

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE DESINFECTANTES EN LA DISMINUCIÓN DE  
BIOPELÍCULA EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN EL  
MUNICIPIO EL ROSAL**

**ANDREA JIMENA JARAMILLO LOZADA  
JUAN FELIPE MOLANO MORALES**

**Proyecto integral de grado para optar el título de  
INGENIERO QUÍMICO**

**Director**

**OSCAR LIBARDO LOMBANA CHARFUELÁN  
Ingeniero Químico**

**Codirector**

**PAULA ANDREA MARTÍNEZ GUERRERO  
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C.**

**2022**

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

Oscar Libardo Lomaba Charfuelán  
Director.

---

Felipe Correa Mahecha  
Presidente Jurado.

---

Felipe Correa Mahecha  
Jurado.

---

Juan Camilo Cely Garzón  
Jurado.

Bogotá D.C., junio de 2022.

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. Mario Posada García-Peña.

Consejero Institucional.

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña.

Vicerrectora Académica y de Investigaciones.

Dra. Alexandra mejía Guzmán.

Vicerrector Administrativo y Financiero.

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro.

Secretario General.

Dr. José Luis Macías Rodríguez.

Decana Facultad de Ingenierías.

Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto.

Directora Programa de Ingeniería Química.

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina.

## DEDICATORIA

A Dios primeramente por ser mi guía, darme fuerza, sabiduría y las habilidades necesarias para culminar esta etapa de mi vida. A mis padres Adela y Ricardo, por brindarme apoyo, motivación y compañía día a día, por enseñarme a ser constante y no rendirme. A mi hermana María Camila por creer siempre en mí, por acompañarme en tantas horas de traspasado y por estar dispuesta a levantarme el ánimo las veces que fuera necesario. A mi familia en general, por la confianza que depositaron en mí y en mis sueños. A mi compañero Juan, por brindarme su amistad incondicional y por siempre darme esas palabras de aliento en los momentos de dificultad. Finalmente, pero no menos importantes, a los amigos que conservo desde el colegio y los que hice en la universidad, por acompañarme y apoyarme de múltiples formas durante este gran recorrido.

Andrea Jimena Jaramillo Lozada

A Dios, a mi familia, que son mi mayor motivación en la vida y mi más grande apoyo en los momentos más importantes. En especial, a mis abuelos y a mi madre, de quienes he aprendido el sentido de la honradez, el trabajo, el amor genuino y la humildad. También, a todas aquellas personas excepcionales que han acompañado mi proceso de aprendizaje; así como a aquellos que han depositado su confianza en mí y me han inspirado a ser mejor persona. A quienes me han brindado su más sincera amistad, especialmente a mi compañera Andrea, por su carisma, su tenacidad y por asumir este gran reto conmigo. Para todos ellos, y para aquellos que seguramente aportarán a mi camino, lo mejor de mí, siempre.

Juan Felipe Molano Morales

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quisiéramos agradecer a la Fundación Universidad de América por su respaldo en el desarrollo de nuestro Trabajo de Grado. A nuestro director, el Ing. Óscar Lombana, quien desde un principio nos presentó la convocatoria que nos llevó a la selección del tema de investigación y posteriormente nos apoyó durante el desarrollo de este. A la Ing. Paula Martínez por inculcarnos el interés y la motivación por indagar sobre el mundo del tratamiento de aguas, por enriquecer nuestro conocimiento a partir de sus experiencias en esta área y por su apoyo incondicional.

Por otra parte, a Egestec, que nos brindó su acompañamiento desde la asignación del tema y del personal capacitado para llevar a cabo las actividades planteadas. A la Ing. Emilce Quintero, quien nos inculcó lecciones de profesionalismo mientras estaba al tanto de los avances del proyecto. Al Acueducto El Rosal S.A.E.S.P y todos sus miembros, quienes nos abrieron las puertas de las instalaciones y estuvieron siempre dispuestos a brindar su colaboración en el aspecto técnico.

Por último, al Laboratorio H2O Es Vida, que nos respaldó en el desarrollo de las pruebas microbiológicas. Así como al personal encargado en los laboratorios de la Fundación Universidad de América, quienes nos facilitaron el acceso a las instalaciones y brindaron su apoyo durante el desarrollo de las pruebas fisicoquímicas. Tampoco, podríamos olvidar a nuestros amigos y compañeros, que no solo durante el desarrollo del proyecto, sino durante toda la carrera, nos apoyaron y que través de tantas experiencias, nos ayudaron a ser mejores personas y profesionales.

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	15
1. GENERALIDADES	16
1.1 Acueducto El Rosal S.A E.S.P.	16
1.1.1 Planta Compacta	17
1.1.2 Plantas convencionales	17
1.1.3 Mantenimiento en las redes de distribución de agua potable	18
1.2 Biopelícula	20
1.2.1 Problemáticas asociadas a la biopelícula	20
1.2.2 Microorganismos formadores de biopelícula	23
1.2.3 Etapas de formación de biopelícula	26
1.2.4 Resistencia de la biopelícula a los desinfectantes	27
1.2.5 Condiciones que favorecen el crecimiento de la biopelícula	28
1.2.6 Control y remoción de biopelículas	33
1.3 Desinfección	34
1.4 Selección de desinfectantes	35
1.4.1 Cloro	35
1.4.2 Dióxido de cloro	38
1.4.3 Hipoclorito de calcio	40
1.4.5 Comparación de los desinfectantes	42
1.5 Influencia del uso del desinfectante sobre la formación de biopelícula y sobre el material	44
2. LA REDUCCIÓN DE BIOPELÍCULA	46

2.1	Metodología experimental	49
2.2	Procedimiento para la recolección de las muestras de agua	50
2.2.1	Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST).	52
2.2.2	Determinación de hierro (Método de la Fenantrolina).	53
2.3	Cálculo de la dosificación de las sustancias	56
2.4	Condiciones de formación de biopelícula en la PTAP	58
2.4.1	Características fisicoquímicas del agua cruda	58
2.4.2	Características fisicoquímicas del agua en la etapa de filtración	64
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	68
3.1	Dosificación	68
3.2	Parámetros Microbiológicos	70
3.2.1	E. Coli y Coliformes Totales	70
3.2.2	Pseudomonas.	70
3.3	Parámetros Fisicoquímicos	71
3.3.1	Hierro total (método de la Fenantrolina)	71
3.3.2	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	76
3.3.3	Ensayo gravimétrico	81
4.	COSTOS	85
4.1	Costos de instalación	85
4.2	Costos de desinfectante	86
4.3	Costos por litro de agua tratado	87
	CONCLUSIONES	88
	BIBLIOGRAFÍA	89
	ANEXOS	97

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama descriptivo de las unidades de la planta convencional de PTAP El Rosal	16
Figura 2. Registro comparativo del efecto de los lavados con ClO <sub>2</sub> sobre la tubería	19
Figura 3. Registro comparativo del efecto de los lavados con ClO <sub>2</sub> sobre la apariencia del agua	19
Figura 4. Esquema de un sistema de cloración	37
Figura 5. Esquema de instalación de preparación de dióxido de cloro	39
Figura 6. Efecto de las condiciones en estudio para la inactivación de Giardia y Cryptosporidium	44
Figura 7. Montaje de la configuración realizada sobre la red de tubería	46
Figura 8. Sección de tubería con biopelícula formada	48
Figura 9. Etiquetado de las muestras	51
Figura 10. Soluciones patrón	54
Figura 11. Pretratamiento de las muestras	55
Figura 12. Gráfica de color de agua cruda en el transcurso de 6 meses	59
Figura 13. Gráfica de turbiedad de agua cruda en el transcurso de 6 meses	60
Figura 14. Gráfica de pH de agua cruda en el transcurso de 6 meses	61
Figura 15. Gráfica de hierro total en agua cruda en el transcurso de 6 meses	62
Figura 16. Gráfica pH del agua de filtros en el transcurso de 6 meses	64
Figura 17. Gráfica de turbiedad del agua de los filtros en el transcurso de 6 meses	65
Figura 18. Gráfica de cloro residual del agua de los filtros en el transcurso de 6 meses.	66
Figura 19. Recipientes con respectiva pieza y desinfectante	69
Figura 20. Curva de calibración de la muestra analizada para agua cruda	73
Figura 21. Curva de calibración de la muestra analizada para agua de filtros	74
Figura 22. Curva de calibración de las muestras analizadas para agua de los experimentos	75
Figura 23. Registro fotográfico de las soluciones al cabo de 10 días	78
Figura 24. Registro fotográfico del blanco al cabo de 10 días	79
Figura 25. Sólidos suspendidos totales SST en las soluciones	80

## LISTA DE ANEXOS

	Pag
ANEXO I. Procedimiento de instalación de sistema hidráulico para proyecto de investigación sobre Evaluación del Efecto de Desinfectantes en la Disminución de Biopelícula en Redes de Distribución de Agua Potable. Código IDI-16. Fecha: 16 de marzo de 2022. (Adaptación).	98
ANEXO II. Registros características del agua cruda	100
ANEXO III. Reporte de agua cruda Acueducto El Rosal	103
ANEXO IV. Resultados detallados pruebas fisicoquímicas (SST, Ensayo Gravimétrico y Hierro Total)	104
ANEXO V. Reporte de resultados de laboratorio No. 1	107
ANEXO VI. Reporte de resultados de laboratorio No. 2	108
ANEXO VII. Reporte de resultados de laboratorio No. 3	109
ANEXO VIII. Reporte de resultados de laboratorio No. 4	110
ANEXO IX. Reporte de resultados de laboratorio No. 5	111
ANEXO X. Reporte de resultados de laboratorio No. 6	112
ANEXO XI. Reporte de resultados de laboratorio No. 7	113
ANEXO XII. Recomendaciones	114

## LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

<b>Sigla / Abreviatura</b>	<b>Significado</b>
PTAP	Planta de Tratamiento de Agua Potable.
S.A.E.S.P.	Empresa de Servicios Públicos.
THM	Trihalometanos.
L/s	Litros por segundo (unidad de caudal).
ppm	Partes por millón. (unidad de concentración).
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos (unidad de volumen).
pH	Potencial de Hidrógeno.
EPS	Matriz Polimérica Extracelular.
PVC	Cloruro de Polivinilo (material).
SCH	Schedule o cédula de tubería.
UFC	Unidad Formadora de Colonia.
COT	Carbono Orgánico Total
MOB	Materia Orgánica Biodegradable.
COA	Carbono Orgánico Admisible.
SST	Sólidos Suspendidos Totales.
UV/TiO <sub>2</sub>	Fotocatálisis heterogénea con dióxido de titanio como catalizador.
cm <sup>2</sup>	Centímetros cuadrados (unidad de área).
°C	Grados centígrados (unidad de temperatura).
mg/L	Miligramo por litro (unidad de concentración).
UPC	Ultra Physical Contact (unidad de color).
NTU	Nephelometric Turbidity Unit (unidad de turbidez).
mg C /L	Miligramos de carbono por litro.
mg NO <sub>2</sub> -N /L	Miligramos de nitrito por litro.
mg NO <sub>3</sub> -N /L	Miligramos de nitrato por litro.
mg PO <sub>4</sub> /L	Miligramos de fosfato por litro.

NMP / 100mL	Número más probable por 100 mL (unidad de medición de coliformes).
nm	Nanómetros (unidad de longitud de onda).
cm	Centímetros (unidad de longitud).
g	Gramos (unidad de masa).
mg	Miligramos (unidad de masa).
L	Litros (unidad de volumen).
mL	Mililitros (unidad de volumen).
m	Masa.
V	Volumen.
%m/v	Porcentaje masa/volumen (unidad de concentración).

## RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo principal evaluar el efecto del cloro, dióxido de cloro e hipoclorito de calcio en la disminución de biopelícula en la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) del municipio El Rosal y mediante pruebas experimentales seleccionar el desinfectante más efectivo.

Inicialmente se realizó una recopilación de los registros de pH, color, turbiedad y hierro total de agua cruda y agua a la salida de la etapa de filtración, además de pruebas microbiológicas de coliformes totales y Escherichia Coli, para establecer así las condiciones del agua tratada que favorecen la formación de biopelículas en las tuberías del Acueducto El Rosal.

La evaluación de la disminución de biopelícula por parte de los desinfectantes se llevó a cabo mediante un ensayo gravimétrico en el que se comparó el peso inicial y final de piezas de tubería en PVC con biopelícula formada que fueron sumergidas en diferentes soluciones de desinfectante. Se realizó también determinación de sólidos suspendidos totales SST y de hierro total, además de pruebas microbiológicas a cada solución probada.

**PALABRAS CLAVE:** Agua potable, Tratamiento, Biopelícula, Desinfectantes, Disminución.

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años se ha reconocido la influencia que tiene la formación de biopelículas en las redes de distribución de agua potable sobre la calidad del agua, causando un deterioro en las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y organolépticas.

Se ha demostrado que los sistemas tanto de almacenamiento como de distribución de agua constituyen un ambiente idóneo para la proliferación bacteriana; el flujo de agua favorece el transporte de nutrientes y bacterias que pueden llegar a ser patógenas, mientras que las paredes de las tuberías y las partículas presentes en el agua sirven de superficie adherente para los microorganismos [6], permitiéndoles reproducirse y formar biopelículas, reduciendo así la calidad del agua a lo largo de su recorrido por la red de abastecimiento, desde la salida de la planta de tratamiento de agua potable PTAP hasta los puntos de consumo de la red, representando riesgos para la salud pública [23].

Además, la formación de biopelículas en las paredes de las tuberías puede reducir la capacidad hidráulica de las mismas, acelerar su corrosión y hacer más difícil su mantenimiento, implicando mayores costos de operación [6].

Una de las principales maneras de controlar la aparición de biopelícula es mediante el proceso de desinfección a la que tiene que ser sometida el agua para su potabilización, que mediante el uso de agentes desinfectantes se busca provocar un deterioro en la pared celular de los microorganismos y producir una oxidación y destrucción de la materia orgánica que generalmente sirve de nutrientes y alimentos para los microorganismos formadores de biopelícula [10].

Por lo expuesto anteriormente y con el fin de reducir el impacto negativo de la formación de biopelículas en las redes de distribución de agua, se hace necesario el estudio de diferentes agentes desinfectantes y su efecto en la reducción de biopelícula formada en las tuberías de la Planta de tratamiento de agua potable (PTAP) El Rosal.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Evaluar la reducción de biopelícula empleando diferentes desinfectantes en las redes de distribución de agua potable del acueducto del municipio El Rosal.

### **Objetivos Específicos**

- Establecer cuáles son las condiciones actuales de formación de biopelícula en un sistema con dimensiones relacionadas con las de la tubería real de la red de distribución de la PTAP El Rosal.
- Seleccionar un sistema de desinfección que permita la reducción de biopelícula por medio de un desarrollo experimental.
- Determinar el efecto del tratamiento de agua con desinfectantes sobre la calidad del agua potable.
- Establecer el costo de implementación del proceso, para el caso de estudio.

# 1. GENERALIDADES

## 1.1 Acueducto El Rosal S.A E.S.P.

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado El Rosal (S.A.E.S.P) se encuentra ubicada en el km 0+575 Vereda Cruz Verde, en el municipio El Rosal - Cundinamarca.

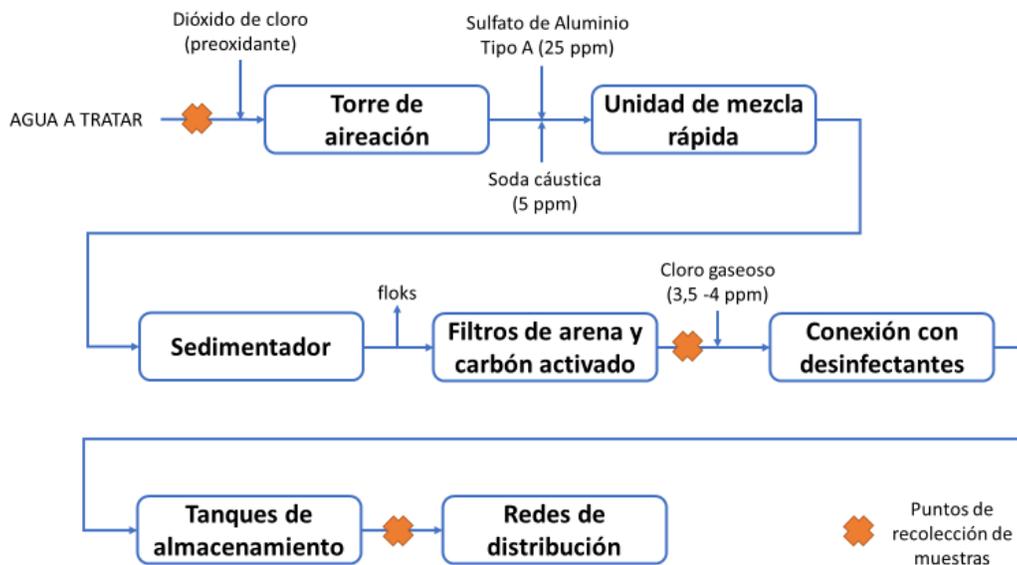
Adicionalmente, presta los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo; mejorando la calidad de vida y desarrollo de sus habitantes.

Inicialmente el agua procede del río de Subachoque, posteriormente se cuenta con un reservorio (La Cuesta) de 9 m de profundidad en el cual se garantiza proporcionar el caudal necesario para el municipio en épocas de escasez de agua, y se garantiza que no haya paradas indeseadas cuando se hace lavados de filtros. Su fuente presenta olor a materia en descomposición ya que en el río anteriormente mencionado se tiene cosecha de peces.

Por otra parte, el acueducto cuenta con cuatro plantas de tratamiento de agua potable, una compacta y tres convencionales a las que llega el agua directamente del reservorio a través de una tubería madre subterránea [1].

**Figura 1.**

*Diagrama descriptivo de las unidades de la planta convencional de PTAP El Rosal.*



**Nota.** En esta figura se puede observar las unidades de la planta convencional de PTAP El Rosal con sus respectivos puntos de recolección de muestras.

### **1.1.1 Planta Compacta**

Esta planta Potabiliza alrededor de 18 a 20 L/s, su funcionamiento consiste en las siguientes etapas [1].

- Torre de aireación: En esta etapa, se oxida parte de la materia orgánica entre otros metales, con el respaldo de una conexión de dióxido de cloro que cumple la función de pre oxidante, así como para la mejora en las posteriores etapas de coagulación, floculación y/o sedimentación; también se utiliza para el control en la formación de trihalometanos (THM).
- Coagulación: Esta se realiza con Sulfato de Aluminio tipo A, a una concentración de 25 ppm.[1]
- Regulación de pH: Se utiliza Soda Cáustica en una concentración de 5 ppm para tener una regulación del pH y obtener valores de 7,5 a 7,8.
- Mezcla Rápida: En esta mezcla se genera de manera ascendente y en forma de remolino, en la misma se van generando procesos de coagulación, sedimentación y filtración).

### **1.1.2 Plantas convencionales**

Estas plantas potabilizan alrededor de 10 L/s cada una (4 plantas en total), y su funcionamiento es similar a la planta compacta en las etapas iniciales de la torre de aireación, coagulación y regulación de pH. Las siguientes etapas posteriores, difieren al funcionamiento de la anteriormente mencionada [1]:

- Sedimentación: En estos se genera la sedimentación de los flocs provenientes de la etapa de floculación.
- Filtración: Se cuentan con Filtros de Carbón Activado y Arena. Posteriormente el agua que debe ser tratada, se distribuye a una red de tubería en la cual se encuentran los tres caudales de las diferentes plantas.
- Desinfección: Se utiliza cloro gaseoso como producto de desinfección a una concentración de 3,5 a 4 ppm.
- Almacenamiento de Agua: El Acueducto cuenta con 4 tanques de almacenamiento con capacidad de 1140, 500, 270 y 250 m<sup>3</sup> respectivamente.

### **1.1.3 Mantenimiento en las redes de distribución de agua potable**

Dentro de las principales causas de las variaciones de los diferentes parámetros en el agua del Río Subachoque (la cual es la fuente hídrica que abastece a los Rosalunos), son: la cercanía de proyectos de vivienda a pocos metros del cauce; el encerramiento de varias zonas por parte de privados; la invasión de la ronda de ganado que ha fragmentado los jarillones; entre otros [11]. A partir de lo anterior, y además de considerar variaciones climáticas que tienen un impacto directo sobre parámetros como hierro y manganeso, se realiza el acondicionamiento del agua para llegar al cumplimiento de los parámetros de calidad establecidos [11].

Con base en lo anterior, el ajuste a estas condiciones es la clave para el mantenimiento de la infraestructura de tratamiento, almacenamiento y distribución de agua. Esto está relacionado con la dosificación de las sustancias involucradas en el tratamiento, tales como coagulantes, floculantes, desinfectantes y en el caso específico del Acueducto El Rosal, pre oxidantes, como el dióxido de cloro. Por otra parte, el crecimiento de biopelícula no se ve favorecido considerablemente ante estas variaciones, ya que el monitoreo por medio del seguimiento de los parámetros en distintas etapas de tratamiento permite que a corto plazo se controle este fenómeno.

Con respecto a la información suministrada por parte de Egestec y el Acueducto El Rosal, sobre el mantenimiento de las redes de distribución de agua potable; se indica que, dentro de las acciones realizadas en conjunto durante el año 2017 (año en que se realizó la implementación de la tecnología de dióxido de cloro como pre oxidante), fue de gran importancia realizar limpieza de las tuberías con dióxido de cloro. Se estableció que la presencia de biopelícula y de material particulado, podía afectar la calidad del agua en la distribución [11].

Posteriormente, se realizó seguimiento al comportamiento fisicoquímico del agua y a las propiedades organolépticas de la misma. Como es posible observar en las siguientes figuras, se evidencia la efectividad del proceso de limpieza, del cual también se hizo seguimiento a través de las mediciones realizadas por el personal del Acueducto El Rosal, durante 3 meses, a parámetros tales como color, turbiedad, hierro en agua cruda y en agua tratada.

**Figura 2.**

*Registro comparativo del efecto de los lavados con ClO<sub>2</sub> sobre la tubería.*



**Nota.** En esta figura se puede observar el efecto de los lavados con ClO<sub>2</sub> en el interior de un tramo de tubería. Tomado de: Egestec “INFORME DE GESTIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO (PTAP) EL ROSAL”, [En línea]. Disponible: <https://drive.google.com/file/d/1XUTKSH-z6ORmjYoR2pT0j42hZre734b3/view?usp=sharing>. [Acceso: julio 21, 2022].

**Figura 3.**

*Registro comparativo del efecto de los lavados con ClO<sub>2</sub> sobre la apariencia del agua.*



**Nota.** En esta figura se puede observar el efecto de los lavados con ClO<sub>2</sub> sobre la apariencia del agua, en diferentes etapas del lavado. Tomado de: Egestec “INFORME DE GESTIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO (PTAP) EL ROSAL”, [En línea]. Disponible: <https://drive.google.com/file/d/1XUTKSH-z6ORmjYoR2pT0j42hZre734b3/view?usp=sharing>. [Acceso: julio 21, 2022].

En cuanto a los lavados periódicos, los cuales se dieron a partir de la necesidad de remover la biopelícula y partículas por un medio físico que fuera respaldo del medio químico (dióxido de cloro); se llevó a cabo mediante la preparación de una cantidad preestablecida de dióxido de cloro con la respectiva dosificación en ciertos tramos de la tubería. Al final de cada tramo, se realiza un desagüe por un tiempo determinado, hasta que el producto haya evacuado la tubería. También se tuvieron presente las variaciones de flujo, ya que esto inactiva químicamente la biopelícula formada en la tubería y la fuerza mecánica desprende de manera física estas asociaciones de microorganismos y se obtiene un mejor proceso de desinfección [11].

## **1.2 Biopelícula**

La biopelícula es una asociación de microorganismos, en su mayoría conformada por bacterias debido a sus altas tasas de crecimiento, capacidad de adaptación ante diferentes condiciones de crecimiento y por su capacidad de excreción de la sustancia polimérica extracelular (EPS), la cual beneficia la permanencia de diferentes comunidades de microorganismos en una matriz [2] [3].

Adicionalmente, presenta una problemática en las redes de distribución de agua potable. Se estima que las biopelículas son un factor predominante del crecimiento microbiano y que albergan alrededor de un 90-95% de la biomasa total en sistemas de agua potable. Por otra parte, a causa de su compleja estructura, implica mayor resistencia a factores externos como la aplicación de desinfectantes y fuerzas de cizallamiento. La consecuencia principal es la contaminación microbiológica, que trae consigo la corrosión, la descomposición residual de desinfectantes y la transmisión de enfermedades patógenas que se propagan a través del agua [2] [3].

### **1.2.1 Problemáticas asociadas a la biopelícula**

La formación de biopelículas en redes de distribución de agua potable trae consigo múltiples problemáticas, entre ellas el riesgo sanitario, el deterioro estético del agua, la proliferación de microorganismos y problemas operacionales [52].

1.2.1.a. Riesgo Sanitario. Las biopelículas representan un reservorio y ambiente óptimo para las bacterias patógenas actuando como refugio y protegiéndolas del efecto de los agentes desinfectantes. Aunque la mayoría de las bacterias presentes en las biopelículas no son patógenas existen algunas con la capacidad de asociarse, adaptarse, formar biopelículas y en algunos casos como la *Legionella* aumentar su patogenicidad. Además de bacterias patógenas y no patógenas, en las redes de distribución también se han encontrado b biopelículas formadas por acumulación de virus. Estos microorganismos representan una baja calidad en el agua y al no ser tratados adecuadamente pueden llegar a los consumidores causando afecciones en la salud pública [52].

1.2.1.b. Deterioro estético del agua. La presencia de biopelículas se asocia a problemas de color, sabor y olor en el agua, ya que estas representan ecosistemas dentro de las redes y tuberías de distribución, que promueven no solo el crecimiento de bacterias sino también el de otros organismos como los hongos que en sus procesos metabólicos producen subproductos que alteran el sabor y olor del agua tratada. Este deterioro en las características organolépticas del agua puede ser causado por algas que tengan la capacidad de desarrollarse y asociarse como biopelícula en las redes de distribución aún en ausencia de luz.

Otro factor influyente es el contenido de sales de hierro y manganeso contenidas en el agua ya sea por la naturaleza del agua o por causa del desprendimiento por corrosión de las paredes de las tuberías [52].

1.2.1.c. Problemas operacionales. Debido a la formación de biopelícula en las tuberías se reduce la velocidad a la que es conducida el agua y con ella la capacidad de circulación, causando que haya un aumento en el consumo energético y un menor rendimiento en el tratamiento. Además, se puede presentar una reducción en la presión de las tuberías. Sin embargo, los problemas a nivel operacional con mayor impacto son el consumo de desinfectante y la biocorrosión [52].

El *consumo de desinfectante* se da por las reacciones que ocurren en el agua que circula como en las paredes de las tuberías de distribución. Los compuestos y sustancias contenidas en el agua como microorganismos, impurezas orgánicas, compuestos

amónicos, hierro, manganeso reaccionan con el desinfectante y lo consumen. Otros factores que tienen incidencia en el decantamiento del desinfectante son los asociados a la tubería, su material y diámetro.

Se ha estudiado este fenómeno y se encuentra que las concentraciones de desinfectante en la biopelícula son menos del 20% de la concentración presente en el agua, lo que indica que hay una difusión de desinfectante hacia el interior de la biopelícula para ser consumido. Adicionalmente esto indica que existe diferencias entre las biopelículas de acuerdo con su localización en la tubería y la resistencia que presentan al efecto del desinfectante [52].

La *biocorrosión* hace referencia a la influencia de los microorganismos en los procesos de corrosión, más específicamente a los productos metabólicos como enzimas, exopolímeros, ácidos orgánicos e inorgánicos, amoníaco y sulfuro de hidrógeno. Estos productos corrosivos representan una amenaza para la estabilidad de los metales incluso si son diseñados resistentes a la corrosión.

El crecimiento y adhesión de microorganismos a superficies metálicas produce cambios en el tipo y concentración de iones, en el pH y el potencial de oxidorreducción, modificando el comportamiento del sustrato metálico junto a sus tasas de corrosión.

