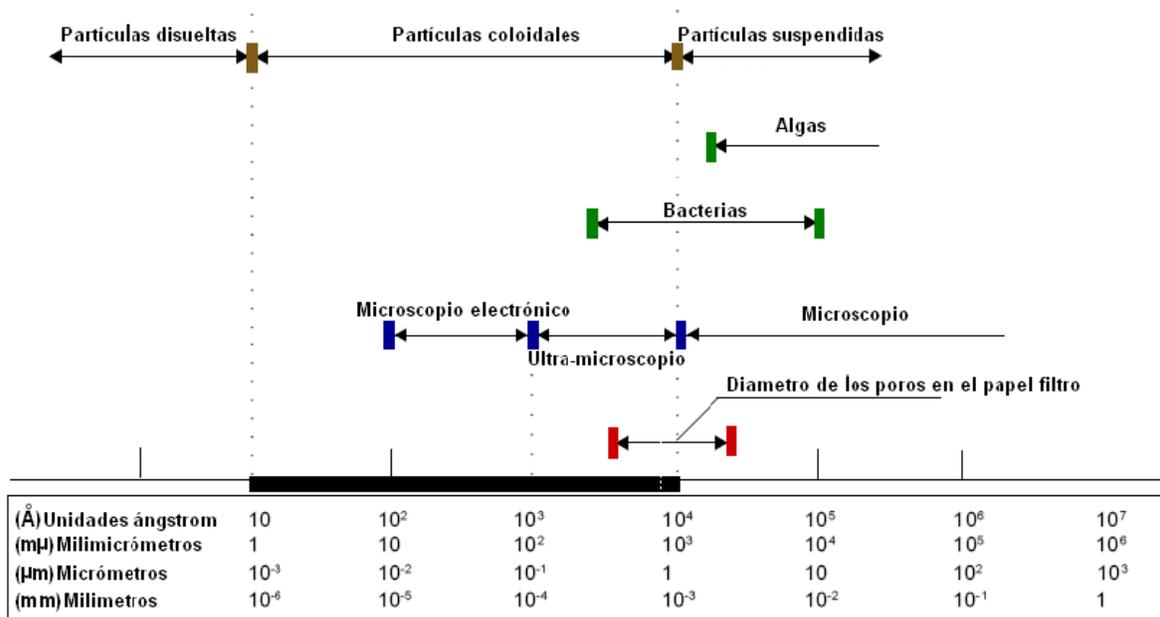


Figura 3. Tipos de partículas presentes en el agua según su tamaño. Tomada de (Naranjo, 2009)

El sistema de tratamiento convencional o de ciclo completo es una de las alternativas con amplia aplicación en Colombia, donde la mayoría de las fuentes de abastecimiento para consumo humano corresponden a fuentes superficiales, en las cuales predominan las partículas suspendidas y las partículas coloidales; el tratamiento convencional incluye el proceso de coagulación, las operaciones de floculación, sedimentación y filtración y el proceso de desinfección, realizado generalmente con compuestos de cloro; este último proceso no se abordará en este trabajo.

3.3.1 Coagulación

Las partículas coloidales y suspendidas presentes en el agua superficial se encuentran normalmente en una condición estable caracterizada por fuerzas de repulsión que provienen de las cargas presentes en la superficie de las partículas; esta carga hace que las partículas permanezcan en suspensión sin formar agregados durante largos periodos, lo que implica que no puedan ser removidas por

sedimentación en un tiempo razonable. El mecanismo principal que controla la estabilidad es la repulsión electrostática (Mackenzie, 2020).

La coagulación puede describirse de manera general, como un proceso químico en el que participan productos químicos coagulantes para formar agregados de partículas (flóculos) para su posterior eliminación mediante procesos de sedimentación, flotación y/o filtración. El propósito de la coagulación es desestabilizar las partículas y permitir que se adhieran a otras, para que puedan ser eliminadas en procesos posteriores (Skaf et al., 2021). Es un componente esencial de los sistemas convencionales de tratamiento de agua en los que se combinan los procesos de coagulación, clarificación, filtración y desinfección para tratar el agua y remover e inactivar contaminantes microbiológicos como virus, bacterias, quistes y ooquistes de protozoos patógenos.

Los coagulantes más utilizados en el tratamiento del agua son las sales de sulfato o cloruro que contienen los iones metálicos Al^{3+} o Fe^{3+} . En soluciones acuosas, esos iones altamente positivos facilitan la desestabilización de las partículas. También pueden usarse polímeros o polielectrolitos, los cuales son una variedad de compuestos sintéticos y naturales. Hay cuatro principales mecanismos que permiten la desestabilización de las suspensiones de agua: (Mackenzie, 2020)

- Compresión de la doble capa eléctrica: las partículas cargadas negativamente acumulan contraiones positivos cerca de la superficie, formando una doble capa. La capa adsorbida de cationes (la cual se conoce como capa de Helmholtz) está unida a la superficie de la partícula por fuerzas electroestáticas y de adsorción; luego se forma una capa difusa suelta más allá de la capa de Helmholtz. La doble capa (Helmholtz más difusa) tiene una carga negativa sobre la solución. Si se comprime la doble capa eléctrica, las fuerzas de repulsión se reducen y las partículas formarán agregados como resultado del movimiento browniano y permanecerán unidas debido a las fuerzas de atracción de Van der Waals.

- Adsorción y neutralización de carga: Las sales de metales prehidrolizados y los polímeros catiónicos tienen una carga positiva. Los complejos hidroxilados pueden ser adsorbidos por los coloides, lo que provoca la desestabilización de las partículas mediante la neutralización de cargas.
- Adsorción y puente entre partículas: La desestabilización por formación de puentes se produce cuando los segmentos de un polímero de alto peso molecular se adsorben en más de una partícula, uniendo así las partículas. Esta unión o puente permite formar una partícula más grande que se sedimenta más rápidamente.
- Barrido: cuando la dosis excede la saturación para el hidróxido metálico, las sales de aluminio y de hierro forman precipitados insolubles que atrapan la materia particulada.

El proceso de coagulación depende de factores como las características físicas y químicas del agua, la dosis óptima de coagulante, el pH óptimo de coagulación y la intensidad y tiempo de mezcla (Castro, 2009). Las reacciones de coagulación ocurren rápidamente, probablemente tomando menos de un segundo para la neutralización de carga, pero más tiempo para otros mecanismos. La eficacia de la mezcla del coagulante con el agua es un aspecto fundamental en la coagulación; la mezcla rápida es una mezcla de alta intensidad que permite dispersar el coagulante e iniciar el proceso de agregación de partículas. Los productos químicos coagulantes se pueden mezclar usando mezcladores mecánicos, mezcladores hidráulicos, mezcla de aire o mezcladores en línea (The American Society of Civil Engineers, 2012).

3.3.2 Flocculación

La flocculación es el proceso de mezcla de baja intensidad que se utiliza para aumentar la velocidad de aglomeración de pequeñas partículas y coloides para formar flóculos que pueden eliminarse mediante un proceso de separación posterior. El tamaño, la densidad y la fuerza de los flóculos dependen de los tipos y

dosis de los coagulantes utilizados y de las condiciones como la intensidad de la mezcla y la duración del proceso de floculación (The Water Environment Federation, 2017). Varios mecanismos pueden causar movimiento relativo y colisiones entre partículas en una suspensión desestabilizada: (The American Water Works Association, 2011)

- **Movimiento Browniano:** Las pequeñas partículas suspendidas en un fluido se mueven de forma aleatoria debido a continuas colisiones con las moléculas de agua circundantes. El proceso se llama difusión browniana y la interacción de partículas que provoca es la floculación browniana o pericinética.
- **Gradientes de velocidad en flujo laminar:** Cuando las partículas están suspendidas en un campo de flujo laminar, una partícula ubicada en un punto con alta velocidad de fluido tiende a moverse más rápido que una en un punto con baja velocidad. Si las partículas están lo suficientemente cerca, sus diferentes velocidades eventualmente harán que entren en contacto. Este proceso se llama floculación ortocinética.
- **Sedimentación diferencial:** La floculación por sedimentación diferencial ocurre cuando las partículas tienen velocidades de sedimentación desiguales y su alineación en la dirección vertical las hace tender a chocar cuando una sobrepasa a la otra. La fuerza impulsora de este mecanismo es la gravedad.
- **Transporte turbulento:** En el flujo turbulento, el movimiento fluctuante del fluido forma remolinos que varían en tamaño. Estos gradientes de velocidad provocan el movimiento relativo de las partículas arrastradas y este movimiento relativo, como en el flujo laminar, provoca la floculación.

La formación de flóculos de tamaño óptimo generalmente requiere una mezcla suave en el rango de gradiente de energía de 20 a 70 s^{-1} durante un período total de aproximadamente 10 a 30 min, dependiendo de la calidad del agua, las características del flóculo y la naturaleza de la sedimentación y filtración aguas abajo. La floculación se puede lograr mediante métodos hidráulicos o dispositivos mecánicos (Alley, 2007).

3.3.3 Sedimentación

Luego de garantizar un tamaño adecuado de las partículas en los procesos de coagulación y floculación para que se sedimenten en un período de tiempo razonable, el medio más común para eliminarlos del agua es mediante la sedimentación gravitacional. También se pueden emplear otros medios, como la filtración directa o la flotación (Mackenzie, 2020). La sedimentación y la filtración son consideradas etapas complementarias; la sedimentación permite remover sólidos densos, mientras que la filtración promueve la separación de partículas que tienen una densidad cercana a la del agua o que han sido resuspendidas y por ende no han sido removidas en el proceso anterior (Castro, 2009).

La sedimentación se puede llevar a cabo a través de diferentes mecanismos, los cuales dependen de las características de las partículas y de su concentración: (Nalco Water, 2018)

- Sedimentación de partículas discretas: Las partículas se depositan discretamente a una velocidad de sedimentación constante; no cambian de forma, tamaño o densidad durante la sedimentación; cuando la concentración de partículas es muy pequeña, cada partícula se asienta discretamente, como si estuviera sola, sin obstáculos por la presencia de otras partículas y como ejemplo se tienen las arenas. De manera general, se presenta en los desarenadores antes de la coagulación y en la sedimentación de arenas durante la limpieza de filtros rápidos de arena.
- Sedimentación de partículas floculentas: Las partículas floculentas se forman por aglomeración de partículas desestabilizadas en la etapa de coagulación, su forma, tamaño y densidad cambian durante la sedimentación. Este tipo de sedimentación se presenta en la clarificación de aguas, como etapa intermedia entre la floculación y la filtración rápida.
- Sedimentación por caída libre e interferida: Cuando existe una baja concentración de partículas en el agua, la sedimentación se lleva a cabo sin la interacción entre dichas partículas y entre ellas y el fluido. A esta

sedimentación se le denomina sedimentación en caída libre. Cuando hay suspensiones de concentración intermedia de material floculento, se presentan choques y ocurre un asentamiento interferido debido a la cercanía entre partículas. Este tipo de sedimentación se presenta en los espesadores de lodos (Wills et al., 2010).

En el proceso de sedimentación influyen factores como la calidad del agua, las condiciones hidráulicas del sedimentador y factores externos como los procesos previos de coagulación y floculación. Los sedimentadores pueden ser de tipo estático (de flujo horizontal o vertical), dinámicos o laminares (sedimentación de alta tasa) (Nalco Water, 2018).

3.3.4 Filtración

La filtración de medios granulares, como se aplica al tratamiento de agua, es el paso de agua a través de un medio granular poroso para eliminar los sólidos suspendidos. Para las aguas superficiales, la filtración junto con la desinfección proporciona una barrera múltiple contra la transmisión de enfermedades transmitidas por el agua. La filtración puede ayudar significativamente al reducir la carga en el proceso de desinfección, aumentar la eficiencia de la desinfección y ayudar a eliminar los precursores para la formación de subproductos de desinfección (Shun Dar Lin, 2014).

Los diversos tipos de filtros utilizados para la eliminación de partículas en la filtración de agua potable se pueden clasificar por varios factores, que incluyen el mecanismo general dominante para la eliminación de partículas, el medio de filtración y la tasa de carga hidráulica (Mackenzie, 2020). De manera general, se considera que la filtración es el resultado de mecanismos de transporte y adherencia; las partículas a remover son transportadas desde la suspensión hasta la superficie de los granos del medio filtrante y permanecen adheridas mientras resistan la acción de las

fuerzas de cizallamiento a causa de las condiciones hidrodinámicas del escurrimiento. En el proceso de filtración se pueden presentar uno o varios mecanismos; dentro de los mecanismos de transporte se destacan: (CEPIS, 2006)

- Cernido: Cuando la partícula es de tamaño mayor que los poros del lecho filtrante, puede quedar retenida en los intersticios; este mecanismo actúa solo en las capas más superficiales del lecho.
- Sedimentación: Se presenta con material suspendido relativamente grande y denso, cuya velocidad de sedimentación sea alta y en zonas del lecho donde la carga hidráulica sea baja.
- Impacto inercial: Las partículas se mueven a lo largo de líneas de corriente; las partículas suspendidas con cantidad de movimiento suficiente para mantener su trayectoria, colisionan con los gránulos del lecho filtrante.
- Difusión: Se presenta por acción del movimiento Browniano.

Las partículas se pueden adherir directamente a los granos o a partículas previamente retenidas; la adherencia se atribuye a la interacción entre las fuerzas eléctricas y las de Van der Waals, y al enlace químico entre las partículas y la superficie de los granos de un material intermediario.

Otra clasificación útil de los procesos de filtración se basa en el material físico utilizado para la eliminación de partículas. Los filtros de lecho granular o medios están compuestos de profundidades específicas de uno o más tipos y tamaños de medios granulares; los filtros de arena rápida, de medios duales y de arena lenta son algunos ejemplos. Por el contrario, los filtros de membrana para la eliminación de partículas se fabrican a partir de una fina capa de material con poros que permiten el paso del agua mientras filtra las partículas. Una característica importante de diseño y operación de los procesos de filtración de partículas es la carga superficial, definida como la tasa de flujo Q a través del filtro dividida por el área de la superficie del filtro A , o Q / A ; los filtros de velocidad rápida operan a cargas superficiales mucho más altas que los filtros de arena lentos; La carga superficial tiene un impacto significativo en el costo de capital del tratamiento porque el área

de superficie de filtración requerida para producir un flujo deseado disminuye a medida que aumenta la carga superficial de diseño (Mackenzie, 2020).

El funcionamiento eficaz de un sistema de filtración de medios granulares de alta velocidad requiere un tratamiento previo de la fuente de agua. La naturaleza, así como la cantidad, del material suspendido en el agua pretratada es fundamental para el rendimiento del filtro. La filtración convencional requiere como pretratamientos la coagulación, floculación y sedimentación (The American Society of Civil Engineers, 2012).

Se han presentado avances significativos en el desarrollo de las tecnologías de filtración rápida de aguas químicamente coaguladas, sin embargo, debido a las características de pequeñas comunidades o zonas rurales que presentan limitaciones de infraestructura y capacidad institucional, ha sido necesario desarrollar nuevas modalidades o variaciones a este tipo de tecnología, por ejemplo la utilización de filtración gruesa ascendente en combinación con técnicas simplificadas de dosificación de coagulantes como pretratamiento, lo que permite reducir las cantidades necesarias de coagulantes químicos y simplificar los procedimientos de tratamiento convencionales (Galvis et al., 1999).

Los filtros gruesos de flujo ascendente consisten en un compartimiento donde se ubica un lecho filtrante de grava, el cual disminuye de tamaño con la dirección del flujo y un sistema de drenaje ubicado en el fondo de la estructura. Este tipo de filtros pueden configurarse en capas, cuando los lechos de grava son instalados en una misma estructura o en serie, cuando se instalan en dos o tres unidades de filtración, cada una con un tamaño predominante de grava. La filtración gruesa ascendente tiene la ventaja de favorecer la acumulación de sólidos en el fondo del filtro, donde se localiza el sistema de drenaje, facilitando el lavado hidráulico o de fondo. Además, la dirección vertical del flujo reduce interferencias generadas por temperatura o diferencias de densidad de fluido, lo cual mejora el comportamiento hidráulico de la unidad (evitando zonas muertas) (Galvis et al., 1999).

3.4 Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención hidráulica

En las unidades de tratamiento de un sistema de potabilización, desde el punto de vista hidráulico, el flujo puede ser de tipo intermitente, en el cual se llena la unidad y se deja el líquido un tiempo determinado mientras se produce el proceso correspondiente, o de tipo continuo; este último es el flujo habitual en los sistemas de tratamiento. En el flujo continuo se pueden presentar reactores de flujo pistón, en el que todas las partículas del fluido que entran a la unidad permanecen en ella el mismo tiempo y no hay ningún tipo de mezcla entre el fluido que ingresa y el que está en la unidad; y se tienen reactores de flujo mezclado en el que todo el elemento que ingresa se dispersa inmediatamente dentro de él, presentándose la misma concentración de una sustancia en todo el reactor. En la práctica es muy difícil lograr estos tipos de flujo ideal, se presenta un intermedio entre los dos flujos anteriores, en el cual, la distribución del tiempo de residencia es una combinación de la distribución predicha teóricamente para los sistemas de flujo pistón y flujo mezclado (CEPIS, 2006).

Para el diseño de las unidades de los sistemas de potabilización se emplea un parámetro denominado tiempo de retención, el cual se define como el tiempo que tardaría una partícula de fluido en entrar y salir de la unidad, en el caso de que todas las partículas evolucionaran de la misma forma, presentándose un flujo ideal. Dadas las condiciones hidráulicas del fluido como son la presencia de zonas muertas, cortocircuitos hidráulicos, recirculaciones, entre otras, en la práctica el comportamiento real de los procesos puede alejarse del flujo ideal, y por tanto, el tiempo de retención varía de una porción de fluido a otra bajo un flujo no ideal, siendo necesario estudiar la distribución de los tiempos de retención para determinar las características hidráulicas predominantes en el sistema y conocer la eficiencia hidráulica del proceso (Wills et al., 2010).

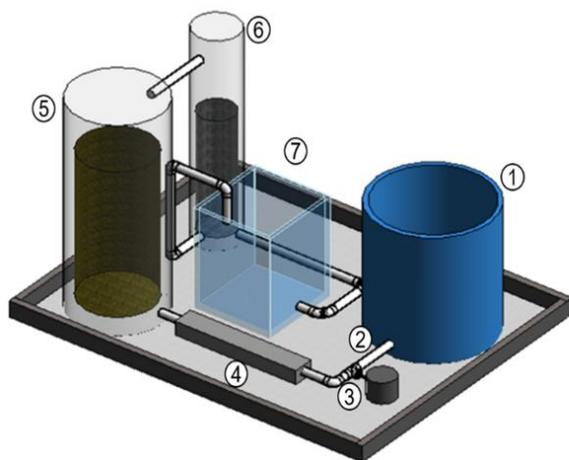
Para determinar el funcionamiento hidráulico de una unidad, se aplican el método experimental estímulo-respuesta, que consiste en inyectar sustancias trazadoras a la entrada del sistema (estímulo) mientras, simultáneamente se comienza a registrar su concentración a la salida (respuesta). Esta aplicación se puede realizar de forma continua (escalón) o instantáneamente (impulso), en un intervalo de tiempo, siendo esta última la más utilizada. Las sustancias trazadoras más utilizadas son los colorantes (rodamina o fluoresceína), los iones (cloruros de sodio o potasio, fluoruros o nitratos de sodio), radioisótopos, ácido clorhídrico y otras sustancias químicas como alizarin o naptol. Estas sustancias trazadoras no pueden reaccionar con la masa líquida ni deben sedimentarse ni absorberse sobre el material suspendido presente en las unidades, deben ser químicamente inertes y además su cuantificación debe realizarse de manera precisa (CEPIS, 2006).

Para la representación del flujo en las unidades de tratamiento, se utilizan modelos matemáticos como el presentado por Wolf y Resnick (1963), donde se supone que el sistema real puede ser estudiado como una combinación de distintas regiones o reactores en cada uno de los cuales puede haber flujo pistón, mezcla completa, zonas muertas, cortocircuitos, entre otros (Naranjo, 2009).

4 ASPECTOS METODOLÓGICOS

4.1 Sistema de potabilización a escala piloto

Para alcanzar los objetivos de esta investigación se diseñó un sistema de potabilización a escala piloto, donde el flujo de agua se garantizó mediante un sistema de bombeo. Las unidades se construyeron en poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) y el sistema fue ensamblado y operado en el laboratorio de investigación del grupo GIGA de la Universidad de Antioquia. En las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 5 se presenta un esquema y una fotografía del sistema de potabilización.



1. Tanque de Alimentación
2. Sensor de flujo de agua
3. Sistema de inyección de coagulante
4. Unidad de mezcla rápida
5. Filtro grueso ascendente en capas (FGAC): volumen total de 0,11 m³, altura de 1,6 m, área superficial de 0,065 m²
6. Filtro rápido descendente en Arena (FRA): volumen total de 0,02 m³, con una altura de 2,0 m y una área superficial de 0,008 m²
7. Tanque de almacenamiento de agua tratada

Figura 4. Esquema del sistema de potabilización a escala de laboratorio. (Fuente: elaboración propia)



Figura 5. Sistema de potabilización a escala de laboratorio.

4.2 Métodos analíticos estandarizados

Todos los análisis fisicoquímicos y microbiológicos desarrollados en esta investigación siguieron los Métodos Estándar para el análisis de aguas y aguas residuales, 23^a edición (2017) de la American Public Health Association (APHA),

American Water Works Association (AWWA) y Water Environment Federation (WEF).

4.3 Agua sintética de alimentación

En el desarrollo de la investigación se utilizaron dos tipos de aguas sintéticas, preparadas a partir del agua suministrada por el acueducto del municipio de Medellín adicionando caolín y ácidos húmicos. El agua denominada Tipo I fue preparada para producir una turbiedad inicial cercana a 10 UNT (unidades nefelométricas de turbiedad) y un color aparente de 20 UPC (unidades platino cobalto); el agua Tipo II alcanzó una turbiedad inicial esperada de 20 UNT y color aparente de 30 UPC.

Las características de ambos tipos de agua, se definieron a partir del análisis de los datos de calidad del agua cruda de 315 fuentes superficiales de abastecimiento (incluidas muestras de ríos y quebradas, ubicadas en el Departamento de Antioquia), recolectados entre los años 2013 a 2018 por el Programa Integral Red Agua- PIRAGUA de CORANTIOQUIA. El valor de 10 UNT corresponde al percentil 90, mientras que el valor de 20 UNT al percentil 95. En este mismo sentido, un color de 20 UPC corresponde al percentil 70 y un valor de 30 UPC al percentil 85. En el ensayo de evaluación de microorganismos, los valores iniciales se seleccionaron en un intervalo entre los percentiles 70 y 90; 1553×10 NMP/100 ml de coliformes totales, y 24×10^1 NMP/100 ml de *E. coli*.

Para la preparación de las aguas Tipo I y II, se realizó una curva de calibración para determinar la correlación entre el caolín agregado al agua (mg/L) y la turbiedad. La Figura 6 presenta dicha curva de calibración con su respectivo análisis de regresión lineal. Con respecto al color aparente, se determinó que era necesario agregar 2,69 mg/l de ácidos húmicos para el agua Tipo I (20 UPC) y 4,04 mg/l de ácidos húmicos para el agua Tipo II (30 UPC).