Esta problemática incrementa los costos de operación de las redes de distribución de agua potable asociados a los tratamientos necesarios para evitar la corrosión de tuberías y equipos, reemplazo de tuberías y estructuras afectadas además de gastos en reparación de averías o fugas causadas por el deterioro debido a la corrosión en las redes [52].

### **1.2.2 Microorganismos formadores de biopelícula**

Se pueden identificar dos tipos importantes de microorganismo que promueven la formación de biopelículas, los heterótrofos que crecen rápidamente y los autótrofos de crecimiento lento, esto determina el lugar a ocupar en la biopelícula y que funciones deben cumplir. Los autótrofos se ubican en la parte más profunda de la biopelícula, ubicación que los protege del desprendimiento y sirven de alimento para los heterótrofos que se ubican en la superficie [4].

Las biopelículas formadas en redes de distribución de agua potable están conformadas esencialmente por bacterias Gram negativas, sin embargo, en ellas habitan otros microorganismos como virus, protozoos, algas y hongos que al cumplir sus funciones dentro de la biopelícula determinan sus características específicas [4] [5].

1.2.2.a. Bacterias. El grupo primario está compuesto particularmente por especies de patógenos oportunistas tales como *Pseudomonas* y *Flavobacterium*, sin embargo, también se han encontrado bacterias responsables de enfermedades intestinales de origen hídrico como *Shigella*, *Salmonella*, *Yersenia enterocolitica*, *Campylobacter Jejuni* y *Escherichia Coli*, *Helicobacter pylori*. Se ha podido detectar en la capa superficial de una tubería en concreto a la bacteria *Acinetobacter* en niveles superiores a  $10^9$  / cm<sup>2</sup>, cantidad más que suficiente para causar enfermedad en cualquier ser humano y/o animal [5].

1.2.2.b. Micobacterias. Dentro de los sistemas de distribución pueden ser originadas en la fuente, sea superficial o subterránea, o por contaminación en procesos de reparaciones o construcción de nuevas redes en el sistema de distribución. Este tipo de bacteria tiene gran importancia en la salud, las especies *Mycobacterium avium*, *M. gordonae*, *M. flavescens*, *M. fortuitum*, *M. chelonae* y *M. phlei*, pueden colonizar a los seres humanos.

Tienen la capacidad de sobrevivir en las tuberías de las redes de distribución por su naturaleza hidrofóbica que les facilita la adhesión a las superficies de las tuberías, además les permite resistir hasta 1,5 mg de cloro residual, es por esto por lo que se han

encontrado estas bacterias al final de las tuberías donde disminuye el cloro residual y aumentan las concentraciones de carbono orgánico [5].

1.2.2.c. Bacterias pigmentadas. Algunas bacterias que pueden estar presentes en la distribución de agua tienen la capacidad de formar pigmentos coloreados brillantes. Estas bacterias pueden ser resistentes a 0,75 mg/L de cloro libre durante 30 a 60 minutos, pero sensibles a 1,0 mg/l de cloramina durante 60 minutos. Se ha demostrado que muchas de las bacterias pigmentadas pertenecen al género *Rhodococcus* y poseen lípidos que las hacen resistentes a la desinfección [5].

1.2.2.d. Coliformes. Este tipo de bacterias gram-negativas se encuentran en los suministros de agua. De las bacterias coliformes, la *Klebsiella pneumoniae*, *Enterobacter aerogenes*, *Enterobacter cloacae* y *Citrobacter freundii* son las colonizadoras de más éxito. Una vez que están establecidos en un hábitat dentro de la red, pueden desarrollarse libremente.

Estudios sugieren que los coliformes en los sistemas de distribución se originan en las biopelículas, lo que indica que las biopelículas sirven no solo como medio de desarrollo, sino como medio de protección para patógenos oportunistas, proveyéndoles un nicho apropiado donde protegerse de los ambientes que le puedan resultar agresivos.

Las biopelículas formadas por estos microorganismos no atacan directamente el material, sino que este puede liberar sustancias orgánicas que facilitan el desarrollo de las biopelículas [5].

1.2.2.e. Actinomicetos y otros microorganismos. Estos microorganismos generan problemas de sabores y olores desagradables en los sistemas de distribución. Las especies *Nocardia* y *Thermoactinomyces vulgaris* fueron predominantes en el agua tratada de sistemas de tratamiento consistentes en aireación y filtración, o aireación y filtración en arena, ozonización y adsorción en carbón activo. Mientras que las concentraciones de *Micromonosporas* aumentaron en el agua tratada por tratamiento consistente en floculación, sedimentación y filtrado en arena o aireación lecho filtrante.

Algunas crecieron también en depósitos de agua tratada con paredes revestidas de PVC y en las tuberías que tuvieron acumulaciones de material orgánico en forma de sedimentos o en las biopelículas [5].

1.2.2.f. Virus. Los virus encontrados en las biopelículas en las redes de distribución son llamados virus entéricos y que son causantes de enfermedades gastrointestinales.

En la biopelícula un virus no puede reproducirse, sólo se acumula, además que esta lo protege de los desinfectantes, lo que les permite vivir por más tiempo. Estudios demuestran que se encuentran más poli virus en una biopelícula que en la masa de agua. Hay diez veces más virus en una biopelícula que en el flujo de agua en presencia de cloro, y en ausencia de este, hay 20 veces más virus en la biopelícula que en el flujo de agua. Ha sido detectado *Coxsackievirus B*, en biopelículas ubicadas en redes principales a la salida de la planta de tratamiento [5].

1.2.2.g. Protozoos. Aunque se han realizado pocos estudios sobre la presencia de estos en las redes de acueducto, una diversa flora de estos microorganismos puede asociarse a la biopelícula. Ciliados, amebas y flagelados han sido detectados en biopelículas de sistemas de distribución piloto. Se ha encontrado un promedio de 103 células / cm<sup>2</sup> en la biopelícula.

A nivel laboratorio se colocaron ovocitos *Cryptosporidium* en tubos de PVC, y se encontró luego que un tamaño considerable de ovocitos se vio asociados a la biopelícula adherida a la tubería [5].

1.2.2.h. Hongos. Investigaciones han reportado que los hongos filiformes y las levaduras son comunes en las tuberías de la red, aún en presencia de cloro residual, tanque e hidrantes que pueden ser fuentes de hongos.

Las especies más abundantes de hongos encontradas en un sistema de distribución son las de *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucorrasemosis* y *Stysanus stemonites*. Dentro de ellas las especies que se han observado en estos sistemas son principalmente el *Aspergillus flavus*, *Stachybotrys chartarum*, *Pseudallescheria boydii*, estas especies detectadas producen toxinas fuertes (micotoxinas), incluyendo las aflotoxinas, las cuales pueden

provocar daño severo al hígado y al riñón. En el Anexo I se muestran los hongos patogénicos identificados en biopelículas.

Las especies más comunes de levaduras identificadas fueron *Aureobasidium pullulans*, *Candida* spp, *Cryptococcus* spp, *Rhodotorula* spp. [5].

1.2.2.i. Microalgas. Las biopelículas pueden ser formadas en el medio ambiente, como en medios acuáticos, en los que se pueden encontrar asociaciones de microorganismos de tipo fototróficos como las microalgas, que se desarrollan cuando existe suficiente luz solar y los nutrientes apropiados. Dentro de este grupo se pueden encontrar las *cianobacterias*, *diatomeas* y *algas verdes*, microorganismos abundantes en ambientes acuáticos dulces y marinos.

Estos microorganismos además de asociarse entre sí pueden unirse también a microorganismos heterótrofos que se ubican principalmente en el interior de la biopelícula ya que no necesitan exposición directa a la luz y se alimentan del carbono y nitrógeno sintetizados por las microalgas [48] [49].

Las microalgas crean un microambiente llamado ficósfera, en la que se dan las interacciones de intercambio de metabolitos con los microorganismos asociados.[50]

Uno de los casos más estudiados son los flóculos o biopelículas flotantes en los que se da el crecimiento de cianobacterias en cuerpos de agua, que provoca intoxicación a peces y demás organismos acuáticos [51].

### **1.2.3 Etapas de formación de biopelícula**

El desarrollo de biopelículas es un proceso dinámico, el cual inicia en el caso de las tuberías, con el acondicionamiento de la superficie por parte de los microorganismos a través de la adhesión a partículas orgánicas e inorgánicas, tales como partículas de corrosión y sólidos en suspensión en el agua. Seguidamente, se da la adhesión irreversible de las células microbianas mediada por la expresión de las moléculas de señalización de quórum (SM) y la formación de EPS [2].

Posteriormente, se da lugar al transporte de sustratos dentro y fuera de la biopelícula madura en una estructura tridimensional. Por último, a causa del movimiento del agua,

se da el desprendimiento de la biopelícula y dispersión de las células, lo que trae consigo la formación de una nueva biopelícula y su proliferación [2].

En cuanto a otros aspectos relacionados al crecimiento, a medida que las biopelículas crecen, las fuentes esenciales de energía y nutrientes se reducen; mientras que los productos de desecho y las toxinas, se acumulan [3]. Por tal motivo, las células en la biopelícula crean mecanismos de resistencia a través de las interacciones metabólicas y la concentración de nutrientes tales como carbono, nitrógeno y fosfatos, maximizando la tasa de crecimiento y supervivencia por medio de la matriz de EPS [2].

#### ***1.2.4 Resistencia de la biopelícula a los desinfectantes***

Estudios alrededor de las comunidades microbianas adheridas al interior de las tuberías, así como al interior de las superficies de los accesorios, en los sistemas de distribución de agua potable; han demostrado que las biopelículas de agua potable son reservorios de varios genes de resistencia a los antibióticos. Lo anterior depende de la temperatura (estaciones del año), la tecnología de tratamiento aplicada, el tipo y la edad del material y la ubicación del lugar de muestreo [42].

Con respecto a la distribución espacial, se ha demostrado la similitud entre varias muestras de agua, tomadas en el mismo punto; en cuanto a resistencia a antibióticos. Lo cual indica que la resistencia se propaga localmente a través de cortas distancias en biopelículas de agua potable. Por otra parte, se ha demostrado que el verano es la época propicia para el crecimiento más frecuente de bacterias aerobias resistentes a los antibióticos. Así como también que, las bacterias reductoras de sulfato, tales como algunas proteobacterias, son dominantes, en este tipo de estudios [42].

Con respecto a la influencia de esta particularidad en la desinfección, implica un constante monitoreo de parámetros como el cloro residual; ya que los bajos niveles indican una alta presencia de microorganismos circulando en el agua, muchos de los cuales han generado resistencia por medio de la biopelícula, lo que trae como posibles consecuencias, el encarecimiento del tratamiento y la falta de garantía de la calidad de agua potable [21].

### **1.2.5 Condiciones que favorecen el crecimiento de la biopelícula**

Para que una biopelícula se pueda desarrollar y los microorganismos que la componen sobrevivan en una red de distribución de agua potable es necesario que existan las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas apropiadas en el medio: temperatura, pH, sustrato, nutrientes, condiciones hidráulicas, desinfectantes y competencia con otros microorganismos [4].

Los microorganismos que se pueden encontrar en los sistemas de distribución de agua potable llegan a éste, por diferentes medios, pueden estar presentes desde la fuente de agua, haber ingresado durante el proceso de potabilización o a causa de un evento o interferencia externa, desde daños en tuberías y conexiones, hasta cambios en el clima. Ya en el sistema los microorganismos desarrollan medios, relaciones físicas, químicas y biológicas para adherirse a la superficie de las tuberías. Mediante la competencia y comunicación las bacterias logran que las relaciones con otros microorganismos sean exitosas y se adapten a su ambiente, se establecen también funciones y de esta manera se optimizan el consumo de nutrientes, espacio y se crea una comunidad.

Las circunstancias que permiten el crecimiento y desarrollo de los microorganismos son el resultado de la combinación de diferentes factores, por lo que al evaluar la formación de biopelículas se deben estudiar y tener en cuenta todos estos factores [4].

1.2.5.a. Material. El contacto del agua con ciertos materiales de la red de abastecimiento puede favorecer el crecimiento bacteriano. Algunos materiales usados en las conducciones de las viviendas pueden permitir incluso la multiplicación de bacterias patógenas, este crecimiento puede verse favorecido por la liberación de compuestos promotores del crecimiento por parte de los materiales en contacto con el agua potable [6].

Cuando se habla de material se debe tomar en consideración los componentes que conforman no solo las tuberías sino también los componentes de las válvulas, las uniones, los arreglos y los empaques, ya que todos estos materiales incluidos en el sistema pueden ser útiles como material de soporte para el desarrollo y preservación de biopelículas.

Existe una relación directa entre los materiales de las tuberías y la formación de biopelículas en ellas, los materiales pueden ser fuente de nutrientes para los microorganismos facilitando su crecimiento y posterior adhesión a las paredes de la tubería. El material del que está hecha la tubería también influye en la velocidad de formación de biopelícula y en el tipo de colonizadores, y por lo tanto también tiene incidencia en las características, diversidad, estructura, densidad y espesor de la biopelícula que se va a presentar [4].

Diferentes observaciones realizadas en depósitos recubiertos con pinturas bituminosas y resinas epóxicas, películas de PVC, tuberías de poliamida y algunos plásticos han revelado un considerable incremento de la concentración de microorganismos en el agua y un crecimiento microbiano visible sobre la superficie del material.

Por parte de los materiales inorgánicos (fibrocemento, hormigón, hierro colado, hierro dúctil y acero), los nódulos producidos por corrosión de las tuberías metálicas reaccionan con los desinfectantes y favorecen el desarrollo microbiano al impedir la penetración del cloro [4].

Otros estudios comparativos entre diferentes materiales utilizados en sistemas de abastecimiento de viviendas y observaron que todos tenían un alto nivel de colonización en comparación con el vidrio (patrón), el ensayo se realizó durante 28 días [6]. Los resultados se encuentran consignados en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Crecimiento bacteriano en cada material al cabo de los 28 días.*

<b>Material de tubería</b>	<b>Película biológica (UFC/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>COT (mg/L)</b>
Vidrio (control)	1.90 x10 <sup>5</sup>	2.78 ± 0.40
Cobre	---	4.15 ± 0.17
Acero inoxidable	2.13 x10 <sup>5</sup>	---
Polipropileno	4.54 x10 <sup>5</sup>	5.98 ± 1.56
PVC <sub>C</sub> (clorado)	5.14 x10 <sup>5</sup>	6.02 ± 0.11
PVC <sub>U</sub> (no plastificado)	6.23 x10 <sup>5</sup>	5.42 ± 0.11
Acero dulce	1.69 x10 <sup>6</sup>	---
Polietileno	2.75 x10 <sup>6</sup>	179 ± 0.82
Etileno-propileno	1.08 x10 <sup>7</sup>	157 ± 0.84

Látex	5.50 x10 <sup>7</sup>	320 ± 19.4
-------	-----------------------	------------

**Nota.** Esta tabla muestra la relación entre la cantidad de biopelícula formada y la medida de carbono orgánico total (COT) en diferentes materiales. Tomada de: J. Knobelsdorf y R. Mujeriego “CRECIMIENTO BACTERIANO EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA”, [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/41786545.pdf>. [Acceso: abril 30, 2022].

En el caso de este proyecto la tubería utilizada es de PVC, material en el que se han realizado diversos estudios y ensayos en los que los resultados arrojan que la biopelícula que se forma es de crecimiento lento, pero de gran diversidad y densidad, además que su comportamiento de crecimiento es igual para todas las temperaturas en un rango de 20°C a 60°C. Los materiales plásticos son capaces de proveer ciertos nutrientes a los microorganismos, sin embargo, es una contribución mínima, por otro lado, se ha encontrado que en las superficies de estos materiales pueden existir imperfectos que se convierten en nichos que promueven la formación de biopelículas ya que sirven como protección para los microorganismos de las fuerzas cortantes actuando como barreras facilitando el crecimiento de colonizadores [4].

En comparaciones hechas con otros materiales se encontró un desarrollo prácticamente igual de biopelícula en PVC y en acero, en comparación con el cobre se ha encontrado una mayor formación en los materiales plásticos, por otro lado, se tiene mayor formación en polietileno que en PVC [4].

1.2.5.b. Nutrientes. Es importante recalcar que los sistemas de distribución de agua potable así cuenten con niveles altos de purificación, cuentan con los nutrientes necesarios para el desarrollo de biopelículas en las paredes de las tuberías.

La fuente de carbono influye en el desarrollo de la biopelícula, la diversidad de especies que la componen, su heterogeneidad, su densidad, espesor y estructura, la materia orgánica presente en el agua provee carbono y energía. Factores climáticos como la lluvia, tormentas o vientos pueden incrementar la cantidad de materia orgánica promoviendo la formación de biopelículas.

De acuerdo con esto se podría controlar el crecimiento bacteriano manteniendo un control sobre la cantidad de materia orgánica biodegradable (MOB) y de carbono orgánico asimilable (COA), ya que cuando los nutrientes son escasos el crecimiento permanece casi intacto, pero a pesar de esto los microorganismos pierden la capacidad de formar biopelículas al estar sometidas a ese tipo de estrés [4].

Para crecer, las bacterias además de MOB y COA mencionados necesitan nutrientes provenientes de los conocidos como macronutrientes que son el nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, magnesio, calcio y hierro. Este último resalta y juega un papel fundamental en el desarrollo bacteriano y por tanto en la formación de biopelículas, ya que está implicado en los procesos de producción de energía, síntesis de nucleótidos, expresión de genes y patogenicidad.

Se ha podido identificar su influencia en la adhesión y fijación a la superficie, motilidad, estabilización de la matriz de polisacáridos y la transformación de las células en fase planctónica. Tras los estudios realizados se determinó que el hierro es requisito para que microorganismos como *K.pneumoniae*, *E.coli*, *P.aeruginosa*, *V.cholerae*, *S.epidermidis* y *Mycobacterium smegmatis*, formen biopelículas. La presencia de hierro es un factor determinante del tipo de biopelícula que se forma ya que si su disponibilidad es limitada la biopelícula será delgada y de fácil remoción, sin embargo, la presencia del hierro no es suficiente, también es necesario que los microorganismos tengan mecanismos de captación de hierro. [53]

1.2.5.c. Condiciones hidráulicas. Condiciones como los tiempos de residencia, puntos muertos, la longitud de la tubería, sus diámetros, el caudal demandado, la presión, las condiciones de flujo y sus variaciones pueden llegar a afectar la supervivencia y desarrollo de las biopelículas en tuberías.

Altas velocidades de flujo pueden incrementar la cantidad de nutrientes y de desinfectantes en contacto con la biopelícula afectando su formación, sin embargo, no puede evitar la adhesión de microorganismos a la superficie de las tuberías ni pueden desprender la totalidad de la biopelícula existente.

Cuando la velocidad es muy alta, la biopelícula tiende a condensarse para hacerse más fuerte y evitar el desprendimiento al asociarse de manera que puedan retenerse unos con otros.

En cuanto a los tiempos de residencia, se ha estudiado que cuando este es muy alto se presenta un incremento en la producción de trihalometanos y una disminución en la concentración de cloro en el agua. Además de esto el estancamiento e interrupción de flujo pueden causar que las biopelículas se desprendan, la contaminación en la columna de agua se acumula y su calidad se ve afectada notablemente y cuando el agua se encuentra estancada se presenta una disminución en la concentración del desinfectante y por lo tanto aumenta el crecimiento de microorganismos [4].

1.2.5.d. Temperatura. Puede considerarse el factor más influyente en el crecimiento de microorganismos en las tuberías de los sistemas de potabilización de agua, ya que puede afectar directa e indirectamente las condiciones físicas y químicas del sistema.

Se ha planteado que la diversidad y cantidad de microorganismos presentes en el agua está relacionado con los cambios climáticos, esto se ha probado en regiones en las que se da el cambio de estaciones, en las que se presenta mayor diversidad en las épocas de calor. Cuando la temperatura es mayor a 15°C la frecuencia y la densidad bacteriana aumenta, esto se debe a que también aumenta la concentración de carbono orgánico biodegradable disuelto en el agua, promoviendo el crecimiento y desarrollo de la población de microorganismos.

Cada microorganismo tiene un rango de temperatura propio en el que puede vivir y una temperatura óptima para su desarrollo, por lo que la relación entre la temperatura y el crecimiento bacteriano es diferente para cada sistema. Conocer estos rangos resulta útil para controlar la formación de biopelícula por medio de la temperatura [4].

1.2.5.e. Otros. Existen factores diferentes a la temperatura, que pueden influir en el desarrollo de las biopelículas en las tuberías de los sistemas de distribución de agua potable como el pH y la turbiedad del agua, ya que estos están relacionados con la efectividad de los desinfectantes. Un pH bajo significa una agresividad alta del agua, mientras que las partículas que causan la turbiedad pueden llegar a ser un método de

protección y escudo para los microorganismos.

Otro factor es el origen del agua, ya que tiene una temperatura determinada, contiene materia orgánica propia y su origen de carbono es diferente en cada fuente, así como las características específicas que tienen sus compuestos inorgánicos. Por ejemplo, las aguas subterráneas son las menos favorecedoras para el crecimiento bacteriano, sin embargo, al mezclarse con aguas superficiales ofrecen condiciones para el desarrollo de biopelículas.

Además de las condiciones ambientales y la fuente del agua, la infraestructura del sistema de distribución también debe tomarse en cuenta, los diámetros y la longitud de la tubería son de suma importancia debido a que influyen en el tipo de desinfectante, sus dosis y puntos de inyección [4].

### **1.2.6 Control y remoción de biopelículas**

La formación de biopelícula se puede controlar y evitar mediante tratamientos mecánicos y químicos. Los tratamientos mecánicos más conocidos y empleados son los lavados hidráulicos y entre los tratamientos químicos la desinfección es el más empleado [54].

1.2.6.a. Lavado Hidráulico (LH). También conocido como flushing, es la técnica más antigua y útil para mejorar la calidad del agua y la capacidad hidráulica de los sistemas de distribución. El lavado convencional consiste en abrir uno o más hidrantes y se permite que el agua fluya fuera del sistema, removiendo arena, sedimentos, y la biopelícula de las paredes de la tubería, mediante chorros que dependiendo de su velocidad pueden ofrecer diversos tipos de limpieza según la necesidad. El tiempo de abertura es determinado por la detección del desinfectante residual y reducción de la turbidez y el color, además debe contemplar la localización de válvulas de desagüe en puntos de baja presión y en los puntos muertos para permitir la remoción de sedimentos.

Es un método establecido como medida correctiva después de que se han hecho reparaciones o instalación, no tiene un efecto duradero y debe ser repetido periódicamente. Se lleva a cabo de manera que se pueda transportar el agua a velocidades (1,5 m/s) y presiones altas (140 KPa) [54] [55].

1.2.6.b. Lavado hidráulico unidireccional (LHU). Es un método mejorado del LH convencional, se realiza mediante el cierre y apertura progresivos de válvulas e hidrantes creando un circuito cerrado de flujo [54] [55].

Funciona siguiendo dos momentos, “primero, el flujo de agua viaja en una sola dirección; al lograr esto, se producen velocidades del agua mayores, lo que permite que el lavado sea más efectivo. Segundo, el lavado se realiza en una secuencia tal, que el agua del lavado proviene de sitios que ya han sido lavados previamente, lo que garantiza que la porción que ya se encuentra lavada no vuelve a recibir agua con una baja calidad.” [55]. Para asegurar la remoción de biopelícula, productos de corrosión y demás desechos asociados a las paredes de las tuberías, el LHU se realiza a velocidades de 1,8 m/s [54].

### **1.3 Desinfección**

La desinfección del agua es una fase fundamental del proceso de potabilización ya que gracias a este proceso se ha logrado reducir enfermedades transmitidas por microorganismos que se encuentran en el agua, mejorando y preservando la salud pública.

Los procesos de desinfección se han empleado con el fin de destruir o inactivar los organismos patógenos productores de enfermedades, estos incluyen las bacterias, una gran variedad de virus, protozoos intestinales y algunos otros microorganismos [7].

La desinfección se logra mediante desinfectantes químicos y/o físicos. Estos agentes también extraen contaminantes orgánicos del agua, que son nutrientes o protección para los microorganismos. Los desinfectantes no solo eliminan microorganismos, sino que además tienen un efecto residual, que significa que se mantienen como agentes activos en el agua después de la desinfección para prevenir el crecimiento de los microorganismos en las tuberías provocando la recontaminación del agua.

Dentro de los agentes químicos se encuentran compuestos como cloro, dióxido de cloro, hipoclorito, ozono, halógenos (bromo, yodo), cloruro de bromo, metales (cobre, plata), permanganato potásico, fenoles alcoholes, jabones y detergentes, sales de amonio, peróxido de hidrogeno y distintas ácidos y bases. En cuanto a los agentes físicos los más empleados son: Luz Ultravioleta (UV), radiación electromagnética, rayos gamma, sonido y calor [8].

Los procesos de desinfección del agua que pueden emplearse incluyen alguno de los siguientes tratamientos o una combinación de ellos, son [7].

- Tratamiento físico (por ejemplo, por almacenamiento, aplicación de calor u otros agentes físicos).
- Radiación (radiación ultravioleta).
- Iones metálicos (cobre y plata).
- Álcalis y ácidos.
- Productos químicos tensoactivos (por ejemplo, los compuestos de amonio cuaternario).
- Los oxidantes (los halógenos como el cloro, el ozono, el permanganato, etc.).
- Fotocatálisis heterogénea con TiO<sub>2</sub> como fotocatalizador (UV/TiO<sub>2</sub>).

La desinfección normalmente provoca la corrosión de la pared celular de los microorganismos, variación en la permeabilidad de la célula y cambios en la actividad enzimática, alteraciones en la célula que evitan la multiplicación de los microorganismos. La acción de los agentes desinfectantes también provoca la oxidación y destrucción de la materia orgánica que son generalmente nutrientes y fuente de alimentación de los microorganismos [7].

## **1.4 Selección de desinfectantes**

### **1.4.1 Cloro**

Es uno de los desinfectantes más utilizados. Es muy práctico para la desinfección de microorganismos patogénicos. Se puede utilizar, medir y controlar fácilmente. Es persistente en su justa medida y relativamente económico.

El cloro se ha utilizado en muchas aplicaciones, como la desactivación de patógenos en agua potable, piscinas y aguas residuales, para la desinfección de áreas domésticas y para el blanqueamiento de textiles, por más de doscientos años [9].

Los principales factores que influyen en el proceso de cloración son la naturaleza, concentración y distribución de los organismos que se van a eliminar, así como de los productos resultantes de su reacción con el agua; también, las sustancias disueltas o en suspensión presentes en el agua, la naturaleza y temperatura del agua objeto del

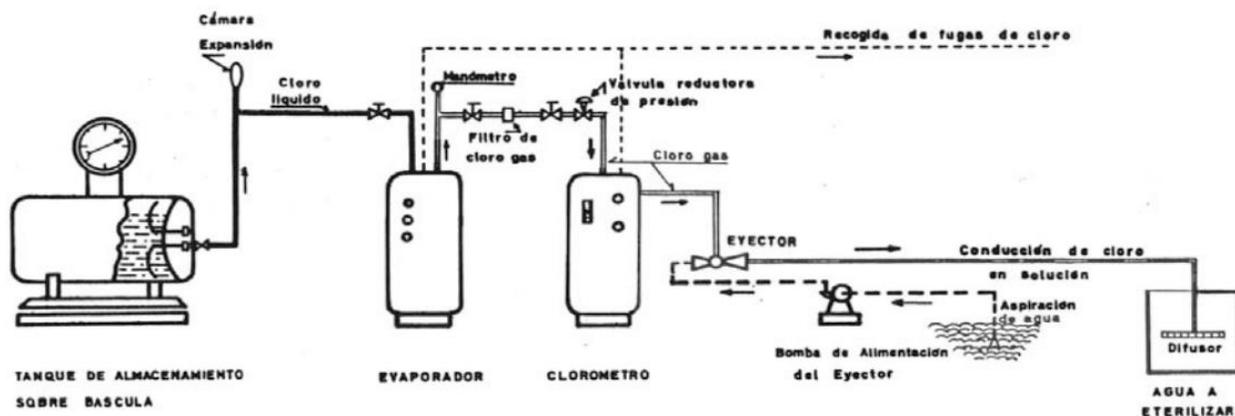
tratamiento, el tiempo de contacto entre el cloro y el agua, el pH del agua y, por último, la mezcla y dispersión a través del agua [7].

El uso de cloro para desinfección es cuestionado e incluso restringido en muchos países, debido a la formación de compuestos halogenados que a largo plazo generan efectos nocivos en la salud. En Colombia es ampliamente utilizado en las etapas de coagulación-floculación y en la desinfección, como es en el caso de la PTAP del municipio El Rosal. En cuanto a su acción sobre los microorganismos, este afecta el ciclo de Krebs, por lo cual detiene el mecanismo celular de obtención de energía [10]. El uso en las etapas iniciales del proceso de tratamiento tiene como propósito eliminar microorganismos y asociaciones, sin embargo, los virus y bacterias se adhieren a los sólidos suspendidos, por lo cual es necesario una posterior etapa de filtración y desinfección.

Con respecto al tiempo de contacto, el tiempo de contacto mínimo suficiente para una cloración eficaz es, a su vez, función de la temperatura, pH, concentración y naturaleza de los organismos y sustancias presentes en el agua, así como de la concentración y estado en que se halle el cloro; como mínimo, el tiempo de contacto debe ser de diez a quince minutos. La instalación consiste en el almacenamiento en tanques o bidones, donde se encuentra cloro en equilibrio líquido-gas, pero el suministro al sistema se da en forma de gas y por medio del uso de válvulas de control, se impide el retorno al sistema de almacenamiento [7].

**Figura 4.**

*Esquema de un sistema de cloración.*



Nota. En esta figura se muestran cada una de los equipos y etapas de una cloración convencional. Tomada de: F. Ramírez "TRATAMIENTO DE DESINFECCIÓN DEL AGUA PORTABLE", [En línea]. Disponible: <https://www.fundacioncanal.com/canaleduca/wp-content/uploads/2015/08/Tratamiento-de-desinfeccion-del-agua-portable2.pdf>. [Acceso: abril 30, 2022].

El cloro elimina patógenos como las bacterias y los virus, rompiendo las uniones químicas moleculares, tiene la capacidad de intercambiar átomos con otros compuestos, como enzimas en bacteria y otras células. Cuando las enzimas entran en contacto con el cloro, uno o más de los átomos de hidrógeno es sustituido por el cloro, provocando que la molécula se transforme o se rompa.

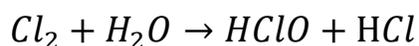
Las propiedades de desinfección del cloro en agua se basan en el poder de oxidación de los átomos de oxígeno libre y reacciones de sustitución del cloro [9].

Las reacciones que tienen lugar entre el cloro y el agua pueden llegar a ser complejas, ya que el agua objeto de la cloración contiene diversas sales y materias orgánicas en solución y suspensión.

Estas reacciones de equilibrio tienen lugar cuando el cloro ( $Cl_2$ ) entra en contacto con el agua ( $H_2O$ ), son reacciones de hidrólisis, originan ácido hipocloroso ( $HClO$ ) y clorhídrico ( $HCl$ ), como se presenta en la Ecuación 1.

### **Ecuación 1.**

*Mecanismo de reacción del cloro en el proceso de desinfección (parte I).*



El ácido clorhídrico es neutralizado por la alcalinidad del agua y el ácido hipocloroso se ioniza [7] tal como se representa en la Ecuación 2.

### **Ecuación 2.**

*Mecanismo de reacción del cloro en el proceso de desinfección (parte II).*



El ácido hipocloroso (HClO) y los iones hipoclorito (ClO<sup>-</sup>), forman cloro libre que es el que provoca la desinfección. Sin embargo, ambas sustancias son diferentes entre sí, el ácido hipocloroso, tiene mayor poder oxidante y bactericida que el ion hipoclorito, esto se debe a que el ácido hipocloroso se divide en ácido hipoclorito (HCl) y oxígeno atómico (O), que es un desinfectante muy poderoso [7] [9].

#### **1.4.2 Dióxido de cloro**

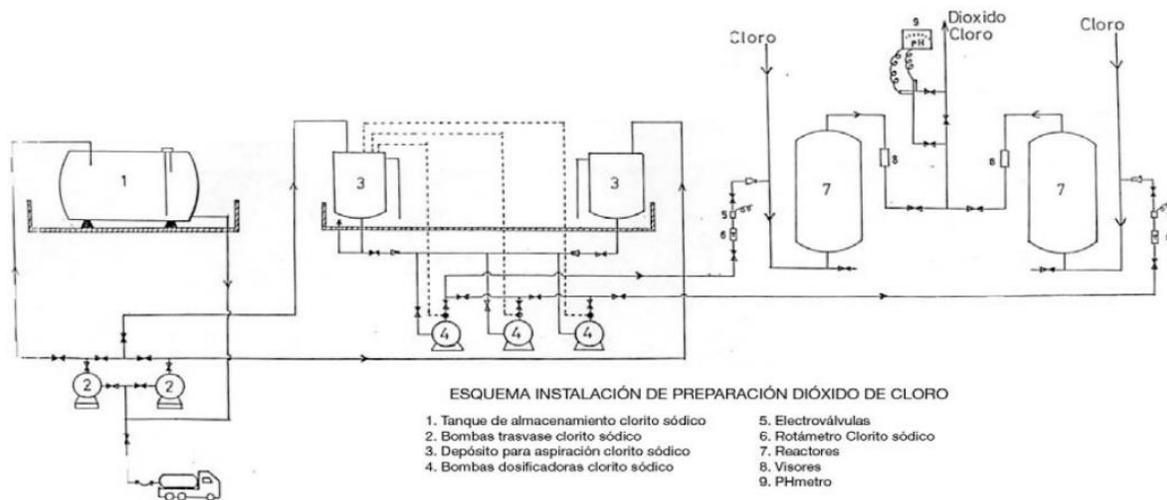
Es un gas que como características presenta un color amarillento, un olor similar al cloro, el uso común como solución en su mayoría de aplicaciones; por otra parte, el alto espectro que desnaturaliza las proteínas, lo cual lo convierte en un desinfectante y oxidante efectivo en el tratamiento de agua potable y residual. Adicionalmente, se fabrica en el punto de uso y la solución es bastante estable a condiciones de poco acceso a la luz solar y humedad, así como dentro de un sistema cerrado y sellado [11].

Cuando el dióxido de cloro reacciona con contaminantes acuosos, generalmente se reduce a iones de clorito. Las reacciones de transferencia de electrones correspondientes son comparables a las que ocurren cuando el oxígeno actúa como oxidante en hierro y manganeso tal como en materia orgánica [7]. Por otra parte, en cuanto a microorganismos, altera la permeabilidad de la membrana celular externa, no permite el desarrollo de resistencia por parte de bacterias aerobias como anaerobias y en específico son vulnerables a la oxidación por óxido de cloro, las bacterias reductoras de sulfato (SRB) y las productoras de ácido (APB) [11].

En el tratamiento del agua, se prepara en la propia planta de tratamiento, haciendo reaccionar una solución de clorito sódico con una solución clorada (vía cloro) o con una solución de ácido clorhídrico, obteniéndose finalmente una solución acuosa con una concentración de 1 a 3 g/L de ClO<sub>2</sub>, consiguiendo así un manejo con gran seguridad [7].

**Figura 5.**

*Esquema de instalación de preparación de dióxido de cloro.*



Nota. En esta figura se muestran cada una de los equipos y etapas de una cloración convencional. Tomada de: F. Ramírez "TRATAMIENTO DE DESINFECCIÓN DEL AGUA PORTABLE", [En línea]. Disponible: <https://www.fundacioncanal.com/canaleduca/wp-content/uploads/2015/08/Tratamiento-de-desinfeccion-del-agua-portable2.pdf>. [Acceso: abril 30, 2022].

El dióxido de cloro es un poderoso agente oxidante que puede descomponerse en clorito; en ausencia de sustancias oxidables y en presencia de álcali, se disuelve en agua, descomponiéndose con la lenta formación de clorito y clorato [11].

### **Ecuación 3.**

*Mecanismo de reacción del dióxido de cloro en el proceso de desinfección (parte I).*

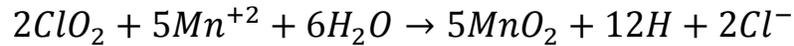
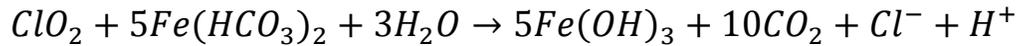


El clorito es generalmente el subproducto inorgánico más predominante en el tratamiento del agua con dióxido de cloro, si bien no suele estar presente cuando hay exceso de cloro.

El poder oxidante del dióxido de cloro es mayor que el del cloro. Su acción bactericida es muy rápida, siendo su nivel más alto de desinfección antes de los dos primeros minutos de contacto. Oxida y reacciona con el hierro y manganeso a velocidades de reacción mayores que con el cloro [7] como se representa en la Ecuación 4.

#### **Ecuación 4.**

*Mecanismo de reacción del dióxido de cloro en el proceso de desinfección (parte II).*



En la reacción de oxidación del hierro y manganeso, el dióxido de cloro se reduce a clorito e inmediatamente este clorito reacciona con el hierro (+2), para pasar a hierro (+3), como hidróxido férrico y con el manganeso (+2), para pasar a manganeso (+4), como MnO<sub>2</sub>. No forma clorofenoles, no reacciona con el amoníaco; por tanto, no forma cloraminas. El dióxido de cloro reacciona con la materia orgánica natural del agua, formando compuestos orgánicos oxidados en muy baja concentración como aldehídos y ácidos carboxílicos, pero no forma subproductos orgánicos clorados [7].

#### **1.4.3 Hipoclorito de calcio**

Es un compuesto químico de fórmula  $Ca(ClO_2)$  ampliamente empleado, también conocido como cal clorada. Posee múltiples ventajas y es efectivo en el tratamiento de aguas (especialmente para piscinas), se considera un químico recurrente.[12]

Se encuentra en forma de polvo, gránulos o bolitas y tiene un olor parecido al del cloro, suele tener un color blanco o beige, apariencia cristalina. Es el resultado de una reacción de hidróxido de calcio con cloro gaseoso [13].

Debido a sus propiedades como agente desinfectante, fungicida, bactericida y microbicida, este compuesto es utilizado en el tratamiento y potabilización de aguas residuales, portables y para piscinas, ya que se descompone fácilmente en el agua, en donde libera oxígeno y cloro, para realizar su función desinfectante. Sin embargo, a pesar de ser un compuesto relativamente estable, puede reaccionar de forma violenta y explosiva al contacto con material combustible, carbono varios alcoholes, azufre, etc.

En su acción desinfectante se encarga de oxidar los agentes orgánicos que pueden ser causantes de varias enfermedades para los seres humanos, como, por ejemplo: diarrea por infección gastrointestinal, oído de nadador, enfermedades cutáneas y dermatológicas, heridas y algunas afecciones respiratorias [12].

El hipoclorito de calcio es una alternativa atractiva a las soluciones de cloro gaseoso o hipoclorito de sodio (lejía) porque es una forma seca de cloro que ofrece varias ventajas de manipulación ya que no requiere certificación del operador.[14]

El hipoclorito de calcio contiene aproximadamente 65% de cloro disponible, comparado con el 12% de blanqueador, ofrece menores costos de capital, precisión, confiabilidad, manejo seguro y beneficios de mantenimiento [14].

Además de que es mucho más fácil de manipular que el cloro, también cuenta con una alta efectividad al desinfectar y purificar el agua debido a los niveles de cloro que contiene y su capacidad para permanecer activo por mayor tiempo, lo que permite eliminar la materia orgánica presente en el agua al igual que los microorganismos de manera más efectiva. Este proceso de oxidación de patógenos e impurezas es posible gracias al cloro, el cual los descompone erradicando cualquier elemento contaminante en el agua [15].

“El hipoclorito de calcio es un oxidante que se descompone fácilmente en el agua liberando oxígeno y cloro”. En el agua, el hipoclorito de calcio se separa en iones de calcio e hipoclorito, estos iones pueden reaccionar con otras sustancias que se encuentran en el agua [16].

### 1.4.5 Comparación de los desinfectantes

Tabla 2.

Comparación de los diferentes desinfectantes utilizados.

Desinfectante	Ventajas	Desventajas	Riesgos	Precios
Cloro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oxidante fuerte.</li> <li>• Alimentación simple.</li> <li>• Residual persistente. [43]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Subproductos clorados.</li> <li>• Puede generar problemas de olor y sabor.</li> <li>• El pH influye en la eficiencia. [43]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Irritación severa de la nariz, garganta y tracto respiratorio causando rinitis, tos, dolor pectoral y déficit de la función pulmonar.</li> <li>-Irritación y quemaduras en la piel.</li> <li>-Irritación en los ojos causando lagrimeo, sensación de quemadura y enrojecimiento.</li> <li>-Quemaduras severas en boca, esófago y estómago.</li> <li>*Riesgo de incendio y explosión.</li> <li>* El personal debe estar adecuadamente instruido para su correcto manejo y contar con el equipo de protección personal (mascara full-face, lentes de seguridad, guantes de protección, botas y traje completo de protección. [44]</li> </ul>	4 750 COP/Kg [45]
Dióxido de cloro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oxidante fuerte.</li> <li>• No forma THM.</li> <li>• NO tiene efectos en el pH.</li> <li>• Persistencia del residual.</li> <li>• Oxida los</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Subproductos: cloritos y cloratos.</li> <li>• Requiere de generación <i>in-situ</i>. [43]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Irritación de piel y ojos causando lagrimeo.</li> <li>- Irritación de la nariz y garganta causando tos y respiración con silbido.</li> <li>-Irritación de los pulmones causando tos o falta de</li> </ul>	1 885 COP/L

	<p>compuestos orgánicos.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora la coagulación.</li> <li>• Tiene buena solubilidad.</li> <li>• Mejora la remoción de hierro y manganeso. [43]</li> </ul>		<p>aire.</p> <p>-Sumamente inflamable y reactivo por lo que presenta un grave peligro de incendio y explosión.</p> <p>-Está prohibido su transportarlo puro (sin hidratar)</p> <p>*Antes de trabajar con ClO<sub>2</sub> el personal debe estar capacitado en la manipulación y almacenaje de esta sustancia y contar siempre con el equipo de protección individual. (traje completo de neopreno o PVC, mascara full-face, gafas de protección guantes de neopreno o PVC y botas de PVC con puntera) [13].</p>	
Hipoclorito cálcico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poderoso bactericida.</li> <li>• Poderoso microbicida. [43]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se descompone a temperaturas superiores a 56°C.</li> <li>• Produce cloratos. [43]</li> </ul>	<p>-Causa graves quemaduras y daño en los tejidos de la piel y los ojos.</p> <p>-Por ingestión causa graves quemaduras y perforaciones en el sistema digestivo.</p> <p>* El personal a cargo del manejo debe contar con los elementos y equipo de protección individual (mascara full-face, traje completo en polipropileno, guantes de caucho butilo o nitrilo, botas de caucho butilo o PVC).[46]</p>	16 000 COP/Kg [47]

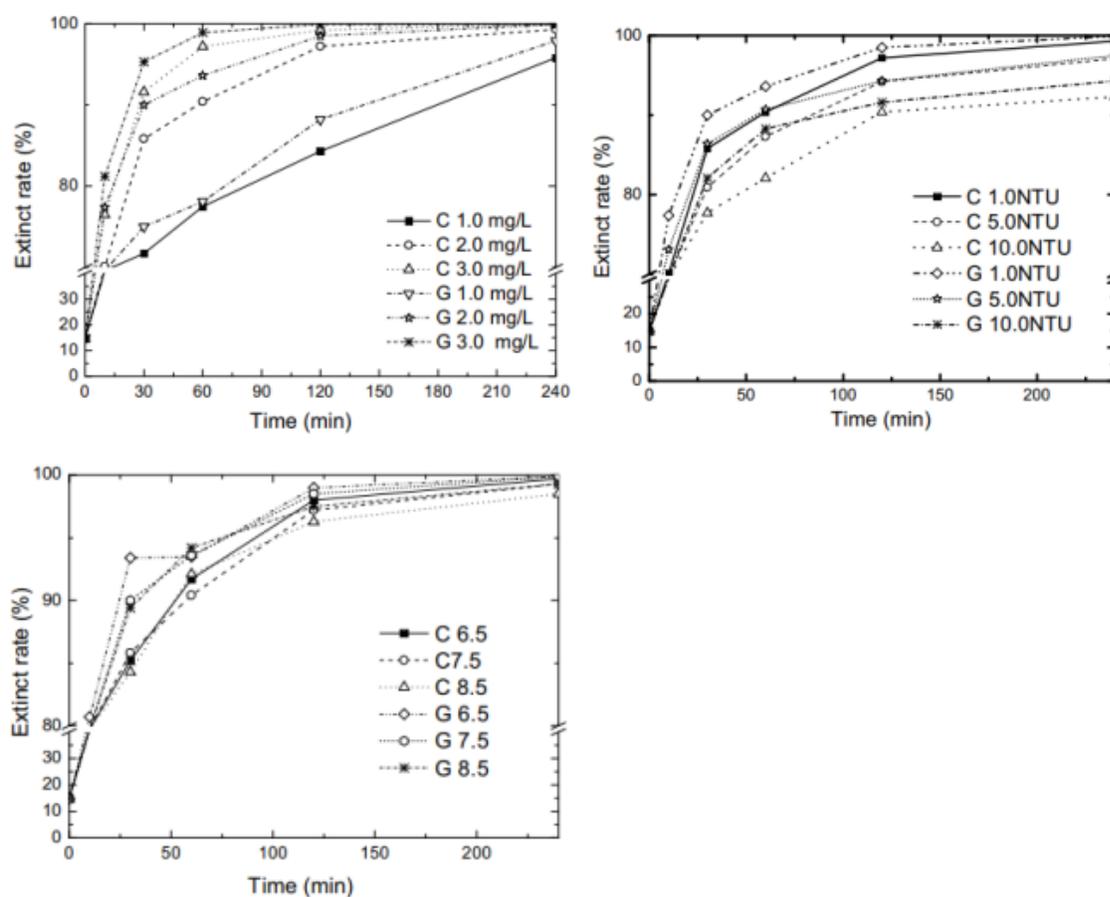
**Nota.** La tabla muestra una comparación entre cloro, dióxido de cloro e hipoclorito de sodio en cuanto a ventajas, desventajas, riesgos, precauciones y precios.

## 1.5 Influencia del uso del desinfectante sobre la formación de biopelícula y sobre el material

Estudios sobre la efectividad del uso de desinfectantes como el dióxido de cloro para remover microorganismos resistentes al cloro, tales como Giardia (G) y Cryptosporidium (C); han demostrado que, al variar diferentes factores como concentración del desinfectante, pH, temperatura, turbidez y contenido orgánico, es posible inactivarlos mediante el método de tinción por fluorescencia [11].

**Figura 6.**

*Efecto de las condiciones en estudio para la inactivación de Giardia y Cryptosporidium.*



**Nota.** En la figura se observa la relación entre las diferentes concentraciones de desinfectante, la tasa de extinción de las especies en estudio y el tiempo. Tomado de: Eggestec "INFORME DE GESTIÓN PLANTA DE TRATAMIENTO (PTAP) EL ROSAL", [En línea]. Disponible:

<https://drive.google.com/file/d/1XUTKSH-z6ORmjYoR2pT0j42hZre734b3/view?usp=sharing>.

[Acceso: julio 24, 2022].

Con respecto a las conclusiones del anterior estudio, se llegó a que el efecto del dióxido de cloro fue más considerable en Giardia que en Cryptosporidium; así como también la condición con mayor tasa de extinción (99%) fue  $V=2\text{mL}$   $\text{pH}=7,5$   $T=25^{\circ}\text{C}$   $\text{Turbidez}= 1$  NTU; por otra parte, la alta turbidez tiene un bajo efecto en la inactivación de las especies en estudio; por último, la velocidad de inactivación se ve favorecida ante el aumento de la temperatura y el pH ácido [11].

A partir de lo anterior, es posible establecer que el efecto del desinfectante sobre la formación de desinfectante, tiene un efecto simultáneo con otros factores, para tener su máxima eficiencia. En cuanto a la efectividad entre desinfectantes, otros estudios demuestran que, aunque convencionalmente el clorito reduce los efectos de la nitrificación en los sistemas de distribución; el dióxido de cloro, es capaz de inactivar células suspendidas y bacterias heterótrofas [11]. Esto indica que, el efecto de cada desinfectante es particular para tratar distintas problemáticas en la red, por lo cual su elección es clave para finalmente garantizar la calidad del tratamiento de agua.

Con respecto a la nitrificación, es una problemática relacionada con el efecto de los desinfectantes sobre la tubería de la red. En una revisión sobre las nitrosaminas, se encontró que son el resultado de la desinfección con cloro o cloraminas. En particular el hallazgo de n-nitrosodimetilamina (NDMA), representa un riesgo para la salud humana al ser cancerígeno. La lixiviación de NDMA de los anillos de sellado de caucho utilizados para conectar las tuberías, representan un riesgo, al estar presente durante varios años en los sistemas de distribución que utilizan componentes de caucho; para lo cual se ha tratado de implementar tecnologías de irradiación ultravioleta para tratar esta problemática [58]. Con base en lo anterior, los desinfectantes representan un efecto clave sobre el mantenimiento de la red, el cual es posible llevar a cabo directamente desde la etapa de desinfección del tratamiento.

## 2. LA REDUCCIÓN DE BIOPELÍCULA

Con el propósito de dar cumplimiento a los objetivos, se tomó como referencia la etapa de filtración, debido a su directa relación con la etapa de desinfección, ya que ésta se encarga de retirar sólidos en suspensión y coloidales, retener materia orgánica [40], además, ha sido demostrado que los filtros de arena tiene la capacidad de eliminar del 93% al 99% de bacterias coliformes [41], todo esto contribuye a reducir la turbiedad del agua y por lo tanto favorece la velocidad de reacción de los agentes desinfectantes.

Por medio del montaje de un sistema de dimensiones relacionadas (ver figura 7), fue posible cuantificar la formación de biopelícula en condiciones tales como flujo volumétrico y temperatura constante, material compatible con la red de distribución y acceso a un niple removible.

**Figura 7.**

*Montaje de la configuración realizada sobre la red de tubería.*



**Nota.** En esta figura se puede observar el montaje de la configuración propuesta en el Anexo I, sobre la red de tubería correspondiente a la salida de la etapa de filtración de la planta convencional 1.

Inicialmente se planteó seguir un ensayo gravimétrico para la cuantificación de biopelícula formada y reducida tomando como referencia la metodología llevada a cabo por García y Torres [10], quienes instalaron una tubería con un niple extraíble a la salida de los filtros en la planta piloto Francisco Weisner, donde partieron de la diferencia del peso inicial del niple, respecto al peso posterior a 44 horas de formación de biopelícula como metodología para determinar la cantidad de biopelícula formada y bajo la misma metodología pero luego de un proceso de desinfección determinar la biopelícula que había sido reducida. Mismo procedimiento realizado por Donoso [57] en la que el modelo estaba constituido por dos tanques conectados por tres tuberías (PVC, polietileno y CCP) con secciones extraíbles (testigos) para la medición del crecimiento de biopelícula, una vez por semana fueron extraídos para ser secados y pesados para determinar así el espesor de la biopelícula, inicialmente tomando la diferencia de pesos del testigo luego de una semana y el peso inicial del mismo y posteriormente calcular el espesor teniendo en cuenta también el área del testigo.

Al seguir esta metodología se obtuvo como resultado una formación de biopelícula de difícil verificación y cuantificación por los equipos disponibles para el desarrollo del ensayo, interfiriendo en el cumplimiento del proyecto. Es por ello por lo que se buscaron otras alternativas encaminadas al cumplimiento de los objetivos.

Por otra parte, se pretendía simultáneamente realizar los ensayos para determinar cuál desinfectante era el más apropiado para remover la biopelícula formada, mediante el acceso a la conexión de cloro y dióxido de cloro sobre la configuración y en los tiempos planteados.

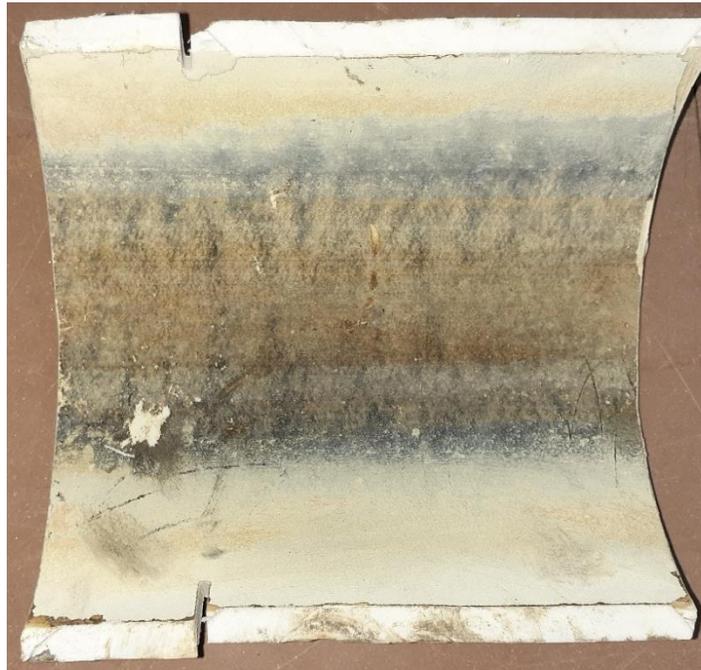
El tiempo fue establecido teniendo en cuenta las propiedades y condiciones del agua a tratar y partiendo de revisiones bibliográficas. Según García y Torres, quienes optaron por una metodología aplicada a planta piloto (sistema por lotes), se da formación de biopelícula en 2 días; sin embargo, ésta resulta muy baja (entre 0 y 0,01 g) [10]. Por otro lado, Gamarra menciona ensayos de 3 días para probar la formación sobre diferentes materiales; mientras que Knobelsdorf y Mujeriego sugieren un ensayo de duración de 28 días para obtener resultados más notorios y significativos para el estudio de desarrollo de biopelículas en tuberías [6].

Con base en estos referentes, se estableció una semana como tiempo de formación, sin embargo, al cumplirse este tiempo se evidenció la baja formación de biopelícula; por lo cual se opta por tomar una sección del tramo de la red, que se obtiene a partir de los restos de tubería que resultaron al realizar las operaciones del montaje (Ver protocolo en Anexo I), para dar cumplimiento al proyecto.

Como se observa en la siguiente figura, la cantidad de biopelícula presente en la sección extraída no es tan densa. Lo anterior es consecuencia del uso del dióxido de cloro como pre oxidante; ya que, según información suministrada por el acueducto, por medio de la gestión realizada junto con Egestec desde hace 5 años, es posible que se esté llevando a cabo un control de la formación de biopelícula en la red, desde la etapa de oxidación; lo cual representa una ventaja en cuanto a la calidad del agua en las distintas etapas del proceso de potabilización.

**Figura 8.**

*Sección de tubería con biopelícula formada.*



**Nota.** En esta figura se observa la biopelícula en el pedazo extraído de la sección de tubería de la etapa de filtración.

Con base en lo anterior, se decide plantear un desarrollo experimental en el cual se tomará como referencia la sección de tubería en PVC, extraído de la red (con biopelícula formada), para realizar los ensayos de selección del desinfectante que cumpla con remover la mayor cantidad de biopelícula posible.

Como se puede apreciar en la Figura 8, la sección seleccionada para llevar a cabo la experimentación corresponde a la parte inferior de la tubería, se elige esta zona debido a que, gracias al efecto de la gravedad, cuando el agua fluye por las tuberías de las redes de distribución su contenido orgánico e inorgánico puede sedimentarse y alojarse en la pared inferior de la tubería, donde su acumulación proporciona nutrientes y un ambiente óptimo para el crecimiento y posterior adhesión de microorganismos que son transportados por el flujo del agua; la velocidad del agua facilita este transporte de células y estructuras de soporte hacia la pared de las tuberías [56].

Además de esto el material de la tubería como se mencionó anteriormente, influye en la efectividad del desinfectante, siendo el PVC el material que demanda una menor concentración de desinfectante en comparación a tuberías metálicas [56]. Siendo esta otra razón para decidir realizar la experimentación con tubería de PVC y reducir la cantidad de desinfectante a emplear.