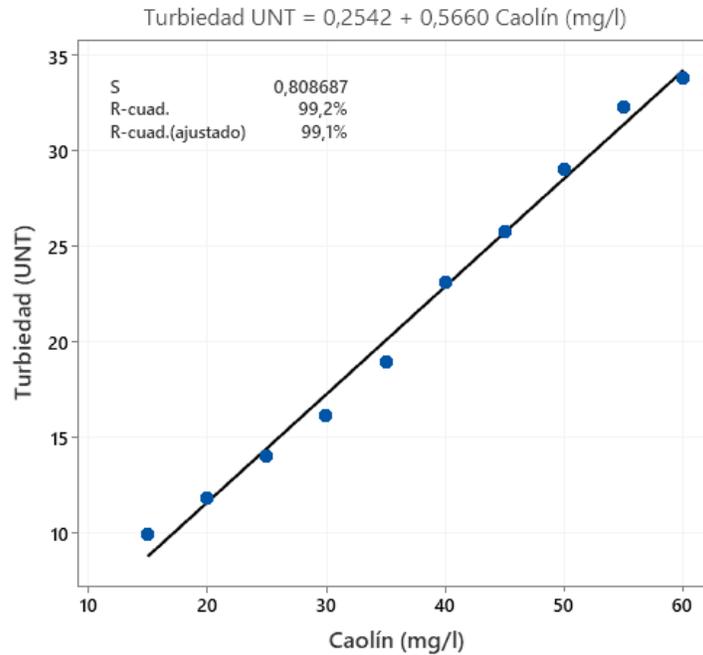


Figura 6. Curva de calibración para la turbiedad.

4.4 Ensayos de jarras

En el estudio se emplearon dos coagulantes ampliamente utilizados en la potabilización de aguas: Policloruro de aluminio (PAC) y Sulfato férrico, ambos en forma líquida y producidos por la empresa Sulfoquímica S.A. Se realizaron los ensayos con un equipo de jarras marca Phipps and Bird, el cual se observa en la Figura 7. La mezcla rápida se realizó a 250 rpm ($G: 233 \text{ s}^{-1}$), durante un minuto y la mezcla lenta a 40 rpm ($G: 21 \text{ s}^{-1}$), durante 15 min; se empleó un tiempo de sedimentación de 15 min. (Wills et al., 2010)



Figura 7 .Equipo para ensayo de jarras

Para la determinación de la dosis óptima de coagulante, se realizaron ensayos de jarras, utilizando soluciones con una concentración de 0,1% (peso/volumen) de Al^{+3} ó Fe^{+3} , preparadas a partir de las fichas técnicas de los productos, suministradas por el fabricante (Anexo 1). Adicionalmente, se utilizaron jarras de 2 L y se evaluaron dosis de coagulantes entre 0,5 y 3,2 mg/L de Al^{+3} o Fe^{+3} .

4.5 Evaluación hidráulica del sistema

Se realizó un estudio hidráulico del Filtro Grueso Ascendente en Capas -FGAC- y del Filtro Rápido de Arena -FRA-, con el fin de determinar el tiempo de retención hidráulico real y las características de flujo. En estas pruebas se utilizó como sustancia trazadora el cloruro de sodio (NaCl) con una pureza del 99,7%.

Se llevaron a cabo ensayos para las tasas de filtración de operación de cada unidad; se aplicó el trazador en el punto de inyección del coagulante de forma instantánea, a través de un impulso, en cada unidad de forma independiente; la determinación de la concentración de NaCl en la salida del FGAC y del FRA se realizó mediante mediciones de conductividad eléctrica y la correlación con la respectiva curva de

calibración. Las características más importantes relacionadas con la aplicación del trazador en los cuatro ensayos se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones para la realización de los ensayos de trazadores.

Característica	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
Unidad	FGAC	FGAC	FRA	FRA
Volumen útil (m ³)	0,048	0,048	0,006	0,006
Caudal (m ³ /d)	0,50	1,00	0,50	1,00
Tasa de filtración (m ³ /m ² . d)	7,1	14,1	63,66	127,32
TRH teórico (min)	136,90	68,50	18,38	9,19
1/30 x TRH (min)	4,56	2,28	0,61	0,31
Concentración NaCl esperada (mg/l)	200	200	500	500
Masa de NaCl adicionada (g)	9,60	9,60	3,01	3,01
Concentración de la solución de NaCl (g/l)	50,00	50,00	250,00	250,00
Tiempo de dosificación (min)	4,80	2,33	0,40	0,40
Tiempo total del ensayo (HH:MM: SS)	6:55:00	3:28:00	1:42:00	0:50:34

TRH: Tiempo de retención hidráulico. Fuente: elaboración propia.

Para el análisis de flujos se aplicó el método de Wolf-Resnick, se calculó el Índice de Morril y se analizó la tendencia de la curva de concentración del trazador. (Canepa de Vargas, 2004)

4.6 Diseño experimental

a) Tasa de Filtración o Carga Superficial del FRA (64,00 y 127,00 m³/m²-d), que responden a los límites de rangos de la tasa de filtración rápida del sistema; de acuerdo con el volumen y el área superficial del FRA, la carga superficial de 64,00 m³/m²-d corresponde a un caudal de 0,5 m³/d, mientras que la carga superficial de 127,00 m³/m²-d corresponde a un caudal de 1,0 m³/d; b) Tipo de Agua a tratar (Tipo I y Tipo II) y c) Tipo de Coagulante (PAC y Sulfato férrico). Este diseño fue planteado con el fin de determinar el efecto individual de los factores y la interacción de estos sobre la respuesta del sistema (porcentaje de remoción de turbiedad).

En la Tabla 3 se presentan los niveles de cada factor, evaluados en cada ensayo y las fechas en las cuales se ejecutaron.

Tabla 3 . Descripción de los tratamientos

Fecha	Tratamiento		Carga superficial FRA (m ³ /m ² .d)	Tipo de Agua	Coagulante
	Notación	N°			
4/02/2020	PAC_II_127	16*	127,32	II	PAC
6/02/2020	PAC_I_127	12*	127,32	I	PAC
10/02/2020	SFe_I_127	11*	127,32	I	Sulfato férrico
11/02/2020	PAC_I_64	2	63,66	I	PAC
12/02/2020	SFe_II_127	6	127,32	II	Sulfato férrico
13/02/2020	PAC_II_127	8	127,32	II	PAC
14/02/2020	PAC_II_64	10	63,66	II	PAC
18/02/2020	SFe_II_64	13*	63,66	II	Sulfato férrico
25/02/2020	SFe_I_64	1	63,66	I	Sulfato férrico
26/02/2020	PAC_I_127	9	127,32	I	PAC
27/02/2020	SFe_I_127	4	127,32	I	Sulfato férrico
28/02/2020	PAC_I_64	3*	63,66	I	PAC
29/02/2020	SFe_II_127	14*	127,32	II	Sulfato férrico
3/03/2020	PAC_II_64	15*	63,66	II	PAC
4/03/2020	SFe_II_64	5	63,66	II	Sulfato férrico
5/03/2020	SFe_I_64	7*	63,66	I	Sulfato férrico

*: Corresponde a las réplicas de los tratamientos. Fuente: elaboración propia.

Cada tratamiento tuvo una duración de cuatro veces el TRH del FGAC: un TRH para permitir la estabilización del sistema y los tres restantes para evaluar la remoción de turbiedad; así, la duración del ensayo fue de seis (6) horas para el caudal de 1,0 m³/d y de diez (10) horas para el caudal de 0,5 m³/d.

A partir del primer TRH, se tomaron muestras cada 15 minutos a la salida del FGAC y salida del FRA (efluente del sistema de potabilización), para determinar turbiedad, color aparente, pH, temperatura del agua y conductividad eléctrica. Al final de los tratamientos 1(SFe_I_64), 3(PAC_I_64), 4(SFe_I_127), 6(SFe_II_127),

8(PAC_II_127), 9(PAC_I_127), 13(SFe_II_64) y 15(PAC_II_64), se tomaron muestras en el efluente del sistema de potabilización para análisis de coagulante residual (aluminio o hierro, según el coagulante evaluado). Adicionalmente, se realizó seguimiento de la pérdida de carga en el FRA.

Al finalizar cada tratamiento se hizo un lavado completo del sistema de potabilización, con el fin de garantizar las mismas condiciones iniciales en cada ensayo. Para la limpieza de tanque de alimentación, tuberías y unidad de mezcla rápida, se empleó un lavado a presión con agua del sistema de acueducto. Se realizó limpieza hidráulica del FGAC, a través de una válvula en el fondo del filtro con apertura y cierre rápido hasta eliminar toda el agua del filtro, se llenó nuevamente la unidad con agua del acueducto y se repitió el proceso en tres oportunidades. En la limpieza del FRA se empleó un proceso de retrolavado con agua tratada, a velocidad de lavado de 1,3 m/min y durante 10 minutos.

Adicional a los tratamientos planteados en el diseño factorial, se realizaron dos ensayos, para la mayor carga superficial, con los dos tipos de agua, sin la adición de coagulante y que se denominaron “blancos”. Estos ensayos se llevaron a cabo con el fin de determinar el porcentaje de remoción de turbiedad, producida como consecuencia exclusiva de la filtración de las partículas presentes en los dos tipos de aguas estudiadas. Posterior a la identificación de las condiciones óptimas de operación del sistema de potabilización (Tipo de Agua, Carga Superficial y Tipo de Coagulante), se ejecutaron cuatro ensayos adicionales, así:

- Evaluación de remoción de coliformes totales y *Escherichia coli* (E.coli): el ensayo fue llevado a cabo con agua de alimentación Tipo II, con un caudal de 1,0 m³/d y con adición de cepas *Enterobacter aerogenes* ATCC 13048, cepa *Escherichia coli* ATCC 11775 ; previo a la adición de las cepas, se registró el abatimiento de las especies de cloro presentes en el agua de alimentación a través de la adición de tiosulfato de sodio (Na₂S₂O₃) al 1%. Se tomaron muestras en el agua de alimentación en dos momentos: a) antes de iniciar el ensayo, para identificar la carga inicial de microorganismos y b)

a los 270 min, una vez finalizando el tercer tiempo de retención y como control para garantizar la concentración de microorganismos durante todo el ensayo. Finalmente, se tomaron muestras del efluente a los 90, 180, 270 y 360 minutos del ensayo (correspondientes a 1, 2, 3 y 4 TRH) de todo el sistema de tratamiento, respectivamente) para evaluar la remoción de microorganismos.

- Operación del sistema a caudales de 2,0 m³/d y 3,0 m³/d: el objetivo de este ensayo fue evaluar la remoción de turbiedad operando el sistema con incrementos de caudal del 200% y 300%, respecto al mayor caudal evaluado en el diseño experimental (1,0 m³/d). El ensayo tuvo una duración de tres (3) horas para el caudal de 2,0 m³/d y dos (2) horas para el de 3,0 m³/d, correspondientes a cuatro (4) veces los TRH teóricos respectivos.
- Evaluación de la operación del sistema con una turbiedad en el agua de alimentación de 50 UNT: con el fin de determinar la respuesta del sistema frente a un aumento de turbiedad, se llevó a cabo un ensayo con un agua de alimentación con 50 UNT y 20 UPC. Se tomaron muestras cada 15 minutos durante un (1) TRH, después de alcanzada la estabilización del sistema.

En la Tabla 4 se describen los ensayos adicionales realizados.

Tabla 4. Descripción de los ensayos adicionales

Fecha	Ensayo	Caudal (m ³ /día)	Tipo de Agua	Coagulante
19/02/2020	Blanco 1	1,0	II	No aplica
10/03/2020	Blanco 2	1,0	I	No aplica
11/03/2020	Remoción de microorganismos	1,0	II	PAC
13/03/2020	200% del caudal mayor	2,0	II	PAC
13/03/2020	300% del caudal mayor	3,0	II	PAC
13/03/2020	Turbiedad 50 UNT	1,0	50 UNT	PAC

Fuente: elaboración propia.

4.7 Análisis estadístico

Como variable respuesta para el análisis del diseño experimental, se trabajó con la remoción de turbiedad obtenida en el FGAC, para evaluar esta etapa; y para evaluar

todo el sistema se utilizó la remoción obtenida en el efluente del FRA. En ambos casos se evaluó la variable respuesta para cuatro tiempos de operación, correspondientes a 1, 2, 3 y 4 veces el TRH real del FGAC o del sistema completo, según el caso. Para garantizar la validez de los resultados obtenidos, se comprobaron los supuestos del modelo, distribución normal de los datos y la varianza constante. En la verificación de supuestos y en el análisis del diseño factorial, se empleó el software Minitab.

En el análisis del comportamiento normal de los datos se aplicó el estadístico Anderson-Darling, ya que esta es una prueba adecuada cuando se analizan distribuciones de tamaño pequeño (Shahabuddin et al., 2009), (Pedrosa et al., 2014). Se analizó el comportamiento normal de los resultados por medio del cálculo y las gráficas de residuos y se verificó el supuesto de varianza constante, a través de la prueba de igualdad de varianzas de Bartlett.

Se determinaron los efectos estandarizados de los factores, su interacción en la remoción de turbiedad y se generó un diagrama de cubos para determinar condiciones óptimas de operación.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Evaluación hidráulica del sistema

Los resultados de los ensayos de trazadores realizados con caudales de 1,0 y 0,5 m³/d, se muestran en la Figura 8 a Figura 15, las cuales representan el análisis de la tendencia de la curva de concentración del trazador, (Canepa de Vargas, 2004), para las gráficas se tienen las variables descritas en la Tabla 5.

Tabla 5 .Variables relacionadas en la curva de concentración del trazador

Variable	Descripción
Cp	Concentración máxima a la salida
tc	Tiempo para el cual la concentración es mayor a Cp/2
l1	Primer punto de inflexión

I2	Segundo punto de inflexión
ti	Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente
to	Tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención= V/Q
tp	Tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración

Luego de la inyección del trazador en el afluente de la unidad a evaluar, se analizan las muestras de agua que se toman a la salida del reactor y se obtienen valores de concentración del trazador que aumentan conforme avanza el tiempo hasta alcanzar una concentración máxima, la cual disminuye progresivamente, originando una curva como la que se presenta en la Figura 8, para el caso del FGAC con un caudal de $1,0 \text{ m}^3/\text{d}$.

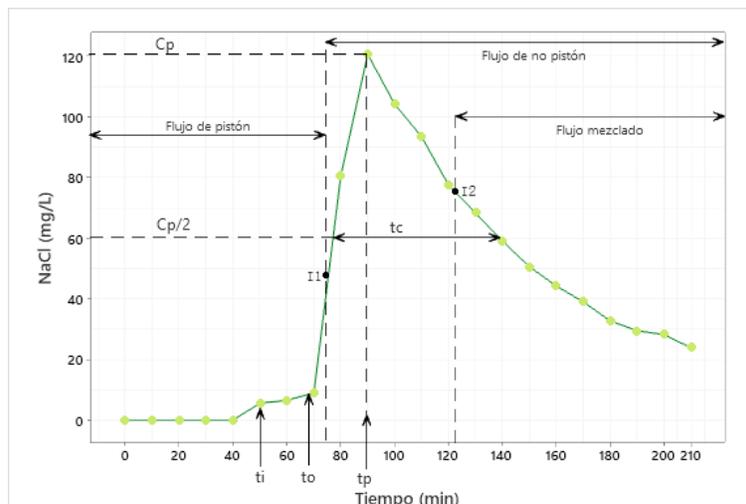


Figura 8. Variación de la concentración del trazador en el efluente del FGAC.
Caudal $1,0 \text{ m}^3/\text{d}$

En los sistemas de tratamiento coexiste el flujo pistón y el flujo mezclado, pero lo ideal es que en los reactores se presente el máximo flujo pistón, ya que esto garantiza que el agua permanezca todo el tiempo de retención proyectado sometida

al tratamiento en la unidad. El análisis de la Figura 9 permite identificar el tipo de flujo que predomina en el FGAC para un caudal de 1,0 m³/d.

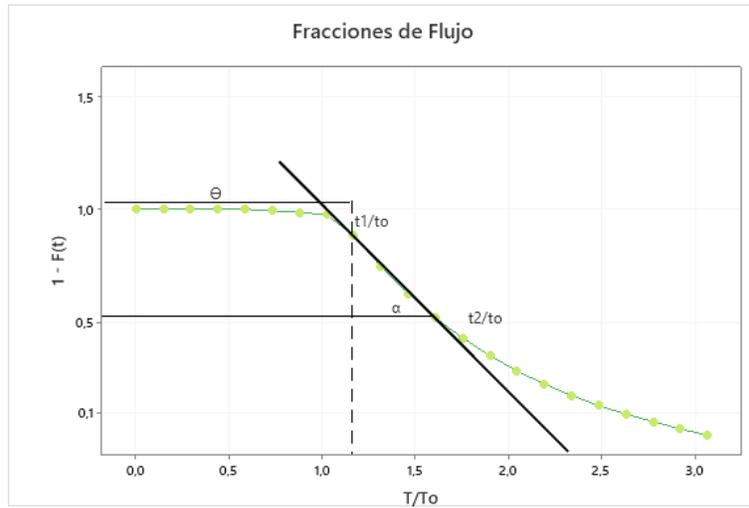


Figura 9. Curva de $1-F(t)$. Cantidad de trazador que permanece en el FGAC, Caudal 1,0 m³/d

De manera similar, se analiza la variación de la concentración de trazador con respecto al tiempo en el efluente del FGAC, con el caudal de 0,5 m³/d, como se observa en la Figura 10.

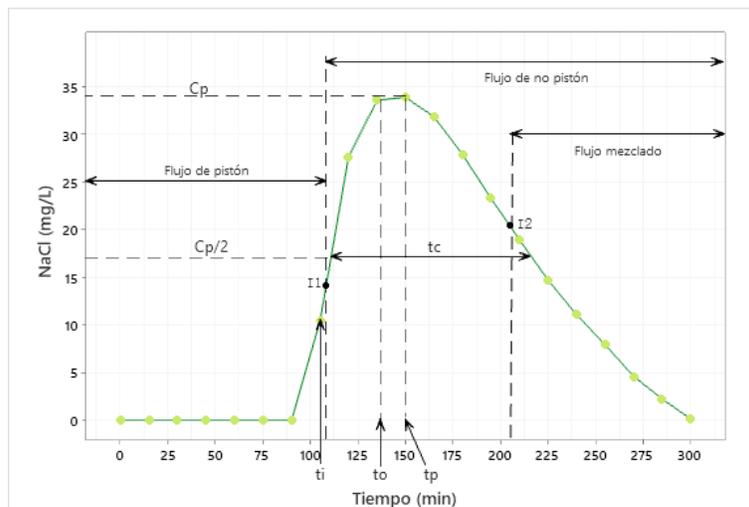


Figura 10. Variación de la concentración del trazador en el efluente del FGAC. Caudal 0,5 m³/d

Con la variación a caudal de $0,5 \text{ m}^3/\text{d}$, se analizan las relaciones t/t_0 para identificar las fracciones de flujo en el FGAC para este caudal, lo cual se ilustra en la Figura 11.

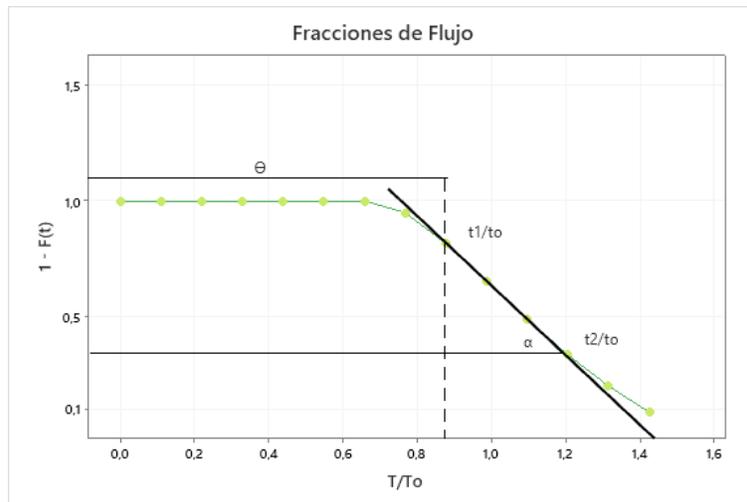


Figura 11. Curva de $1-F(t)$. Cantidad de trazador que permanece en el FGAC, Caudal $0,5 \text{ m}^3/\text{d}$

La curva de concentración del trazador también permite establecer la eficiencia hidráulica del reactor, en este caso en la Figura 12 se presenta el análisis gráfico para el FRA operando con un caudal de $1,0 \text{ m}^3/\text{d}$. también se ilustran las fracciones de flujo para esta unidad y este caudal en la Figura 13.

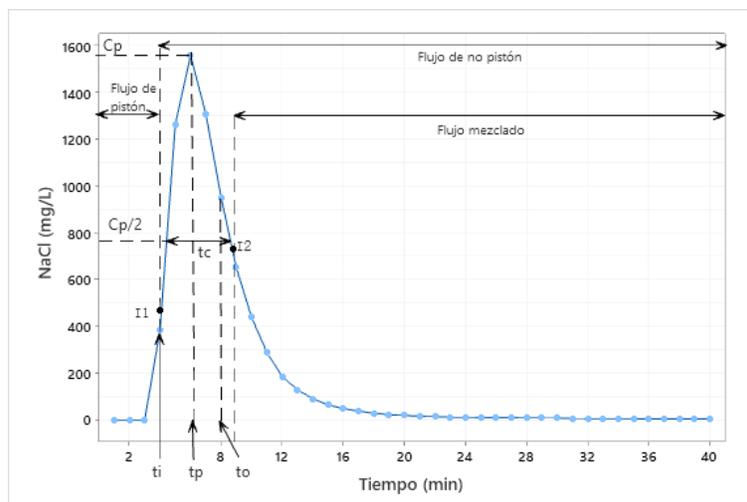


Figura 12. Variación de la concentración del trazador en el efluente del FRA.

Carga hidráulica: Caudal 1,0 m³/d

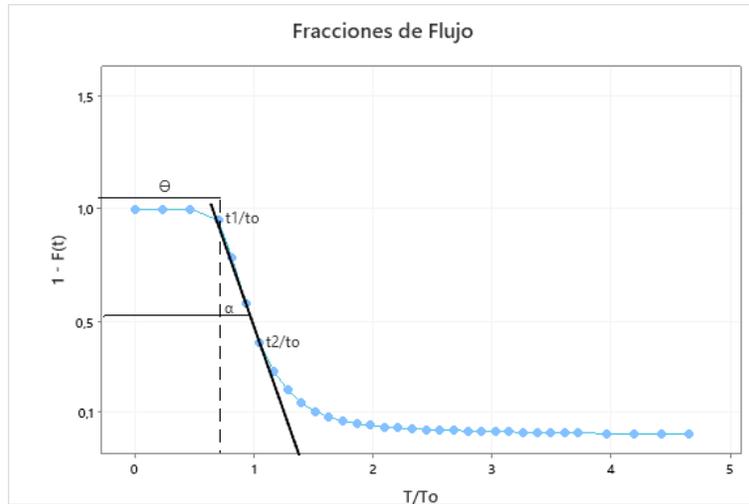


Figura 13. Curva de $1-F(t)$. Cantidad de trazador que permanece en el FRA, Caudal 1,0 m³/d

La presencia exclusiva de flujo pistón en el reactor, se representa por el tiempo que transcurre hasta que aparece el trazador (I1); en adelante, se considera flujo no pistón, desde este punto hasta el segundo punto de inflexión de la curva (I2) hay una combinación de flujo pistón y flujo mezclado. A partir de I2 el flujo es predominantemente mezclado. Estas características de flujo se observan en la Figura 14 para el FRA operando con caudal de 0,5 m³/día.