## **2.1 Metodología experimental**

Se plantea el siguiente plan de acción:

- Cortar en partes pequeñas la sección de tubería. Se seleccionan 6 partes (aproximadamente de dimensiones de 5x5 cm), con el fin de realizar un diseño experimental para observar el efecto de los 3 desinfectantes en estudio (dióxido de cloro, hipoclorito de calcio y cloro en solución acuosa) con sus respectivas réplicas.
- Registrar el peso inicial de las piezas (esto incluye el peso de la biopelícula).
- Tomar muestras de agua cruda y en la salida de la etapa de filtración.
- Definir los parámetros y caracterizar las muestras de agua.
- Calcular y aplicar las respectivas dosificaciones de cada desinfectante, teniendo en cuenta que los ensayos se realizan con muestras de agua de la salida de la etapa de filtración, en recipientes de 1L de capacidad.

- Sumergir las piezas en las soluciones de desinfectantes durante el tiempo de retención definido (10 días).
- Establecer mediante ensayo gravimétrico (diferencia de peso inicial respecto al final) si efectivamente se evidencia la reducción de biopelícula.
- Caracterizar las muestras de agua, con el fin de evidenciar cambios en los parámetros definidos.

Con base en las recomendaciones de García y Torres [10], se toma en consideración la aplicación de la determinación de Sólidos Totales Suspendidos (SST) y de hierro total, tanto a la muestra de agua cruda, la muestra a la salida de la etapa de filtración y a las correspondientes a cada experimento; ya que se relacionan de manera directa con las condiciones que favorecen el crecimiento de la biopelícula.

Por otra parte, también a partir de la revisión bibliográfica, se considera importante caracterizar la microbiología que influye en la formación de biopelícula. Para ello se realizan pruebas de presencia/ausencia de *E. Coli* y Coliformes Totales por normativa; así como del otro grupo de bacterias del cual se indaga en varias investigaciones sobre las redes de distribución de agua potable, que son las *Pseudomonas*.

Se decide solicitar el respaldo del laboratorio especializado H2O Es Vida, el cual se encarga de realizar las respectivas pruebas a las muestras seleccionadas, y entregar los resultados para el respectivo análisis por parte de los investigadores.

Por otra parte, las pruebas diferentes a las microbiológicas se desarrollan por parte de los investigadores, con el apoyo de los laboratorios de la Fundación Universidad de América. La decisión se toma a partir de la revisión del presupuesto y el acceso a los recursos para realizar el desarrollo experimental.

## **2.2 Procedimiento para la recolección de las muestras de agua**

Se selecciona el recipiente para la recolección de la muestra, según el volumen que sea requerido, el cual debe estar limpio, sin residuos de ningún tipo. Adicionalmente se coloca una etiqueta con la que se identificarán las muestras. Esta etiqueta contiene información tal como el punto de recolección, fecha y hora, el nombre del recolector, el

tipo de prueba a la que va destinada y las observaciones con respecto al entorno del punto de recolección; tal como se muestra en la Figura 9.

Se purga el recipiente con la muestra de agua al menos dos veces. En el caso de las muestras destinadas a pruebas de microbiología, no es necesario, ya que se puede alterar el resultado. Los recipientes para este tipo de pruebas son de vidrio, vienen previamente esterilizados en autoclave y se requiere un volumen aproximado de 250 mL de muestra.

Se llena el recipiente con la muestra de agua, en la totalidad de su volumen.

Si la muestra requiere refrigeración, se recomienda colocar el recipiente en una nevera de poliestireno que contenga pilas de refrigeración a una temperatura aproximada de 4°C. Este es el caso específico de las muestras destinadas a pruebas de microbiología, que a su vez deben ser tomadas con anticipación aproximada de un día, para ser representativa.

**Figura 9.**

*Etiquetado de las muestras.*



**Nota.** Esta figura representa la forma como se hizo el etiquetado de cada una de las muestras, donde se registra la información correspondiente de cada una.

### **2.2.1 Determinación de Sólidos Suspendidos Totales (SST).**

La importancia de la determinación de este parámetro radica en la presencia de material particulado en el agua que se puede asociar a grandes rasgos con la materia orgánica e inorgánica que favorece a la formación de biopelícula. Para el desarrollo experimental se requiere de los siguientes materiales y equipos [17]: 1 probeta graduada (10 mL); 1 frasco Erlenmeyer (250 mL); 1 embudo de filtración; papel de filtro; 1 cápsula de porcelana; pinzas; desecador; estufa.

El procedimiento [17], básicamente consiste en:

- Enfriar el papel de filtro en desecador.
- Identificar y pesar el filtro.
- Colocar el filtro en el embudo de filtración y humedecerlo con una pequeña cantidad de agua destilada.
- Medir 100 mL de agua homogenizada con una probeta de 100 mL.
- Verter el volumen medido en el embudo de filtración y comenzar la filtración simple.
- Lavar 3 veces sucesivas con 10 mL de agua destilada cada vez, permitiendo un completo drenaje en los lavados.
- Continuar hasta que la filtración sea completa.
- Remover el papel de filtro y colocarlo sobre un soporte de porcelana.
- Secar por 1 hora a 103-105 ° C en estufa, enfriar en desecador hasta temperatura ambiente y pesar.
- Repetir el ciclo de secado, enfriado, y pesado hasta peso constante o hasta que la pérdida de peso sea menor que el 4% del peso previo o 0,5 mg.

El cálculo y expresión de los resultados se da partir de la Ecuación 5:

#### **Ecuación 5.**

*Expresión para determinar Sólidos Suspendidos Totales (SST).*

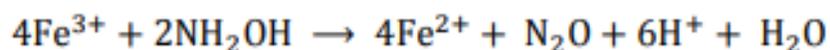
$$SST \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 1000}{V}$$

### 2.2.2 Determinación de hierro (Método de la Fenantrolina).

El principio del método, indica que al llevar a ebullición la muestra de agua, junto con hidroxilamina (agente reductor) y ácido clorhídrico, se disuelve el hierro [17]; tal como se muestra en la Ecuación 6:

#### Ecuación 6.

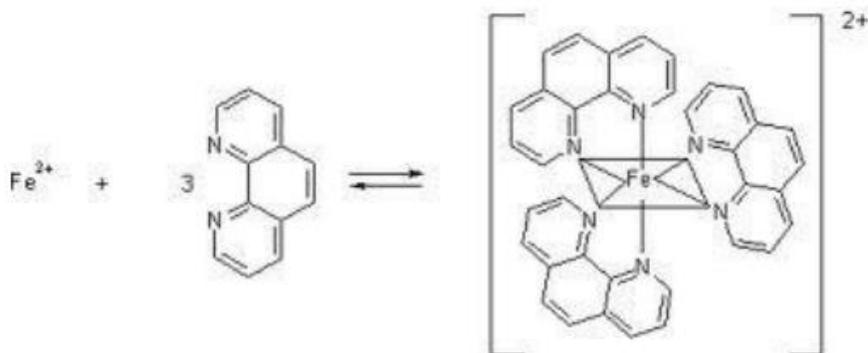
*Reacción de oxidación de hierro con hidroxilamina.*



Posteriormente, al tratar con solución de 1,10-Fenantrolina (pH 3,2-3,3), se produce la quelación de los átomos de hierro y se forma un ion complejo anaranjado-rojo [17]. La ecuación química que representa el fenómeno es la siguiente

#### Ecuación 7.

*Reacción de oxidación de hierro con hidroxilamina.*



El procedimiento consta de las siguientes etapas:

2.2.2.a. Preparación de las soluciones patrón. Se tienen en cuenta seis patrones de distintas concentraciones de hierro. Para ello se toman seis balones aforados de 100 mL limpios y purgados con agua destilada; se marcan de P1 a P6, y respectivamente se adicionan por medio de pipetas aforadas, alícuotas de 0,1; 0,5; 1,0; 5,0; 10,0 y 25,0 mL de la solución stock de hierro (II) a 70 ppm.

Seguidamente, a cada solución patrón se adiciona 1 mL de solución de hidroxilamina al 10% m/v; también 10 mL de solución de o-Fenantrolina al 0,1% m/v, y se diluye hasta la marca con agua destilada. Se mezcla y se deja en reposo durante 10 min para el máximo desarrollo del color [17], tal como se observa en la Figura 10.

**Figura 10.**

*Soluciones patrón.*



**Nota.** La figura muestra las soluciones patrón preparadas y las tonalidades que toma cada una según su concentración de hierro.

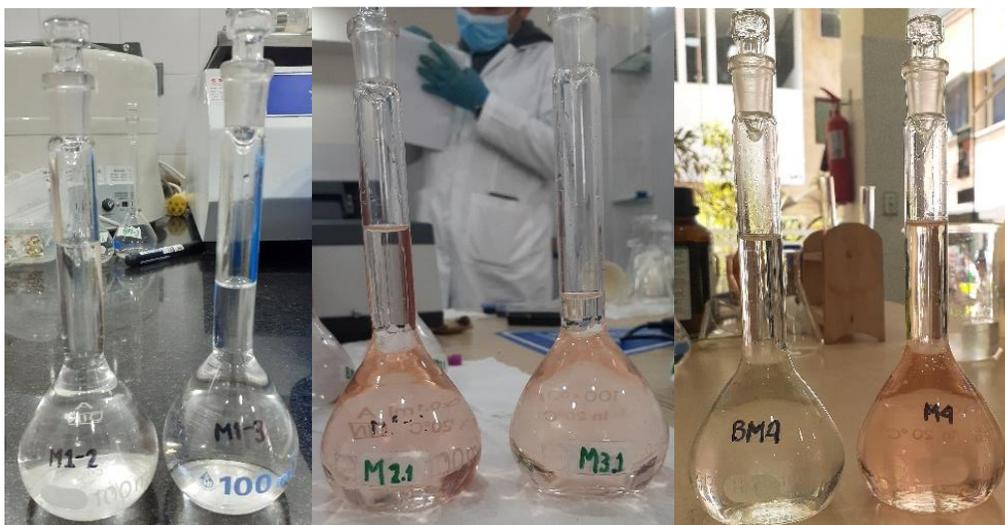
#### 2.2.2.b. Pretratamiento de la muestra.

- Se homogeniza la muestra por agitación manual, aproximadamente durante 20 segundos y se toma una alícuota de 50.0 mL con pipeta aforada sobre un Erlenmeyer de 125 mL.
- Se adicionan 2 ml de HCl concentrado y 1 ml de disolución de hidroxilamina. Se adicionan unas pocas perlas de ebullición, se tapa la boca del Erlenmeyer con un tapón con orificios y se calienta hasta ebullición en plancha de calentamiento.
- Para asegurar la disolución de todo el hierro se continúa la ebullición hasta que el volumen se reduzca a 15 mL o 20 mL.

- Se enfría a temperatura ambiente y se transfiere a un balón volumétrico de 100 mL limpio y purgado con agua destilada, marcado como M1. Se retiran las perlas de ebullición.
- Se lava con dos porciones de 10 mL aproximadamente el Erlenmeyer y transfiera los lavados al balón aforado. Lavar las perlas de ebullición con jabón, secarlas y depositarlas en el recipiente contenedor.
- Se adicionan 10 mL de disolución reguladora y 10 mL de solución de o-Fenantrolina y se diluye hasta la marca con agua destilada.
- Se mezcla perfectamente y se deja un mínimo de 10 min para el máximo desarrollo del color.
- Repetir los literales i-vii, marcando el balón aforado como BM1, sin adicionar o-Fenantrolina. Esta disolución constituye el blanco de muestra [17].

**Figura 11.**

*Pretratamiento de las muestras.*



**Nota.** Esta figura representa el resultado del pretratamiento de las muestras de agua tomadas en el caso de los experimentos.

2.2.2.c. Construcción de la curva espectral. Con el espectrofotómetro configurado a la longitud de onda de máxima absorción, se hace lectura de la absorbancia de cada patrón. La máxima absorbancia se mide así: Inicialmente, se mide la absorbancia a diferentes longitudes de onda en intervalos de 20 nm empezando en 400 nm y terminando en 560 nm del patrón de coloración intermedia. Luego, se seleccionan los 3 valores más altos y se miden en ese rango de 5 en 5 nm (sin repetir los medidos anteriormente) para finalmente definir el valor de máxima absorbancia [17].

### 2.3 Cálculo de la dosificación de las sustancias

Para el cálculo de las dosis necesarias de cada desinfectante se hace uso de una expresión que relaciona la dosis, concentración de cada reactivo y el volumen en el que se prepara la solución, así:

#### Ecuación 8.

*Expresión para el cálculo de dosificación para dióxido de cloro y cloro.*

$$\text{Dosificación} = \text{dosis (ppm)} * \frac{V \text{ (mL)}}{\text{concentración (ppm)}}$$

Las dosis de cloro y dióxido de cloro están dentro de los valores máximos establecidos por establecido por la EPA para agua potable que son 4 ppm [61] y 0,8 ppm [60] respetivamente, para desinfección del agua potable, debido a que en el Rosal se hace tratamiento con ambas sustancias desde hace más de 5 años, se tomó el mismo valor de dosificación usado en el acueducto con el fin de mantener las condiciones lo más semejantes posible. Se hace uso de la Ecuación 8 de la siguiente forma respectivamente:

$$\text{Dosificación } Cl_2 = 0,25 \text{ ppm} * \frac{1\ 000 \text{ ml}}{822 \text{ ppm}} = \mathbf{0,3 \text{ ml}}$$

$$\text{Dosificación } ClO_2 = 0,05 \text{ ppm} * \frac{1\ 000 \text{ ml}}{1\ 000 \text{ ppm}} = \mathbf{0,05 \text{ ml (1 gota)}}$$

En el caso del hipoclorito se partió de preparaciones estándar de disolución de este para desinfección así.[59]

**Ecuación 9.**

*Expresión para el cálculo de dosificación de hipoclorito de calcio.*

$$\text{Dosificación} = \frac{\text{concentración(ppm)} * \text{volumen(L)}}{\% \text{ de cloro} * 10}$$

Reemplazando,

$$\text{CaClO}_2 = \frac{5\,000 \text{ ppm} * 1\text{L}}{65\% * 10} = 7,7\text{g}$$

Se realiza el cálculo con diferentes dosis y concentraciones para cada sustancia debido a que cada uno tiene un mecanismo de acción y efecto diferente sobre las biopelículas.

## **2.4 Condiciones de formación de biopelícula en la PTAP**

Por medio de la comparación de los datos, respecto a las características fisicoquímicas del agua cruda y del agua a la salida de los filtros, con los registros de meses anteriores y los actuales; es posible determinar si las características actuales del agua representan un posible factor de formación de biopelícula. Los datos se encuentran en el Anexo I.

La información recopilada por parte de los investigadores fue obtenida de los registros de la empresa en el período que comprende del 1 de octubre de 2021 al 16 de marzo de 2022, lo cual pone en consideración varios aspectos como la variación tanto de las condiciones climáticas como de las condiciones operativas de la PTAP. Los datos se encuentran en el Anexo II.

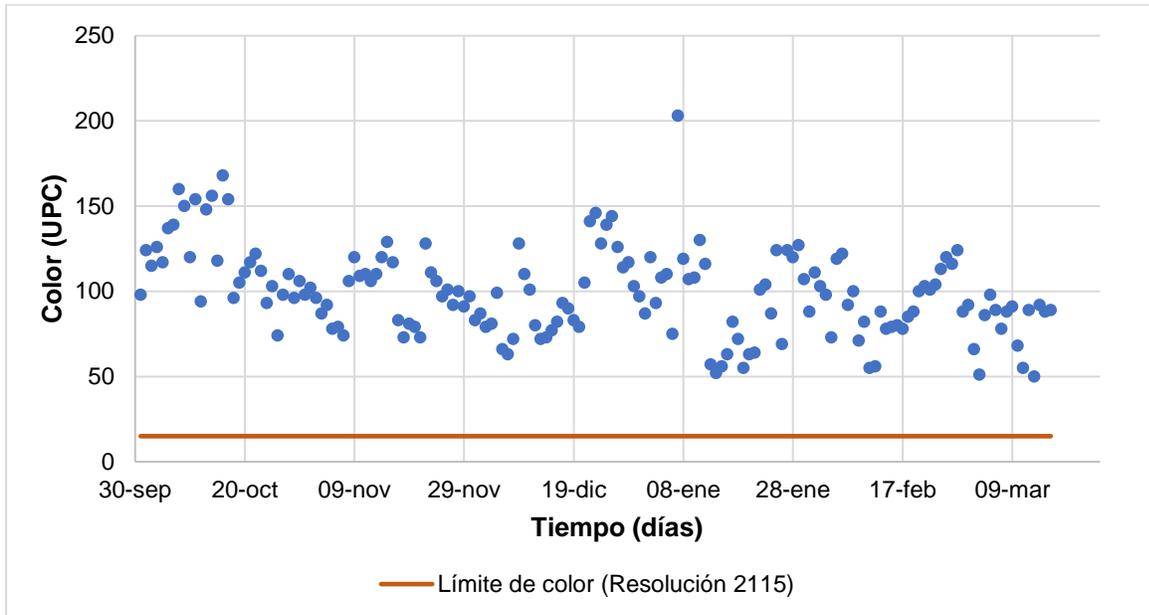
### **2.4.1 Características fisicoquímicas del agua cruda**

La recopilación y representación gráfica de estos datos se realizó con el fin de conocer el comportamiento del agua a tratar que ingresa a la PTAP y en qué manera pueden influir en la formación de biopelícula en los diferentes procesos a los que se somete el agua durante su potabilización.

El primer parámetro considerado es el color debido a que da a conocer el nivel de materia orgánica natural que hay en el agua, como pueden ser las sustancias húmicas o ciertos metales como hierro, manganeso o cobre, que se encuentra disuelta o en suspensión. Estas sustancias representan una fuente de nutrientes para los diferentes microorganismos formadores de biopelícula, además que su presencia es un factor de riesgo de generación de subproductos nocivos de la desinfección del agua, como, por ejemplo, los trihalometanos [18].

**Figura 12.**

*Gráfica de color de agua cruda en el transcurso de 6 meses.*



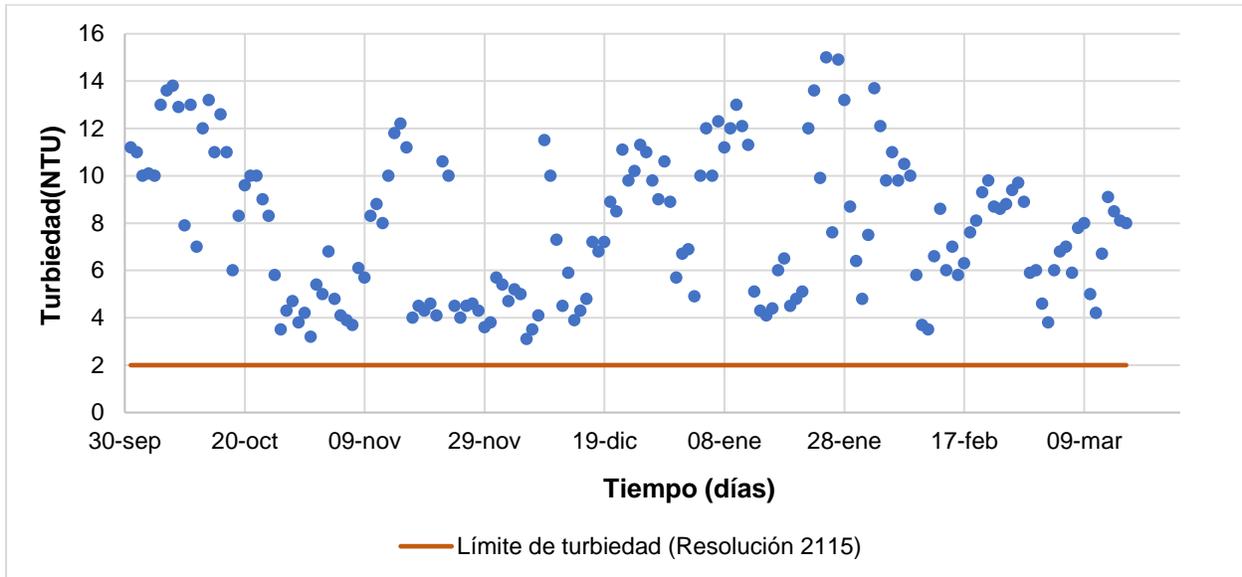
**Nota.** Se representa la gráfica de dispersión del comportamiento del color en el agua cruda en el transcurso de seis meses.

Según los datos recogidos el color del agua cruda a tratar en la PTAP varía en un rango de 50 UPC a 203 UPC. Estos valores reflejan el contenido considerable de materia orgánica y hierro en el agua proveniente del reservorio La Cuesta. El rango obtenido es bastante amplio ya que el color aparente del agua se ve afectado por eventos externos como los cambios del clima, precipitaciones o alguna manipulación no prevista de la fuente del agua.

El valor promedio de este parámetro es 98,26 UPC, siendo superior al permitido en la resolución 2115 de 2007 para agua potable que es de 15 UPC, lo que indica que respecto al color el agua cruda tratada en la PTAP no cumple con lo estipulado en la ley.

**Figura 13.**

*Gráfica de turbiedad de agua cruda en el transcurso de 6 meses.*



**Nota.** Se representa la gráfica de dispersión del comportamiento de la turbiedad el agua cruda en el transcurso de seis meses.

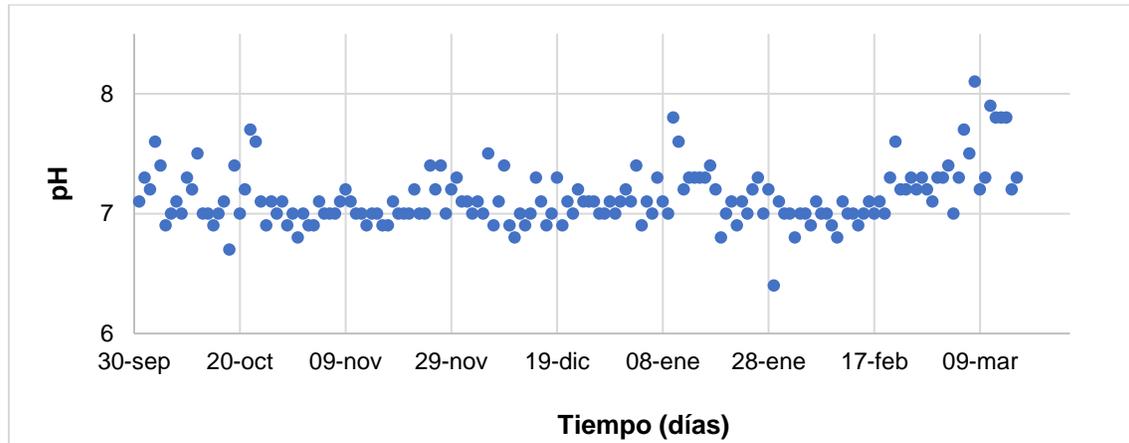
La turbiedad se tuvo en cuenta ya que indica el grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión lo cual lo hace un parámetro de suma importancia para determinar la calidad del agua [19].

Mediante la representación gráfica de los registros de establecer que el agua cruda tiene un rango de turbiedad de 3,1 NTU a 14,9 NTU y un valor promedio de 7,83 NTU, los valores obtenidos a lo largo del tiempo no se mantienen constantes y esto puede ser debido a lluvias, crecimiento de algas o a sólidos suspendidos que debido a el movimiento de los peces que habitan en el reservorio, altera este parámetro.

Este parámetro también está por fuera del valor permitido por la normatividad que para turbiedad es de 2 NTU.

**Figura 14.**

*Gráfica de pH de agua cruda en el transcurso de 6 meses.*

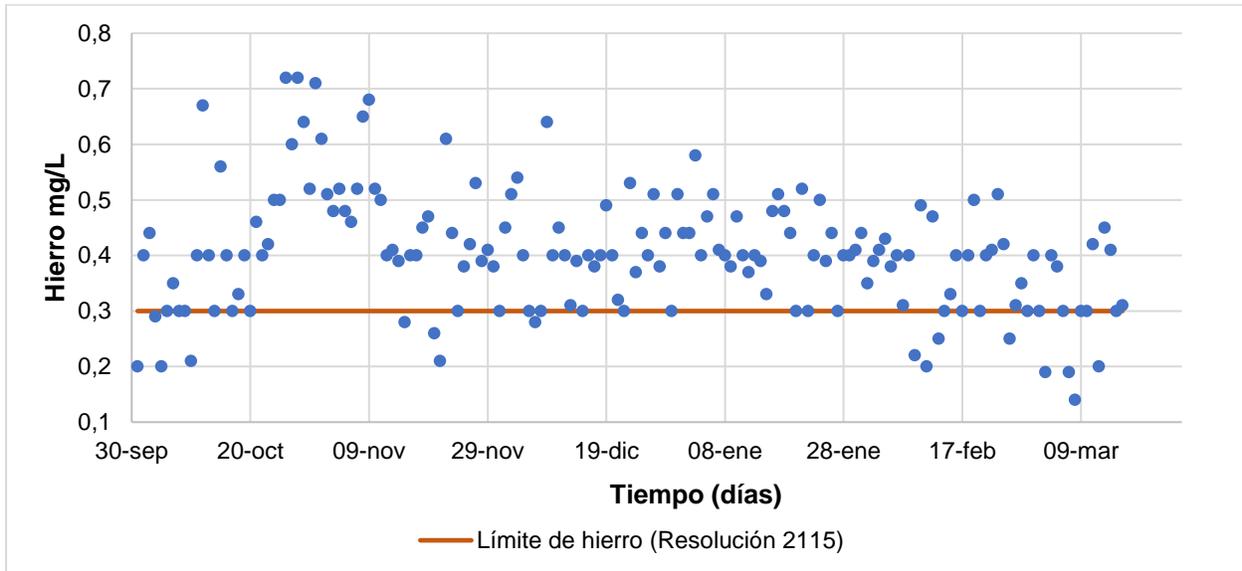


**Nota.** Se representa la gráfica de dispersión del comportamiento del pH en el agua cruda en el transcurso de seis meses.

Otro de los parámetros importantes para la determinación de la calidad del agua es el pH, que indica la naturaleza del líquido para que pueda ser consumida por humanos. A partir de los datos consignados se establece que el agua del reservorio tiene un rango de pH promedio de 7,14 y por lo tanto se encuentra dentro del rango permitido dentro de la Resolución 2115 de 2007 de agua potable que va desde 6,5 hasta 9,0.

**Figura 15.**

*Gráfica de hierro total en agua cruda en el transcurso de 6 meses.*



**Nota.** Se representa la gráfica de dispersión del comportamiento del hierro total en el agua cruda en el transcurso de seis meses.

En cuanto al hierro total, que es un elemento que en grandes cantidades en el agua potable pueden darle un color, olor y sabor metálico desagradable al agua y aunque es seguro para ingerir, los sedimentos de hierro pueden contener trazas de impurezas o albergar bacterias capaces de disolver el hierro y otros minerales de origen natural y que además se pueden acumular en las tuberías [20].

Para este parámetro se obtuvo un rango de 0,14 a 0,72 mg/L, además se puede apreciar mediante la gráfica que la mayoría de los datos registrados (90,42%) no están dentro del cumplimiento de la normatividad para agua potable, ya que el valor máximo permitido en la ley es de 0,3 mg/L.