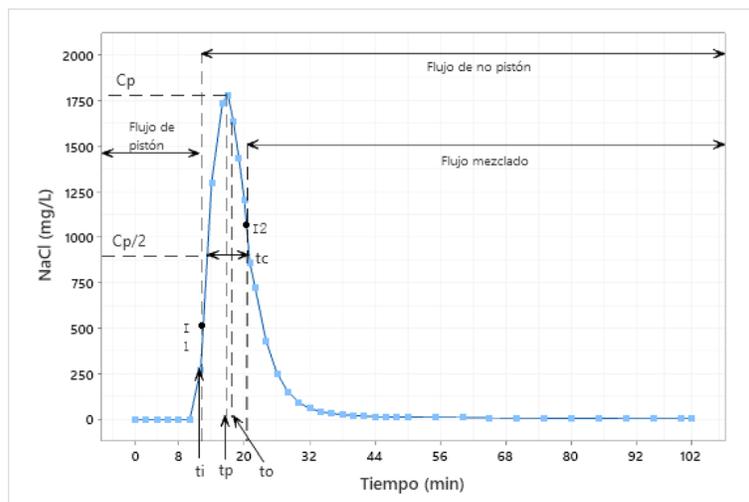


Figura 14. Variación de la concentración del trazador en el efluente del FRA.

Caudal 0,5 m³/d

En el análisis de las fracciones de flujo también se debe considerar la presencia de cortocircuitos, en los que el agua atraviesa el reactor de manera instantánea; la Figura 15 permite analizar la cantidad de trazador que permanece en el FRA operando a un caudal de 0,5 m³/d.

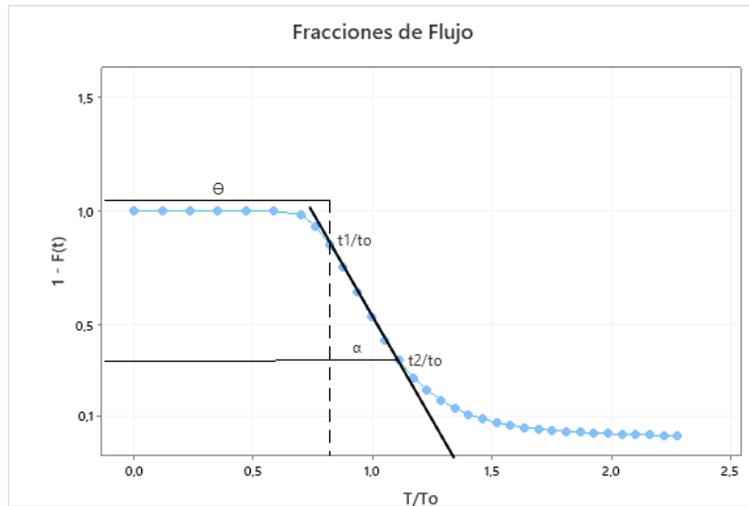


Figura 15. Curva de $1-F(t)$. Cantidad de trazador que permanece en el FRA, Caudal 0,5 m³/d

Los parámetros que explican el comportamiento hidráulico de los filtros, operando con las dos cargas superficiales correspondientes a los caudales mencionados, se presentan en las Tabla 6 y Tabla 7.

Tabla 6. Resultados de la aplicación del modelo simplificado Wolf-Resnick

Modelo simplificado de Wolf-Resnick			
Parámetro		Caudal 0,5 m³/d	Caudal 1,0 m³/d
FGAC	θ	0,9	1,2
	$Tan \alpha$	1,31	0,6
	P	73%	62%
	m	0%	0%
	FM	27%	38%
FRA	θ	0,9	0,8

	<i>Tan α</i>	1,3	1,23
	<i>P</i>	74%	70%
	<i>m</i>	0%	0%
	<i>FM</i>	26%	30%

Fuente: elaboración propia.

La relación t_i/t_o mide la presencia de cortocircuitos; t_p/t_o indica la relación de flujo pistón y flujo mezclado y el Índice de Morrill permite tener una información mas completa de las tendencias de flujo en el reactor. Los resultados del análisis de estas variables para el FGAC y el FRA con los dos caudales de operación se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados del análisis de la curva de tendencia

Análisis de la curva de tendencia			
Parámetro		Caudal 0,5 m³/d	Caudal 1,0 m³/d
FGAC	<i>t_o</i>	136,9 min	68,50 min
	<i>t_i/t_o</i>	0,77	0,73
	<i>t_p/t_o</i>	1,1	1,31
	<i>Índice de Morrill</i>	1,32	1,21
FRA	<i>t_o</i>	17,13 min	8,60 min
	<i>t_i/t_o</i>	0,7	0,7
	<i>t_p/t_o</i>	0,99	0,47
	<i>Índice de Morrill</i>	1,36	1,4

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos para el sistema de tratamiento operando con un caudal de 0,5 m³/d muestran un alto predominio de flujo pistón (P) tanto en el FGAC como en el FRA (73% y 74% respectivamente) sobre el flujo mezclado (FM) (27% FGAC y 26% FRA). La razón entre el tiempo inicial y el tiempo de retención teórico (t_i/t_o) mayor a 0,3 para los dos filtros, indica la ausencia de cortocircuitos hidráulicos. Respecto a los porcentajes de flujo pistón y flujo mezclado, la razón entre el tiempo modal y el tiempo de retención teórico (t_p/t_o) muestra un evidente predominio del

flujo pistón sobre el flujo mezclado, al igual que el índice de Morril (I.M =1,32 en el FGAC, I.M=1,36 en el FRA).

En la operación del sistema con un caudal de 1,0 m³/d, también se identifica un alto predominio de flujo pistón (62 % y 70% para el FGAC y el FRA respectivamente). La razón entre el tiempo inicial y el tiempo de retención teórico (ti/to), no muestra la presencia de cortocircuitos hidráulicos. La razón entre el tiempo modal y el tiempo de retención teórico (tp/to=0,99) en el FGAC muestra un indudable predominio de flujo pistón. El índice de Morril es indicativo de flujo pistón para ambas unidades, confirmando de esta forma los resultados obtenidos con el método de Wolf-Resnick simplificado.

Para los dos caudales evaluados y desde el punto de vista hidráulico, tanto el FGAC como el FRA presentan buenas características en relación con el predominio del flujo pistón, sin presencia de cortos circuitos; condiciones que favorecen la floculación y la sedimentación en el FGAC. El predominio de flujo pistón permitió alcanzar un porcentaje del 70% del volumen útil disponible para los procesos e indica que se tiene un tiempo de contacto o TRH real, cercano al de diseño o teórico.

5.2 Ensayos de jarras

En las Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de jarras realizadas.

En el ensayo de jarras realizado para el agua Tipo I con coagulante PAC se alcanzó la mayor remoción de turbiedad con la dosis de 1,6 mg Al⁺³/l, sin variaciones significativas en el pH, los resultados del ensayo se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados ensayo de jarras, PAC, agua Tipo I

Condiciones del ensayo		
Coagulante	Policloruro de aluminio (PAC)	
Concentración de coagulante	0,1	%p/v Al ⁺³
Mezcla rápida	250 rpm	Tiempo: 1 minuto
Mezcla lenta	40 rpm	Tiempo: 15 minutos
Sedimentación	0 rpm	Tiempo: 15 minutos
Caracterización inicial del agua cruda, Tipo I		
Turbiedad	10,9	UNT

pH		7,30	Unidades de pH
Resultados			
Dosis de coagulante (mg/l)	Turbiedad final (UNT)	pH final (Unidades de pH)	%Remoción de turbiedad
0,5	2,1	7,21	80,7
0,8	1,6	7,15	85,3
1,1	1,2	7,17	89,0
1,6	1,0	7,10	90,8
2,4	1,05	7,12	90,4
3,2	4,05	7,08	62,8

Fuente: elaboración propia.

En el caso del agua Tipo II, con coagulante PAC, para todas las dosis se alcanzó una remoción de turbiedad mayor a la alcanzada con la dosis optima encontrada en el ensayo para agua Tipo I. Como se evidencia en la Tabla 9, la turbiedad final alcanzada siempre fue menor a 2,0 UNT.

Tabla 9. Resultados ensayo de jarras, PAC, agua Tipo II

Condiciones del ensayo			
Coagulante	Policloruro de aluminio (PAC)		
Concentración de coagulante	0,1	%p/v Al ³⁺	
Mezcla rápida	250 rpm	Tiempo: 1 minuto	
Mezcla lenta	40 rpm	Tiempo: 15 minutos	
Sedimentación	0 rpm	Tiempo: 15 minutos	
Caracterización inicial del agua cruda, Tipo II			
Turbiedad	20,5	UNT	
pH	7,20	Unidades de pH	
Resultados			
Dosis de coagulante (mg/l)	Turbiedad final (UNT)	pH final (Unidades de pH)	%Remoción de turbiedad
0,5	1,15	7,10	94,4
0,8	1,00	7,17	95,1
1,1	0,75	7,08	96,3
1,6	0,65	7,03	96,8
2,4	0,55	7,01	97,3
3,2	0,80	6,99	96,1

Fuente: elaboración propia.

En la evaluación del coagulante sulfato férrico, la mayor remoción se alcanzó con la dosis de 1,6 mg Fe³⁺/l de coagulante, resultado que coincide con lo encontrado con el coagulante PAC para el agua Tipo I. La Tabla 10 presenta los resultados completos de este ensayo.

Tabla 10. Resultados ensayo de jarras, sulfato férrico, agua Tipo I

Condiciones del ensayo			
Coagulante	Sulfato férrico		
Concentración de coagulante	0,1	%p/v Fe ³⁺	
Mezcla rápida	250 rpm	Tiempo: 1 minuto	
Mezcla lenta	40 rpm	Tiempo: 15 minutos	
Sedimentación	0 rpm	Tiempo: 15 minutos	
Caracterización inicial del agua cruda, Tipo I			
Turbiedad	10,7	UNT	
pH	7,29	Unidades de pH	
Resultados			
Dosis de coagulante (mg/l)	Turbiedad final (UNT)	pH final (Unidades de pH)	%Remoción de turbiedad
0,5	8,5	7,29	20,3
0,8	2,3	6,96	78,1
1,1	1,8	6,77	82,9
1,6	1,6	6,57	85,5
2,4	3,5	6,22	66,9
3,2	9,4	5,71	12,4

Fuente: elaboración propia.

De manera similar, se evidencian los porcentajes de remoción mas altos con la dosis de 1,6 mg Fe³⁺/l de coagulante para el agua Tipo II, como se observa en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados ensayo de jarras, sulfato férrico, agua Tipo II

Condiciones del ensayo			
Coagulante	Sulfato férrico		
Concentración de coagulante	0,1	%p/v Fe ³⁺	
Mezcla rápida	250 rpm	Tiempo: 1 minuto	
Mezcla lenta	40 rpm	Tiempo: 15 minutos	
Sedimentación	0 rpm	Tiempo: 15 minutos	
Caracterización inicial del agua cruda, Tipo II			
Turbiedad	21,0	UNT	
pH	7,25	Unidades de pH	
Resultados			
Dosis de coagulante (mg/l)	Turbiedad final (UNT)	pH final (Unidades de pH)	%Remoción de turbiedad
0,5	24,0	7,12	-14,29
0,8	3,0	6,86	85,71
1,1	2,3	6,63	89,19
1,6	2,0	6,40	90,48
2,4	5,8	6,12	72,48
3,2	7,7	5,42	63,33

Fuente: elaboración propia.

Las Figura 16 y Figura 17 ilustran los resultados obtenidos de porcentaje de remoción de turbiedad, con las diferentes dosis de coagulante evaluadas, para el agua Tipo I y Tipo II, respectivamente. Para ambos tipos de agua, se obtuvieron mayores remociones de turbiedad con el tipo de coagulante PAC, siendo más significativo para el agua Tipo II.

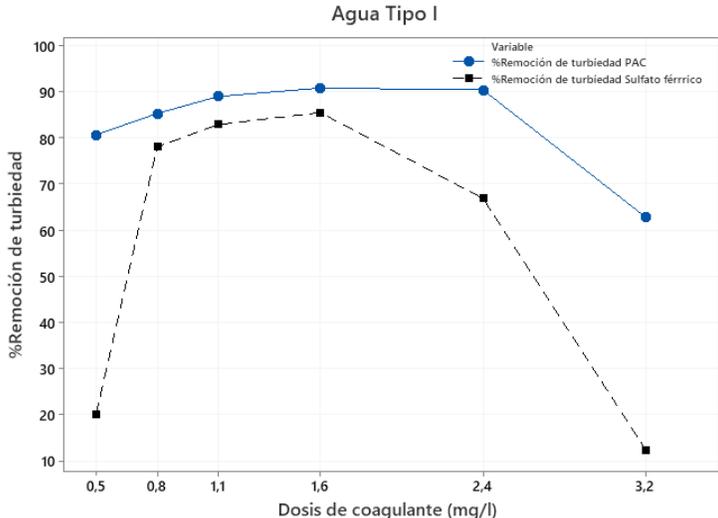


Figura 16. Porcentaje de remoción de turbiedad vs dosis de coagulante, agua Tipo I.

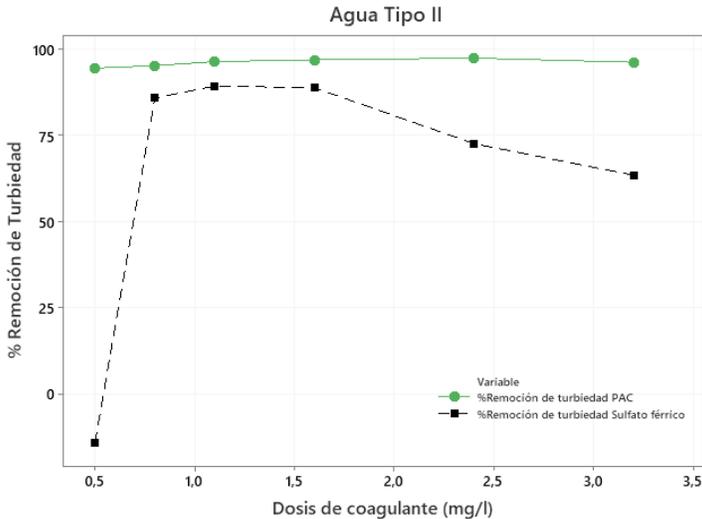


Figura 17. Porcentaje de remoción de turbiedad vs dosis de coagulante, agua Tipo I.

Según los resultados de los ensayos de jarras, para los dos tipos de agua evaluados, se seleccionó la misma dosis óptima de coagulante: 1,6 mg Al⁺³/L (PAC) y 1,6 mg Fe⁺³/L (sulfato férrico), esto permitió mantener las mismas condiciones de dosificación de coagulante en todos los tratamientos evaluados. Con estas dosis se obtuvieron valores finales de turbiedad menores o iguales a 2,0 UNT, color aparente inferior a 15 UPC y pH de 6,63 Unidades de pH para el sulfato férrico y de 7,01 Unidades de pH para el PAC que corresponden a los límites establecidos por la norma que regula la calidad del agua para consumo humano en Colombia (Resolución 2115 de 2007, expedida por el Ministerio de Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial).

5.3 Tratamientos experimentales

Para la turbiedad los resultados obtenidos en los 16 tratamientos realizados y en los ensayos Blanco (1 y 2), se presentan en la Tabla 12. Los resultados detallados de turbiedad, conductividad eléctrica y pH para cada tratamiento, se presentan en el Anexo 2.

Tabla 12. Resultados de turbiedad para efluentes FGAC y del sistema de potabilización (FRA) en los tratamientos realizados.

Tratamiento		Turbiedad (UNT)							
		Efluente FGAC				Efluente FRA			
Notación	N°	1 TRH	2 TRH	3 TRH	4 TRH	1 TRH	2 TRH	3 TRH	4 TRH
PAC_II_127	16*	1,4	0,7	0,5	0,4	1,6	0,3	0,3	0,2
PAC_I_127	12*	1,3	0,5	0,6	0,32	0,3	0,2	0,1	0,2
SFe_I_127	11*	3,85	1,14	0,76	0,64	1,36	0,29	0,24	0,27
PAC_I_64	2	0,98	0,53	0,34	0,42	0,66	0,23	0,24	0,25
SFe_II_127	6	2,37	1,28	0,82	0,91	0,63	0,23	0,19	0,31
PAC_II_127	8	1,68	0,50	0,41	0,31	0,79	0,20	0,24	0,22
PAC_II_64	10	1,1	0,43	0,3	0,36	0,57	0,23	0,26	0,3
SFe_II_64	13*	4,73	2,91	2,00	1,44	1,50	0,61	0,57	0,5
SFe_I_64	1	2,86	1,23	0,95	0,72	0,73	0,39	0,39	0,24

PAC_I_127	9	0,88	0,32	0,36	0,25	0,3	0,15	0,18	0,18
SFe_I_127	4	1,8	0,72	0,49	0,56	0,42	0,22	0,3	0,3
PAC_I_64	3*	0,69	0,36	0,29	0,24	0,41	0,17	0,28	0,18
SFe_II_127	14*	1,36	0,76	0,55	0,49	0,35	0,27	0,21	0,26
PAC_II_64	15*	0,9	0,62	0,47	0,34	0,57	0,28	0,26	0,21
SFe_II_64	5	1,65	0,73	0,74	0,33	0,51	0,25	0,31	0,27
SFe_I_64	7*	0,97	0,62	0,38	0,34	0,37	0,22	0,16	0,15
Blanco_I_127	B1	4,4	6,5	6,76	6,73	3,16	5,82	6,25	6,45
Blanco_II_127	B2	9,64	14,1	14,8	15,2	7,35	13,1	14,3	13,8

*: Corresponde a las réplicas de los tratamientos. Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 12, en todos los tratamientos y para los cuatro valores de TRH evaluados, se obtuvieron valores efluentes de turbiedad menores a 2,0 UNT en el sistema de tratamiento (efluente FRA), cumpliendo con la turbiedad máxima permisible por la normatividad colombiana para el agua de consumo humano (2,0 UNT), establecida en la Resolución 2115 de 2007. Para el efluente del FGAC se presentaron turbiedades menores a 2,0 UNT para todos los tratamientos al usar el coagulante PAC y para el 81% de los tratamientos con Tipo de Coagulante sulfato férrico.

En la Figura 18 se presenta el comportamiento del promedio de cada tratamiento con su respectiva replica, para la remoción de turbiedad en los tratamientos y los blancos realizados. En el 91% de los casos se presentan remociones de turbiedad por encima del 96%. En esta gráfica se observa que los porcentajes de remoción de turbiedad en los tratamientos, fueron significativamente mayores a los de los blancos, hecho que se corrobora con análisis pareado entre Blanco_I_127 - PAC_I_127 (valor $p=0,007$), Blanco_I_127 - SFe_I_127 (valor $p=0,004$), Blanco_II_127 - PAC_II_127 (valor $p=0,008$) y Blanco_II_127 - SFe_II_127 (valor $p=0,006$); puesto que el valor p es menor que el nivel de significancia de 0,05 en todos los casos, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay una diferencia estadísticamente significativa entre el porcentaje de remoción de turbiedad en los tratamientos con y sin coagulante (blancos). En el caso de los blancos, se observa

un comportamiento opuesto, la remoción de turbiedad disminuye a través del tiempo debido a que se presenta una acumulación de partículas en el lecho filtrante, disminuyendo el área efectivamente disponible para el fenómeno de sedimentación. Esta diferencia se explica porque en los blancos la remoción de turbiedad se produce como consecuencia de la sedimentación propia de las partículas presentes en los tipos de aguas estudiadas, mientras que en los ensayos con presencia de coagulante influyen los fenómenos de desestabilización de las cargas superficiales, adsorción y adherencia en las partículas, aumentando en estos casos la remoción de turbiedad (The American Water Works Association, 2011).

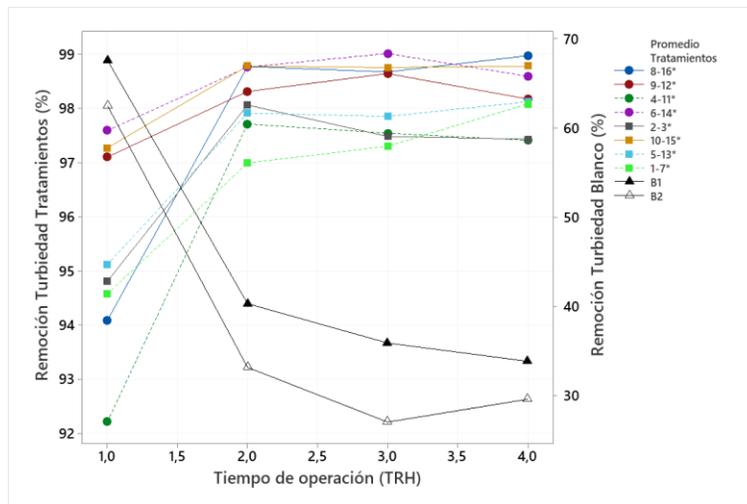


Figura 18. Resultados del porcentaje remoción promedio de turbiedad en los tratamientos evaluados vs los blancos.

La Se hizo seguimiento a la temperatura del agua efluente como variable de laboratorio, registrándose un valor promedio de 24,6 °C; lo que indica que la densidad y la viscosidad del agua (propiedades físicas que varían con la temperatura), variables que afectan tanto la floculación como la sedimentación y la mezcla rápida, no presentaron cambios apreciables durante los ensayos.

Tabla 13 presenta los resultados para el pH, la temperatura y la conductividad eléctrica en el efluente del sistema de tratamiento (salida FRA) para los tratamientos y los blancos; la Figura 19 presenta la variabilidad y tendencia de estos parámetros.

La conductividad eléctrica no presentó variaciones significativas en el efluente, se obtuvo un valor máximo de 104,9 $\mu\text{s}/\text{cm}$, cumpliendo así con el valor máximo aceptable establecido en la normatividad colombiana: 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Resolución 2115 de 2007, expedida por el Ministerio de Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial). Se puede observar que el pH efluente para los tratamientos con el coagulante Sulfato férrico presentó valores cercanos al límite inferior permisible establecido para este parámetro en el agua de consumo humano (6,5 a 9,0 unidades de pH); en el caso de los tratamientos con coagulante PAC, se presentaron valores más cercanos a la neutralidad, cumpliendo con la normatividad colombiana. Esto se debe a que el coagulante sulfato férrico genera un mayor descenso en el pH, pues consume mayor alcalinidad que el coagulante PAC, debido a que este último es una sal prehidrolizada que incluye basicidad (OH^-) en su composición.

Se hizo seguimiento a la temperatura del agua efluente como variable de laboratorio, registrándose un valor promedio de 24,6 $^{\circ}\text{C}$; lo que indica que la densidad y la viscosidad del agua (propiedades físicas que varían con la temperatura), variables que afectan tanto la floculación como la sedimentación y la mezcla rápida, no presentaron cambios apreciables durante los ensayos.

Tabla 13. Resultados de pH, Temperatura y conductividad del efluente del sistema de potabilización obtenidos durante los ensayos realizados.

Tratamiento	pH (Unidades de pH)				Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)				Conductividad eléctrica ($\mu\text{s}/\text{cm}$)			
	Media	Desv.Est.	Min.	Max.	Media	Desv.Est.	Min.	Max.	Media	Desv.Est.	Min.	Max.
16* (PAC_II_127)	7,65	0,122	7,43	7,95	23,77	0,56	22,8	24,7	89,18	5,29	68,7	97,3
12* (PAC_I_127)	7,67	0,185	7,03	7,97	24,48	0,608	23,6	25,8	84,22	1,16	81,7	85,9
11* (SFe_I_127)	7,89	0,532	6,71	8,38	23,98	1,607	22,5	26,1	82,77	0,947	81,7	85,6
2 (PAC_I_64)	7,23	0,063	7,10	7,35	24,93	1,086	23,2	26,5	84,3	0,81	82,2	85,2
6 (SFe_II_127)	7,15	0,079	7,04	7,33	25,37	0,71	24,1	26,4	84,63	0,715	82,5	85,4
8 (PAC_II_127)	7,29	0,088	7,18	7,49	24,62	0,718	23,6	25,7	85,35	1,416	80,7	86,5
10 (PAC_II_64)	7,24	0,066	7,13	7,49	25,46	0,948	23,9	26,9	84,04	0,592	82,7	85
13* (SFe_II_64)	7,35	0,090	7,11	7,48	24,83	0,974	23,4	26,4	84,29	1,387	82,5	87,8

1 (SFe_I_64)	7,13	0,081	6,93	7,25	24,47	1,156	22,7	26,4	89,44	1,906	87,4	94,5
9 (PAC_I_127)	7,26	0,053	7,17	7,35	23,89	0,57	23,1	24,8	104,09	0,815	101,3	104,7
4 (SFe_I_127)	7,24	0,080	6,99	7,35	23,86	0,674	22,8	24,9	102,95	0,819	101,7	104,6
3* (PAC_I_64)	7,29	0,061	7,12	7,36	24,00	1,027	22,3	26,1	102,81	0,632	101,8	104,2
14* (SFe_II_127)	6,62	0,293	6,92	7,20	24,14	0,773	23,0	25,2	99,47	0,632	98,2	100,5
15* (PAC_II_64)	6,98	0,089	6,74	7,11	24,61	1,08	23,0	26,4	100,25	0,62	99,2	101,2
5 (SFe_II_64)	6,97	0,080	6,79	7,11	25,22	0,979	23,8	26,8	98,85	1,053	95,5	100,5
7* (SFe_I_64)	6,93	0,128	6,60	7,10	24,95	0,794	23,8	26,1	99,61	0,243	99,2	100,3
Blanco_I_127	7,29	0,065	7,16	7,42	23,97	0,573	23,2	24,9	93,76	0,641	92,7	95,1
Blanco_II_127	7,11	0,081	6,98	7,33	25,65	0,948	24,5	26,9	80,47	0,502	79,8	81,5

Fuente: elaboración propia.

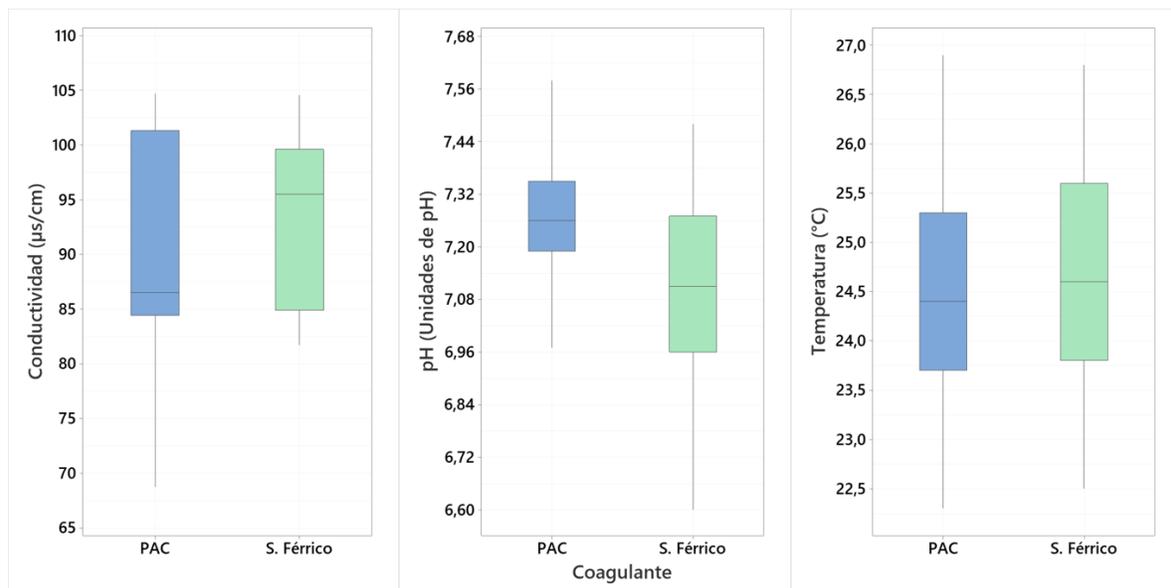


Figura 19. Variabilidad y tendencia de a) conductividad; b) pH y c) temperatura medidas en el efluente del sistema de potabilización durante los ensayos realizados.

Con respecto al color aparente, se obtuvieron valores inferiores a 10 UPC desde un (1) TRH, tanto para el FGAC como para el FRA, cumpliendo así en todos los procesos con el valor máximo permisible de 15 UPC establecido para agua de consumo humano. (Resolución 2115 de 2007, expedida por el Ministerio de

Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial). El análisis de residual de coagulante para los tratamientos 1 (SFe_I_64), 4 (SFe_I_127), 6 (SFe_II_127) y 13* (SFe_II_64) arrojó valores menores a 0,3 mg/l Fe; en los tratamientos 3* (PAC_I_64), 8 (PAC_II_127), 15* (PAC_II_64), 9 (PAC_I_127) los valores fueron menores a 0,2 mg/l Al, estando todos por debajo del valor máximo aceptable del residual de hierro y aluminio según la normatividad. Durante el periodo correspondiente a cada tratamiento y a los blancos, no se observó pérdida de carga en el piezómetro del FRA, indicando que la carga de sólidos que llegaba al FRA era muy baja y su acumulación durante el tiempo de cada ensayo (entre 6 y 10 horas) no generó la colmatación del lecho filtrante.

La Figura 20 presenta los resultados de la evaluación de remoción de coliformes totales y *E. coli*; en ella, se observan remociones por encima del 99% (2 log de inactivación) desde el primer tiempo de retención para el efluente del sistema operando a un caudal de 1,0 m³/d, con el coagulante PAC y Tipo de Agua II con adición de cepas de microorganismos. Los porcentajes de remoción de *E. coli* coinciden con los obtenidos en la alternativa de tratamiento para abastecimiento de comunidades rurales a través de un filtro lento de arena con coagulación como pretratamiento, presentada por (Souza & Sabogal, 2020), donde obtuvieron reducciones cercanas a 3,0 log y superiores a los encontrados por (Medeiros et al., 2020) en un sistema FIME (alrededor de 1,78 log). A partir de 2 veces el TRH para *E. coli* y 3 TRH para coliformes totales, en el efluente se alcanza una reducción total de 3,0 log de inactivación, lo que se puede traducir en la eliminación completa de los microorganismos, y por ende en el cumplimiento de la norma colombiana para agua de consumo (Resolución 2115 de 2007, expedida por el Ministerio de Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial) en cuanto a ausencia de microorganismos (ausencia en 100 cm³) o concentraciones menores al límite de cuantificación del método (< de 1 microorganismo en 100 cm³). Sin embargo, se debe resaltar que en estos ensayos no se incluyó el proceso de desinfección, que es fundamental para complementar la inactivación de

microorganismos y proteger el agua tratada durante su transporte por la red distribución hasta los usuarios finales.

Adicionalmente, aunque los sistemas de tratamiento que incluyen coagulación, floculación, sedimentación y filtración están diseñados para la eliminación de partículas y materia orgánica natural, estos sistemas también aportan una remoción significativa de microorganismos, incluidos patógenos, tal como lo indican trabajos entre los que se destaca el de (Hijnen, 2010). Los altos porcentajes de remoción de microorganismos puede atribuirse, en parte, por un lado, a la adsorción (mecanismo responsable de la unión de patógenos de pequeño tamaño a diferentes superficies cargadas del material filtrante) y de otro, al proceso de muerte natural, donde factores como el envejecimiento y el estrés en los medios filtrantes pueden causar la muerte de estos patógenos (Mahmood et al., 2011) (Elliott et al., 2015).

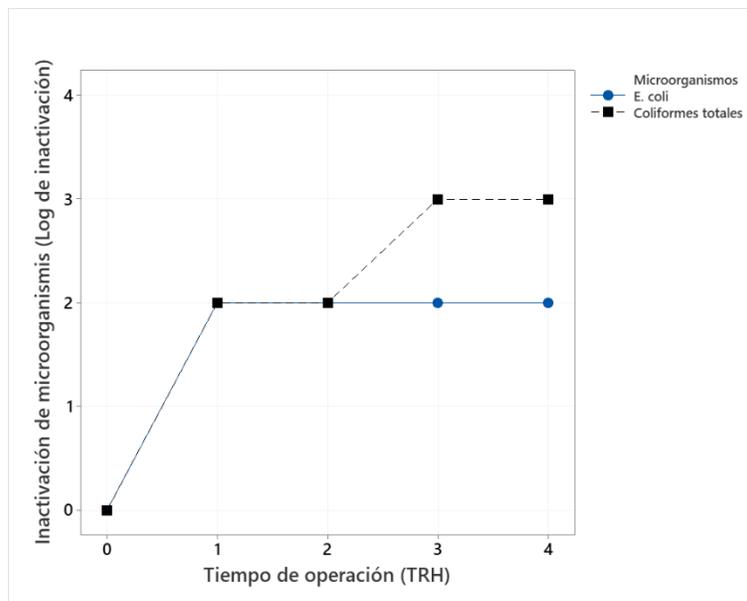


Figura 20. Resultados del ensayo para evaluación de remoción de microorganismos.

La Figura 21 muestra el comportamiento de los ensayos de aumento del caudal de operación del sistema, comparados con caudal de 1,0 m³/ día, para el Tipo de Agua II y con el Tipo de Coagulante PAC, para todos los TRH evaluados. El incremento en el caudal de operación del sistema de tratamiento generó una mayor remoción

de turbiedad, para todos los valores de TRH. El valor final para los parámetros turbiedad entre 0,14 - 047 UNT, color aparente ≤ 10 UPC, pH entre 6,80 – 6,96 unidades de pH, y conductividad eléctrica entre 99,4 – 103,3 $\mu\text{s}/\text{cm}$ del efluente cumplieron con los límites máximos permisibles para agua de consumo en ambos ensayos de aumento de caudal.

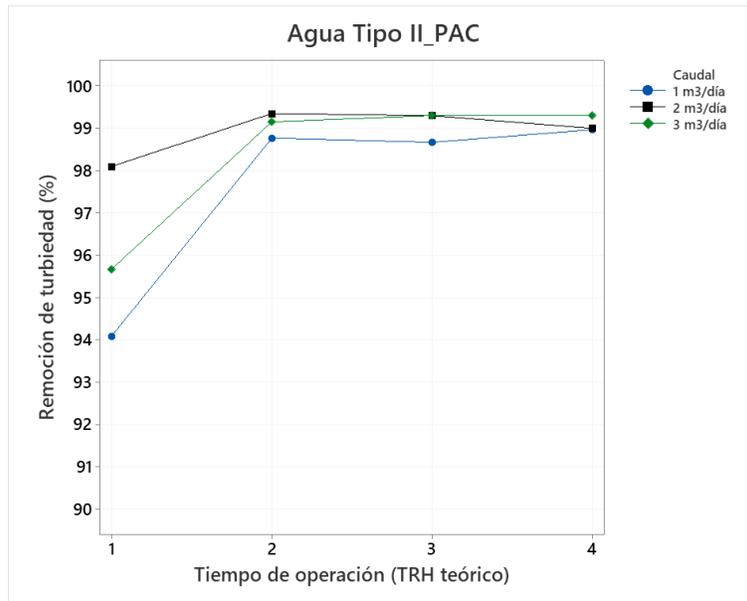


Figura 21. Resultados para la evaluación del aumento en el caudal de operación.

Finalmente, durante la evaluación de la respuesta del sistema frente a un aumento en la turbiedad afluente (50 UNT); se obtuvo una turbiedad efluente de 0,5 UNT en el primer TRH, lo que corresponde con un porcentaje de remoción del 99% y que evidencia que el sistema de tratamiento propuesto permite la potabilización de aguas con turbiedades mayores, y con caudales o cargas superficiales superiores a las de diseño.

5.4 Análisis estadístico

Con el software Minitab se analizó el comportamiento normal y se verificó el supuesto de varianza constante en los datos de porcentaje de remoción de turbiedad en cada tratamiento (condiciones de 1, 2, 3 y 4 veces el TRH), tanto en la salida del FGAC, como en la del FRA (ver Tabla 14). El valor p obtenido de la gráfica de probabilidad de residuos ($> 0,05$) indica que los datos de remoción de

turbiedad siguen una distribución normal; de otro lado, el valor p ($> 0,05$) obtenido en la prueba de Bartlell indica que no hay diferencia entre las varianzas, es decir que se presenta igualdad u homogeneidad de estas, lo cual es un requisito para poder analizar el diseño factorial.

Tabla 14. Resultados de las pruebas de normalidad y de igualdad de varianza en los datos de porcentaje de remoción de turbiedad del diseño experimental.

Ensayo	Prueba de normalidad- Anderson Darling (Gráfica de probabilidad de residuos)			Prueba de igualdad de varianzas de Bartlell
	Media	Desviación estándar	Valor -P	Valor -P
1 TRH FGAC	9,77E-15	5,159	0,330	0,239
2 TRH FGAC	-5,33E-15	2,27	0,330	0,407
3 TRH FGAC	5,33E-15	1,546	0,352	0,342
4 TRH FGAC	-7,11E-15	1,247	0,346	0,040
1 TRH FRA	7,11E-15	1,939	0,958	0,090
2 TRH FRA	-1,60E-14	0,4505	0,352	0,58
3 TRH FRA	1,07E-14	0,5055	0,860	0,156
4 TRH FRA	1,33E-14	0,2994	0,941	0,508

Fuente: elaboración propia.

Todos los datos cumplieron con los supuestos del modelo, a excepción de 4 TRH FGAC, el cual no cumplió el supuesto de varianza constante; en este caso particular, se aplica una transformación de Box-Cox con λ estimado 39,5122 para la estabilización de la varianza, antes de proceder con el análisis del diseño factorial.

Análisis de efectos de interacción: El modelo factorial implementado (2^3) tiene tres efectos de interacción de dos factores. La gráfica normal de efectos estandarizados mostró que no existen interacciones significativas, dado que todos los términos de las interacciones de dos factores tienen valores p mayores que 0,05, como se observa en la Tabla 15. En los tres factores tampoco se evidenció interacción significativa.

Tabla 15. Efectos estimados para el porcentaje de remoción de turbiedad.

Término	TC		TA		Q		TC*TA		TC*Q		TA*Q		TC*TA*Q	
	Efecto	Valor p	Efecto	Valor p										
1 TRH FGAC	9,37	0,029	6,33	0,111	-1,25	0,732	-3,21	0,39	-1,32	0,718	3,02	0,417	-3,21	0,389
2 TRH FGAC	4,372	0,023	1,59	0,336	1,134	0,487	-0,198	0,902	-1,163	0,476	0,535	0,74	-0,942	0,561
3 TRH FGAC	2,598	0,04	1,414	0,219	0,574	0,603	0,377	0,731	-1,546	0,182	0,871	0,435	-0,289	0,792
4 TRH FGAC	2,036	0,022	1,677	0,048	-0,073	0,921	0,24	0,747	0,218	0,77	-0,067	0,928	-0,196	0,792
1 TRH FRA	0,939	0,499	1,34	0,342	-0,195	0,887	-1,614	0,259	-0,246	0,858	-0,16	0,907	-2,575	0,088
2 TRH FRA	0,636	0,073	0,783	0,035	0,455	0,178	-0,198	0,54	-0,332	0,313	-0,033	0,917	-0,099	0,756
3 TRH FRA	0,461	0,22	0,832	0,043	0,621	0,111	-0,177	0,622	-0,082	0,82	-0,082	0,819	-0,54	0,157
4 TRH FRA	0,407	0,082	0,722	0,008	0,064	0,763	0,112	0,599	0,158	0,464	0,268	0,227	-0,3	0,182

TC: Tipo de Coagulante, TA: Tipo de Agua, Q: Caudal. Fuente: elaboración propia.

Análisis de efectos principales: El modelo implementado contiene tres efectos principales, y se obtuvieron valores p menores de 0,05, para el factor Tipo de Coagulante en todos los casos del FGAC; adicionalmente, en 4 TRH FGAC igual se presentó un valor p menor a 0,05 para el factor Tipo de Agua. En el caso de 1 TRH FRA, no se presentaron efectos significativos para ningún factor; en los tres casos restantes del FRA se obtuvieron valores p menores de 0,05, para el factor Tipo de Agua. Lo anterior indica que dichos factores tienen un efecto significativo en la remoción de turbiedad.

En relación con los datos sobre remoción de turbiedad, los efectos sugieren que el Tipo de Coagulante ejerce la acción más significativa en el efluente del FGAC; especialmente cuando el sistema se operó con el Tipo de Coagulante PAC, se produjo una remoción de turbiedad ligeramente mayor en el 75% de los casos, que cuando se trabajó con sulfato férrico. También se observó que el Tipo de Agua ejerce el segundo efecto más significativo sobre la remoción de turbiedad en el efluente del FGAC, su signo positivo indica que las mayores remociones de

turbiedad se produjeron con el Tipo de Agua II; este resultado se atribuye a una mayor eficiencia en los mecanismos de floculación en aguas con turbiedades mayores y al hecho que, de acuerdo a los resultados de los ensayos de jarras, se obtienen mayores porcentajes de remoción para el coagulante PAC con el agua Tipo II.

En el efluente de la operación total del sistema (punto de muestreo FRA), el efecto más significativo fue el Tipo de Agua, presentando también signo positivo. También se destaca como el segundo efecto más significativo, el ejercido por el Tipo de Coagulante, presentándose las mayores remociones de turbiedad con el Tipo de Coagulante PAC.

Complementando el análisis anterior, en la Figura 22 se presentan las gráficas de cubos, donde se puede observar que las mayores remociones en el FGAC se obtuvieron cuando el Tipo de Agua y el Tipo de Coagulante presentaron los niveles más altos, es decir para el Tipo de Agua II (20 UNT) y PAC, que corresponde a los ensayos 8, 10, 15 y 16. En cuanto al efluente de la operación del sistema, la Figura 23 muestra que las mayores remociones se obtuvieron para el Tipo de Agua II correspondiente al nivel más alto.

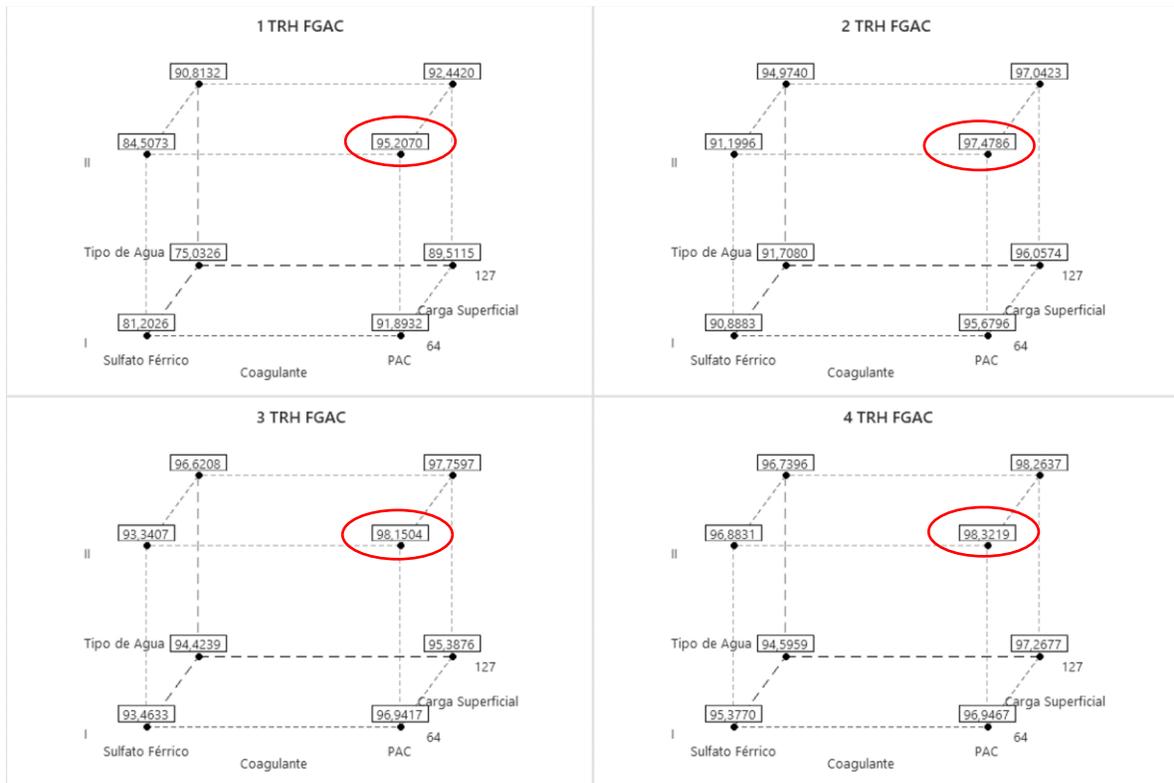


Figura 22. Gráfica de cubos (medias ajustadas) para remoción de turbiedad (%) en el FGAC