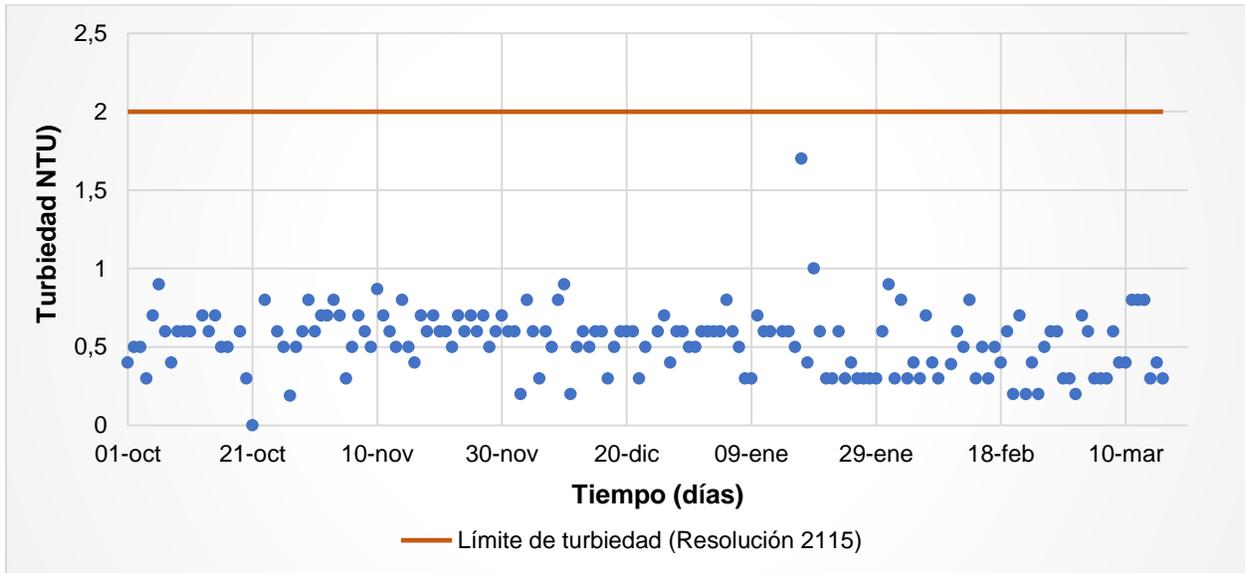
2.4.1.a. Datos adicionales. Además de la recolección de registros se recurrió a informes y pruebas de laboratorio (ver Anexo III) realizados en el laboratorio H2O es Vida sobre el agua cruda en el que se comprueba que ésta cuenta con propiedades fisicoquímicas y contenido microbiológico idóneo para la formación de biopelículas.

Con estos informes se encontró que el agua cruda tiene contenido de compuestos que sirven de nutrientes a los microorganismos favoreciendo su desarrollo y crecimiento, como lo son el carbono COT (<5 mg C/L), nitritos (<0,004 mg NO<sub>2</sub>-N/L), nitratos (1,35 mg NO<sub>3</sub>-N/L) y fosfatos (<0,05 mg PO<sub>4</sub>/L). En cuanto a la microbiología se encontró presencia de *Giarda* (<0,1 quistes/L), *coliformes fecales* (<1 NMP/100 ml) y *Cryptosporidium* (<0,1 quistes/L), microorganismos asociados a la formación de biopelícula, deterioro de la calidad del agua y afectaciones a la salud pública.



**Figura 17.**

*Gráfica de turbiedad del agua de los filtros en el transcurso de 6 meses.*

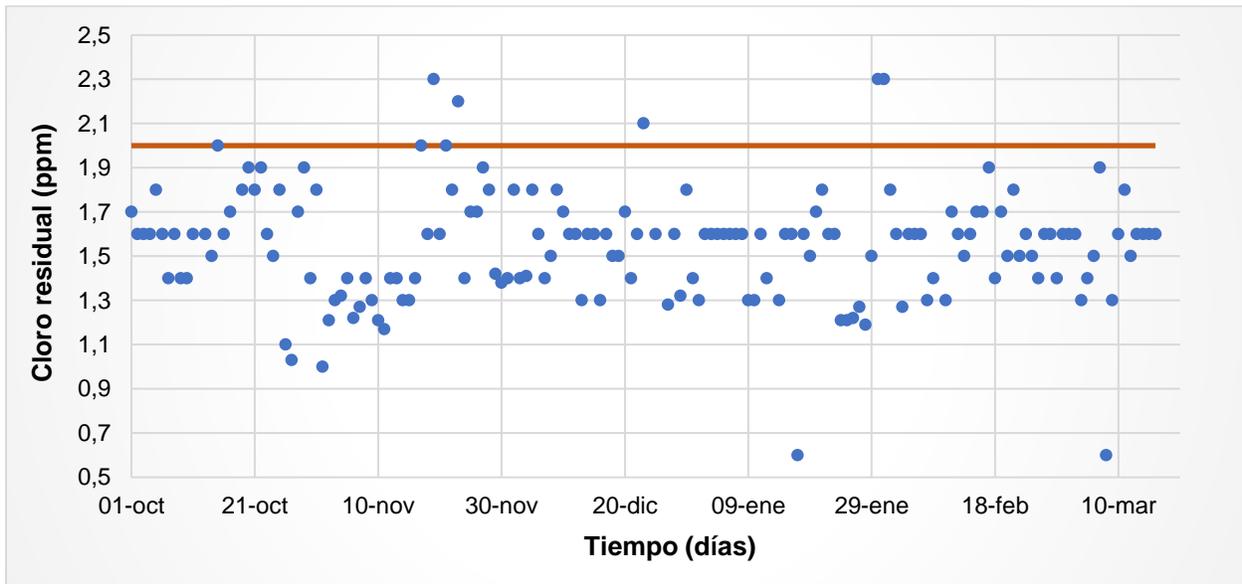


**Nota.** Se representa la gráfica de dispersión del comportamiento de la turbiedad en el agua cruda en el transcurso de seis meses.

En cuanto a la turbiedad, es posible observar que, respecto al agua cruda, los valores se estabilizan y esto es producto del tratamiento. Por otra parte, este parámetro está asociado a las partículas en suspensión, las cuales en este caso podrían estar relacionadas con el desprendimiento de partículas del material de la tubería o incluso del filtro, que por su parte es una condición que favorece a la formación de biopelícula. Los valores se aproximan a un promedio de 0,5 NTU; que, según la Norma 2115 de 2007, están dentro del rango permisible ( $\leq 2$ NTU).

**Figura 18.**

Gráfica de cloro residual del agua de los filtros en el transcurso de 6 meses.



**Nota.** Se representa la gráfica de dispersión del comportamiento del cloro residual en el agua cruda en el transcurso de seis meses.

Con respecto al cloro residual, este es un parámetro clave de seguimiento para el control de formación de biopelícula; ya que, según Gelves, en casos eventuales de desprendimiento de biopelícula, la cantidad suficiente de cloro residual hace efectiva la acción del cloro sobre las partículas desprendidas e inactiva los posibles patógenos que existan, evitando su llegada a los consumidores [5].

Por otra parte, se sugiere que el control adecuado del material orgánico dentro del sistema hace más estable este parámetro en la red, lo que permite su efectiva acción en el sistema. Adicionalmente, la presencia de cloro retrasa el desarrollo de biopelículas, sin embargo, no lo inhibe. Sobre este parámetro se dice que “presenta un efecto selectivo sobre las poblaciones presentes en las biopelículas disminuyendo la variedad de organismos presentes” [5].

Dentro de las posibles causas de la variación de este parámetro en el tiempo, según Rueda, están los cambios en la demanda de cloro, el sistema de inyección y el estado de la red de distribución de agua potable [21]. Lo anterior favorece al crecimiento de biopelícula en distintos tramos de la red, aportando diferentes características en cuanto a morfología, especies y desplazamiento de nutrientes. El promedio de datos correspondiente a la concentración 1,5 ppm, está dentro de la Norma 2115 de 2007 (rango de cloro residual: 0,3 a 2 ppm).

Por último, como parte de otras medidas de seguimiento, se deben evitar posibles eventos de contaminación del sistema con el fin de evitar la entrada de agentes extraños al sistema; lo anterior, ante reparaciones y mantenimiento de las redes, ante los cuales se deben realizar acciones de limpieza de los tramos reemplazados o reparados [5].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desarrollo experimental propuesto arroja, en primer lugar, cuáles son las condiciones actuales de formación de biopelícula, tanto a nivel fisicoquímico, como microbiológico, en las secciones de tubería sumergidos en agua correspondiente a la salida de la etapa de filtración. Adicionalmente, los resultados permiten comparar cómo a través de la aplicación de los desinfectantes, estas condiciones varían, y finalmente, se hace la selección cuál de los tres desinfectantes evaluados presenta mayor remoción de biopelícula.

#### 3.1 Dosificación

Para llevar a cabo la metodología propuesta, mediante las ecuaciones descritas en el literal 2.3 se calculó la dosificación de cada desinfectante según el volumen de solución deseado, que para todos los casos es de 1 000 mL, obteniendo las siguientes dosificaciones.

**Tabla 3.**

*Dosificación de desinfectantes.*

<b>Desinfectante</b>	<b>Dosificación (en 1000 mL)</b>
Dióxido de cloro $\text{ClO}_2$	0,05 mL
Cloro $\text{Cl}_2$	0,3 mL
Hipoclorito de calcio $\text{Ca}(\text{ClO})_2$	7,7 g

**Nota.** La tabla presenta la dosificación a aplicar de cada desinfectante evaluado.

Para consignar los datos y resultados de los ensayos realizados, se enumeró cada pieza y cada experimento según el desinfectante a aplicar y así facilitar su identificación, tal como se muestra en la Tabla 3 y en la Figura 19.

**Tabla 4.**

*Identificación de piezas.*

# Pieza	Desinfectante	# Recipiente
1 (blanco)	NA	1
2 y 2.1*	Dióxido de cloro ClO <sub>2</sub>	2
3 y 3.1*	Cloro Cl <sub>2</sub>	3
4 y 4.1*	Hipoclorito de calcio Ca (ClO) <sub>2</sub>	4

**Nota.** Esta tabla representa la nomenclatura de cada pieza de tubería, el recipiente y solución de desinfectante en los que fueron sumergidas. Los datos marcados con (\*) corresponden a los duplicados; así como los marcados como (NA) a aquellos en los que no aplica.

**Figura 19.**

*Recipientes con respectiva pieza y desinfectante.*



**Nota.** La figura muestra cada recipiente con la respectiva pieza al inicio de la experimentación.

## **3.2 Parámetros Microbiológicos**

### **3.2.1 *E. Coli* y *Coliformes Totales***

A partir de los Anexos III y IV, se observa en primer lugar, que el agua a la salida de la etapa de filtración no representa un riesgo para el consumo humano, ya que cumple con los parámetros de calidad según la Norma 2115 de 2007. A causa de la baja incidencia de este parámetro, como posible causa de la formación de biopelícula; se decide no tomarlo en cuenta en la evaluación de los experimentos.

En cambio, el agua cruda tiene presencia de Coliformes Totales (259 UFC/ 100 mL), lo que representa un riesgo para la salud y no cumple con la norma mencionada anteriormente. Estos coliformes pueden estar asociados con la falta de tratamiento, y ya que este tipo de agua no será tomada en cuenta para el estudio, se descarta como posible riesgo que influya en la formación de biopelícula en la red de distribución de agua potable, en el Acueducto El Rosal.

### **3.2.2 *Pseudomonas*.**

Con base en los Anexos V al IX, se puede evidenciar que las *Pseudomonas*, son un tipo de microorganismo que no representa ningún riesgo para la calidad del agua potable en el municipio El Rosal. Lo anterior, ya que tanto en las muestras de agua cruda, de agua en la salida de la etapa de filtración y en los experimentos base, no hay presencia de este parámetro.

La posible causa, es desde un principio, el tratamiento de pre-oxidación con dióxido de cloro. Según Remache, se estima que al primer minuto de contacto de *P. Aureginosa* con dióxido de cloro, la estructura de la pared celular se rompe en un momento [22]. Además, teniendo en cuenta que el flujo es constante, se puede evidenciar claramente el efecto sobre el tratamiento, y por tanto en la red.

### 3.3 Parámetros Fisicoquímicos

#### 3.3.1 Hierro total (método de la Fenantrolina)

En primer lugar, es importante aclarar que se realizó la medición de este parámetro a las siguientes muestras de agua, con su correspondiente referencia:

- Muestra de agua cruda (MC).
- Muestra de agua de filtros (MF).
- Muestra de agua del experimento 2 y de su respectiva réplica (M2 – M2.1).
- Muestra de agua del experimento 3 y de su respectiva réplica (M3 – M3.1).
- Muestra de agua del experimento 4 y de su respectiva réplica (M4 – M4.1).

En cuanto a la aplicación del método, la concentración de hierro en las soluciones patrón, se determina por medio de la siguiente expresión:

#### Ecuación 10.

*Relación de cambio de concentración de una solución.*

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

Donde  $C_1$  corresponde a la concentración de la solución Stock de hierro (70 ppm);  $V_1$  al volumen de solución Stock de hierro, que se añade según cada patrón; y finalmente,  $V_2$  corresponde a 100 mL, que corresponde a la medida del aforo en cada patrón.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 5.**

*Concentración de los patrones.*

Patrón	Volumen Stock (mL)	C patrón (ppm)
0	0,0	0
1	0,1	0,07
2	0,5	0,35
3	1,0	0,70
4	5,0	3,50
5	10,0	7,00
6	25,0	17,50

**Nota.** La tabla representa la relación entre el volumen añadido de la solución Stock de hierro, con la concentración obtenida de cada patrón

Adicionalmente, las curvas espectrales obtenidas para cada muestra se observan en el Anexo IV; cada una con su respectivo ajuste en la región de máxima absorbancia. Así como también, los datos en específico están consignados.

Por otra parte, la concentración de hierro de cada muestra se obtiene a partir de la linealización de la curva de calibración, la cual relaciona la concentración de cada patrón con su respectiva absorbancia (tomada a la longitud de onda de máxima absorbancia de la curva espectral ajustada). La región útil está comprendida por los valores que cumplen la Ley de Lambert-Beer, es decir, la región que se ajuste a una línea recta que pase por el origen [17].

La Ley de Lambert-Beer, relaciona el coeficiente de absortividad molar ( $\epsilon$ ), la longitud de celda ( $b=1$  cm) y la concentración molar ( $c$ ); o en su defecto el logaritmo inverso de la transmitancia ( $T$ ), tal como se expresa en la Ecuación 11.

#### **Ecuación 11.**

*Ley de Lambert-Beer.*

$$A = \epsilon \cdot b \cdot c = -\log T$$

Con base en lo anterior, es posible relacionar esta Ley mencionada con la ecuación de la recta obtenida, ya que se cumple en los rangos de concentración evaluados; de la siguiente forma: En la ecuación de la recta (Ecuación 12), se conoce la pendiente ( $m$ ) y el intercepto ( $b$ ); por otra parte, ( $x$ ) representa la concentración de hierro y ( $y$ ) es equivalente a la absorbancia de la muestra, la cual fue medida junto con los patrones (muestras marcadas como M y BM, cuya diferencia representa la absorbancia real).

#### **Ecuación 12.**

*Ecuación de la recta con su respectivo ajuste.*

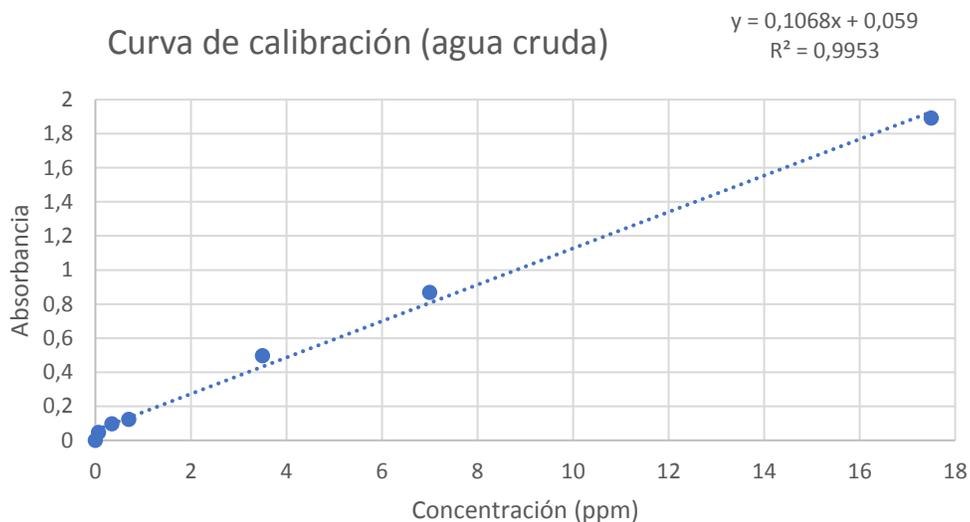
$$y = mx + b \Rightarrow A = m[Fe] + b$$

A continuación, se entra en detalle sobre los resultados obtenidos en cada una de las muestras.

3.3.1.a. Muestra de agua cruda (MC). A partir de la curva espectral y, por consiguiente, de la curva de calibración, fue posible obtener una concentración de hierro de 0,35 ppm aproximadamente. Lo anterior, coincide con el promedio de los valores obtenidos en los registros analizados en el capítulo anterior (0,40 ppm). Por lo cual, la muestra tomada representa las condiciones actuales del agua al ingreso del tratamiento. No obstante, no cumple con los parámetros establecidos por la Norma 2115 de 2007 (Límite máximo de hierro= 0,3 ppm). Sin embargo, con relación a las condiciones de formación de biopelícula, existe la posibilidad que este mineral contribuya al crecimiento de asociaciones de microorganismos.

**Figura 20.**

*Curva de calibración de la muestra analizada para agua cruda.*

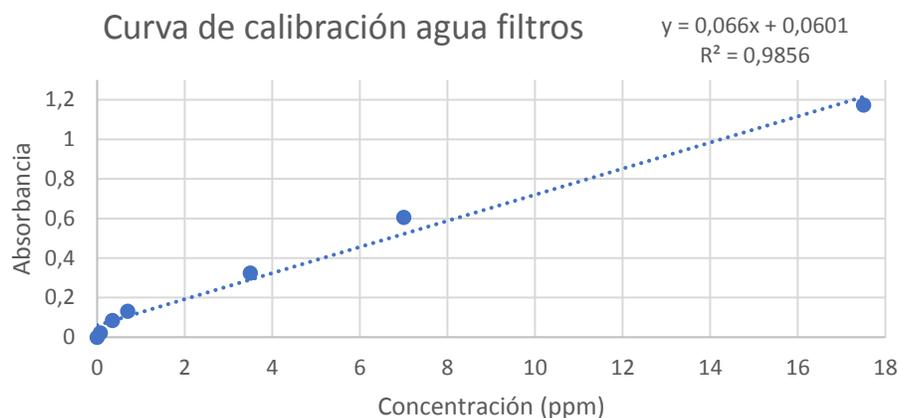


**Nota.** La figura representa para la muestra de agua cruda, la relación entre la concentración de los patrones y la absorbancia tomada a la máxima longitud de onda.

3.3.1.b. Muestra de agua de filtros (MF). Con base a la curva espectral y, por consiguiente, de la curva de calibración, fue posible obtener una concentración de hierro de 0,03 ppm aproximadamente. Lo anterior, coincide con el promedio de los valores obtenidos en los registros de agua potable tomados a la fecha de la muestra (0,05 ppm). Por lo cual, la muestra tomada representa las condiciones actuales del agua potable en la red. Adicionalmente, cumple con los parámetros establecidos por la Norma 2115 de 2007 (Límite máximo de hierro= 0,3 ppm). Con relación a las condiciones de formación de biopelícula, es posible descartar la posibilidad que este mineral contribuya al crecimiento de asociaciones de microorganismos en la red, ya que es una concentración muy baja.

**Figura 21.**

*Curva de calibración de la muestra analizada para agua de filtros.*



**Nota.** La figura representa para la muestra de agua de filtros, la relación entre la concentración de los patrones y la absorbancia tomada a la máxima longitud de onda.

3.3.1.c. Muestra de agua de los experimentos y de sus respectivas réplicas. A partir de la curva espectral y, por consiguiente, de la curva de calibración, fue posible obtener de forma aproximada, las siguientes concentraciones de hierro en partes por millón (ppm) respectivamente:

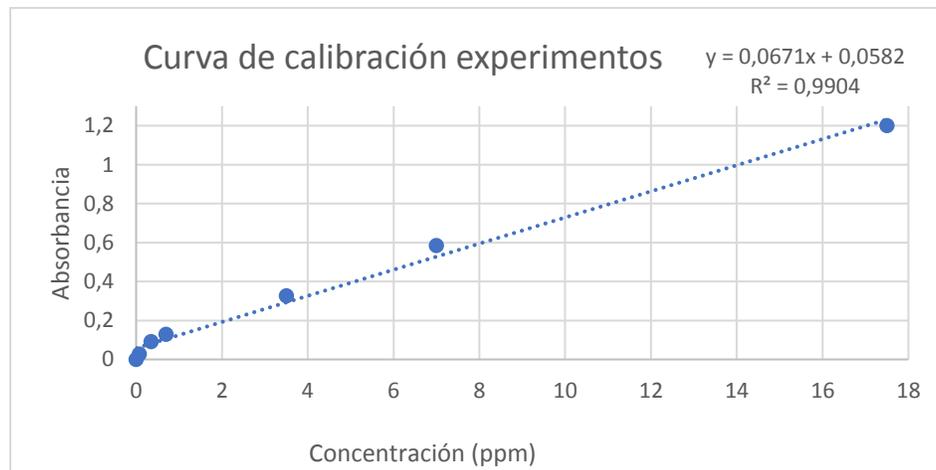
- M2 y M2.1: 0.04 ppm y 0,02 ppm
- M3 y M3.1: 0.05 ppm y 0,05 ppm

- M4 y M4.1: 0.02 ppm y 0,04 ppm

Lo anterior, coincide aproximadamente con lo obtenido en agua de filtros. Por lo cual, las piezas cubiertas con biopelícula no tuvieron incidencia sobre este parámetro de manera significativa, en las muestras provenientes de este tipo de agua. Adicionalmente, cumple con los parámetros establecidos por la Norma 2115 de 2007 (Límite máximo de hierro= 0,3 ppm). Con respecto a las condiciones de formación de biopelícula, es posible descartar la posibilidad que este mineral contribuya al crecimiento de asociaciones de microorganismos en la red, ya que su concentración en las muestras es muy baja y por tanto en las piezas de tubería.

**Figura 22.**

*Curva de calibración de las muestras analizadas para agua de los experimentos.*



**Nota.** La figura representa para las muestras de agua de los experimentos, la relación entre la concentración de los patrones y la absorbancia tomada a la máxima longitud de onda.

En cuanto a los resultados obtenidos por otros autores, también se consideró que el rango del parámetro de hierro total, para evaluar formación de biopelícula (0,08-0,41 ppm), está dentro de la norma, al igual que los resultados obtenidos en el presente estudio. Sin embargo, al considerar otras condiciones experimentales, tales como variación en las dosis de coagulantes y en las dosis de desinfectantes, hacen que, para efectos comparativos, no sean lo suficientemente relevantes [10].

### 3.3.2 Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Como fue descrito en capítulos anteriores la determinación de este parámetro tiene gran importancia ya que determina la presencia de material particulado en el agua que se puede asociar a grandes rasgos con la materia orgánica e inorgánica que favorece a la formación de biopelícula y en el caso de las soluciones con desinfectante ayuda a comprobar la remoción y desprendimiento de la biopelícula ya formada en cada pieza. Para esta determinación se siguió el procedimiento descrito en el literal 2.2.2, los datos registrados y las evidencias fotográficas se encuentran en los anexos IV y V respectivamente, mientras que los resultados obtenidos fueron consignados en la Tabla 6.

**Tabla 6.**

*Sólidos suspendidos totales SST.*

<b>Muestra</b>	<b>SST (mg/L)</b>
Cruda	92
Filtros	53
1 (blanco)	77
2	263
3	169
4	99
2.1*	233
3.1*	154
4.1*	74

**Nota.** La tabla muestra los resultados obtenidos tras la realización de la determinación de sólidos suspendidos totales de cada muestra de agua. Los datos marcados con (\*) corresponden a las réplicas.

Los resultados de esta determinación respecto al agua cruda comprueban el contenido de partículas (92 mg/L), que puede llegar a ser materia orgánica proveniente de la cosecha de peces que se realiza en estas aguas, este contenido como se ha mencionado anteriormente representa un factor favorecedor para el crecimiento y desarrollo bacteriano y por ende para la formación de biopelícula.

En cuanto al agua proveniente de la salida de filtros, debido a los tratamientos de coagulación, floculación y filtración a los que el agua ya fue sometida, se aprecia una reducción en los sólidos suspendidos totales (53 mg/L), que aunque refleja la importancia y efectividad de estos en la reducción de sólidos suspendidos en el agua, también muestra que es necesario realizar procesos como la desinfección para asegurar la descomposición de estas partículas que sirven de nutrientes a los microorganismos formadores de biopelícula que reducen la calidad del agua y que además pueden ser patógenos.

Para la determinación de los SST reales de cada ensayo de las soluciones con desinfectantes se les resta el valor de la muestra de filtros y del blanco para así cuantificar los sólidos suspendidos totales generados por el desprendimiento de biopelícula gracias a la acción de los desinfectantes, arrojando los siguientes resultados.

**Tabla 7.**

*Determinación de SST reales de cada ensayo.*

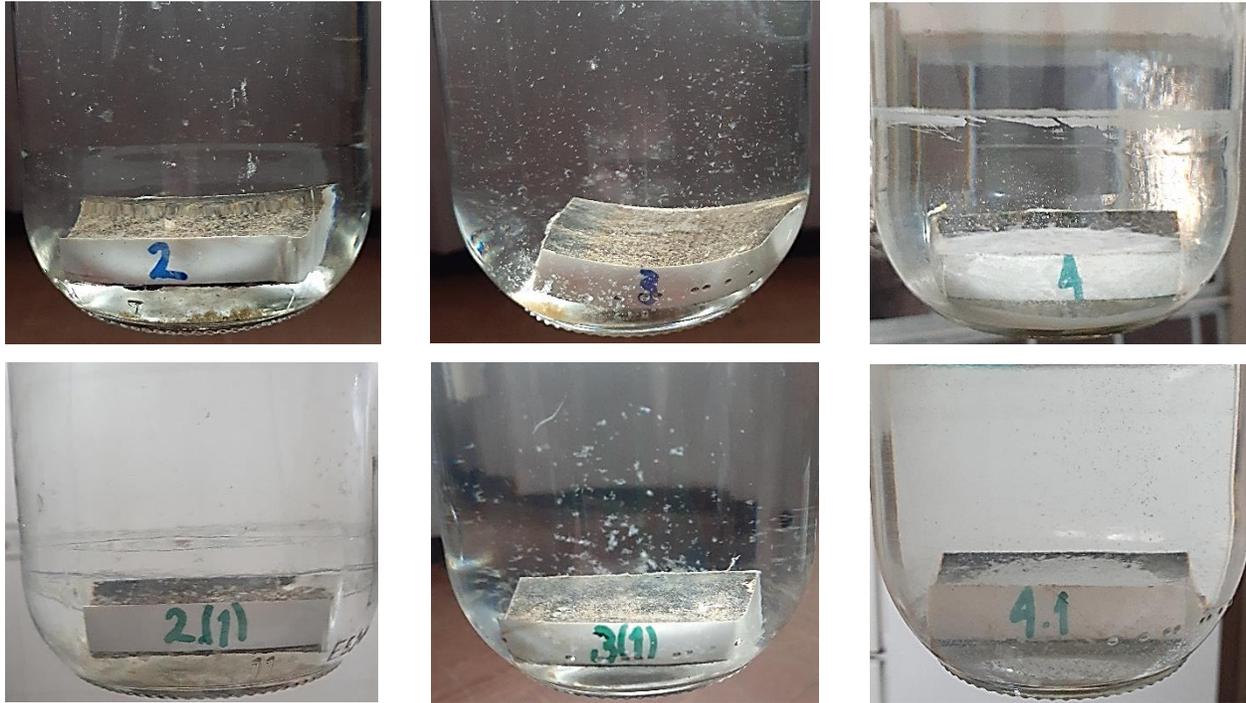
<b>Muestra</b>	<b>SST (mg/L)</b>
2	131
3	37
4	-33
2.1*	101
3.1*	22
4.1*	-58

**Nota.** La tabla registra los valores de SST obtenidos en cada ensayo y su réplica luego de restar el valor de la muestra de filtros y del blanco.

Respecto a las soluciones con desinfectantes, antes de la realización de pruebas en el laboratorio, la observación de los recipientes y el registro fotográfico dan un indicio respecto a cuál o cuáles de las soluciones a evaluar presentan mayor contenido de sólidos suspendidos al cumplirse el tiempo de experimentación. (ver figura 23).