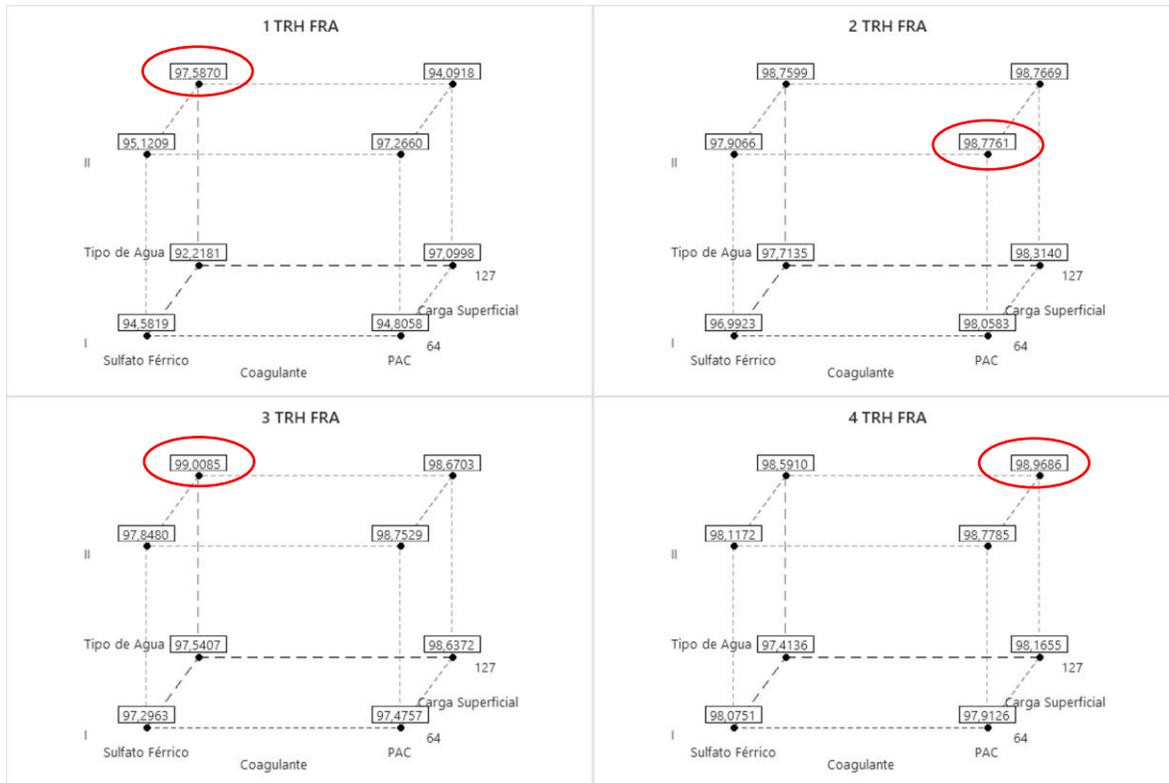


Figura 23. Gráfica de cubos (medias ajustadas) para remoción de turbiedad (%) en el efluente del sistema, FRA

Finalmente, la Figura 24 presenta el comportamiento para la turbiedad, pH y conductividad eléctrica en el tiempo para las condiciones óptimas de operación encontradas: Tipo de coagulante PAC, Caudal de $1,0 \text{ m}^3/\text{d}$ (carga superficial de $127,32 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$ para el FRA) y Tipo de Agua II. Se observan remociones del 94,10% de turbiedad en el efluente pasado el primer TRH (90 minutos), y del 98,97% al final de la prueba, pasados 4 TRH (360 minutos), con un valor final de turbiedad de 0,21 UNT; durante todo el ensayo se obtuvieron valores de pH en el efluente cercanos a la neutralidad y la conductividad eléctrica se mantuvo en un rango entre 85,0 y $97,3 \mu\text{s}/\text{cm}$, variaciones poco representativas que se atribuyen a las características agua suministrada por el acueducto. De esta manera se evidencia que todos los parámetros evaluados en el efluente para el ensayo con las condiciones óptimas de

operación, cumplen con lo establecido en la normatividad colombiana para agua potable.

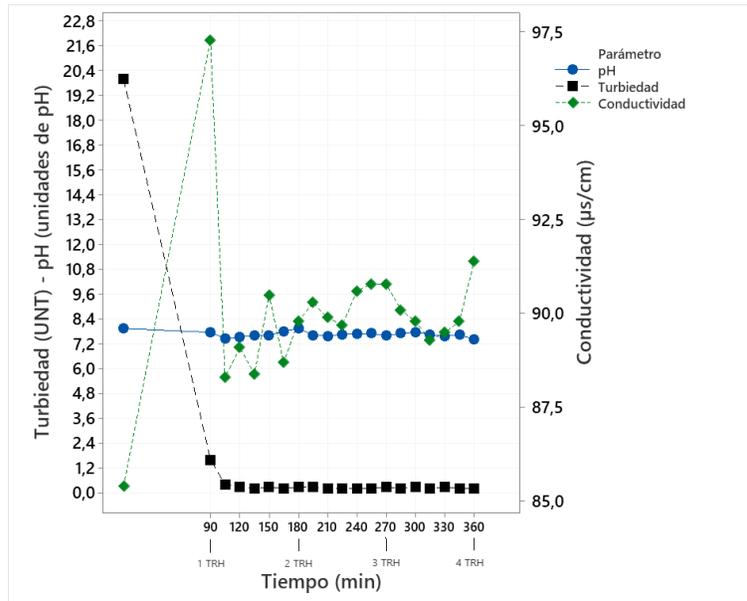


Figura 24. Comportamiento en el tiempo de la turbiedad, el pH y la conductividad eléctrica para las condiciones óptimas de operación del sistema.

6 CONCLUSIONES

El estudio hidráulico realizado en las unidades principales del sistema de potabilización a escala piloto objeto de investigación, permitió concluir que, para las dos cargas superficiales evaluadas, tanto el FGAC como el FRA presentan predominio de flujo pistón, con un volumen útil del 70% disponible para los procesos, sin presencia de cortocircuitos; estas características favorecen los procesos de floculación y sedimentación en el FGAC.

De acuerdo con el análisis del diseño factorial, los factores que más afectan la remoción de turbiedad en el sistema de potabilización a escala piloto son el Tipo de Coagulante y el Tipo de Agua; cuando estos factores presentan los niveles más altos (PAC y Agua Tipo II) se obtienen mayores remociones de turbiedad. En el FGAC se evidenció la mayor remoción de la turbiedad (alrededor del 90%) para todos los ensayos evaluados, gracias a la integración de procesos de coagulación-floculación y sedimentación en esta unidad; la operación del FRA jugó un papel

importante como barrera final de pulimiento en la remoción de turbiedad, permitiendo alcanzar en el efluente valores por debajo del máximo permisible establecido en la normatividad de agua para consumo en Colombia, además de la menor turbiedad posible para un posterior proceso de desinfección más eficiente.

Se determinaron, como condiciones óptimas de operación, el uso de coagulante PAC, caudal de 1,0 m³/d y Tipo de Agua II; para estas condiciones, los parámetros evaluados en el efluente presentaron valores que se ajustan a los permisibles indicados en la normatividad colombiana; sin embargo, a partir de los ensayos de evaluación de la operación a caudales de 2,0 m³/d y 3,0 m³/d y con una turbiedad en el agua de alimentación de 50 UNT, se concluye que el sistema puede trabajar satisfactoriamente con mayores cargas superficiales y tratar adecuadamente aguas con turbiedades superiores a las valoradas, evidenciándose así que es un sistema de potabilización que presentará una buena respuesta ante cambios significativos en el caudal o en la turbiedad del agua a tratar, los cuales tienen una alta probabilidad de suceder debido a variaciones climáticas o eventos representativos de lluvias, que modifican las características fisicoquímicas del afluente.

La operación del sistema para todas las condiciones evaluadas permitió obtener un efluente de buena calidad que cumple con los valores establecidos en la norma para las variables pH, conductividad, turbiedad y color aparente. Adicionalmente, la combinación de procesos de filtración en múltiples etapas con procesos convencionales como la coagulación y la floculación, además del adecuado funcionamiento hidráulico, brindan una alternativa eficiente, fácil de implementar, operar y mantener para la remoción de turbiedad, microorganismos patógenos y color aparente en el agua.

El sistema de potabilización con filtración gruesa ascendente y filtración rápida descendente evaluado se consolida como una alternativa viable "semi-centralizada" para poblaciones rurales o pequeñas comunidades, ya que combina los beneficios de un sistema centralizado: buen rendimiento en remoción de contaminantes y eliminación de microorganismos patógenos, con las ventajas de los sistemas

descentralizados: bajos costos de construcción y consumo energético, simplicidad operacional y de mantenimiento.

7 TRABAJO DE INVESTIGACIÓN FUTURO

El trabajo futuro en esta área de investigación, se enfocará entre otras, en evaluar los tiempos requeridos durante las carreras de filtración, identificar el valor máximo de turbiedad en el agua de alimentación que puede tratar el sistema, implementar la etapa de desinfección, automatizar el sistema de potabilización e integrar energías alternativas para su funcionamiento.

8 REFERENCIAS

- Alley, E. R. (2007). *Water Quality Control Handbook, Second Edition* (2nd ed.). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071467605>
- Castro, C. (2009). Evaluación de un clarificador de manto de lodos a escala de laboratorio. In *Universidad de Antioquia*. Universidad de Antioquia.
- CEPIS. (2006). Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida. *Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Del Ambiente*, 504. http://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1_tomo1_indice.pdf
- Departamento Nacional de Planeación. (2017). *Plan de Desarrollo del Sector de Acueducto y Alcantarillado. Bogotá, Colombia: Departamento Nacional de Planeación –DNP–*. www.dnp.gov.co
- Elliott, M., Stauber, C. E., Digiano, F. A., de Aceituno, A. F., & Sobsey, M. D. (2015). Investigation of E. Coli and virus reductions using replicate, bench-scale biosand filter columns and two filter media. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(9), 10276–10299. <https://doi.org/10.3390/ijerph120910276>
- Fabiszewski, A. M., Stauber, C. E., Walters, A. R., Meza Sanchez, R. E., & Sobsey, M. D. (2012). A randomized controlled trial of the plastic-housing BioSand filter and its impact on diarrheal disease in Copan, Honduras. *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 86(6), 913–921. <https://doi.org/10.4269/ajtmh.2012.11-0066>
- Fuller, J. A., Goldstick, J., Bartram, J., & Eisenberg, J. N. S. (2016). Tracking progress towards global drinking water and sanitation targets: A within and among country analysis. *Science of the Total Environment*, 541, 857–864. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.130>
- Galvis, G., Latorre, J., & Visscher, J. (1999). *Filtración en Múltiples Etapas. Tecnología innovativa para el tratamiento de agua* (Instituto). Artes Gráficas de Univalle.
- Gruoso, M. C., Castro, C. C., Correa, M. A., & Saldarriaga, J. C. (2019). Estado del arte: desalinización mediante tecnologías de membrana como alternativa frente al problema de escasez de agua dulce. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(35), 69–89. <https://doi.org/10.22395/rium.v18n35a5>
- Hijnen, W. A. M. (2010). Elimination of Micro-organisms by Drinking Water Treatment Processes: A Review. In *Water Intelligence Online* (Vol. 9, Issue May 2014). <https://doi.org/10.2166/9781780401584>
- Hoslett, J., Massara, T. M., Malamis, S., Ahmad, D., van den Boogaert, I., Katsou, E., Ahmad, B., Ghazal, H., Simons, S., Wrobel, L., & Jouhara, H. (2018). Surface water filtration using granular media and membranes: A review. *Science of the Total Environment*, 639, 1268–1282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.247>
- Lin, W. S., Lee, M., Huang, Y. C., & Den, W. (2015). Identifying water recycling strategy using multivariate statistical analysis for high-tech industries in Taiwan. *Resources, Conservation and Recycling*, 94, 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.11.007>
- Lu, Z., Mo, W., Dilkina, B., Gardner, K., Stang, S., Huang, J. C., & Foreman, M. C. (2019). Decentralized water collection systems for households and communities: Household preferences in Atlanta and Boston. *Water Research*, 167, 115134.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115134>

- Lugo-Arias, J., Burgos-Vergara, J., Lugo-Arias, E., Gould, A., & Ovallos-Gazabon, D. (2020). Evaluation of low-cost alternatives for water purification in the stilt house villages of Santa Marta's Ciénaga Grande. *Heliyon*, 6(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03062>
- Mackenzie, D. (2020). *Water and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice, Second Edition* (2nd editio). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260132274>
- Mahmood, Q., Baig, S. A., Nawab, B., Shafqat, M. N., Pervez, A., & Zeb, B. S. (2011). Development of low cost household drinking water treatment system for the earthquake affected communities in Northern Pakistan. *Desalination*, 273(2–3), 316–320. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.01.052>
- Margat, J., & Vallée, D. (2014). Total renewable freshwater supply by country (2013 update). *The World's Water*, 7, 21.
- Medeiros, R. C., de, N., Freitas, B. L. S., Sabogal-Paz, L. P., Hoffmann, M. T., Davis, J., Fernandez-Ibañez, P., & Byrne, J. A. (2020). Drinking water treatment by multistage filtration on a household scale: Efficiency and challenges. *Water Research*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115816>
- Ministerio de la Protección Social. (2007). Resolución 2115/2007. *Gaceta Oficial*, 23. http://www.lasalle.edu.co/wps/wcm/connect/d951c109-a227-44a3-8a42-1d1f87db2b43/Resolución_2115-2007.pdf?MOD=AJPERES
- Morató, J., Subirana, A., Gris, A., Carneiro, A., & Pastor, R. (2006). Tecnologías sostenibles para la potabilización y el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 3(1), 19–29. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=69530105>
- Mushila, C. N., Ochieng, G. M., Otieno, F. A. O., Shitote, S. M., & Sitters, C. W. (2016). Hydraulic design to optimize the treatment capacity of Multi-Stage Filtration units. *Physics and Chemistry of the Earth*, 92, 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2015.10.015>
- Mwabi, J. K., Adeyemo, F. E., Mahlangu, T. O., Mamba, B. B., Brouckaert, B. M., Swartz, C. D., Offringa, G., Mpenyana, L., & Momba, M. N. B. (2015). Household water treatment systems: A solution to the production of safe drinking water by the low-income communities of Southern Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(14–15), 1120–1128. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.07.078>
- Nalco Water, an E. C. (2018). *Nalco Water Handbook, Fourth Edition* (4th editio). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781259860973>
- Naranjo, D. (2009). *Desarrollo de un sistema compacto de potabilización*. Universidad de Antioquia.
- Pedrosa, I., Juarros, J., Robles, A., Basteiro, J., & García, E. (2014). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? *Universitas Psychologica*, 14(1), 245–254. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.upsy14-1.pbad>

- Peter-varbanets, M., Gujer, W., & Pronk, W. (2012). Intermittent operation of ultra-low pressure ultrafiltration for decentralized drinking water treatment. *Water Research*, 46(10), 3272–3282. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.020>
- Schumann, P., Andrade, J. A. O., Jekel, M., & Ruhl, A. S. (2020). Packing granular activated carbon into a submerged gravity-driven flat sheet membrane module for decentralized water treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 38(March), 101517. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101517>
- Shahabuddin, F. A. A., Ibrahim, K., & Jemain, A. A. (2009). On the Comparison of Several Goodness of Fit tests under Simple Random Sampling and Ranked Set Sampling. *International Journal of Mathematical and Computational Sciences*, 3(6), 406–409.
- Shun Dar Lin, P. D. (2014). *Water and Wastewater Calculations Manual, Third Edition* (3rd edition.). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071819817>
- Sierra, C. (2011). *Calidad del agua. Evaluación y diagnóstico*. U. de Medellín.
- Skaf, D. W., Punzi, V. L., Rolle, J. T., & Cullen, E. (2021). Impact of Moringa Oleifera extraction conditions on zeta potential and coagulation effectiveness. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104687. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104687>
- Souza, B. L., & Sabogal, L. P. (2020). Pretreatment using *Opuntia cochenillifera* followed by household slow sand filters: technological alternatives for supplying isolated communities. *Environmental Technology*, 41(21), 2783–2794. <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1582700>
- String, G. M., Singleton, R. I., Mirindi, P. N., & Lantagne, D. S. (2020). Operational research on rural, community-managed Water Safety Plans: Case study results from implementations in India, DRC, Fiji, and Vanuatu. *Water Research*, 170, 115288. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115288>
- The American Society of Civil Engineers. (2012). *Water Treatment Plant Design, Fifth Edition* (5th ed.). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071745727>
- The American Water Works Association. (2011). *Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water, Sixth Edition* (6th ed.). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071630115>
- The Water Environment Federation. (2017). *Operation of Water Resource Recovery Facilities, Manual of Practice No. 11, Seventh Edition* (7th editio). McGraw-Hill Education. <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781259859366>
- Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico. (2018). *Plan Director de Agua y Saneamiento Básico, Visión Estratégica 2018-2030* (pp. 1–108). Bogotá, Colombia: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Wills, B., Castro, C., & Correa, M. (2010). Evaluación de un clarificador de manto de lodos a escala de laboratorio. *Revista EIA*, 1794–1237, 53–65.
- Wu, C., Wang, L., Hu, B., & Ye, J. (2013). Influential factors of formation kinetics of flocs

produced by water treatment coagulants. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 25(5), 1015–1022. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60150-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60150-8)

9 ANEXOS

Anexo 1 .Fichas técnicas de los coagulantes



Policloruro de Aluminio, PAC Ficha Técnica del Producto



KOSHER PAREVE
3627
No Reg. 290



Propiedades Químicas (AWWA B408-03)

Fórmula Química	$[Al(OH)_m Cl_{3-m}]_n$
Densidad a 25 °C, g/ml	1.23 ± 0.05
pH a 25 °C	2.5 ± 0.3
% Al ₂ O ₃	10.5 ± 0.5
Relación de Basicidad	70% min.

*Vida útil posterior a su fabricación: 3 meses

Indicaciones

El policloruro de aluminio (PAC) es una sal de alta basicidad con base en anión cloruro. Se diferencia del hidroxiclorigerato de aluminio (ACH) porque presenta especies polinucleares del metal convirtiéndolo en un coagulante de alto desempeño, con excelentes propiedades para el tratamiento de aguas con dificultades especiales y generando bajo volumen de lodos, pues trabaja bien con poco suministro de alúmina.

Condiciones de Manejo

El producto debe ser almacenado en tanques de fibra de vidrio, polietileno o acero recubierto en caucho y conducido empleando fibra de vidrio, PVC o cualquier otro material termoplástico. También es compatible con EPDM, Caucho Natural y Vitón. El producto no debe estar en contacto con hierro, acero al carbón, acero inoxidable y bronce.

Es deseable que el Policloruro de Aluminio Líquido sea dosificado tal como se recibe del proveedor y no ser contaminados por agua u otra impureza durante el almacenamiento.

Para la dosificación exacta y uniforme, debe ser usada una bomba de desplazamiento positivo. El producto no se deteriora con el tiempo mientras sea manejado bajo las condiciones explicadas. Su vida útil es de 3 meses.

Precauciones y Seguridad

El producto no presenta alto riesgo en su manejo pero, por ser una sal ácida debe tratarse con cuidado. Evite el contacto con metales que puedan sufrir corrosión tales como hierro, cobre, bronce, aluminio y acero inoxidable. Se recomienda el uso de guantes y gafas protectoras.

En los ojos y mucosas causa irritación; en caso de contacto debe enjuagarse con agua abundante.

El producto no emite gases y por lo tanto no causa efectos nocivos al ser inhalado.



Oficina Principal y Producción

Medellín: Calle 55 No 46-85 Itagüí, Antioquia; Tel: (574)370 1170; Fax: (574)277 5676; sulfosa@sulfoquimica.com

Producción

- Barbosa: Via Girardota - El Hatillo km. 4 (Vereda Platanito), Barbosa, Antioquia. Tel. (574)289 2480, Fax. (574)289 1234; sobarbosa@sulfoquimica.com
- Barranquilla: Via Malambo - Sabanagrande, km. 3; Parque Industrial PIMSA; Malambo, Atlántico. Tel (575)347 8350; Fax: (575)3478353; sobarranquilla@sulfoquimica.com
- Caloto: Via Caloto - Santander de Quilichao, km. 7, Caloto, Cauca. Tel (572)550 4344; Fax: (572)550 4343; socaloto@sulfoquimica.com

Sulfato Férrico
Ficha Técnica del Producto

Fórmula Química	$Fe_2(SO_4)_3$ (ac)
Densidad g/mL	1.48 ± 0.04
Contenido de Hierro Férrico Fe^{+3}	8.5 ± 0.5 %
Contenido de Hierro Ferroso Fe^{+2}	2.0 % max.
Contenido de Insolubles	0.1 % max.

*Vida útil posterior a su fabricación: 6 – 12 meses

Condiciones de Manejo

El producto debe ser almacenado y conducido empleando acero inoxidable 316, fibra de vidrio, PVC, o cualquier otro material termoplástico. También es compatible con EPDM, caucho natural y vitón. El producto no debe ponerse en contacto con hierro, cobre o aluminio y en acero inoxidable 304 puede haber efectos menores.

Es deseable que el Sulfato Férrico sea dosificado como se entrega; su uso diluido puede ser consultado con el personal técnico de Sulfoquímica. Para la dosificación exacta y uniforme, debe ser usada una bomba de desplazamiento positivo.

El producto no se deteriora con el tiempo mientras sea manejado bajo las condiciones explicadas.

Precauciones y Seguridad

El producto no presenta alto riesgo en su manejo pero por ser una sal ácida debe tratarse con cuidado. Se recomienda el uso de guantes y gafas protectoras.

En los ojos y mucosas causa irritación; en caso de contacto debe enjuagarse con agua abundante.

El producto no emite gases y por lo tanto no causa efectos nocivos al ser inhalado.



Oficina Principal y Producción

Medellín: Calle 55 No 46-85 Itagüí, Antioquia; Tel: (574)370 1170; Fax: (574)277 5676; sulfosa@sulfoquimica.com

Producción

- Barbosa: Via Girardota - El Hatillo km. 4 (Vereda Platanito), Barbosa, Antioquia. Tel. (574)289 2480, Fax. (574)289 1234; sobarbosa@sulfoquimica.com
- Barranquilla: Via Malambo - Sabanagrande, km. 3; Parque Industrial PIMSA; Malambo, Atlántico. Tel (575)347 8350; Fax: (575)3478353; sobarranquilla@sulfoquimica.com
- Caloto: Via Caloto - Santander de Quilichao, km. 7, Caloto, Cauca. Tel (572)550 4344; Fax: (572)550 4343; sgcaloto@sulfoquimica.com

Anexo 2. Tabla A1. Resultados Tratamiento 1

Tratamiento: 1													
		Fecha	25/02/2020	Tipo de agua		I							
		Coagulante	S Férrico	Carga superficial (m3/m2.día)		63,66							
		Hora de inicio:				7:40							
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	7:35	7,07		23		84,6		20		10,3			
1	10:10	7,14	7,17	22,9	22,7	94,1	94,5	≤10	≤10	2,86	0,73	72,23	92,91
2	10:25	7,19	7,24	22,7	22,8	93,0	94,1	≤10	≤10	2,76	0,63	73,20	93,88
3	10:40	7,20	7,20	22,9	22,8	92,5	93,0	≤10	≤10	2,59	0,64	74,85	93,79
4	10:55	7,23	7,25	23,0	23,1	91,3	92,8	≤10	≤10	2,53	0,53	75,44	94,85
5	11:10	7,17	7,23	23,1	23,0	90,8	91,4	≤10	≤10	2,15	0,58	79,13	94,37
6	11:25	7,22	7,16	23,0	23,0	90,7	90,6	≤10	≤10	1,91	0,54	81,46	94,76
7	11:40	7,12	7,18	23,3	23,2	90,4	91,0	≤10	≤10	1,78	0,46	82,72	95,53
8	11:55	7,21	7,19	23,6	23,4	90,3	89,9	≤10	≤10	1,52	0,35	85,24	96,60
9	12:10	7,18	6,94	23,7	23,5	89,3	89,7	≤10	≤10	1,41	0,33	86,31	96,80
10	12:25	7,24	7,20	23,9	23,7	89,1	89,7	≤10	≤10	1,46	0,29	85,83	97,18
11	12:40	7,25	7,22	24,1	23,8	88,9	88,9	≤10	≤10	1,23	0,39	88,06	96,21
12	12:55	6,98	6,99	24,4	24,1	89,8	88,6	≤10	≤10	1,16	0,35	88,74	96,60
13	13:10	7,12	7,13	24,2	24,0	88,5	89,0	≤10	≤10	1,23	0,38	88,06	96,31
14	13:25	7,13	7,08	24,3	24,2	89,9	89,0	≤10	≤10	1,16	0,50	88,74	95,15
15	13:40	7,24	7,13	24,6	24,3	88,7	88,9	≤10	≤10	1,17	0,50	88,64	95,15
16	13:55	7,22	7,12	24,7	24,4	88,5	89,2	≤10	≤10	1,01	0,28	90,19	97,28
17	14:10	7,16	7,14	25,1	24,6	88,3	88,5	≤10	≤10	1,02	0,33	90,10	96,80
18	14:25	7,28	7,11	25,1	24,7	88,3	89,3	≤10	≤10	0,99	0,38	90,39	96,31
19	14:40	7,09	7,07	25,3	25,0	88,3	88,2	≤10	≤10	1,04	0,32	89,90	96,89
20	14:55	7,03	7,01	25,4	25,1	88,1	87,5	≤10	≤10	1,03	0,39	90,00	96,21
21	15:10	7,20	7,12	25,5	25,2	88,9	88,4	≤10	≤10	0,95	0,39	90,78	96,21
22	15:25	7,30	7,16	25,7	25,2	88,5	88,1	≤10	≤10	0,89	0,43	91,36	95,83
23	15:40	7,29	7,15	25,7	25,3	88,3	88,1	≤10	≤10	0,86	0,53	91,65	94,85
24	15:55	7,26	7,12	26,0	25,4	88,1	88,0	≤10	≤10	0,75	0,24	92,72	97,67
25	16:10	7,31	7,12	25,3	25,9	88,6	88,6	≤10	≤10	0,75	0,74	92,72	92,82
26	16:25	7,28	7,12	26,3	25,7	88,3	88,3	≤10	≤10	0,70	0,27	93,20	97,38
27	16:40	7,18	7,12	26,5	25,9	88,2	87,9	≤10	≤10	0,76	0,28	92,62	97,28
28	16:55	7,10	6,93	26,3	26,1	88,3	87,4	≤10	≤10	0,72	0,25	93,01	97,57
29	17:10	7,15	7,12	26,1	25,6	87,4	87,6	≤10	≤10	0,65	0,23	93,69	97,77
30	17:25	7,26	7,02	27,1	26,4	89,3	88,3	≤10	≤10	0,64	0,27	93,79	97,38
31	17:40	7,27	7,18	25,7	26,3	88,4	88,1	≤10	≤10	0,72	0,24	93,01	97,67

Anexo 3. Tabla A2. Resultados Tratamiento 2

Tratamiento: 2													
		Fecha		11/02/2020		Tipo de agua		I					
		Coagulante		PAC		Carga superficial (m3/m2.día)		63,66					
		Hora de inicio:				8:00 a. m.							
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	8:00	7,38		23,3		83,4		20		10,3			
1	10:30	7,24	7,23	23,5	23,3	82,5	82,4	≤10	≤10	0,98	0,66	90,49	93,59
2	10:45	7,26	7,23	23,2	23,2	82,9	82,7	≤10	≤10	0,69	0,43	93,30	95,83
3	11:00	7,20	7,29	23,3	23,3	83,5	82,2	≤10	≤10	0,72	0,43	93,01	95,83
4	11:15	7,38	7,28	23,4	23,4	83,7	83,2	≤10	≤10	0,61	0,31	94,08	96,99
5	11:30	7,41	7,34	23,5	23,4	83,7	83,6	≤10	≤10	0,59	0,31	94,27	96,99
6	11:45	7,36	7,28	23,9	23,6	83,8	83,7	≤10	≤10	0,71	0,30	93,11	97,09
7	12:00	7,21	7,20	24,1	23,9	83,9	83,9	≤10	≤10	0,49	0,30	95,24	97,09
8	12:15	7,34	7,30	24,3	24,0	83,9	83,9	≤10	≤10	0,64	0,24	93,79	97,67
9	12:30	7,35	7,31	24,5	24,2	83,9	84,1	≤10	≤10	0,48	0,24	95,34	97,67
10	12:45	7,28	7,24	24,5	24,2	84,5	84,1	≤10	≤10	0,54	0,28	94,76	97,28
11	13:00	7,25	7,23	24,6	24,4	84,3	84,3	≤10	≤10	0,53	0,23	94,85	97,77
12	13:15	7,29	7,25	24,6	24,6	84,2	84,7	≤10	≤10	0,55	0,29	94,66	97,18
13	13:30	7,28	7,35	24,8	24,6	84,4	84,3	≤10	≤10	0,41	0,29	96,02	97,18
14	13:45	7,25	7,21	24,8	26,4	85,3	84,5	≤10	≤10	0,40	0,25	96,12	97,57
15	14:00	7,28	7,25	25,0	24,9	84,4	84,5	≤10	≤10	0,42	0,24	95,92	97,67
16	14:15	7,30	7,29	25,2	25,1	84,3	84,1	≤10	≤10	0,43	0,26	95,83	97,48
17	14:30	7,26	7,26	25,3	25,0	84,7	84,6	≤10	≤10	0,43	0,30	95,83	97,09
18	14:45	7,29	7,22	25,3	25,1	84,6	84,6	≤10	≤10	0,39	0,26	96,21	97,48
19	15:00	7,21	7,18	25,6	25,2	85,0	84,9	≤10	≤10	0,36	0,23	96,50	97,77
20	15:15	7,29	7,24	25,5	25,6	85,2	85,0	≤10	≤10	0,43	0,23	95,83	97,77
21	15:30	7,19	7,16	26,0	25,8	85,1	85,1	≤10	≤10	0,34	0,24	96,70	97,67
22	15:45	7,13	7,13	25,8	26,0	85,3	84,8	≤10	≤10	0,33	0,23	96,80	97,77
23	16:00	7,22	7,18	26,2	25,9	85,6	85,2	≤10	≤10	0,53	0,23	94,85	97,77
24	16:15	7,25	7,17	26,2	25,9	85,4	85,1	≤10	≤10	0,48	0,26	95,34	97,48
25	16:30	7,22	7,20	26,1	26,0	84,8	84,9	≤10	≤10	0,34	0,24	96,70	97,67
26	16:45	7,22	7,19	26,2	25,9	84,8	84,9	≤10	≤10	0,29	0,22	97,18	97,86
27	17:00	7,13	7,14	26,3	26,0	84,5	85,0	≤10	≤10	0,31	0,20	96,99	98,06
28	17:15	7,09	7,10	26,3	26,3	84,8	84,6	≤10	≤10	0,34	0,19	96,70	98,16
29	17:30	7,27	7,17	26,8	26,5	85,1	85,2	≤10	≤10	0,31	0,18	96,99	98,25
30	18:00	7,17	7,15	26,8	26,3	85,0	84,8	≤10	≤10	0,42	0,25	95,92	97,57

Anexo 4. Tabla A3. Resultados Tratamiento 3

Tratamiento: 3													
		Fecha		28/02/2020		Tipo de agua		I					
		Coagulante		PAC		Carga superficial (m3/m2.día)		63,66					
		Hora de inicio: 7:00											
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	6:55	7,29		22,6		96,6		20		10,3			
1	9:30	7,21	7,2	22,3	22,3	101,9	101,8	≤10	≤10	0,69	0,41	93,30	96,02
2	9:45	7,27	7,3	22,6	22,5	102,4	102,9	≤10	≤10	0,60	0,25	94,17	97,57
3	10:00	7,29	7,31	22,8	22,6	102,1	101,9	≤10	≤10	0,50	0,29	95,15	97,18
4	10:15	7,34	7,29	23,1	22,7	102,5	102,1	≤10	≤10	0,43	0,24	95,83	97,67
5	10:30	7,33	7,32	23,1	22,8	103,2	102,2	≤10	≤10	0,51	0,25	95,05	97,57
6	10:45	7,34	7,34	23,1	22,9	102,4	101,9	≤10	≤10	0,42	0,16	95,92	98,45
7	11:00	7,33	7,32	23,2	23,1	102,1	101,9	≤10	≤10	0,36	0,17	96,50	98,35
8	11:15	7,35	7,34	23,3	23,1	102,3	102,2	≤10	≤10	0,34	0,15	96,70	98,54
9	11:30	7,36	7,35	23,3	23,3	102,7	102,1	≤10	≤10	0,36	0,23	96,50	97,77
10	11:45	7,32	7,28	23,4	23,4	102,8	102,5	≤10	≤10	0,46	0,17	95,53	98,35
11	12:00	7,29	7,3	23,6	23,5	103,1	102,5	≤10	≤10	0,36	0,17	96,50	98,35
12	12:15	7,34	7,33	23,8	23,6	102,9	102,4	≤10	≤10	0,34	0,17	96,70	98,35
13	12:30	7,34	7,32	24,0	23,6	103,1	102,7	≤10	≤10	0,49	0,18	95,24	98,25
14	12:45	7,34	7,33	24,1	23,8	103,1	102,6	≤10	≤10	0,33	0,16	96,80	98,45
15	13:00	7,36	7,35	24,1	23,9	102,8	103,0	≤10	≤10	0,28	0,18	97,28	98,25
16	13:15	7,36	7,36	24,2	24,1	103,2	102,9	≤10	≤10	0,43	0,32	95,83	96,89
17	13:30	7,26	7,22	24,1	23,7	103,0	103,3	≤10	≤10	0,36	0,21	96,50	97,96
18	13:45	7,09	7,18	24,3	24,0	103,5	103,9	≤10	≤10	0,35	0,23	96,60	97,77
19	14:00	7,12	7,12	24,0	24,2	103,3	102,8	≤10	≤10	0,41	0,18	96,02	98,25
20	14:15	7,24	7,21	24,4	24,3	103,5	103,4	≤10	≤10	0,47	0,21	95,44	97,96
21	14:30	7,35	7,32	24,6	24,8	103,4	103,4	≤10	≤10	0,29	0,28	97,18	97,28
22	14:45	7,34	7,33	24,7	24,4	103,2	102,9	≤10	≤10	0,31	0,29	96,99	97,18
23	15:00	7,29	7,29	25,1	24,4	103,4	102,9	≤10	≤10	0,21	0,27	97,96	97,38
24	15:15	7,34	7,33	25,3	25,1	103,7	103,2	≤10	≤10	0,33	0,26	96,80	97,48
25	15:30	7,35	7,34	25,4	25,1	103,8	103,2	≤10	≤10	0,28	0,23	97,28	97,77
26	15:45	7,32	7,29	25,6	25,4	103,4	103,1	≤10	≤10	0,30	0,22	97,09	97,86
27	16:00	7,34	7,28	25,4	25,6	103,5	103,2	≤10	≤10	0,32	0,25	96,89	97,57
28	16:15	7,32	7,3	24,3	24,8	103,9	103,8	≤10	≤10	0,42	0,33	95,92	96,80
29	16:30	7,33	7,29	26,1	25,3	104,1	103,6	≤10	≤10	0,38	0,30	96,31	97,09
30	16:45	7,34	7,26	26,3	26,1	104,1	104,2	≤10	≤10	0,26	0,28	97,48	97,28
31	17:00	7,24	7,15	26,3	25,5	103,9	102,6	≤10	≤10	0,24	0,18	97,67	98,25

Anexo 5. Tabla A4. Resultados Tratamiento 4

Tratamiento: 4													
		Fecha		27/02/2020		Tipo de agua		I					
		Coagulante		S. Férrico		Carga superficial (m3/m2.día)		127,32					
Hora de inicio:										7:10			
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	7:05	7,55		22,3		104,9		20		10,4			
1	8:40	7,36	7,28	23,1	22,8	104,7	104,6	≤10	≤10	1,80	0,42	82,69	95,96
2	8:55	7,41	7,35	23,0	22,9	103,9	103,6	≤10	≤10	1,04	0,27	90,00	97,40
3	9:10	7,38	7,27	23,1	23,1	103,6	103,5	≤10	≤10	0,94	0,24	90,96	97,69
4	9:25	7,40	7,35	23,4	23,2	103,5	103,4	≤10	≤10	0,87	0,22	91,63	97,88
5	9:40	7,39	7,31	23,4	23,3	104,1	103,6	≤10	≤10	0,74	0,20	92,88	98,08
6	9:55	7,30	7,21	23,6	23,1	103,4	103,2	≤10	≤10	0,69	0,20	93,37	98,08
7	10:10	7,33	7,27	23,8	23,3	103,4	103,3	≤10	≤10	0,72	0,22	93,08	97,88
8	10:25	7,35	7,23	23,8	23,7	102,9	103,1	≤10	≤10	0,62	0,17	94,04	98,37
9	10:40	7,34	7,28	24,1	23,9	103,6	102,6	≤10	≤10	0,66	0,18	93,65	98,27
10	10:55	7,37	7,21	23,9	23,8	102,6	102,7	≤10	≤10	0,53	0,17	94,90	98,37
11	11:10	7,34	7,18	24,2	24,1	102,5	102,6	≤10	≤10	0,51	0,31	95,10	97,02
12	11:25	7,35	7,22	24,3	24,1	102,4	102,5	≤10	≤10	0,49	0,17	95,29	98,37
13	11:40	7,34	7,27	24,4	24,3	102,7	102,4	≤10	≤10	0,49	0,30	95,29	97,12
14	11:55	7,36	7,28	24,5	24,5	102,4	102,1	≤10	≤10	0,50	0,19	95,19	98,17
15	12:10	7,13	6,99	24,3	24,4	102,3	101,9	≤10	≤10	0,50	0,25	95,19	97,60
16	12:25	7,27	7,16	24,6	24,6	102,4	102,4	≤10	≤10	0,55	0,26	94,71	97,50
17	12:40	7,31	7,21	24,8	24,6	102,2	104,6	≤10	≤10	0,55	0,31	94,71	97,02
18	12:55	7,36	7,23	25,0	24,9	103,2	102,2	≤10	≤10	0,55	0,24	94,71	97,69
19	13:10	7,27	7,20	24,7	24,7	102,9	101,7	≤10	≤10	0,56	0,30	94,62	97,12

Anexo 6. Tabla A5. Resultados Tratamiento 5

Tratamiento: 5													
Fecha		4/03/2020		Tipo de agua				II					
Coagulante		S Férrico		Carga superficial (m3/m2.día)				63,66					
Hora de inicio: 8:45													
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	8:40	6,94		24,3		93,9		30		19,5			
1	11:15	6,88	6,93	23,9	23,8	97,6	97,2	≤10	≤10	1,65	0,51	91,54	97,38
2	11:30	6,87	6,87	24,0	23,8	97,5	97,0	≤10	≤10	1,47	0,49	92,46	97,49
3	11:45	7,08	7,05	23,9	23,8	98,5	98,2	≤10	≤10	1,31	0,47	93,28	97,59
4	12:00	7,01	6,98	24,2	23,9	97,4	98,1	≤10	≤10	1,35	0,43	93,08	97,79
5	12:15	7,10	7,04	24,1	24,1	99,6	99,0	≤10	≤10	1,23	0,41	93,69	97,90
6	12:30	7,08	7,08	24,3	24,2	99,7	99,0	≤10	≤10	1,00	0,42	94,87	97,85
7	12:45	7,09	7,11	24,4	24,5	100,2	99,3	≤10	≤10	0,42	0,38	97,85	98,05
8	13:00	7,08	7,01	24,4	24,2	100,0	95,5	≤10	≤10	0,84	0,38	95,69	98,05
9	13:15	6,82	6,82	24,3	24,2	99,8	99,6	≤10	≤10	0,86	0,24	95,59	98,77
10	13:30	6,83	6,81	24,4	24,3	99,7	100,0	≤10	≤10	0,79	0,26	95,95	98,67
11	13:45	7,04	6,88	24,4	24,3	100,0	100,5	≤10	≤10	0,73	0,25	96,26	98,72
12	14:00	7,12	7,03	24,7	24,5	100,2	100,1	≤10	≤10	0,69	0,26	96,46	98,67
13	14:15	7,09	7,02	25,0	25,1	100,6	100,0	≤10	≤10	0,65	0,25	96,67	98,72
14	14:30	7,07	7,02	25,3	25,2	100,3	100,0	≤10	≤10	0,62	0,31	96,82	98,41
15	14:45	7,06	7,03	25,4	25,2	100,7	100,2	≤10	≤10	0,65	0,29	96,67	98,51
16	15:00	6,99	6,93	25,5	25,3	100,1	100,1	≤10	≤10	0,68	0,30	96,51	98,46
17	15:15	7,08	7,03	25,7	25,4	100,0	99,6	≤10	≤10	0,68	0,30	96,51	98,46
18	15:30	7,07	7,04	25,4	25,6	99,2	99,3	≤10	≤10	0,65	0,26	96,67	98,67
19	15:45	7,05	7,01	25,6	25,7	100,4	99,2	≤10	≤10	0,77	0,34	96,05	98,26
20	16:00	7,07	6,96	26,0	25,8	99,5	98,8	≤10	≤10	0,64	0,27	96,72	98,62
21	16:15	7,07	7,02	26,1	26,1	99,2	98,4	≤10	≤10	0,74	0,31	96,21	98,41
22	16:30	7,04	6,95	26,3	26,1	98,8	98,4	≤10	≤10	0,70	0,26	96,41	98,67
23	16:45	7,03	6,98	26,3	26,3	99,6	98,3	≤10	≤10	0,71	0,39	96,36	98,00
24	17:00	7,05	6,98	26,6	26,5	99,3	98,4	≤10	≤10	0,63	0,25	96,77	98,72
25	17:15	6,98	6,89	26,4	26,4	98,8	98,7	≤10	≤10	0,61	0,21	96,87	98,92
26	17:30	7,09	7,01	26,9	26,6	99,9	98,8	≤10	≤10	0,62	0,26	96,82	98,67
27	17:45	6,89	6,79	26,8	26,8	100,1	98,7	≤10	≤10	0,53	0,25	97,28	98,72
28	18:00	7,10	6,92	26,1	25,8	99,1	98,5	≤10	≤10	0,55	0,19	97,18	99,03
29	18:15	7,12	6,89	26,5	26,3	99,7	98,4	≤10	≤10	0,48	0,23	97,54	98,82
30	18:30	7,09	7,02	26,7	26,2	99,2	98,8	≤10	≤10	0,34	0,21	98,26	98,92
31	18:45	7,06	7,01	26,7	25,9	99,3	98,3	≤10	≤10	0,33	0,27	98,31	98,62

Anexo 7. Tabla A6. Resultados Tratamiento 6

Tratamiento: 6													
		Fecha	12/02/2020	Tipo de agua		II							
		Coagulante	S. Férrico	Carga superficial (m3/m2.día)		127,32							
		Hora de inicio:		9:30									
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	9:30	7,61		25,3		83,7		30		20,6			
1	11:00	7,07	7,04	24,3	24,2	82,6	82,5	≤10	≤10	2,37	0,63	88,50	96,94
2	11:15	7,36	7,32	24,6	24,1	84,1	83,3	≤10	≤10	2,34	0,44	88,64	97,86
3	11:30	7,38	7,26	24,6	24,5	84,2	84,2	≤10	≤10	2,04	0,36	90,10	98,25
4	11:45	7,38	7,33	24,8	24,7	84,5	84,1	≤10	≤10	1,80	0,31	91,26	98,50
5	12:00	7,21	7,19	25,0	24,8	84,4	84,1	≤10	≤10	1,64	0,29	92,04	98,59
6	12:15	7,26	7,19	25,2	24,9	83,0	84,9	≤10	≤10	1,48	0,26	92,82	98,74
7	12:30	7,23	7,18	25,2	25,2	84,1	84,9	≤10	≤10	1,28	0,23	93,79	98,88
8	12:45	7,30	7,15	25,3	25,1	84,9	84,9	≤10	≤10	1,17	0,25	94,32	98,79
9	13:00	7,21	7,15	25,5	25,3	84,8	85,4	≤10	≤10	1,01	0,20	95,10	99,03
10	13:15	7,11	7,10	25,6	25,5	85,2	85,2	≤10	≤10	1,02	0,25	95,05	98,79
11	13:30	7,15	7,11	25,6	25,6	85,1	84,9	≤10	≤10	0,97	0,27	95,29	98,69
12	13:45	7,17	7,13	25,7	25,6	85,0	84,9	≤10	≤10	0,91	0,26	95,58	98,74
13	14:00	7,17	7,10	25,8	25,4	85,0	84,9	≤10	≤10	0,82	0,19	96,02	99,08
14	14:15	7,17	7,07	26,1	25,9	84,3	84,7	≤10	≤10	0,76	0,22	96,31	98,93
15	14:30	7,19	7,10	26,3	26,1	85,0	84,9	≤10	≤10	0,79	0,18	96,17	99,13
16	14:45	7,20	7,13	26,4	26,2	84,8	85,1	≤10	≤10	0,78	0,23	96,21	98,88
17	15:00	7,18	7,14	26,5	26,3	84,6	85,0	≤10	≤10	0,80	0,22	96,12	98,93
18	15:15	7,17	7,08	26,4	26,2	84,1	85,2	≤10	≤10	0,80	0,17	96,12	99,17
19	15:30	7,22	7,10	26,6	26,4	84,9	84,8	≤10	≤10	0,91	0,31	95,58	98,50