### Figura 23.

Registro fotográfico de las soluciones al cabo de 10 días.

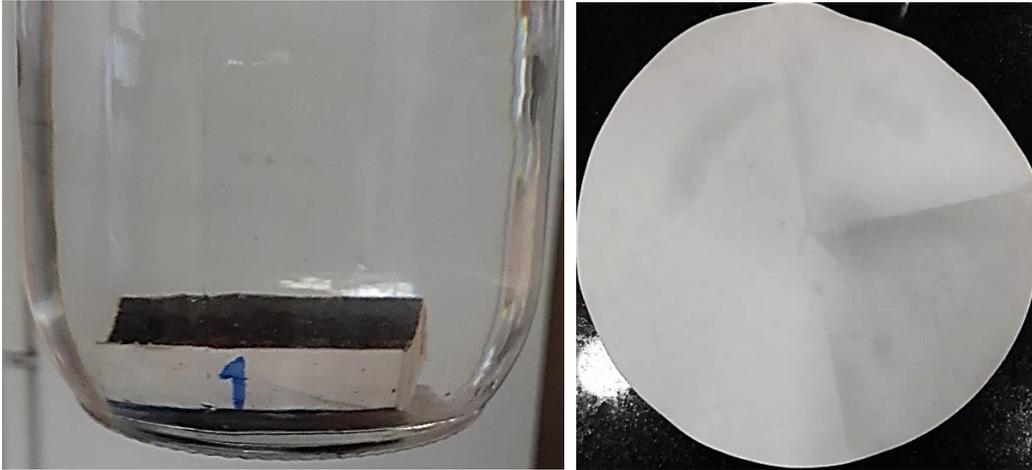


**Nota.** La figura muestra los sólidos en suspensión presentes en cada una de las soluciones al cumplir el tiempo de experimentación en los ensayos iniciales y sus respectivos duplicados.

En la Figura 23 se puede notar que las soluciones 2 ( $\text{ClO}_2$ ) y 3 ( $\text{Cl}_2$ ) tienen un contenido apreciable y fácilmente visible de sólidos suspendidos de color amarillento a lo largo de estas y en el fondo de los recipientes, mientras que en la solución 4 ( $\text{CaClO}_2$ ) se puede apreciar que no hay sólidos suspendidos amarillentos, sino que se presenta acumulación de hipoclorito en la superficie de las piezas, lo que puede indicar que la mayor parte de los sólidos que se encuentren suspendidos en esta muestra serán pequeños gránulos de residuo del desinfectante y no biopelícula removida.

## Figura 24.

*Registro fotográfico del blanco al cabo de 10 días.*



**Nota.** La figura representa los sólidos suspendidos en el blanco al cumplir el tiempo de experimentación.

En cuanto al blanco se puede apreciar que aparentemente y solo con el uso de los sentidos (inspección visual), no existe presencia de sólidos suspendidos en éste lo que representa una prueba del efecto de los desinfectantes en la remoción de biopelícula. (Ver figura 24)

Mediante la realización de la determinación en el laboratorio se encuentra que la solución 2 (dióxido de cloro  $\text{ClO}_2$ ), tanto en el primer ensayo como en su duplicado presentaron la mayor cantidad de sólidos suspendidos totales con valores de 131 mg/L y 101 mg/L respectivamente, la solución 3 (Cloro  $\text{Cl}_2$ ) registró una cantidad de sólidos suspendidos de 37 mg/L para el primer ensayo y 22 mg/L para el duplicado.

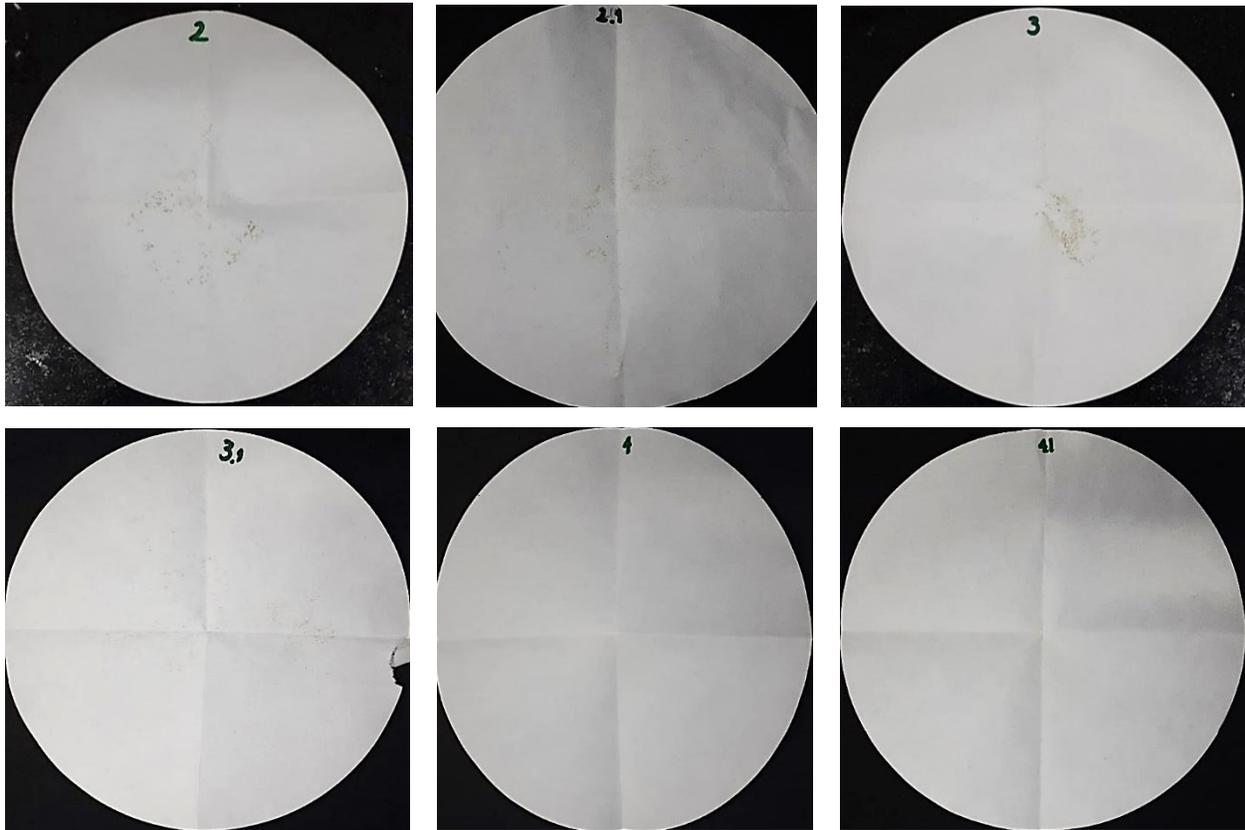
Mientras que la solución 4 (hipoclorito de calcio  $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ) luego de restar los valores de muestra de filtros y blanco registró valores negativos (-33 y -38 respectivamente), lo que puede indicar que este desinfectante tiene gran efecto en el control y eliminación de las partículas que estaban suspendidas en la muestra de agua, sin embargo, también muestra que no tuvo un efecto en la remoción de biopelícula.

Estos valores junto a las evidencias fotográficas (ver figura 23) permiten dar una primera apreciación de cuál de los tres desinfectantes probados tiene mayor efecto en la

remoción de biopelículas formadas en las paredes de las tuberías de la planta de tratamiento de agua potable PTAP El Rosal.

**Figura 25.**

*Sólidos suspendidos totales SST en las soluciones.*



**Nota.** La figura muestra los registros fotográficos de sólidos suspendidos totales SST en cada solución.

Los sólidos suspendidos cuantificados y observados son un indicio del desprendimiento de biopelícula que se dio gracias a la acción de los desinfectantes en la capacidad de adhesión de los microorganismos y la inhibición de estos, siendo así el dióxido de cloro el de mayor efecto.

Este resultado corrobora que el dióxido de cloro al reaccionar directamente con la pared celular de los microorganismos, penetra y oxida la matriz de polisacáridos que mantiene la biopelícula unida ocasionando su separación y por consiguiente la remoción de esta [24], lo que convierte a este agente en una alternativa eficaz para el control y eliminación de microorganismos durante el tratamiento del agua [11].

Con respecto a los resultados obtenidos de otros autores, también se asocia la turbidez con la cantidad de SST presentes en el agua. El rango obtenido en este parámetro, para evaluar condiciones de formación de biopelícula, es 0,7-2 NTU; lo cual está dentro de los límites permitidos por la norma, así como también para el caso del presente estudio, lo cual se puede observar en los registros del agua descritos en la parte 2.4.2.

Sin embargo, al considerar otras condiciones experimentales, tales como variación en las dosis de coagulantes y en las dosis de desinfectantes, hacen que, para efectos comparativos, no sean lo suficientemente relevantes [10].

### 3.3.3 Ensayo gravimétrico

Para verificar la reducción de biopelícula en las piezas de tubería se recurrió a un ensayo gravimétrico que se basa en la diferencia de pesos de cada pieza antes y después de sumergirlas en las soluciones de desinfectantes, como se muestra en la Ecuación 13.

Los datos se encuentran consignados en el Anexo IV y los resultados obtenidos se registraron en la Tabla 8.

#### Ecuación 13.

*Expresión para calcular la biopelícula reducida.*

$$\text{Reducción (g)} = \text{pieza con biopelícula formada (g)} - \text{pieza después de desinfección}$$

**Tabla 8.**

*Resultados ensayo gravimétrico.*

# Pieza	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	Reducción
1	25,4003	25,4057	-0,0054
2	32,0378	32,0059	0,0319
3	30,4448	30,4247	0,0201
4	23,7965	23,7957	0,0008
2.1*	28,8693	28,8377	0,0316
3.1*	27,9344	27,9125	0,0220
4.1*	25,5573	25,5568	0,0004

**Nota.** La tabla relaciona los pesos iniciales y finales de cada pieza y la reducción que presentaron después de la experimentación. Los datos marcados como (\*) corresponden a las respectivas réplicas.

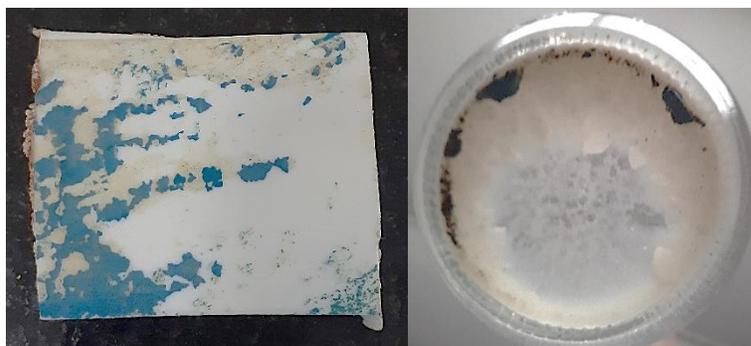
Mediante este ensayo se determinó en cuanto se redujo la biopelícula formada en cada pieza con el fin de corroborar los resultados obtenidos en las pruebas anteriores y seleccionar el desinfectante que tiene mayor efectividad al momento de reducir biopelículas formadas en las superficies de las tuberías.

Los datos de la tabla 6 indican que las piezas sumergidas en solución de dióxido cloro sufrieron una reducción mayor tanto en el ensayo inicial (0,0319 g) como en el duplicado (0,0316 g), las piezas que estuvieron sumergidas en la solución de cloro también presentaron una reducción apreciable de 0,0201 g y 0,0220 g.

Demostrando que estos agentes además de tratar el agua también son efectivos a la hora de atacar biopelículas ya formadas, sin embargo, entre estos el más eficaz es el dióxido de cloro, gracias a su alta solubilidad que le permite permanecer como gas disuelto facilitando que, como se mencionó anteriormente, atraviese las membranas celulares de los microorganismos presentes en la biopelícula y esta se vea reducida.[24] Mientras que las piezas sumergidas en hipoclorito de calcio tuvieron una reducción no representativa arrojando valores de 0,0008 g y 0,0004 g respectivamente, lo que indica que esta sustancia tiene un bajo efecto sobre la disminución de biopelículas.

**Figura 22.**

*Registro fotográfico de las piezas sumergidas en hipoclorito de calcio.*





**Nota.** La figura muestra los cambios que sufrieron las piezas sumergidas en solución de hipoclorito de calcio al cabo de 10 días.

Sin embargo, mediante la observación y registros fotográficos (ver figura 22) se logró apreciar su poder blanqueador además de haber retirado el recubrimiento de pintura de la pieza, mientras que su poder de desinfección del agua fue evidenciado en las pruebas microbiológicas realizadas, ratificando su importancia y amplio uso en la industria de tratamientos de agua principalmente en la desinfección de piscinas [12].

En cuanto a los datos del blanco consignados en la Tabla 8 se puede observar que la pieza sumergida solo en agua proveniente de filtros no presentó reducción, sino que aumentó su peso 0,0054 g, indicando que hubo una pequeña formación de biopelícula en la superficie de la pieza y que esta agua cuenta con las condiciones óptimas para ello, además, refleja que los desinfectantes aplicados en las demás soluciones contribuyen a la reducción de biopelícula.

Con respecto a los resultados obtenidos por otros autores, donde también se implementa para el estudio el ensayo gravimétrico (incluso en las mismas condiciones de humedad); se obtiene para sus ensayos, un porcentaje de remoción de biopelícula entre un 86 a un 99% con sus respectivos desinfectantes [10]. En el presente caso de estudio, se obtuvieron porcentajes de remoción mucho menores (%) en comparación con los resultantes del estudio de García y Torres, esto puede deberse a que la experimentación fue realizada a partir de piezas que ya tenían biopelícula que llevaba años en formación por lo que presentaban una fuerza de adhesión mayor que las formadas en 44 horas en la planta piloto Francisco Weisner. Sin embargo, los desinfectantes comparados en el

presente trabajo lograron reducir y remover la biopelícula ya formada, demostrando la importancia de los procesos periódicos o continuos de desinfección.

A partir de lo anterior es posible establecer, que la metodología podría considerarse efectiva, aunque también, al realizar las pruebas de diferencia de peso, se puede incurrir en bastantes errores técnicos, lo que podría alterar la pertinencia de los resultados.

Por último, respecto a la posibilidad de realizar un análisis estadístico, no se realizó este análisis debido a que solo se hizo una réplica por desinfectante en las que se mantuvo constante concentración, dosis, dosificación, volumen y tiempo. Por lo que no se obtendría un resultado estadísticamente significativo.

## 4. COSTOS

Se determina el costo de la implementación del desinfectante seleccionado mediante la experimentación (dióxido de cloro), en el proceso de desinfección en la planta de tratamiento convencional 1 del el Acueducto El Rosal, teniendo en cuenta los costos de instalación del montaje, equipos y desinfectante necesarios.

Se realiza únicamente para la planta convencional 1 ya fue allí donde se realizó el montaje para llevar a cabo la parte experimental del presente proyecto, además que servirá como referente de variabilidad de una futura aplicación de dióxido de cloro en las demás plantas que conforman el acueducto del Rosal.

### 4.1 Costos de instalación

Se establece el costo del sistema de dosificación de dióxido de cloro, teniendo en cuenta los precios actuales en el mercado en pesos colombianos (COP) de los materiales y equipos necesarios. Dando como resultado un total de **\$ 1 342 074 COP**.

**Tabla 9.**

*Costos de instalación.*

Ítem	Concepto	Valor unitario	Cantidad	Valor total
1	Tee en PVC SCH 40 de 6" [25]	\$ 197 581	2	\$ 395 162
2	Unión universal en PVC SCH 40 de 1 1/2" [26]	\$ 31 900	4	\$ 127 600
3	Reducción en PVC SCH 40 de 6" a 2" [27]	\$ 50 829	2	\$ 101 657
4	Reducción en PVC SCH 40 de 2" a 1 1/2" [28]	\$ 5 250	2	\$ 10 500
5	Galápago de 1 1/2" con reducción a 1/2" [29]	\$ 12 000	2	\$ 24 000
6	Codo en PVC SCH 40 de 1 1/2" [30]	\$ 8 300	2	\$ 16 600

7	Válvula en PVC SCH 40 de 1 1/2" [31]	\$ 49 900	2	\$ 99 800
8	Acople de macho SCH 40 1/2" [32]	\$ 390	2	\$ 780
9	Codo en PVC SCH 40 de 1/2" [33]	\$ 650	1	\$ 650
10	Tubería en PVC SCH 40 de 1 1/2 " por 3m [34]	\$ 35 900	1	\$ 35 900
11	Tubería en PVC SCH 40 de 1/2" por 1m [35]	\$ 3 817	1	\$ 3 817
12	Válvula en PVC SCH 40 de 1/2" [36]	\$ 21 900	1	\$ 21 900
13	Limpiador de PVC [37]	\$ 60 900	1	\$ 60 900
14	Pegante para PVC SCH 40 [38]	\$ 95 900	1	\$ 95 900
16	Bomba de dosificación [39]	\$ 346 908	1	\$ 346 908

**Total            \$ 1 342 074**

**Nota.** La tabla relaciona las cantidades y los costos totales de materiales y equipo de instalación del sistema de dosificación.

#### 4.2 Costos de desinfectante

Se determina el costo del desinfectante en relación con el agua a tratar, a partir del precio actual del mercado, según la necesidad de la PTAP El Rosal.

Se parte del cálculo de dosificación del desinfectante haciendo uso de la Ecuación 8, donde se relacionan la dosis (0,05 ppm), concentración (3000 ppm) y caudal tratado (10 L/s) así

$$Dosificación = 0,05 \text{ ppm} * \frac{10\ 000 \frac{ml}{s}}{3\ 000 \text{ ppm}} = 0,17 \frac{ml}{s} * \frac{3\ 600 \text{ s}}{1 \text{ h}} * \frac{1 \text{ L}}{1\ 000 \text{ ml}} = \mathbf{0,612 \text{ L/h}}$$

Teniendo en cuenta la vida útil del dióxido de cloro almacenado correctamente es de 30 a 40 días y partiendo que este tiene un costo de \$1 885 COP/L, se calcula el costo de desinfectante por mes obteniendo un total de **\$ 830 606,4 COP/mes**

Finalmente, la inversión inicial de la implementación del proceso de desinfección se compone de los costos de instalación del montaje y costos de desinfectante, lo que da un total de **\$ 2 172 680,4 COP**.

### **4.3 Costos por litro de agua tratado**

Partiendo de los anteriores cálculos se determina el costo de desinfectante por cada litro de agua tratada partiendo de la dosificación necesaria de dióxido de cloro para un litro, como se muestra a continuación.

$$Dosificación = 0,05 \text{ ppm} * \frac{1\ 000 \text{ ml}}{3\ 000 \text{ ppm}} = \mathbf{0,017 \text{ ml}}$$

$$Precio/L = \frac{1\ 885 \text{ COP} * 0,017 \text{ ml}}{1\ 000 \text{ ml}} = \mathbf{0,032 \text{ COP}}$$

El anterior cálculo se realizó con el fin de conocer el impacto de la desinfección del agua con dióxido de cloro sobre el valor del agua suministrada a los habitantes del Rosal.

## CONCLUSIONES

Se llegó a establecer que las condiciones actuales planteadas durante el estudio, tales como son algunos parámetros de calidad del agua cruda (pH, color, turbiedad, hierro total, SST, parámetros microbiológicos); no representan a corto plazo un factor de formación de biopelícula significativo. Lo anterior debido a que el uso del dióxido de cloro como pre oxidante tiene un efecto sobre la calidad del agua, haciendo que, desde la etapa de filtración, los parámetros se aproximen a los establecidos por la Resolución 2115 de 2007 para agua potable. Esto representa una ventaja para la etapa de desinfección, al reducir el uso de altas dosis de desinfectantes.

Se determinó que el efecto del tratamiento de agua con desinfectantes cambia los parámetros del agua proveniente del reservorio, ajustándolos a los establecidos para agua potable en la Resolución 2115 de 2007. Adicionalmente, es consecuencia no sólo de la etapa de desinfección sino de todas las que conlleva el tratamiento. Lo anterior se puede evidenciar a través del cambio en los parámetros de calidad tomados en las diferentes muestras (parámetros fisicoquímicos y microbiológicos).

Por medio del desarrollo experimental se seleccionó el dióxido de cloro como el desinfectante más efectivo, ya que presentó los valores más altos a través del ensayo gravimétrico (0,0319 g y 0,0316 g) y la determinación de sólidos totales (263 mg/L y 233 mg/L), evidenciando su acción en el control y disminución de biopelícula, además de remover el hierro manteniendo sus valores dentro de la normatividad vigente, reflejando su influencia positiva en la calidad del agua tratada.

A partir de los costos de instalación del montaje necesario para la dosificación y del dióxido de cloro necesario, se estableció el costo de implementación del proceso para la planta de tratamiento convencional 1 en \$ 2 172 680,4 COP.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Martínez. “Protocolo de pruebas dióxido de cloro (ClO<sub>2</sub>) para limpieza de tuberías”, Empresa de Acueducto y Alcantarillado y Aseo El Rosal (S.A.E.S.P). El Rosal, Cundinamarca. 19 octubre, 2019, pp. 2-3.
- [2] I. Gomes, M. Pereira, L. Simões, & M. Simões. “Influence of surface materials on biofilm formation.” *Viruses, Bacteria and Fungi in the Built Environment, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, p. 45-63, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85206-7.00013-7>. [Acceso: abril 17, 2022].
- [3] J. Chen, et al., “Effect of disinfectant exposure and starvation treatment on the detachment of simulated drinking water biofilms.” *GScience of The Total Environment*, vol. 807. 150896. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150896>. [Acceso: abril 17, 2022].
- [4] A. Vargas, et al. “Factores que favorecen el desarrollo y el crecimiento de biopelículas en las tuberías de los sistemas de distribución de agua potable”. Tesis pre, Licenciatura. Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia, 2004.
- [5] M.F. Gelves. “Deterioro de la calidad del agua por el posible desprendimiento de las biopelículas en las redes de distribución de agua potable”. Uniandes. 2005. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/10551>. [Acceso: mayo 22, 2022].
- [6] J. Knobelsdorf, R. Mujeriego (1987). “Crecimiento bacteriano en las redes de distribución de agua potable: una revisión bibliográfica”. *Ingeniería del agua*, Volumen 4, Número 2. [En línea]. Disponible: <https://core.ac.uk/download/pdf/41786545.pdf>. [Acceso: abril 20, 2022].
- [7] F. Ramírez. (2005). *Tratamientos de desinfección del agua potable*. Editorial Canaleduca. ISBN: 84-933694-3-8. [En línea]. Disponible: <https://bit.ly/3t6q4xO>.
- [8] Lenntech (s.f.). “¿Qué es la desinfección del agua?”. [En línea]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/que-es-desinfeccion.htm#ixzz7RIzfNUIa>. [Acceso abril 26, 2022].

- [9] Lenntech (s.f.). “Desinfectantes: Cloro”. [En línea]. Disponible en <https://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/quimica/desinfectantes-cloro.htm>. [Acceso: abril 17, 2022].
- [10] J. García, A. Torres. “Evaluación del Efecto de los Desinfectantes en la Disminución de la Biopelícula en la Tubería de la Planta Piloto Francisco Wiesner”, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América. Bogotá, Colombia, 2016.
- [11] Egestec. “Informe de gestión planta de tratamiento de agua potable (PTAP) El Rosal”, El Rosal, Cundinamarca, junio de 2021, pp.2-9.
- [12] Amoquímicos. (2022). “Hipoclorito de calcio: usos, características y precauciones”. [En línea]. Disponible en <https://bit.ly/3zd3986>. [Acceso: mayo 28, 2022]
- [13] Departamento de Salud y Servicios para Personas Mayores de New Jersey (s.f.). “Hoja informativa sobre sustancias peligrosas”. [En línea]. Disponible: <https://www.nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0323sp.pdf>. [Acceso: abril 28, 2022].
- [14] S. Betcher (2022). “Cloración con tabletas de Hipoclorito de Calcio: ¿Realidad o Ficción?”. [En línea]. Disponible: <https://purewater.com.co/cloracion-con-tabletas-de-hipoclorito-de-calcio-realidad-o-ficcion/>. [Acceso: abril 29, 2022].
- [15] Amoquímicos. (2022). “Desinfección de aguas residuales con hipoclorito de calcio: todo lo que debe saber”. [En línea]. Disponible en <https://www.amoquimicos.com/desinfeccion-aguas-residuales-con-hipoclorito>. [Acceso: abril 29, 2022].
- [16] Agencia para sustancias toxicas y el registro de enfermedades ATSDR. (2016). “Hipoclorito de calcio e hipoclorito de sodio (Calcium Hypochlorite / Sodium Hypochlorite).” [En línea]. Disponible en: <https://bit.ly/3z9Vwz9>. [Acceso: mayo 4, 2022].
- [17] A. Castillo, J. Tovar. “Guías de Laboratorio Química Industrial Inorgánica”, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. Enero, 2018, pp. 6-13, 24-25.