Anexo 8. Tabla A7. Resultados Tratamiento 7

Tratamiento: 7													
		Fecha		5/03/2020		Tipo de agua		I					
		Coagulante		S Férrico		Carga superficial (m3/m2.día)		63,66					
		Hora de inicio: 7:30											
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	7:25	6,82		23,7		93,6		20		9,87			
1	10:00	6,68	6,72	23,9	23,8	98,9	99,6	≤10	≤10	0,97	0,37	90,17	96,25
2	10:15	6,94	6,84	23,8	23,9	99,4	99,4	≤10	≤10	0,93	0,29	90,58	97,06
3	10:30	6,90	6,94	23,9	23,8	99,4	99,3	≤10	≤10	0,82	0,25	91,69	97,47
4	10:45	7,02	7,02	24,1	23,9	99,6	99,4	≤10	≤10	0,73	0,27	92,60	97,26
5	11:00	7,05	7,05	24,1	24,1	99,5	99,5	≤10	≤10	0,79	0,25	92,00	97,47
6	11:15	7,10	7,09	24,2	24,1	99,6	99,5	≤10	≤10	0,71	0,35	92,81	96,45
7	11:30	7,04	7,06	24,2	24,1	99,5	99,4	≤10	≤10	0,67	0,28	93,21	97,16
8	11:45	7,05	7,06	24,3	24,3	99,3	99,5	≤10	≤10	0,63	0,23	93,62	97,67
9	12:00	7,06	7,05	24,4	24,3	99,3	99,8	≤10	≤10	0,55	0,14	94,43	98,58
10	12:15	7,05	7,04	24,5	24,4	100,3	99,6	≤10	≤10	0,49	0,17	95,04	98,28
11	12:30	7,09	7,10	24,6	24,5	100,5	99,7	≤10	≤10	0,62	0,22	93,72	97,77
12	12:45	7,08	7,07	24,8	24,6	99,9	99,6	≤10	≤10	0,53	0,21	94,63	97,87
13	13:00	6,96	6,92	24,6	24,7	99,8	99,6	≤10	≤10	0,51	0,29	94,83	97,06
14	13:15	7,03	7,06	25,1	24,8	99,6	99,5	≤10	≤10	0,43	0,20	95,64	97,97
15	13:30	6,93	6,94	25,0	24,3	99,2	99,7	≤10	≤10	0,51	0,22	94,83	97,77
16	13:45	7,07	7,02	25,0	24,9	99,7	99,2	≤10	≤10	0,51	0,21	94,83	97,87
17	14:00	6,87	6,86	25,0	25,0	99,6	100,0	≤10	≤10	0,42	0,18	95,74	98,18
18	14:15	7,07	6,96	25,2	25,1	99,4	99,2	≤10	≤10	0,49	0,19	95,04	98,07
19	14:30	6,88	6,88	25,2	25,1	99,2	99,5	≤10	≤10	0,40	0,24	95,95	97,57
20	14:45	7,09	6,99	25,4	25,3	99,6	99,8	≤10	≤10	0,43	0,21	95,64	97,87
21	15:00	7,00	6,93	25,4	25,3	99,4	99,7	≤10	≤10	0,38	0,16	96,15	98,38
22	15:15	7,04	6,98	25,6	25,6	100,3	99,6	≤10	≤10	0,44	0,26	95,54	97,37
23	15:30	7,01	6,93	25,7	25,6	100,7	99,6	≤10	≤10	0,45	0,24	95,44	97,57
24	15:45	6,65	6,67	25,8	25,8	99,2	99,2	≤10	≤10	0,37	0,20	96,25	97,97
25	16:00	7,07	6,99	26,1	25,7	99,7	99,7	≤10	≤10	0,36	0,18	96,35	98,18
26	16:15	6,92	6,89	25,9	26,0	99,4	100,3	≤10	≤10	0,41	0,20	95,85	97,97
27	16:30	6,54	6,60	26,1	26,0	99,9	99,8	≤10	≤10	0,32	0,16	96,76	98,38
28	16:45	6,78	6,72	26,1	26,1	99,8	99,9	≤10	≤10	0,34	0,19	96,56	98,07
29	17:00	7,02	6,83	26,0	26,1	99,7	99,9	≤10	≤10	0,39	0,21	96,05	97,87
30	17:15	7,05	6,88	26,1	26,1	99,6	99,7	≤10	≤10	0,37	0,15	96,25	98,48
31	17:30	6,89	6,86	26,0	26,1	99,8	99,8	≤10	≤10	0,34	0,15	96,56	98,48

Anexo 9. Tabla A8. Resultados Tratamiento 8

Tratamiento: 8													
		Fecha		13/02/2020		Tipo de agua		II					
		Coagulante		PAC		Carga superficial (m3/m2.día)		127,32					
				Hora de inicio:		9:50							
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	9:50	7,50		23,0		80,4		30		20,7			
1	11:20	7,65	7,49	23,4	23,6	92,6	80,7	≤10	≤10	1,68	0,79	91,88	96,18
2	11:35	7,40	7,35	23,7	23,7	84,1	83,3	≤10	≤10	1,24	0,49	94,01	97,63
3	11:50	7,53	7,44	23,7	23,7	84,9	84,3	≤10	≤10	1,04	0,45	94,98	97,83
4	12:05	7,52	7,41	23,7	23,7	86,7	84,2	≤10	≤10	0,76	0,29	96,33	98,60
5	12:20	7,56	7,41	24,1	24,0	85,2	85,2	≤10	≤10	0,68	0,26	96,71	98,74
6	12:35	7,22	7,21	24,2	24,1	84,5	85,1	≤10	≤10	0,55	0,23	97,34	98,89
7	12:50	7,19	7,23	24,4	24,2	85,8	85,5	≤10	≤10	0,50	0,20	97,58	99,03
8	13:05	7,24	7,32	24,3	24,1	85,8	85,5	≤10	≤10	0,49	0,20	97,63	99,03
9	13:20	7,25	7,29	24,7	24,7	85,7	86,2	≤10	≤10	0,45	0,23	97,83	98,89
10	13:35	7,31	7,29	24,5	24,6	86,7	86,1	≤10	≤10	0,41	0,24	98,02	98,84
11	13:50	7,36	7,23	24,7	24,7	86,1	86,2	≤10	≤10	0,36	0,20	98,26	99,03
12	14:05	7,34	7,28	25,0	24,9	85,5	86,1	≤10	≤10	0,41	0,27	98,02	98,70
13	14:20	7,35	7,20	25,2	25,1	86,1	86,4	≤10	≤10	0,41	0,24	98,02	98,84
14	14:35	7,30	7,24	25,3	25,1	86,5	86,1	≤10	≤10	0,35	0,24	98,31	98,84
15	14:50	7,29	7,18	25,4	25,2	86,1	86,2	≤10	≤10	0,33	0,23	98,41	98,89
16	15:05	7,31	7,23	25,6	25,4	86,4	86,1	≤10	≤10	0,30	0,22	98,55	98,94
17	15:20	7,26	7,24	25,8	25,5	87,0	86,2	≤10	≤10	0,42	0,22	97,97	98,94
18	15:35	7,34	7,28	25,8	25,7	86,5	86,5	≤10	≤10	0,33	0,25	98,41	98,79
19	15:50	7,28	7,24	25,9	25,7	86,1	85,7	≤10	≤10	0,31	0,22	98,50	98,94

Anexo 10. Tabla A9. Resultados Tratamiento 9

Tratamiento: 9													
		Fecha		26/02/2020		Tipo de agua		I					
		Coagulante		PAC		Carga superficial (m3/m2.día)		127,32					
		Hora de inicio				8:40							
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	8:35	7,36		22,7		98		20		10,1			
1	10:10	7,31	7,25	23,3	23,2	102,7	101,3	≤10	≤10	0,88	0,30	91,29	97,03
2	10:25	7,29	7,22	23,2	23,2	103,3	102,9	≤10	≤10	0,49	0,22	95,15	97,82
3	10:40	7,35	7,27	23,3	23,2	104,1	103,5	≤10	≤10	0,48	0,22	95,25	97,82
4	10:55	7,34	7,26	23,3	23,3	104,6	104,4	≤10	≤10	0,44	0,17	95,64	98,32
5	11:10	7,36	7,29	23,4	23,4	104,6	104,5	≤10	≤10	0,39	0,18	96,14	98,22
6	11:25	7,35	7,30	23,6	23,4	104,5	104,6	≤10	≤10	0,34	0,28	96,63	97,23
7	11:40	7,36	7,29	23,9	23,6	104,2	104,3	≤10	≤10	0,32	0,15	96,83	98,51
8	11:55	7,32	7,30	23,9	23,9	104,7	104,7	≤10	≤10	0,36	0,23	96,44	97,72
9	12:10	7,35	7,28	24,1	23,1	104,6	104,6	≤10	≤10	0,32	0,18	96,83	98,22
10	12:25	7,33	7,34	24,1	23,9	104,2	104,5	≤10	≤10	0,35	0,21	96,53	97,92
11	12:40	7,36	7,34	24,3	24,1	104,3	104,3	≤10	≤10	0,36	0,23	96,44	97,72
12	12:55	7,35	7,35	24,3	24,2	104,7	104,3	≤10	≤10	0,36	0,13	96,44	98,71
13	13:10	7,22	7,17	24,3	24,3	104,2	103,9	≤10	≤10	0,36	0,18	96,44	98,22
14	13:25	7,28	7,20	24,4	24,3	104,8	103,7	≤10	≤10	0,34	0,21	96,63	97,92
15	13:40	7,25	7,21	24,6	24,3	106,1	104,4	≤10	≤10	0,28	0,21	97,23	97,92
16	13:55	7,27	7,19	24,6	24,4	104,7	104,4	≤10	≤10	0,28	0,22	97,23	97,82
17	14:10	7,35	7,27	24,8	24,6	104,9	104,7	≤10	≤10	0,25	0,19	97,52	98,12
18	14:25	7,33	7,22	25,1	24,7	104,8	104,5	≤10	≤10	0,28	0,16	97,23	98,42
19	14:40	7,25	7,22	25,2	24,8	104,4	104,3	≤10	≤10	0,25	0,18	97,52	98,22

Anexo 11. Tabla A10. Resultados Tratamiento 10

Tratamiento: 10													
		Fecha	14/02/2020	Tipo de agua		II							
		Coagulante	PAC	Carga superficial (m3/m2.día)		63,66							
		Hora de inicio:		7:40									
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	7:35	7,16		25,8		79,6		30		21			
1	10:10	7,58	7,49	29,2	24,0	82,7	82,7	≤10	≤10	1,10	0,57	94,76	97,29
2	10:25	7,20	7,24	24,2	23,9	83,7	82,7	≤10	≤10	0,97	0,50	95,38	97,62
3	10:40	7,21	7,23	24,3	24,0	83,4	83,4	≤10	≤10	0,88	0,38	95,81	98,19
4	10:55	7,17	7,25	24,5	24,2	83,7	83,8	≤10	≤10	0,80	0,33	96,19	98,43
5	11:10	7,19	7,22	24,6	24,3	83,9	83,7	≤10	≤10	0,69	0,33	96,71	98,43
6	11:25	7,31	7,25	24,8	24,9	84,1	83,4	≤10	≤10	0,64	0,31	96,95	98,52
7	11:40	7,21	7,26	24,9	24,6	84,1	83,9	≤10	≤10	0,67	0,27	96,81	98,71
8	11:55	7,20	7,22	25,0	24,8	83,7	83,9	≤10	≤10	0,56	0,35	97,33	98,33
9	12:10	7,23	7,22	25,2	24,9	84,3	83,7	≤10	≤10	0,51	0,22	97,57	98,95
10	12:25	7,22	7,24	25,3	25,0	84,4	83,8	≤10	≤10	0,48	0,27	97,71	98,71
11	12:40	7,24	7,22	25,5	25,2	84,1	84,2	≤10	≤10	0,43	0,23	97,95	98,90
12	12:55	7,22	7,22	25,6	25,3	84,3	84,0	≤10	≤10	0,41	0,19	98,05	99,10
13	13:10	7,17	7,19	25,6	25,4	84,3	84,1	≤10	≤10	0,50	0,27	97,62	98,71
14	13:25	7,21	7,30	25,7	25,3	84,7	84,1	≤10	≤10	0,45	0,21	97,86	99,00
15	13:40	7,23	7,33	25,7	25,7	84,2	84,5	≤10	≤10	0,44	0,24	97,90	98,86
16	13:55	7,36	7,34	26,1	25,7	84,1	83,2	≤10	≤10	0,35	0,32	98,33	98,48
17	14:10	7,20	7,30	26,2	25,7	84,3	84,3	≤10	≤10	0,37	0,19	98,24	99,10
18	14:25	7,11	7,13	26,3	25,9	84,8	83,9	≤10	≤10	0,33	0,23	98,43	98,90
19	14:40	7,31	7,24	26,4	25,2	84,2	83,6	≤10	≤10	0,36	0,22	98,29	98,95
20	14:55	7,20	7,22	26,5	26,2	84,1	83,8	≤10	≤10	0,32	0,18	98,48	99,14
21	15:10	7,25	7,21	26,7	26,3	84,7	84,3	≤10	≤10	0,30	0,26	98,57	98,76
22	15:25	7,23	7,19	26,5	26,4	84,8	84,3	≤10	≤10	0,32	0,18	98,48	99,14
23	15:40	7,25	7,24	26,8	26,5	85,1	84,1	≤10	≤10	0,48	0,17	97,71	99,19
24	15:55	7,19	7,18	25,0	26,5	85,3	84,6	≤10	≤10	0,35	0,23	98,33	98,90
25	16:10	7,20	7,22	26,1	26,3	84,5	84,3	≤10	≤10	0,36	0,18	98,29	99,14
26	16:25	7,22	7,18	25,8	26,2	84,1	84,8	≤10	≤10	0,34	0,21	98,38	99,00
27	16:40	7,25	7,26	27,3	26,9	85,2	85,0	≤10	≤10	0,45	0,23	97,86	98,90
28	16:55	7,20	7,21	27,5	23,9	84,5	84,9	≤10	≤10	0,31	0,23	98,52	98,90
29	17:10	7,21	7,15	27,3	26,9	84,9	84,9	≤10	≤10	0,34	0,18	98,38	99,14
30	17:25	7,25	7,18	27,6	26,9	84,7	85,0	≤10	≤10	0,33	0,27	98,43	98,71
31	17:40	7,14	7,21	27,0	26,2	84,3	84,2	≤10	≤10	0,36	0,30	98,29	98,57

Anexo 12. Tabla A11. Resultados Tratamiento 11

Tratamiento: 11													
		Fecha	10/02/2020	Tipo de agua		I							
		Coagulante	S. Férrico	Carga superficial (m3/m2.día)		127,32							
		Hora de inicio:		10:50									
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	10:50	7,50		21,9		77,7		20		11,8			
1	12:20	7,57	7,37	22,8	22,5	85,8	85,6	≤10	≤10	3,85	1,36	67,37	88,47
2	12:35	7,11	7,09	22,7	22,6	83,8	84,0	≤10	≤10	2,82	0,94	76,10	92,03
3	12:50	7,54	7,17	22,8	22,6	83,3	83,4	≤10	≤10	2,19	0,63	81,44	94,66
4	13:05	7,27	7,20	22,9	22,7	83,2	83,4	≤10	≤10	1,84	0,52	84,41	95,59
5	13:20	7,37	7,17	23,0	22,9	83,1	83,0	≤10	≤10	1,52	0,39	87,12	96,69
6	13:35	7,42	7,12	23,1	23,0	82,9	82,1	≤10	≤10	1,36	0,33	88,47	97,20
7	13:50	7,27	7,07	23,2	23,1	83,0	82,9	≤10	≤10	1,14	0,29	90,34	97,54
8	14:05	7,65	7,13	23,3	23,2	83,2	83,5	≤10	≤10	1,01	0,32	91,44	97,29
9	14:20	7,22	7,27	23,1	25,0	82,7	83,0	≤10	≤10	0,93	0,28	92,12	97,63
10	14:35	7,26	7,14	23,8	23,5	82,8	82,7	≤10	≤10	0,87	0,25	92,63	97,88
11	14:50	7,20	7,05	23,8	23,6	81,7	82,5	≤10	≤10	0,90	0,30	92,37	97,46
12	15:05	7,90	7,07	24,0	23,5	82,1	82,2	≤10	≤10	0,77	0,24	93,47	97,97
13	15:20	7,06	7,94	24,1	24,0	82,0	81,9	≤10	≤10	0,76	0,24	93,56	97,97
14	15:35	7,03	7,97	24,2	29,1	82,0	81,7	≤10	≤10	0,70	0,26	94,07	97,80
15	15:50	7,16	7,05	24,4	24,2	81,9	82,3	≤10	≤10	0,68	0,30	94,24	97,46
16	16:05	7,14	7,93	24,2	24,2	82,0	81,7	≤10	≤10	0,63	0,22	94,66	98,14
17	16:20	6,63	6,72	24,5	26,5	82,6	82,7	≤10	≤10	0,77	0,27	93,47	97,71
18	16:35	6,71	6,73	26,5	24,6	82,2	82,0	≤10	≤10	0,60	0,22	94,92	98,14
19	16:50	6,64	6,71	24,9	24,8	82,0	82,1	≤10	≤10	0,64	0,27	94,58	97,71

Anexo 13. Tabla A12. Resultados Tratamiento 12

Tratamiento:12													
		Fecha		6/02/2020		Tipo de agua		I					
		Coagulante		PAC		Carga superficial (m3/m2.día)		127,32					
		Hora de inicio:		10:30									
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	10:25	7,55		23,3		82,4		20		10,6			
1	12:00	7,45	7,47	23,8	23,7	81,4	81,8	≤10	≤10	1,30	0,30	87,74	97,17
2	12:15	7,53	7,35	23,7	23,6	82,1	81,7	≤10	≤10	0,80	0,20	92,45	98,11
3	12:30	7,47	7,03	24,0	23,7	83,0	83,0	≤10	≤10	0,60	0,20	94,34	98,11
4	12:45	7,50	7,47	24,1	25,8	83,4	83,3	≤10	≤10	0,50	0,20	95,28	98,11
5	13:00	7,54	7,38	24,1	23,9	83,9	84,1	≤10	≤10	0,60	0,20	94,34	98,11
6	13:15	7,48	7,30	24,1	24,0	84,2	84,3	≤10	≤10	0,50	0,20	95,28	98,11
7	13:30	7,42	7,39	24,3	24,1	84,3	84,4	≤10	≤10	0,50	0,20	95,28	98,11
8	13:45	7,42	7,41	24,4	24,0	85,1	85,5	≤10	≤10	0,40	0,20	96,23	98,11
9	14:00	7,45	7,45	24,5	24,3	85,0	84,9	≤10	≤10	0,60	0,20	94,34	98,11
10	14:15	7,53	7,52	24,5	24,3	84,9	85,1	≤10	≤10	0,40	0,20	96,23	98,11
11	14:30	7,41	7,46	24,7	24,5	85,0	85,1	≤10	≤10	0,30	0,20	97,17	98,11
12	14:45	7,46	7,50	24,8	24,6	84,6	84,8	≤10	≤10	0,30	0,20	97,17	98,11
13	15:00	7,43	7,47	24,7	24,6	85,0	84,5	≤10	≤10	0,60	0,10	94,34	99,06
14	15:15	7,45	7,46	24,9	24,8	85,4	84,7	≤10	≤10	0,30	0,20	97,17	98,11
15	15:30	7,50	7,55	25,0	24,7	84,7	84,7	≤10	≤10	0,20	0,20	98,11	98,11
16	15:45	7,53	7,55	25,1	25,0	84,2	82,9	≤10	≤10	0,26	0,15	97,55	98,58
17	16:00	7,51	7,48	25,2	25,0	85,3	85,9	≤10	≤10	0,27	0,17	97,45	98,40
18	16:15	7,50	7,53	25,4	25,2	84,6	84,5	≤10	≤10	0,29	0,21	97,26	98,02
19	16:30	7,55	7,51	25,2	25,3	85,3	84,9	≤10	≤10	0,32	0,20	96,98	98,11

Anexo 14. Tabla A13. Resultados Tratamiento 13

Tratamiento: 13													
		Fecha	18/02/2020		Tipo de agua	II							
		Coagulante	S Férrico		Carga superficial (m3/m2.día)	63,66							
		Hora de inicio			7:55								
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	7:50	7,53		23,7		78,6		30		21			
1	10:25	7,25	7,30	23,4	23,4	87,5	87,8	≤10	≤10	4,73	1,50	77,48	92,86
2	10:40	7,39	7,40	23,2	23,4	87,4	87,8	≤10	≤10	4,58	1,37	78,19	93,48
3	10:55	7,25	7,27	23,3	23,6	86,9	86,2	≤10	≤10	4,27	1,19	79,67	94,33
4	11:10	7,48	7,45	23,4	23,5	86,7	86,9	≤10	≤10	4,20	1,09	80,00	94,81
5	11:25	7,51	7,48	23,6	23,6	85,7	86,3	≤10	≤10	4,05	0,99	80,71	95,29
6	11:40	7,27	7,28	23,4	23,6	85,2	85,0	≤10	≤10	3,85	0,41	81,67	98,05
7	11:55	7,29	7,33	23,6	23,7	85,4	85,3	≤10	≤10	3,72	0,85	82,29	95,95
8	12:10	7,36	7,32	24,1	23,9	84,6	85,2	≤10	≤10	3,36	0,80	84,00	96,19
9	12:25	7,24	7,23	24,3	24,0	83,4	84,3	≤10	≤10	3,09	0,68	85,29	96,76
10	12:40	7,16	7,11	24,5	24,2	83,9	84,9	≤10	≤10	2,92	0,65	86,10	96,90
11	12:55	7,40	7,34	24,7	24,4	83,5	83,8	≤10	≤10	2,91	0,61	86,14	97,10
12	13:10	7,46	7,38	24,5	24,5	84,0	84,3	≤10	≤10	3,09	0,69	85,29	96,71
13	13:25	7,56	7,38	24,9	24,6	83,8	83,6	≤10	≤10	3,26	0,65	84,48	96,90
14	13:40	7,51	7,34	25,1	24,7	83,4	83,5	≤10	≤10	3,15	0,71	85,00	96,62
15	13:55	7,46	7,37	25,2	24,8	82,9	83,7	≤10	≤10	3,21	0,70	84,71	96,67
16	14:10	7,51	7,40	25,2	24,3	83,1	83,4	≤10	≤10	2,80	0,80	86,67	96,19
17	14:25	7,48	7,40	25,4	25,1	83,4	83,4	≤10	≤10	2,50	0,65	88,10	96,90
18	14:40	7,56	7,42	25,5	25,1	83,6	83,4	≤10	≤10	2,32	0,62	88,95	97,05
19	14:55	7,55	7,46	25,3	25,3	82,9	83,5	≤10	≤10	2,31	0,64	89,00	96,95
20	15:10	7,51	7,43	25,6	25,1	83,2	83,3	≤10	≤10	2,07	0,69	90,14	96,71
21	15:25	7,48	7,47	25,7	25,5	83,2	82,5	≤10	≤10	2,00	0,57	90,48	97,29
22	15:40	7,49	7,42	25,7	25,6	83,5	83,5	≤10	≤10	1,92	0,55	90,86	97,38
23	15:55	7,40	7,43	26,0	25,7	83,2	83,8	≤10	≤10	1,82	0,52	91,33	97,52
24	16:10	7,37	7,22	25,9	25,6	84,4	83,6	≤10	≤10	1,89	0,58	91,00	97,24
25	16:25	7,49	7,33	26,2	25,7	83,7	83,3	≤10	≤10	1,68	0,54	92,00	97,43
26	16:40	7,53	7,24	26,2	25,9	83,5	83,8	≤10	≤10	1,60	0,54	92,38	97,43
27	16:55	7,47	7,37	26,4	26,4	83,6	83,5	≤10	≤10	1,60	0,59	92,38	97,19
28	17:10	7,32	7,30	26,1	25,7	84,1	83,1	≤10	≤10	1,57	0,50	92,52	97,62
29	17:25	7,39	7,28	26,2	26,4	84,7	83,6	≤10	≤10	1,54	0,41	92,67	98,05
30	17:40	7,55	7,47	26,3	26,1	83,6	83,6	≤10	≤10	1,51	0,44	92,81	97,90
31	17:55	7,27	7,21	26,7	26,3	83,2	83,1	≤10	≤10	1,44	0,50	93,14	97,62