- [18] Higiene ambiental. (2019). "Color del agua, parámetro indicador de calidad". [En línea]. Disponible en: <https://higieneambiental.com/aire-agua-y-legionella/color-del-agua-parametro-indicador-de-calidad>. [Acceso: abril 19, 2022].
- [19] Lenntech (s.f.). "Turbidez". [En línea]. Disponible en <https://www.lenntech.es/turbidez.htm>. [Acceso: abril 19, 2022]
- [20] M. Mc Farlan, M. Doizer. "Problemas del agua potable: el hierro y el manganeso". [PDF]. Disponible en: <https://texaswater.tamu.edu/resources/factsheets/l5451sironandman.pdf>. [Acceso: abril 19, 2022].
- [21] J. Rueda, A. Martínez, D. Calvo. "Efecto del desprendimiento de las biopelículas formadas en una red de acuerdo sobre la calidad del agua". *Revista de Ingeniería*, Universidad de los Andes. No.39, pp. 6-11, mayo, 2013. [En línea]. Disponible: <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n39/n39a02.pdf>. [Acceso: abril 17, 2022].
- [22] J. Remache. "Evaluación de desinfectantes para la inhibición de microorganismos *Pseudomonas spp*, *Salmonella spp* y *Staphylococcus aureus*", tesis pre. Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2020
- [23] M. Trujillo. "Modelación física de biopelículas en redes de distribución de agua potable alimentadas con carbono orgánico disuelto". Proyecto de grado. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia, 2011. [En línea]. Citado el 31/05/2022. Disponible en <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/24666/u608036.pdf?sequence=1>
- [24] Lentech (s.f.). "Desinfectantes: Dióxido de cloro". [En línea]. Disponible. <https://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/quimica/desinfectantes-dioxido-de-cloro.htm>. [Acceso: junio 6, 2022]
- [25] Inversiones Proin. "Tee PVC presión 6 Gerfor". <https://inversionesproin.com/product/tee-pvc-presion-6/>. [Acceso: junio 8, 2022]
- [26] Homecenter. "Unión universal de 1 ½ pulg PVC para soldar". <https://onx.la/0bd63>. [Acceso: junio 8, 2022]
- [27] APEC. "Reducción bushing espiga x CEM 6 plg.x 2 pulg PVC C40". [http://deriego.com/index.php?id\\_product=724&controller=product](http://deriego.com/index.php?id_product=724&controller=product). [Acceso: junio 10, 2022]

- [28] Mercado Libre. “Buje Reducción Presión PVC 2” x 1 ½”.<https://onx.la/d23b4>. [Acceso: junio 8,2022]
- [29] Mercado Libre. “Abrazadera Galápago rápido Polietileno Riego 2 salida ½”. <https://onx.la/4702e>. [Acceso: junio 10, 2022]
- [30] Homecenter. “Codo 90 x 1.1/2 Presión”. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/04600/codo-90-x-11-2-presion/04600/>. [Acceso: junio 8, 2022]
- [31] Homecenter. “Válvula de bola DE 1 ½ pulg PVC para soldar”. <https://onx.la/d2d32>. [Acceso: junio 8, 2022]
- [32] Homecenter. “Adaptador Macho ½ Presión Propack 10 und”. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/74883/adaptador-macho-1-2-presion-propack-10-und/74883/>. [Acceso: junio 8, 2022]
- [33] Homecenter. “Codo 90 x ½ Presión”. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/04730/codo-90-x-1-2-presion/04730/>. [Acceso: junio 8, 2022]
- [34] Homecenter. “Tubo 1.1/2x3m Presión”. <https://onx.la/0c94d>. [Acceso: junio 8, 2022]
- [35] Homecenter. “Tubo 1/2x6m Presión 13.5-315 psi”. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/65889/tubo-1-2x6m-presion-135-315-psi/65889/?queryId=cd89f377-08ea-43f4-9245-7c23fcddcd55>. [Acceso: junio 8,2022]
- [36] Homecenter. “Válvula de Bola de ½ pulg PVC para soldar”. <https://onx.la/62b56>. [Acceso: junio 8, 2022]
- [37] Homecenter. “Removedor PVC ¼ galón 760gr” <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/22762/removedor-pvc-1-4-galon-760gr/22762/>. [Acceso: junio 8, 2022]
- [38] Homecenter. “Soldadura PVC 1/4GI 946ml”. <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/22764/soldadura-pvc-1-4gl-946ml/22764/>. [Acceso: junio 8,2022]
- [39] Quimiopool. “Bomba peristáltica 1,5 lts”. <https://www.quimipool.com/817-bomba-peristaltica-15-lts-h.html>. [Acceso: junio 11 ,2022]

- [40] J. Córdoba, J. Dueñas. “Análisis comparativo de la eficiencia de la filtración con material vítreo frente al uso de antracita-arena para remoción de hierro y manganeso, en las aguas subterráneas del acueducto de Funza”. Proyecto de grado. Facultad de Ingeniería. Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia, 2016. [En línea]. Disponible [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/51](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/51). [Acceso: junio 13,2022]
- [41] J. López. “Verificación de un sistema de filtración descentralizado diseñado para la vereda alto guapaya, vista hermosa meta: revisión de literatura”. Proyecto de grado. Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia, 2021. [En línea]. Disponible <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/54285/Trabajo%20de%20grado%20Gabriel%20Lopez.pdf?sequence=1>. [Acceso: junio 13,2022].
- [42] “Microbial communities of biofilms developed in a chlorinated drinking water distribution system: A field study of antibiotic resistance and biodiversity”. *Science of the Total Environment*. Vol.774, No.145113, febrero, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145113> [Acceso: julio 22, 2022].
- [43] E. Torrejano. “PARÁMETROS CRÍTICOS DEL AGUA CRUDA: Manganeso soluble e insoluble, ácidos húmicos, cianobacterias, entre otros”. EGESTEC. Bogotá, 2 de noviembre de 2021. pp 6-7.
- [44] BRINSA. “Ficha de seguridad Cloro”. (2018). [En línea]. Disponible en <http://www.brinsaquimica.com.co/wp-content/uploads/2018/07/3.Ficha-de-Seguridad-Cloro.pdf> [Acceso : julio 20, 2022]
- [45] IBAL. “Análisis de precio de mercado” (2017). [En línea] Disponible en <https://contratacion.ibal.gov.co/documents/2018/200/AYn6bs8iCLwwC0y9F2YRV6YfFvbNP1ajBnTtDvjH.pdf> [Acceso: julio 20, 2022]
- [46] ARL SURA. “Manejo seguro de hipoclorito de calcio”. [En línea] Disponible en [https://www.arlsura.com/images/stories/documentos/hipoclorito\\_calcio\\_bflores.pdf](https://www.arlsura.com/images/stories/documentos/hipoclorito_calcio_bflores.pdf) [Acceso: julio 23, 2022]
- [47] Llano Químicos. “Hipoclorito de calcio al 70% x Kilo”. [En línea] Disponible en <https://llanoquimicos.com/es/productos/hipoclorito-de-calcio-al-70> [Acceso: julio 20, 2022]

- [48] A. Navarro. “Estudio de la formación y eliminación del fouling, biofouling y biofilms en la industria láctea”. Tesis doctoral. Facultad de veterinaria. Universidad Autónoma de Barcelona. Balleterra. 2017. [En línea] Disponible en <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/458695/aegn1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Acceso: julio 23, 2022]
- [49] O. D’Angelo. “Biopelículas fototróficas, ¿qué longitudes de onda lumínica favorecen su desarrollo y diversidad? Ejemplo de enseñanza de fundamentos de ecología microbiana desde una práctica sencilla de laboratorio escolar”. *Escuela sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*. Vol. 14. No.3. pp 647-652, julio. 2017. DOI:[http://dx.doi.org/10.25267/Rev\\_Eureka\\_ensen\\_divulg\\_cienc.2017.v14.i3.10](http://dx.doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2017.v14.i3.10) [Acceso: julio 23, 2022]
- [50] G. Tirado. “Evaluación de bacterias asociadas a microalgas con potencial como bacterias promotoras de crecimiento en *Chaetoceros calcitrans*”. Tesis maestría. Centro de investigaciones biológicas del noreste. La Paz, Baja California. 2021. [En línea] Disponible en [http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/3100/gonz%c3%a1lez\\_g%20TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/3100/gonz%c3%a1lez_g%20TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [Acceso: julio 23, 2022]
- [51] J. Vázquez. “Formación de biopelículas por cianobacterias: el papel de la comunicación microbiana”. Tesis doctoral. Centro de investigación y de estudios avanzados. Instituto Politécnico Nacional. Guanajuato, México. 2017. [En línea] Disponible en <https://repositorio.cinvestav.mx/bitstream/handle/cinvestav/1570/SSIT0015077.pdf?sequence=1> [Acceso: julio 23, 2022]
- [52] E. González. “Formación y desarrollo de biofilms: su impacto en los sistemas de abastecimiento y distribución de agua potable”. Facultad de Ciencias Veterinarias. Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Argentina. 2016. [En línea] Disponible en [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/66667/Documento\\_completo\\_.pdf?sequence=1](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/66667/Documento_completo_.pdf?sequence=1) [Acceso: julio 23, 2022]
- [53] M. González. “Capítulo VI Discusión”. Universidad de las Américas Puebla. [En línea] Disponible en

- [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lbc/gonzalez\\_pena\\_ma/capitulo6.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lbc/gonzalez_pena_ma/capitulo6.pdf) [Acceso: julio 23, 2022]
- [54] L. Carvajal, A. Gomez, S. Ochoa. “Simulación de un lavado hidráulico en tuberías para el control del crecimiento de biopelícula”. *DINA*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia vol.74, no.152, 2007. [En línea]. Disponible en [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532007000200006](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532007000200006) [Acceso: julio 24, 2022]
- [55] P. Reyes del Toro, J. Saldarriaga “Comportamiento de biopelículas luego de lavados sucesivos en tuberías de agua a presión”. *Revista de ingeniería*. No.22. pp. 142-150. Noviembre, 2005. [En línea] Disponible en [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-49932005000200017](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932005000200017) [Acceso: julio 24, 2022]
- [56] L. Muñoz. “Velocidad de desprendimiento de las biopelículas en tuberías de distribución de agua potable”. Informe Final. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. Enero, 2005. [En línea] Disponible en <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/10625/u258769.pdf?sequence=1> [Acceso: julio 24, 2022]
- [57] A. Donoso. “Efecto de los materiales de las tuberías en la generación de biopelículas en redes de distribución de agua potable”. Tesis de maestría. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes. Bogotá, 2009. [En línea] Disponible en <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/11077/u371953.pdf?sequence=1> [Acceso: julio 24, 2022].
- [58] “Nitrosamines from pipeline materials in drinking water distribution systems”. *Journal AWAA*. Vol. 103, No. 10, pp.76-83, oct., 2011, DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2011.tb11549.x>. [Acceso: julio 24, 2022].
- [59] T. Girón. “Preparación de una Solución de Hipoclorito de Calcio para desinfección de agua” [En línea] Disponible en <https://slidetodoc.com/preparacin-de-una-solucin-de-hipoclorito-de-calcio/> [Acceso julio 28, 2022]
- [60] EPA. “Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual”. Abril, 1999. [Acceso: julio 28, 2022]

[61] Loudon Water “Calidad de agua potable Reporte anual”. Sistema Central. 2015.  
[En línea] Disponible en [https://www.loudonwater.org/sites/default/files/15007%20Loudoun%20Water%20QR%20Central\\_SP%20v2.pdf](https://www.loudonwater.org/sites/default/files/15007%20Loudoun%20Water%20QR%20Central_SP%20v2.pdf) [Acceso: julio 28, 2022]

## **ANEXOS**

## ANEXO I

### Procedimiento de instalación de sistema hidráulico para proyecto de investigación sobre Evaluación del Efecto de Desinfectantes en la Disminución de Biopelícula en Redes de Distribución de Agua Potable. Código IDI-16. Fecha: 16 de marzo de 2022. (Adaptación).

#### Actividades preliminares:

- Revisión y autorización de parte del cliente y de personal de Egestec para el desarrollo de la instalación (Orden de servicio, Procedimientos, Remisiones).
- Cálculo de materiales
- Se requiere que se realice apagado de la planta de ingreso y cerrar los filtros, se debe purgar por completo la planta, sacarle toda el agua desde los filtros y cerrar las válvulas, por aproximadamente 6 horas, para realizar esta intervención de la tubería

#### Herramientas:

Ítem	Cantidad	Unidades
1	Llave de Tubo	1
2	Taladro	1
3	Cegueta	1
4	Destornilladores	1
5	Alicate	1
6	Martillo de goma	1
7	Llaves torx	1
8	Metro 1 mt.	1
9	Llaves Bristol	1

#### Materiales:

Ítem	Cantidad	Unidades
1	Tee en pvc SCH 40 de 6"	2
2	Unión Universal en pvc SCH 40 de 1 1/2"	4
3	Reducción en pvc SCH 40 de 6" a 2"	2
4	Reducción en pvc SCH 40 de 2" a 1 1/2"	2
5	Collarín o galápago de 1 1/2" con reducción a 1/2" y tornillería	2
6	Codo en pvc SCH 40 de 1 1/2"	2
7	Válvula en pvc SCH 40 de 1 1/2"	2
8	Acople de macho SCH40 1/2"	2
9	Miple 10 cm 1/2"	1
10	Codo en pvc SCH 40 de 1/2"	1
11	Acoples para manguera de dosificación	1
12	Tubería en pvc SCH 40 de 1 1/2" por 3 mtrs	1
13	Tubería en pvc SCH 40 de 1/2" por 1 mtrs	1
14	Válvula en pvc SCH 40 de 1/2"	1
15	Manguera de dosificación 3 mtrs	1
16	Bomba de dosificación de 6 l/h	1
17	Limpiador de PVC	1
18	Pegante para pvc SCH 40	1

### Metodología de la instalación:

1. Se toma medida entre válvula y lugar de ubicación de la Tee previo a desfogue de gases, así como medida luego de válvula en donde se encuentra un codo, esta medida debe establecerse desde el codo a la ubicación de Tee. Estas medidas se toman con el fin de evaluar el distanciamiento que se contempla de ancho para realizar la instalación a implementar.
2. Después de estos datos, se debe lijar el tubo ya existente en las dos puntas donde se va a cortar
3. Se corta el tubo para adaptación de cada Tee
4. Con limpiador se aplica en ambos extremos de la tubería donde va a estar soldado en ambos costados para implementación de cada Tee.
5. Después de limpiar presentamos la tubería en este punto
6. Se inicia colocando los accesorios colocando las Tee en ambos costados, recordar que estas tienen que quedar al mismo nivel del piso, Se soldan.
7. Se coloca buje de 6" a 2" en cada extremo de la Tee, se solda,
8. Luego se coloca buje de 2" a 1 ½" en cada extremos de las Tee, se soldan,
9. Se toma un miple de tubo por lado y lado de medidas de acuerdo al espacio que se cuente para instalación de la intervención de la tubería.
10. De acuerdo a la imagen, se continua con la instalación de las piezas en sentido horizontal, por tanto, se continúa ubicando las dos universales, entre ellas dos miples de acuerdo a la distancia que se contemple para empatar con la tubería vertical.
11. Después se adiciona miple de tubería, se coloca el galápago 1 ½" a 1/2"
12. Posteriormente se adiciona miple de acuerdo a medidas para empatar mediante un codo con la tubería en la que se tiene válvula de apertura.
13. Posteriormente se adiciona miple para colocar la válvula
14. Se adiciona miple para colocar galápago de 1 ½" a 1/2" y se empara con la reducción que va conectada directamente a la Tee.

A continuación, en la figura 1 se muestra el proceso de instalación de la prueba

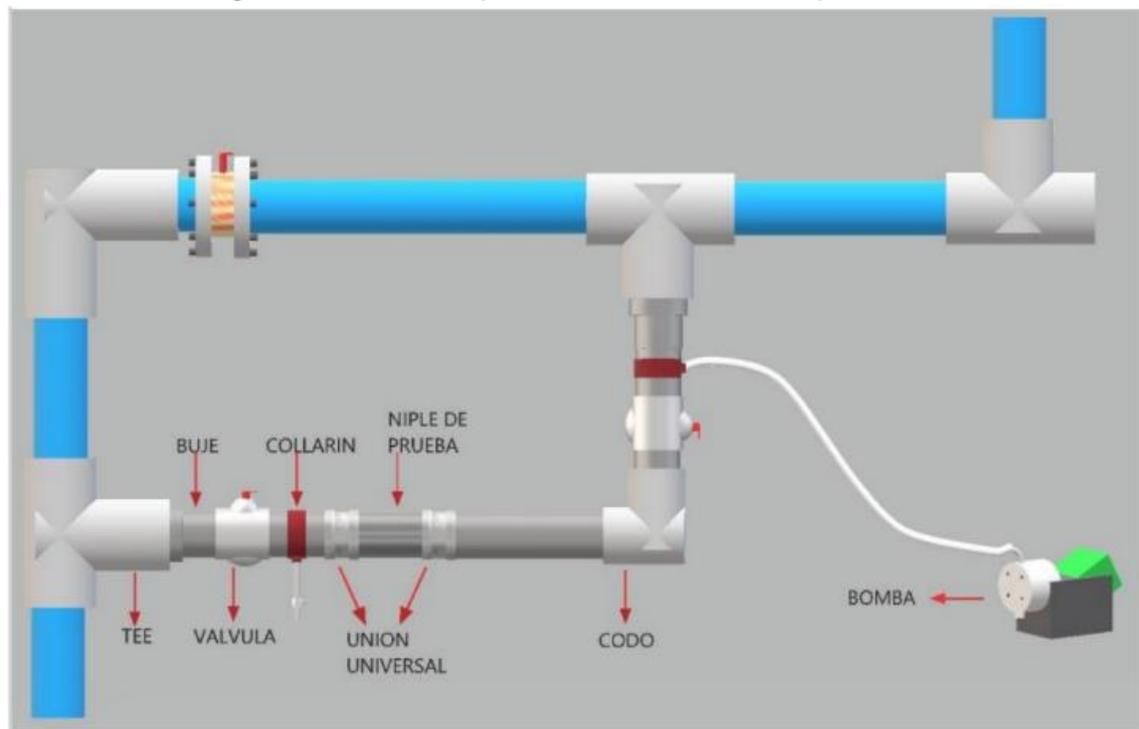


Figura 1. Proceso de pruebas en planta piloto

## ANEXO II.

### REGISTROS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA CRUDA (\*NR: NO REGISTRA)

FECHA	Color UPC	Turbiedad NTU	pH	Hierro mg/L	CIO2 ppm
01-oct	98	11,2	7,1	0,2	0,2
02-oct	124	11	7,3	0,4	0,2
03-oct	115	10	7,2	0,44	0,2
04-oct	126	10,1	7,6	0,29	0,2
05-oct	117	10	7,4	0,2	0,2
06-oct	137	13	6,9	0,3	0,2
07-oct	139	13,6	7	0,35	0,2
08-oct	160	13,8	7,1	0,3	0,2
09-oct	150	12,9	7	0,3	0,2
10-oct	120	7,9	7,3	0,21	0,2
11-oct	154	13	7,2	0,4	0,18
12-oct	94	7	7,5	0,67	0,18
13-oct	148	12	7	0,4	0,18
14-oct	156	13,2	7	0,3	0,18
15-oct	118	11	6,9	0,56	0,18
16-oct	168	12,6	7	0,4	0,18
17-oct	154	11	7,1	0,3	0,18
18-oct	96	6	6,7	0,33	0,18
19-oct	105	8,3	7,4	0,4	0,18
20-oct	111	9,6	7	0,3	0,18
21-oct	117	10	7,2	0,46	0,18
22-oct	122	10	7,7	0,4	0,18
23-oct	112	9	7,6	0,42	NR
24-oct	93	8,3	7,1	0,5	0,18
25-oct	103	5,8	6,9	0,5	0,18
26-oct	74	3,5	7,1	0,72	0,18
27-oct	98	4,3	7	0,6	0,18
28-oct	110	4,7	7,1	0,72	NR
29-oct	96	3,8	6,9	0,64	NR
30-oct	106	4,2	7	0,52	NR
31-oct	98	3,2	6,8	0,71	0,18
01-nov	102	5,4	7	0,61	0,18
02-nov	96	5	6,9	0,51	0,18
03-nov	87	6,8	6,9	0,48	0,18

FECHA	Color UPC	Turbiedad NTU	pH	Hierro mg/L	CIO2 ppm
04-nov	92	4,8	7,1	0,52	0,18
05-nov	78	4,1	7	0,48	NR
06-nov	79	3,9	7	0,46	NR
07-nov	74	3,7	7	0,52	NR
08-nov	106	6,1	7,1	0,65	0,18
09-nov	120	5,7	7,2	0,68	0,18
10-nov	109	8,3	7,1	0,52	0,18
11-nov	110	8,8	7	0,5	0,18
12-nov	106	8	7	0,4	0,18
13-nov	110	10	6,9	0,41	0,18
14-nov	120	11,8	7	0,39	0,18
15-nov	129	12,2	7	0,28	0,18
16-nov	117	11,2	6,9	0,4	0,18
17-nov	83	4	6,9	0,4	0,18
18-nov	73	4,5	7,1	0,45	0,18
19-nov	81	4,3	7	0,47	0,18
20-nov	79	4,6	7	0,26	0,18
21-nov	73	4,1	7	0,21	0,18
22-nov	128	10,6	7,2	0,61	0,18
23-nov	111	10	7	0,44	0,18
24-nov	106	4,5	7	0,3	0,18
25-nov	97	4	7,4	0,38	0,18
26-nov	101	4,5	7,2	0,42	0,18
27-nov	92	4,6	7,4	0,53	0,18
28-nov	100	4,3	7	0,39	0,18
29-nov	91	3,6	7,2	0,41	0,18
30-nov	97	3,8	7,3	0,38	NR
01-dic	83	5,7	7,1	0,3	0,18
02-dic	87	5,4	7,1	0,45	0,18
03-dic	79	4,7	7	0,51	0,18
04-dic	81	5,2	7,1	0,54	0,18
05-dic	99	5	7	0,4	0,18
06-dic	66	3,1	7,5	0,3	0,18
07-dic	63	3,5	6,9	0,28	0,18

FECHA	Color UPC	Turbiedad NTU	pH	Hierro mg/L	CIO2 ppm
08-dic	72	4,1	7,1	0,3	0,18
09-dic	128	11,5	7,4	0,64	0,18
10-dic	110	10	6,9	0,4	0,18
11-dic	101	7,3	6,8	0,45	0,18
12-dic	80	4,5	7	0,4	0,18
13-dic	72	5,9	6,9	0,31	NR
14-dic	73	3,9	7	0,39	0,18
15-dic	77	4,3	7,3	0,3	0,18
16-dic	82	4,8	7,1	0,4	0,18
17-dic	93	7,2	6,9	0,38	0,18
18-dic	90	6,8	7	0,4	0,18
19-dic	83	7,2	7,3	0,49	NR
20-dic	79	8,9	6,9	0,4	0,18
21-dic	105	8,5	7,1	0,32	0,18
22-dic	141	11,1	7	0,3	0,18
23-dic	146	9,8	7,2	0,53	0,18
24-dic	128	10,2	7,1	0,37	0,18
25-dic	139	11,3	7,1	0,44	0,18
26-dic	144	11	7,1	0,4	0,18
27-dic	126	9,8	7	0,51	0,18
28-dic	114	9	7	0,38	0,18
29-dic	117	10,6	7,1	0,44	NR
30-dic	103	8,9	7	0,3	0,18
31-dic	97	5,7	7,1	0,51	0,18
01-ene	87	6,7	7,2	0,44	0,18
02-ene	120	6,9	7,1	0,44	0,18
03-ene	93	4,9	7,4	0,58	NR
04-ene	108	10	6,9	0,4	0,18
05-ene	110	12	7,1	0,47	0,18
06-ene	75	10	7	0,51	0,18
07-ene	203	12,3	7,3	0,41	0,18
08-ene	119	11,2	7,1	0,4	0,18
09-ene	107	12	7	0,38	0,18
10-ene	108	13	7,8	0,47	0,18

FECHA	Color UPC	Turbiedad NTU	pH	Hierro mg/L	ClO2 ppm
11-ene	130	12,1	7,6	0,4	0,18
12-ene	116	11,3	7,2	0,37	0,18
13-ene	57	5,1	7,3	0,4	0,18
14-ene	52	4,3	7,3	0,39	0,15
15-ene	56	4,1	7,3	0,33	0,15
16-ene	63	4,4	7,3	0,48	0,15
17-ene	82	6	7,4	0,51	0,15
18-ene	72	6,5	7,2	0,48	0,15
19-ene	55	4,5	6,8	0,44	0,15
20-ene	63	4,8	7	0,3	0,1
21-ene	64	5,1	7,1	0,52	0,15
22-ene	101	12	6,9	0,3	0,15
23-ene	104	13,6	7,1	0,4	0,15
24-ene	87	9,9	7	0,5	0,15
25-ene	124	15	7,2	0,39	0,15
26-ene	69	7,6	7,3	0,44	0,18
27-ene	124	14,9	7	0,3	0,15
28-ene	120	13,2	7,2	0,4	0,15
29-ene	127	8,7	6,4	0,4	0,15
30-ene	107	6,4	7,1	0,41	0,15
31-ene	88	4,8	7	0,44	0,15
01-feb	111	7,5	7	0,35	0,15
02-feb	103	13,7	6,8	0,39	0,15
03-feb	98	12,1	7	0,41	0,15
04-feb	73	9,8	7	0,43	NR
05-feb	119	11	6,9	0,38	0,15
06-feb	122	9,8	7,1	0,4	0,15
07-feb	92	10,5	7	0,31	0,15
08-feb	100	10	7	0,4	0,15
09-feb	71	5,8	6,9	0,22	NR
10-feb	82	3,7	6,8	0,49	0,15
11-feb	55	3,5	7,1	0,2	0,15
12-feb	56	6,6	7	0,47	0,15
13-feb	88	8,6	7	0,25	0,15
14-feb	78	6	6,9	0,3	0,15
15-feb	79	7	7	0,33	0,15
16-feb	80	5,8	7,1	0,4	0,15
17-feb	78	6,3	7	0,3	0,15

FECHA	Color UPC	Turbiedad NTU	pH	Hierro mg/L	ClO2 ppm
18-feb	85	7,6	7,1	0,4	0,15
19-feb	88	8,1	7	0,5	0,15
20-feb	100	9,3	7,3	0,3	0,15
21-feb	103	9,8	7,6	0,4	0,15
22-feb	101	8,7	7,2	0,41	0,15
23-feb	104	8,6	7,2	0,51	0,15
24-feb	113	8,8	7,3	0,42	0,15
25-feb	120	9,4	7,2	0,25	0,15
26-feb	116	9,7	7,3	0,31	NR
27-feb	124	8,9	7,2	0,35	0,15
28-feb	88	5,9	7,1	0,3	0,15
01-mar	92	6	7,3	0,4	0,15
02-mar	66	4,6	7,3	0,3	0,15
03-mar	51	3,8	7,4	0,19	0,15
04-mar	86	6	7	0,4	0,15
05-mar	98	6,8	7,3	0,38	0,15
06-mar	89	7	7,7	0,3	0,15
07-mar	78	5,9	7,5	0,19	0,15
08-mar	88	7,8	8,1	0,14	0,15
09-mar	91	8	7,2	0,3	0,15
10-mar	68	5	7,3	0,3	0,15
11-mar	55	4,2	7,9	0,42	0,15
12-mar	89	6,7	7,8	0,2	0,15
13-mar	50	9,1	7,8	0,45	0,15
14-mar	92	8,5	7,8	0,41	0,15
15-mar	88	8,1	7,2	0,3	0,15
16-mar	89	8	7,3	0,31	0,15
<b>REGISTROS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE FILTROS</b>					
FECHA	PH	Turbiedad NTU	CL res. (ppm)		
01-oct	6,5	0,4	1,7		
02-oct	6,8	0,5	1,6		
03-oct	6,5	0,5	1,6		
04-oct	6,6	0,3	1,6		
05-oct	6,5	0,7	1,8		
06-oct	6,1	0,9	1,6		
07-oct	6,6	0,6	1,4		
08-oct	6,6	0,4	1,6		
09-oct	6,5	0,6	1,4		

FECHA	PH	Turbiedad NTU	CL res. (ppm)
10-oct	6,6	0,6	1,4
11-oct	6,4	0,6	1,6
13-oct	6,6	0,7	1,6
14-oct	6,5	0,6	1,5
15-oct	6,5	0,7	2
16-oct	6,5	0,5	1,6
17-oct	6,6	0,5	1,7
19-oct	6,7	0,6	1,8
20-oct	6,6	0,3	1,9
21-oct	6,5	0	1,8
22-oct	5,9	NR	1,9
23-oct	6,4	0,8	1,6
24-oct	6,5	NR	1,5
25-oct	6,4	0,6	1,8
26-oct	6,3	0,5	1,1
27-oct	6,2	0,19	1,03
28-oct	6,6	0,5	1,7
29-oct	6,3	0,6	1,9
30-oct	6,3	0,8	1,4
31-oct	6,5	0,6	1,8
01-nov	6,6	0,7	1
02-nov	6,5	0,7	1,21
03-nov	6,6	0,8	1,3
04-nov	6,6	0,7	1,32
05-nov	6,5	0,3	1,4
06-nov	6,4	0,5	1,22
07-nov	6,7	0,7	1,27
08-nov	6,4	0,6	1,4
09-nov	6,6	0,5	1,3
10-nov	6,8	0,87	1,21
11-nov	6,8	0,7	1,17
12-nov	6,4	0,6	1,4
13-nov	6,5	0,5	1,4
14-nov	6,3	0,8	1,3
15-nov	6,3	0,5	1,3
16-nov	6,4	0,4	1,4
17-nov	6	0,7	2
18-nov	6,5	0,6	1,6

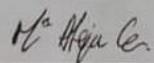
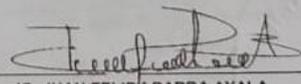
FECHA	PH	Turbiedad NTU	CL res. (ppm)
19-nov	6,3	0,7	2,3
20-nov	6,5	0,6	1,6
21-nov	6,3	0,6	2
22-nov	6,5	0,5	1,8
23-nov	6,6	0,7	2,2
24-nov	6,5	0,6	1,4
25-nov	6,2	0,7	1,7
26-nov	6,3	0,6	1,7
27-nov	6,5	0,7	1,9
28-nov	6,6	0,5	1,8
29-nov	6,7	0,6	1,42
30-nov	6,5	0,7	1,38
01-dic	6,4	0,6	1,4
02-dic	6,4	0,6	1,8
03-dic	6,6	0,2	1,4
04-dic	6,6	0,8	1,41
05-dic	6,5	0,6	1,8
06-dic	6,4	0,3	1,6
07-dic	6,4	0,6	1,4
08-dic	6,5	0,5	1,5
09-dic	6,4	0,8	1,8
10-dic	6,3	0,9	1,7
11-dic	6,6	0,2	1,6
12-dic	6,5	0,5	1,6
13-dic	6,5	0,6	1,3
14-dic	6,4	0,5	1,6
15-dic	6,5	0,6	1,6
16-dic	6,5	0,6	1,3
17-dic	6,4	0,3	1,6
18-dic	6,5	0,5	1,5
19-dic	6,4	0,6	1,5
20-dic	6,4	0,6	1,7
21-dic	6,5	0,6	1,4
22-dic	6,6	0,3	1,6
23-dic	6,4	0,5	2,1
25-dic	6,5	0,6	1,6
26-dic	6,5	0,7	NR
27-dic	6,7	0,4	1,28
28-dic	6,5	0,6	1,6