Anexo 15. Tabla A14. Resultados Tratamiento 14

Tratamiento: 14															
Fecha		29/02/2020		Tipo de agua		II		Coagulante		S Férrico		Carga superficial (m3/m2.día)		127,32	
Hora de inicio: 9:30															
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad			
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA		
Agua de alimentación	9:25	7,05		22,9		94,2		30		19,8					
1	11:00	7,26	7,20	23,0	23,0	99,5	98,8	≤10	≤10	1,36	0,35	93,13	98,23		
2	11:15	7,16	7,13	23,0	23,0	99,8	100,2	≤10	≤10	1,28	0,32	93,54	98,38		
3	11:30	7,14	7,08	22,8	23,2	100,4	100,3	≤10	≤10	1,16	0,33	94,14	98,33		
4	11:45	7,08	6,88	23,1	23,2	100,3	99,4	≤10	≤10	1,13	0,29	94,29	98,54		
5	12:00	6,64	6,69	23,1	23,2	99,9	100,5	≤10	≤10	0,88	0,22	95,56	98,89		
6	12:15	6,62	6,69	23,8	23,6	100,2	100,1	≤10	≤10	0,81	0,27	95,91	98,64		
7	12:30	6,74	6,60	23,9	23,7	100,3	100,0	≤10	≤10	0,76	0,27	96,16	98,64		
8	12:45	6,97	6,85	24,1	24,1	100,1	99,8	≤10	≤10	0,80	0,27	95,96	98,64		
9	13:00	6,85	6,74	24,2	24,1	99,7	99,8	≤10	≤10	0,75	0,29	96,21	98,54		
10	13:15	6,96	6,86	24,4	24,3	100,1	99,9	≤10	≤10	0,64	0,26	96,77	98,69		
11	13:30	6,69	6,67	24,4	24,2	99,1	99,0	≤10	≤10	0,55	0,25	97,22	98,74		
12	13:45	6,64	6,61	24,5	24,4	99,3	98,9	≤10	≤10	0,61	0,26	96,92	98,69		
13	14:00	6,61	6,66	24,6	24,6	99,2	99,4	≤10	≤10	0,55	0,21	97,22	98,94		
14	14:15	6,63	6,66	24,9	24,8	99,8	99,2	≤10	≤10	0,52	0,20	97,37	98,99		
15	14:30	6,62	6,66	25,0	24,9	99,7	99,6	≤10	≤10	0,53	0,21	97,32	98,94		
16	14:45	6,60	6,67	25,0	25,0	99,2	99,3	≤10	≤10	0,52	0,20	97,37	98,99		
17	15:00	6,62	6,68	25,2	25,1	98,7	98,2	≤10	≤10	0,53	0,24	97,32	98,79		
18	15:15	6,66	6,61	25,3	25,2	99,0	98,6	≤10	≤10	0,51	0,25	97,42	98,74		
19	15:30	6,69	6,61	25,0	25,1	98,8	98,9	≤10	≤10	0,49	0,26	97,53	98,69		

Anexo 16. Tabla A15. Resultados Tratamiento 15

Tratamiento: 15															
Fecha		3/03/2020		Tipo de agua		II		Coagulante		PAC		Carga superficial (m3/m2.día)		63,66	
Hora de inicio: 7:45															
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad			
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA		
Agua de alimentación	7:40	6,90		23,3		92,5		30		20,7					
1	10:15	6,89	6,82	23,0	23,0	99,9	99,7	≤10	≤10	0,90	0,57	95,65	97,25		
2	10:30	6,91	6,83	23,0	23,1	100,3	99,2	≤10	≤10	0,85	0,52	95,89	97,49		
3	10:45	7,06	6,93	23,1	23,0	100,5	100,4	≤10	≤10	0,83	0,40	95,99	98,07		
4	11:00	7,01	6,94	23,0	23,2	100,4	100,5	≤10	≤10	0,77	0,37	96,28	98,21		
5	11:15	7,01	6,92	23,3	23,2	100,1	100,3	≤10	≤10	0,67	0,32	96,76	98,45		
6	11:30	7,08	6,93	23,4	23,4	100,1	100,2	≤10	≤10	0,66	0,25	96,81	98,79		
7	11:45	7,00	6,93	23,6	23,5	99,9	100,2	≤10	≤10	0,60	0,33	97,10	98,41		
8	12:00	6,97	6,93	23,7	23,7	99,9	99,7	≤10	≤10	0,52	0,25	97,49	98,79		
9	12:15	7,10	7,05	23,9	23,7	99,9	99,6	≤10	≤10	0,47	0,23	97,73	98,89		
10	12:30	7,12	7,10	24,2	24,0	100,0	99,5	≤10	≤10	0,47	0,30	97,73	98,55		
11	12:45	7,08	7,07	24,4	24,1	99,9	99,6	≤10	≤10	0,62	0,28	97,00	98,65		
12	13:00	7,10	7,07	24,5	24,3	99,8	99,6	≤10	≤10	0,43	0,26	97,92	98,74		
13	13:15	6,93	6,92	24,4	24,2	99,8	99,7	≤10	≤10	0,55	0,25	97,34	98,79		
14	13:30	6,86	6,86	24,4	24,3	100,1	99,6	≤10	≤10	0,42	0,25	97,97	98,79		
15	13:45	6,88	6,89	24,5	24,5	100,4	99,5	≤10	≤10	0,37	0,26	98,21	98,74		
16	14:00	7,13	7,01	24,7	24,4	100,1	99,9	≤10	≤10	0,36	0,24	98,26	98,84		
17	14:15	7,07	6,97	25,1	24,8	100,3	100,1	≤10	≤10	0,43	0,21	97,92	98,99		
18	14:30	7,13	7,03	25,1	24,7	100,1	100,0	≤10	≤10	0,33	0,21	98,41	98,99		
19	14:45	7,13	7,11	25,3	25,1	100,6	100,1	≤10	≤10	0,41	0,26	98,02	98,74		
20	15:00	7,10	7,01	25,5	25,1	101,1	99,6	≤10	≤10	0,38	0,30	98,16	98,55		
21	15:15	7,01	6,99	25,4	25,2	100,8	100,6	≤10	≤10	0,47	0,26	97,73	98,74		
22	15:30	7,14	7,10	25,7	25,4	101,0	100,8	≤10	≤10	0,40	0,28	98,07	98,65		
23	15:45	7,10	7,04	25,8	25,4	101,2	100,9	≤10	≤10	0,37	0,20	98,21	99,03		
24	16:00	7,08	7,01	25,9	24,9	101,3	100,8	≤10	≤10	0,40	0,20	98,07	99,03		
25	16:15	7,09	7,00	26,1	25,7	101,3	101,0	≤10	≤10	0,31	0,18	98,50	99,13		
26	16:30	7,06	7,02	26,2	26,1	101,4	100,9	≤10	≤10	0,30	0,21	98,55	98,99		
27	16:45	7,11	7,03	26,5	26,2	102,1	101,1	≤10	≤10	0,33	0,26	98,41	98,74		
28	17:00	7,09	6,98	26,6	26,2	103,1	101,2	≤10	≤10	0,32	0,26	98,45	98,74		
29	17:15	7,08	7,07	26,6	26,4	101,8	101,1	≤10	≤10	0,35	0,26	98,31	98,74		
30	17:30	7,01	6,97	26,7	26,3	101,7	101,2	≤10	≤10	0,36	0,30	98,26	98,55		
31	17:45	6,73	6,74	26,3	25,8	101,1	101,0	≤10	≤10	0,34	0,21	98,36	98,99		

Anexo 17. Tabla A16. Resultados Tratamiento 16

Tratamiento: 16													
		Fecha		4/02/2020		Tipo de agua		II					
		Coagulante		PAC		Carga superficial (m3/m2.día)		127,32					
		Hora inicio:		9:50 a. m.									
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua alimentación	9:40	7,55		22,8		85,4		30		20			
1	11:20	7,52	7,56	24,0	24,3	96,0	97,3	≤10	≤10	1,40	1,60	93,00	92,00
2	11:35	7,35	7,47	22,5	22,8	88,9	88,3	≤10	≤10	1,10	0,40	94,50	98,00
3	11:50	7,56	7,53	22,9	22,9	90,9	89,1	≤10	≤10	0,90	0,30	95,50	98,50
4	12:05	7,31	7,51	23,1	23,1	90,5	68,7	≤10	≤10	0,80	0,20	96,00	99,00
5	12:20	7,29	7,52	23,3	23,7	90,5	90,5	≤10	≤10	0,80	0,30	96,00	98,50
6	12:35	7,39	7,52	23,5	23,3	95,2	88,7	≤10	≤10	0,70	0,20	96,50	99,00
7	12:50	7,66	7,55	23,5	23,9	91,8	89,8	≤10	≤10	0,70	0,30	96,50	98,50
8	13:05	7,51	7,53	23,5	23,4	89,9	90,3	≤10	≤10	0,60	0,30	97,00	98,50
9	13:20	7,56	7,58	23,5	23,3	89,9	89,9	≤10	≤10	0,80	0,20	96,00	99,00
10	13:35	7,58	7,57	23,8	23,6	90,4	89,7	≤10	≤10	0,60	0,20	97,00	99,00
11	13:50	7,51	7,50	23,8	23,6	91,4	90,6	≤10	≤10	0,50	0,20	97,50	99,00
12	14:05	7,53	7,51	23,9	23,7	91,4	90,8	≤10	≤10	0,50	0,20	97,50	99,00
13	14:20	7,54	7,50	24,0	23,9	91,3	90,8	≤10	≤10	0,50	0,30	97,50	98,50
14	14:35	7,54	7,51	24,1	24,0	90,4	90,1	≤10	≤10	0,50	0,20	97,50	99,00
15	14:50	7,04	7,57	24,2	24,1	89,7	89,8	≤10	≤10	0,40	0,30	98,00	98,50
16	15:05	7,50	7,56	24,4	24,3	90,5	89,3	≤10	≤10	0,40	0,20	98,00	99,00
17	15:20	7,54	7,57	24,4	24,5	89,5	89,5	≤10	≤10	0,50	0,30	97,50	98,50
18	15:35	7,58	7,54	24,9	24,7	89,7	89,8	≤10	≤10	0,40	0,20	98,00	99,00
19	15:50	7,48	7,43	24,8	24,6	90,3	91,4	≤10	≤10	0,40	0,20	98,00	99,00

Anexo 18. Tabla A17. Resultados Blanco, agua Tipo I

Tratamiento: Blanco													
Fecha		10/03/2020		Tipo de agua		I							
Coagulante		No aplica		Carga superficial (m3/m2.día)		127,32							
Hora de inicio:										8:00			
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	7:55	7,12		23,1		94,9		20		9,75			
1	9:30	7,28	7,24	23,4	23,3	94,8	95,1	≤10	≤10	4,40	3,16	54,87	67,59
2	9:45	7,30	7,28	23,4	23,3	94,4	94,7	≤10	≤10	4,95	3,88	49,23	60,21
3	10:00	7,34	7,25	23,4	23,2	94,1	94,2	≤10	≤10	5,51	4,63	43,49	52,51
4	10:15	7,37	7,31	23,4	23,3	93,3	93,3	≤10	≤10	6,06	4,97	37,85	49,03
5	10:30	7,41	7,33	23,4	23,4	93,1	93,4	≤10	≤10	6,21	5,41	36,31	44,51
6	10:45	7,27	7,24	23,5	23,4	93,0	92,7	≤10	≤10	6,34	5,63	34,97	42,26
7	11:00	7,32	7,28	23,7	23,7	93,6	93,3	≤10	≤10	6,50	5,82	33,33	40,31
8	11:15	7,31	7,27	23,7	23,6	94,3	93,7	≤10	≤10	6,72	6,03	31,08	38,15
9	11:30	7,30	7,20	24,1	23,8	92,8	92,8	≤10	≤10	6,52	6,06	33,13	37,85
10	11:45	7,26	7,27	24,1	24,0	93,5	93,3	≤10	≤10	6,70	6,15	31,28	36,92
11	12:00	7,29	7,28	24,3	24,1	94,2	93,4	≤10	≤10	6,86	6,08	29,64	37,64
12	12:15	7,40	7,38	24,4	24,3	94,2	93,6	≤10	≤10	6,75	6,25	30,77	35,90
13	12:30	7,41	7,42	24,6	24,4	94,5	93,6	≤10	≤10	6,76	6,25	30,67	35,90
14	12:45	7,40	7,37	24,6	24,5	94,2	93,6	≤10	≤10	6,83	6,30	29,95	35,38
15	13:00	7,33	7,22	24,4	24,3	93,9	93,7	≤10	≤10	6,61	6,10	32,21	37,44
16	13:15	7,21	7,16	24,8	24,7	95,1	93,8	≤10	≤10	6,78	6,36	30,46	34,77
17	13:30	7,40	7,35	25,0	24,3	95,1	94,8	≤10	≤10	6,88	6,46	29,44	33,74
18	13:45	7,37	7,32	25,0	24,9	94,5	94,1	≤10	≤10	6,92	6,56	29,03	32,72
19	14:00	7,42	7,32	24,8	24,9	94,8	94,3	≤10	≤10	6,73	6,45	30,97	33,85

Anexo 19. Tabla A18. Resultados Blanco, agua Tipo II

Tratamiento: Blanco													
Fecha		19/02/2020		Tipo de agua		II							
Coagulante		No aplica		Carga superficial (m3/m2.día)		127,32							
Hora de inicio:						9:30							
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	9:25	6,93		25,3		79,4		30		19,6			
1	11:00	7,08	6,98	24,5	24,5	81,9	81,2	20	20	9,64	7,35	50,82	62,50
2	11:15	7,16	7,12	24,7	24,8	80,4	80,5	20	20	11,30	9,68	42,35	50,61
3	11:30	7,06	6,98	24,7	24,9	80,4	80,1	20	20	11,70	10,90	40,31	44,39
4	11:45	7,14	7,12	25,0	24,7	80,0	80,2	20	20	12,70	11,70	35,20	40,31
5	12:00	7,19	7,07	25,3	25,1	80,2	80,3	20	20	13,50	12,40	31,12	36,73
6	12:15	7,13	7,09	25,3	25,2	80,5	80,3	20	20	13,90	12,90	29,08	34,18
7	12:30	7,17	7,10	25,3	25,3	80,3	80,3	20	20	14,10	13,10	28,06	33,16
8	12:45	7,26	7,23	25,6	25,4	80,4	80,1	20	20	14,40	13,70	26,53	30,10
9	13:00	7,39	7,33	25,5	25,6	80,3	80,5	20	20	14,50	13,70	26,02	30,10
10	13:15	7,17	7,09	25,8	25,5	80,8	80,3	≤10	≤10	14,10	13,80	28,06	29,59
11	13:30	7,17	7,08	25,5	25,6	80,5	79,8	≤10	≤10	14,90	14,20	23,98	27,55
12	13:45	7,13	7,15	25,6	25,6	80,6	80,1	≤10	≤10	14,70	14,00	25,00	28,57
13	14:00	7,18	7,12	25,6	25,5	82,0	80,7	≤10	≤10	14,80	14,30	24,49	27,04
14	14:15	7,02	7,06	26,0	25,8	81,1	80,3	≤10	≤10	14,60	13,80	25,51	29,59
15	14:30	6,99	7,03	26,1	28,9	81,0	79,9	≤10	≤10	14,50	14,20	26,02	27,55
16	14:45	7,10	7,12	26,2	26,2	81,0	80,3	≤10	≤10	15,20	14,50	22,45	26,02
17	15:00	7,11	7,07	25,9	26,1	82,6	81,5	≤10	≤10	14,90	14,70	23,98	25,00
18	15:15	7,26	7,19	26,3	26,3	81,5	81,1	≤10	≤10	15,30	14,80	21,94	24,49
19	15:30	7,17	7,12	26,2	26,3	81,9	81,5	≤10	≤10	15,20	13,80	22,45	29,59

Anexo 20. Tabla A19. Resultados Tratamiento con Microorganismos

Tratamiento: Microorganismos														
		Fecha		11/03/2020		Tipo de agua		II						
		Coagulante		PAC		Carga superficial (m3/m2.día)		127,32						
		Hora de inicio: 11:30												
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		E. coli NMP/100	Coliformes totales NMP/100	Bacterias heterótrofas UFC/100
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA			
Agua de alimentación	11:30	7,51		24,3		96,6		30		19		240	15530	1750000
Agua de alimentación	16:00	/		/		/		/		/		310	10460	1680000
1	13:00	7,54	7,50	22,9	23,2	103,2	101,9	≤10	≤10	0,84	0,29	<1	6	1950000
2	13:15	7,49	7,50	23,6	23,4	102,4	101,4	≤10	≤10	0,64	0,17			
3	13:30	7,37	7,33	23,7	23,5	103,8	102,8	≤10	≤10	0,63	0,16			
4	13:45	7,48	7,42	23,2	23,7	103,7	103,2	≤10	≤10	0,54	0,16			
5	14:00	7,49	7,40	24,1	24,0	104,0	103,2	≤10	≤10	0,48	0,16			
6	14:15	7,37	7,40	24,4	24,1	104,0	103,7	≤10	≤10	0,41	0,18			
7	14:30	7,34	7,30	24,6	24,2	104,1	104,1	≤10	≤10	0,39	0,18	<1	2	310000
8	14:45	7,39	7,32	24,4	24,6	104,3	104,3	≤10	≤10	0,41	0,18			
9	15:00	7,41	7,40	24,7	24,5	104,0	104,3	≤10	≤10	0,39	0,15			
10	15:15	7,39	7,33	24,7	24,5	104,0	103,9	≤10	≤10	0,34	0,13			
11	15:30	7,28	7,33	25,0	24,8	104,1	104,0	≤10	≤10	0,31	0,14			
12	15:45	7,39	7,39	25,0	24,8	104,2	103,9	≤10	≤10	0,30	0,13			
13	16:00	7,29	7,35	25,2	24,9	104,3	103,7	≤10	≤10	0,29	0,13	<1	<1	360000
14	16:15	7,27	7,29	25,2	24,9	104,1	104,1	≤10	≤10	0,28	0,14			
15	16:30	7,27	7,34	25,3	25,1	104,2	104,3	≤10	≤10	0,29	0,14			
16	16:45	7,44	7,41	24,4	25,2	105,0	104,2	≤10	≤10	0,28	0,16			
17	17:00	7,39	7,38	25,3	25,1	104,7	104,3	≤10	≤10	0,27	0,14			
18	17:15	7,23	7,25	25,8	25,5	104,3	104,1	≤10	≤10	0,33	0,13			
19	17:30	7,39	7,37	25,5	25,1	104,3	104,7	≤10	≤10	0,35	0,16	<1	<1	190000

Anexo 21. Tabla A20. Resultados 200% del caudal mayor

Tratamiento: 200% caudal													
Fecha		13/03/2020		Tipo de agua		II							
Coagulante		PAC		Caudal (m3/día)		2,0							
Hora de inicio:										9:30			
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	9:25	6,92		22,9		95,1		30		20			
1	10:00	6,91	6,88	22,9	22,7	94,0	95,0	≤10	≤10	2,08	0,95	89,60	95,25
2	10:15	6,70	6,68	22,9	22,7	97,3	98,4	≤10	≤10	1,23	0,39	93,85	98,05
3	10:30	6,66	6,67	23,1	23,0	99,3	99,0	≤10	≤10	0,84	0,17	95,80	99,15
4	10:45	6,68	6,66	23,2	23,2	99,8	100,1	≤10	≤10	0,61	0,15	96,95	99,25
5	11:00	6,76	6,72	23,2	23,2	100,0	100,1	≤10	≤10	0,53	0,13	97,35	99,35
6	11:15	6,66	6,65	23,3	23,4	99,7	99,9	≤10	≤10	0,44	0,13	97,80	99,35
7	11:30	6,60	6,61	23,5	23,4	100,1	99,8	≤10	≤10	0,41	0,13	97,95	99,35
8	11:45	6,60	6,62	23,5	23,5	100,3	100,0	≤10	≤10	0,38	0,14	98,10	99,30
9	12:00	6,69	6,64	23,7	23,7	100,3	100,7	≤10	≤10	0,37	0,12	98,15	99,40
10	12:15	6,65	6,63	24,0	24,1	100,5	100,5	≤10	≤10	0,45	0,21	97,75	98,95
11	12:30	6,80	6,81	24,0	23,6	100,2	100,3	≤10	≤10	0,47	0,20	97,65	99,00

Anexo 22. Tabla A21. Resultados 300% del caudal mayor

Tratamiento: 300% caudal													
Fecha		13/03/2020		Tipo de agua		II							
Coagulante		PAC		Cauda (m3/día)		3,0							
Hora de inicio:										14:05			
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)		% Remoción Turbiedad	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	14:00	6,96		22,7		93,2		30		20,1			
1	14:20	6,82	6,82	23,0	23,1	91,7	91,8	30	≤10	6,38	2,56	68,26	87,26
2	14:35	6,96	6,86	23,1	23,2	96,5	95,9	30	≤10	2,53	0,87	87,41	95,67
3	14:50	6,94	6,96	23,1	23,3	110,8	98,4	≤10	≤10	1,16	0,24	94,23	98,81
4	15:05	6,90	6,81	23,4	23,5	98,6	98,6	≤10	≤10	0,72	0,17	96,42	99,15
5	15:20	6,84	6,80	23,6	23,6	99,7	99,4	≤10	≤10	0,57	0,17	97,16	99,15
6	15:35	6,79	6,74	23,8	23,8	99,4	99,7	≤10	≤10	0,48	0,14	97,61	99,30
7	15:50	6,95	6,96	24,0	23,9	99,6	99,5	≤10	≤10	0,42	0,12	97,91	99,40
8	16:05	6,87	6,87	23,7	23,9	103,3	99,4	≤10	≤10	0,42	0,14	97,91	99,30

Anexo 23. Tabla A22. Resultados con turbiedad de 50 UNT

Tratamiento: 50 UNT											
		Fecha		12/03/2020		Tipo de agua		50 UNT			
		Coagulante		PAC		Carga superficial (m3/m2.día)		127,32			
Hora de inicio: 14:00											
Muestra	Hora Toma de muestra	pH (Unidades de pH)		Temperatura (°C)		Conductividad (µs/cm)		Color Aparente (UC)		Turbiedad (UNT)	
		FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA	FGAC	FRA
Agua de alimentación	13:55	7,10		22,6		95,8		/		51,90	
1	15:30	7,12	7,08	23,0	23,0	99,7	99,2	/	/	2,20	0,50
2	15:45	6,95	6,93	23,0	23,0	100,7	100,5	/	/	1,10	0,40
3	16:00	7,07	7,07	23,2	23,1	102,3	101,1	/	/	0,89	0,27
4	16:15	7,09	7,09	23,3	23,3	101,6	101,8	/	/	0,68	0,23
5	16:30	7,08	7,06	23,4	23,3	101,9	102,0	/	/	0,60	0,23