FECHA	PH	Turbiedad NTU	CL res. (ppm)
29-dic	6,6	0,6	1,32
30-dic	6,5	0,5	1,8
31-dic	6,4	0,5	1,4
01-ene	6,7	0,6	1,3
02-ene	6,5	0,6	1,6
03-ene	6,5	0,6	1,6
04-ene	6,5	0,6	1,6
05-ene	6,5	0,8	1,6
06-ene	6,5	0,6	1,6
07-ene	6,5	0,5	1,6
08-ene	6,6	0,3	1,6
09-ene	6,4	0,3	1,3
10-ene	6,6	0,7	1,3
11-ene	6,5	0,6	1,6
12-ene	6,5	0,6	1,4
14-ene	6,4	0,6	1,3
15-ene	6,4	0,6	1,6
16-ene	6,5	0,5	1,6
17-ene	6,4	1,7	0,6
18-ene	6,6	0,4	1,6
19-ene	6,6	1	1,5
20-ene	6,5	0,6	1,7
21-ene	6,4	0,3	1,8
22-ene	6,5	0,3	1,6
23-ene	6,5	0,6	1,6
24-ene	6,8	0,3	1,21
25-ene	6,6	0,4	1,21
26-ene	6,6	0,3	1,22
27-ene	6,6	0,3	1,27
28-ene	6,6	0,3	1,19
29-ene	6,5	0,3	1,5
30-ene	6,4	0,6	2,3
31-ene	6,3	0,9	2,3
01-feb	6,5	0,3	1,8
02-feb	6,5	0,8	1,6
03-feb	6,5	0,3	1,27
04-feb	6,5	0,4	1,6
05-feb	6,4	0,3	1,6
06-feb	6,5	0,7	1,6

FECHA	PH	Turbiedad NTU	CL res. (ppm)
07-feb	6,5	0,4	1,3
08-feb	6,5	0,3	1,4
10-feb	6,5	0,39	1,3
11-feb	6,5	0,6	1,7
12-feb	6,5	0,5	1,6
13-feb	6,1	0,8	1,5
14-feb	6,4	0,3	1,6
15-feb	6,5	0,5	1,7
16-feb	6,5	0,3	1,7
17-feb	6,4	0,5	1,9
18-feb	6,5	0,4	1,4
19-feb	6,5	0,6	1,7
20-feb	6,4	0,2	1,5
21-feb	6,3	0,7	1,8
22-feb	6,5	0,2	1,5
23-feb	6,4	0,4	1,6
24-feb	6,5	0,2	1,5
25-feb	6	0,5	1,4
26-feb	6,5	0,6	1,6
27-feb	6,4	0,6	1,6
28-feb	6,5	0,3	1,4
01-mar	6,5	0,3	1,6
02-mar	6,5	0,2	1,6
03-mar	6,1	0,7	1,6
04-mar	6,5	0,6	1,3
05-mar	6,4	0,3	1,4
06-mar	6,5	0,3	1,5
07-mar	6,4	0,3	1,9
08-mar	6,6	0,6	0,6
09-mar	6,5	0,4	1,3
10-mar	6,6	0,4	1,6
11-mar	6,4	0,8	1,8
12-mar	6,8	0,8	1,5
13-mar	6,9	0,8	1,6
14-mar	6,8	0,3	1,6
15-mar	6,6	0,4	1,6
16-mar	6,5	0,3	1,6

### ANEXO III.

## REPORTE DE AGUA CRUDA ACUEDUCTO EL ROSAL

 <p style="font-size: small;">Es vida SAS</p>	<b>REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO</b>	 <p style="font-size: x-small;">Resolución 0316/2016 Resolución 3187/2019</p>			
CODIGO: F02-PT04	VERSIÓN: 11	Fecha: 19/06/2019			
<b>REPORTE No. 12352-21</b> <b>EL ROSAL S.A. .E.S.P.</b>		<b>PAGINA 1 de 1</b>			
SEÑOR(ES):	Hugo Contreras	TELÉFONO: 3153280556			
CONTACTO:	Calle 9 #5 - 44	CIUDAD: El Rosal - Cundinamarca			
DIRECCIÓN:					
PUNTO:	Bocatoma Reservorio la Cuesta	TIPO DE MUESTRA: Agua Cruda			
MUESTREO:	<input type="checkbox"/> Contramuestra <input checked="" type="checkbox"/> Unica <input type="checkbox"/> Punto Concertado	COORDENADAS: 04°51'38,03" 74°15'52,40" N.R.			
	No. Horas: N.A	FECHA DE TOMA: 2021-07-06 HORA INICIO: 9:10 a. m. FECHA RECEPCIÓN: 2021-07-06			
RESULTADOS					
ENSAYO	MÉTODO	UNIDADES	LC	FECHA DE ANÁLISIS	RESULTADO
*Conductividad	SM 2510 B	µs/cm	10	2021-07-06	29,00
*pH	SM 4500 H+B	Unidades de pH	N.A	2021-07-06	7,40
Calcio	SM 3500 Ca	mg Ca/L	5	2021-07-06	8,00
Alcalinidad	SM 2320 B	mg CaCO3/L	5	2021-07-07	35,20
Cloruros	SM 4500 Cl B	mg Cl/L	5	2021-07-09	12,41
Dureza Total	SM 2340 C	mg CaCO3/L	5	2021-07-09	16,21
Hierro Total	SM 3500 Fe B	mg Fe/L	0,2	2021-07-14	<0,20
Sulfatos	SM 4500 SO42 E	mg SO42/L	20	2021-07-08	<20,00
Aluminio	SM 3500 Al B	mg Al/L	0,01	2021-07-14	0,06
Nitritos	SM 4500NO3 D	mg NO3-N/L	0,5	2021-07-06	1,35
Nitros	SM 4500 NO2 B	mg NO2-N/L	0,004	2021-07-07	<0,004
Fosfatos	SM 4500 P E	mg PO4/L	0,05	2021-07-08	<0,05
COT	SM 5220 C	mg C/L	5	2021-07-08	<5,00
Hidrocarburos	SM 5520 D F	mg /L	8	2021-07-09	<8,00
**Manganeso	SM 3120 B	mg/L Mn	N.R.	2021-07-09	0,08
**Molibdeno	SM 3120 B	mg/L Mo	0,005	2021-07-09	<0,005
**Zinc	SM 3120 B	mg/L Zn	N.R.	2021-07-09	0,03
**Pesticidas Organoclorados	EPA 3510 C, REV 3 DIC 1996 - EPA 8081 B, REV 2 FEB 2007	mg/L	0,00001	2021-07-07 al 2021-07-16 (1)	<0,00001
**Pesticidas Organofosforados	EPA 3510 C, REV 3 DIC 1996 - EPA 8141 B, REV 2 FEB 2007	mg/L	0,001	2021-07-07 al 2021-07-16 (1)	<0,001
**Carbamatos	China National Standard Method GB/T	mg/L	0,01	2021-07-17	<0,0100
**Giardia	EPA 1623,1 V:2012	Quistes/L	0,1	2021-07-06	<0,1
**Coliformes Totales Superficiales	SM 9223 B	NMP/100 mL	1	2021-07-06	34000
**Coliformes Fecales	SM 9223B	NMP/100 mL	1	2021-07-06	<1
**Fluoruros	SM 4500-F C	mg/L F	0,1	2021-07-12	<0,1
**Cryptosporidium	EPA 1623,1 V:2012	Ooquistes/L	0,1	2021-07-06	<0,1
*Análisis Medidos En Campo **Análisis Subcontratados N.A - No Aplica / N.R - No Reporta / N.E - No Establecido / N.D No Detectado / LC - Limite de Cuantificación			OBSERVACIONES: (1) Intervalo de fecha de análisis reportado por el laboratorio subcontratado		
2021-07-06		2021-07-18		2021-07-29	
FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA		FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS		FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	
Elaborado por: Lorena Bautista		Revisado por: Juan Felipe Parra		Aprobado por: Camila Parra	
<p><b>Nota:</b> Este informe solo puede ser reproducido íntegramente y con la aprobación escrita del laboratorio. Este Reporte de Resultados solo es valido con firma Original y Sello Seco del Laboratorio. RESULTADOS VALIDOS UNICAMENTE PARA LA MUESTRA ANALIZADA</p>					
 <b>Mc Maria Alejandra Camacho</b> Microbióloga			 <b>IQ. JUAN FELIPE PARRA AYALA</b> Director Técnico T.P. IQ-25632		
Fin del reporte					

## ANEXO IV.

### Resultados detallados pruebas fisicoquímicas (SST, Ensayo Gravimétrico y Hierro Total)

#### *Sólidos suspendidos totales SST*

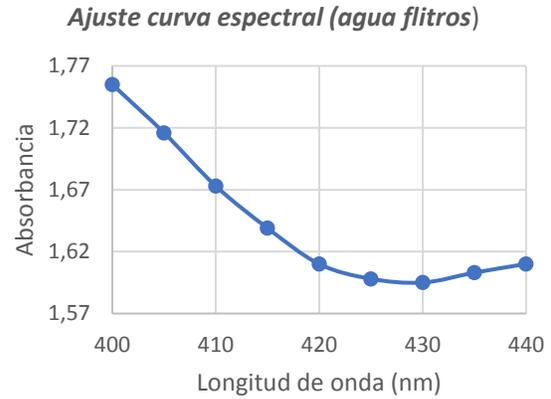
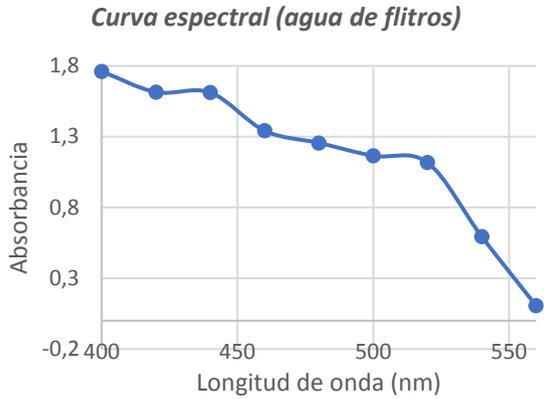
Muestra	m1 (mg)	m2 (mg)	V (ml)	SST (mg/L)
Cruda	1560,4	1569,6	100	92
Filtros	1570,5	1575,8	100	53
1	1425,5	1433,4	100	79
2	1501,6	1527,9	100	263
3	1598,2	1615,1	100	169
4	1381,8	1391,7	100	99
2.1*	1397,2	1420,5	100	233
3.1*	1400,1	1415,5	100	154
4.1*	1433,9	1441,3	100	74

#### *Promedio de resultados Ensayo gravimétrico*

Pieza	m1 (g)		m2 (g)		Reducción
2	32,0379		32,0057		0,0319
	32,0378	32,0378	32,0060	32,0059	
	32,0378		32,0061		
3	30,4444		30,4246		0,0201
	30,4450	30,4448	30,4248	30,4247	
	30,4449		30,4246		
4	23,796		23,7953		0,0008
	23,7966	23,7965	23,7961	23,7957	
	23,7969		23,7957		
2.1	28,8689		28,8376		0,0316
	28,8695	28,8693	28,8379	28,8377	
	28,8696		28,8377		
3.1	27,9344		27,9122		0,0220
	27,9346	27,9344	27,9126	27,9125	
	27,9343		27,9126		
4.1	25,5578		25,5557		0,0004
	25,5566	25,5573	25,5571	25,5568	
	25,5574		25,5577		
1	25,4002		25,4056		-0,0054
	25,4003	25,4003	25,4061	25,4057	
	25,4004		25,4054		

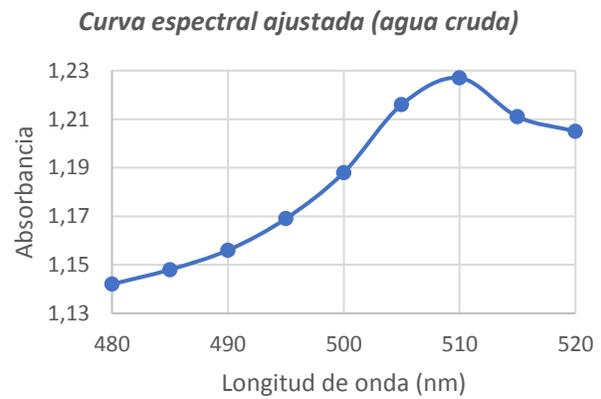
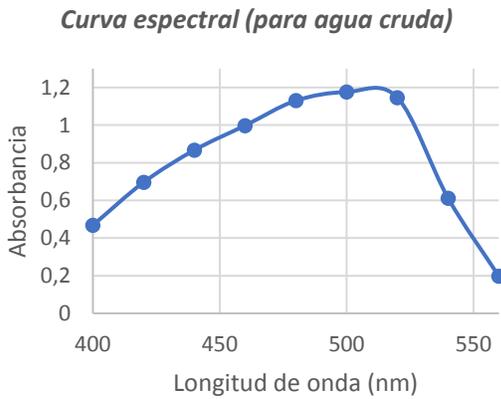
#### *Datos para la construcción de curva espectral para agua de filtros*

$\lambda$	abs	$\lambda$	abs	Patrón	abs
400	1,761	400	1,755	Blanco	0
420	1,615	405	1,716	P1	0,022
440	1,612	410	1,673	P2	0,085
460	1,342	415	1,639	P3	0,131
480	1,256	420	1,610	P4	0,325
500	1,165	425	1,598	P5	0,605
520	1,117	430	1,595	P6	1,174
540	0,593	435	1,603	M1	0,081
560	0,106	440	1,610	BM1	0,019



**Datos para la construcción de curva espectral para agua cruda**

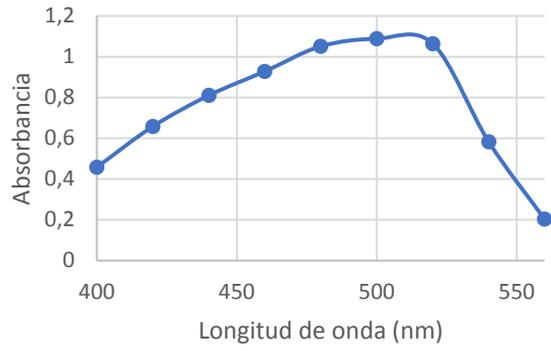
$\lambda$	abs	$\lambda$	abs	Patrón	abs
400	0,468	480	1,142	blanco	0
420	0,696	485	1,148	1	0,046
440	0,867	490	1,156	2	0,098
460	0,998	495	1,169	3	0,123
480	1,13	500	1,188	4	0,497
500	1,176	505	1,216	5	0,868
520	1,146	510	1,227	6	1,891
540	0,612	515	1,211	MC	0,128
560	0,197	520	1,205	BMC	0,031



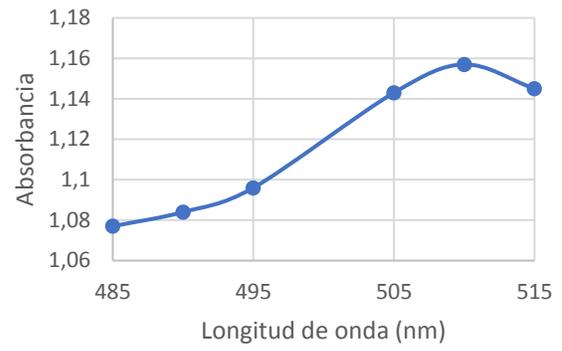
**Datos para la construcción de curva espectral para muestras de los experimentos**

$\lambda$	abs	$\lambda$	abs	Patrón	abs
400	0,458	485	1,077	0	0
420	0,658	490	1,084	1	0,027
440	0,81	495	1,096	2	0,091
460	0,928	505	1,143	3	0,129
480	1,051	510	1,157	4	0,327
500	1,088	515	1,145	5	0,585
520	1,064	M2	0,082	6	1,201
540	0,583	BM2	0,021	M4	0,079
560	0,203	M3	0,08	BM4	0,019
M2.1	0,078	BM3	0,018	M4.1	0,079
MB2.1	0,017	M3.1	0,082	BM4.1	0,018
		BM3.1	0,020		

**Curva espectral (para experimentos)**



**Ajuste (para experimentos)**



**Reporte No. 15451-22**

<b>SEÑOR(ES):</b>	JUAN FELIPE MOLANO	<b>FECHA DE TOMA :</b>	2022-04-22	<b>CODIGO DE MUESTRA:</b>	
<b>CONTACTO:</b>	Juan Felipe Molano	<b>HORA INICIO:</b>	10:05 a. m.		
<b>DIRECCIÓN:</b>	PTAP el Rosal	<b>FECHA RECEPCIÓN :</b>	2022-04-22		15451-22
<b>TELÉFONO:</b>	3134117699	<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Única ( X )		
<b>CIUDAD:</b>	El Rosal - Cundinamarca		Contramuestra ( )		
<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Superficial		Punto concertado ( )		
<b>MUESTREO POR:</b>	H2O ES VIDA SAS	<b>COORDENADAS:</b>	N: N.R		
<b>PUNTO:</b>	Agua Cruda		W: N.R		
			A: N.R		

**RESULTADOS**

ENSAYO	METODO	LC	UNIDADES	FECHA	RESULTADO	RESOLUCIÓN 2115/2007 Valor máximo aceptable	PUNTAJE DE RIESGO IRCA	CUMPLIMIENTO
AL .Coliformes Totales	ISO 9308	1	UFC/100 mL ó cm3	2022-04-22	259	0	15	No Cumple
AL .Escherichia Coli	ISO 9308	1	UFC/100 mL ó cm3	2022-04-22	0	0	25	Cumple

(AC) Análisis medido en Campo  
(AL) Análisis de laboratorio  
(AS) Análisis Subcontratados  
(DC) Dato entregado por el cliente  
N.A - No Aplica / N.R - No Reporta / N.E - No Establecido / N.D No Detectado / LC - Limite de Cuantificación

Índice de Riesgo de la calidad del agua para el Consumo Humano (IRCA)	
RIESGO ALTO	
Agua no apta para consumo humano ( Gestión directa de Alcaldes y Gobernadores)	37,50%

**OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES:**

2022-04-22	2022-04-23	2022-04-27
<b>FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA</b>	<b>FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS</b>	<b>FECHA DE EMISIÓN DE INFORME</b>
Elaborado por: Catalina Castillo Serrano	Revisado por: Lorena Bautista	Aprobado por: Juan Felipe Parra

**Nota:**  
Análisis autorizados por el Ministerio de Salud Resolución 2625 de 2019  
Resultados válidos unicamente para la muestra analizada  
H2O es vida SAS no se hace responsable por los datos entregados por el cliente  
Este Reporte de Resultados es válido en formato digital con firma y sello del Laboratorio  
Este informe solo puede ser reproducido íntegramente y con la aprobación escrita del laboratorio.  
La autenticidad de este documento puede ser verificada mediante solicitud al correo calidad@h2oesvida.com.co

*Catalina Castillo s.*  
\_\_\_\_\_  
CATALINA CASTILLO SERRANO  
Microbióloga

*Jesika Maritza Muñoz Pulido*  
\_\_\_\_\_  
JESIKA MARITZA MUÑOZ PULIDO  
Analista Líder  
TP PQ-06893



Fin de Reporte

# ANEXO VI



## REPORTE DE RESULTADOS DE LABORATORIO - IRCA No. 2



V2: 2021-07-27  
FD2-PT04

### Reporte No. 15380-22

<b>SEÑOR(ES):</b>	JUAN FELIPE MOLANO	<b>FECHA DE TOMA :</b>	2022-04-20	<b>CODIGO DE MUESTRA:</b>	
<b>CONTACTO:</b>	Juan Felipe Molano	<b>HORA INICIO:</b>	11:00 a. m.		
<b>DIRECCIÓN:</b>	N.R	<b>FECHA RECEPCIÓN :</b>	2022-04-20	<b>15380-22</b>	
<b>TÉLFONO:</b>	3134117699	<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Única ( X )		
<b>CIUDAD:</b>	El Rosal, Cundinamarca		Contramuestra ( )		
<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Potable		Punto concertado ( )		
<b>MUESTREO POR:</b>	Ciente	<b>COORDENADAS:</b>	N: N.R		
<b>PUNTO:</b>	Salida Filtros		W: N.R		
			A: N.R		

### RESULTADOS

ENSAYO	METODO	LC	UNIDADES	FECHA	RESULTADO	RESOLUCIÓN 2115/2007 Valor máximo aceptable	PUNTAJE DE RIESGO IRCA	CUMPLIMIENTO
AL .Coliformes Totales	ISO 9308	1	UFC/100 mL ó cm3	2022-04-08	0	0	15	Cumple
AL .Escherichia Coli	ISO 9308	1	UFC/100 mL ó cm3	2022-04-08	0	0	25	Cumple

(AC) Análisis medido en Campo

(AL) Análisis de Laboratorio

(AS) Análisis Subcontratados

(DC) Datos entregados por el cliente

N.A - No Aplica / N.R - No Reporta / N.E - No Establecido / N.D No

Detectado / LC - Límite de Cuantificación

### Índice de Riesgo de la calidad del agua para el Consumo Humano (IRCA)

SIN RIESGO

Agua apta para consumo humano

0,00%

### OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES:

2022-04-20

#### FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA

Elaborado por: Maria Alejandra Camacho

2022-04-09

#### FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS

Revisado por: Lorena Bautista

2022-04-22

#### FECHA DE EMISIÓN DE INFORME

Aprobado por: Juan Felipe Parra

### Nota:

Análisis autorizados por el Ministerio de Salud Resolución 2625 de 2019

Resultados válidos únicamente para la muestra analizada

H2O es vida SAS no se hace responsable por los datos entregados por el cliente

Este Reporte de Resultados es válido en formato digital con firma y sello del Laboratorio

Este informe solo puede ser reproducido íntegramente y con la aprobación escrita del laboratorio

La autenticidad de este documento puede ser verificada mediante solicitud al correo calidad@h2oesvida.com.co

MARIA ALEJANDRA CAMACHO  
Microbióloga

JESIKA MARITZA MUÑOZ PULIDO  
Analista Líder  
TP PQ-06893



Fin de Reporte

**Reporte No. 15629-22**

<b>SEÑOR(ES):</b>	Andrea Jimena Jaramillo Lozada	<b>FECHA DE TOMA :</b>	2022-05-13	<b>CODIGO DE MUESTRA:</b>	
<b>CONTACTO:</b>	Andrea Jimena Jaramillo	<b>HORA INICIO:</b>	2:15 p. m.		
<b>DIRECCIÓN:</b>	N.R	<b>FECHA RECEPCIÓN :</b>	2022-05-13		15629-22
<b>PUNTO:</b>	Reservorio	<b>TIPO MUESTREO:</b>	Puntual ( X )		
<b>TELÉFONO:</b>	3203526746		Compuesto ( )		
<b>CIUDAD:</b>	El Rosal - Cundinamarca		Integrado ( )		
<b>No. HORAS:</b>	NA	<b>COORDENADAS:</b>	N: N.R		
<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Potable		W: N.R		
<b>MUESTREO POR:</b>	Cliente		A: N.R		

**RESULTADOS**

ENSAYO	MÉTODO	UNIDADES	LC	FECHA DE ANÁLISIS	RESULTADO
AS Pseudomona aeruginosa	SM 9213 E	UFC/100 mL	N. R	2022-05-14	0

(AC) Análisis medido en Campo  
(AL) Análisis de laboratorio  
(AS) Análisis Subcontratados  
(DC) Dato entregado por el cliente  
N.A - No Aplica / N.R - No Reporta / N.E - No Establecido / N.D No Detectado / LC - Limite de Cuantificación

**OBSERVACIONES:**

2022-05-13

2022-05-26

2022-05-26

**FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA**

**FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS**

**FECHA DE EMISIÓN DE INFORME**

Elaborado por: Catalina Castillo Serrano

Revisado por: Lorena Bautista

Aprobado por: Juan Felipe Parra

**Nota:**

Analisis autorizados por el Ministerio de Salud Resolución 2625 de 2019  
Resultados validos unicamente para la muestra analizada  
H2O es vida SAS no se hace responsable por los datos entregados por el cliente  
Este Reporte de Resultados es valido en formato digital con firma y sello del Laboratorio  
Este informe solo puede ser reproducido íntegramente y con la aprobación escrita del laboratorio.  
La autenticidad de este documento puede ser verificada mediante solicitud al correo calidad@h2oesvida.com.co

  
**JESIKA MARITZA MUÑOZ PULIDO**  
 Analista Lider  
 TP PQ 06893

  
**H2O es Vida S.A.S**  
**Laboratorio**

*Fin de Reporte*

**Reporte No. 15631-22**

<b>SEÑOR(ES):</b>	Andrea Jimena Jaramillo Lozada	<b>FECHA DE TOMA :</b>	2022-05-13	<b>CODIGO DE MUESTRA:</b>	
<b>CONTACTO:</b>	Andrea Jimena Jaramillo	<b>HORA INICIO:</b>	2:15 p. m.		
<b>DIRECCIÓN:</b>	N.R	<b>FECHA RECEPCIÓN :</b>	2022-05-13		15631-22
<b>PUNTO:</b>	Filtros	<b>TIPO MUESTREO:</b>	Puntual ( X )		
<b>TELÉFONO:</b>	3203526746		Compuesto ( )		
<b>CIUDAD:</b>	El Rosal - Cundinamarca		Integrado ( )		
<b>No. HORAS:</b>	NA	<b>COORDENADAS:</b>	N: N.R		
<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Potable		W: N.R		
<b>MUESTREO POR:</b>	Cliente		A: N.R		

**RESULTADOS**

ENSAYO	MÉTODO	UNIDADES	LC	FECHA DE ANÁLISIS	RESULTADO
AS Pseudomona aeruginosa	SM 9213 E	UFC/100 mL	N. R	2022-05-14	0

(AC) Análisis medido en Campo  
 (AL) Análisis de laboratorio  
 (AS) Análisis Subcontratados  
 (DC) Dato entregado por el cliente  
 N.A - No Aplica / N.R - No Reporta / N.E - No Establecido / N.D No Detectado / LC - Limite de Cuantificación

**OBSERVACIONES:**

2022-05-13

2022-05-26

2022-05-26

**FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA**

**FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS**

**FECHA DE EMISIÓN DE INFORME**

Elaborado por: Catalina Castillo Serrano

Revisado por: Lorena Bautista

Aprobado por: Juan Felipe Parra

**Nota:**

Analisis autorizados por el Ministerio de Salud Resolución 2625 de 2019  
 Resultados validos unicamente para la muestra analizada  
 H2O es vida SAS no se hace responsable por los datos entregados por el cliente  
 Este Reporte de Resultados es valido en formato digital con firma y sello del Laboratorio  
 Este informe solo puede ser reproducido íntegramente y con la aprobación escrita del laboratorio.  
 La autenticidad de este documento puede ser verificada mediante solicitud al correo calidad@h2oesvida.com.co



**JESIKA MARITZA MUÑOZ PULIDO**  
 Analista Lider  
 TP PQ 06893



*Fin de Reporte*

Reporte No. 15632-22

<b>SEÑOR(ES):</b>	Andrea Jimena Jaramillo Lozada	<b>FECHA DE TOMA :</b>	2022-05-13	<b>CODIGO DE MUESTRA:</b>	
<b>CONTACTO:</b>	Andrea Jimena Jaramillo	<b>HORA INICIO:</b>	2:15 p. m.		
<b>DIRECCIÓN:</b>	N.R	<b>FECHA RECEPCIÓN :</b>	2022-05-13		15632-22
<b>PUNTO:</b>	Frasco 2	<b>TIPO MUESTREO:</b>	Puntual ( X )		
<b>TELÉFONO:</b>	3203526746		Compuesto ( )		
<b>CIUDAD:</b>	El Rosal - Cundinamarca		Integrado ( )		
<b>No. HORAS:</b>	NA	<b>COORDENADAS:</b>	N: N.R		
<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Potable		W: N.R		
<b>MUESTREO POR:</b>	Cliente		A: N.R		

RESULTADOS

ENSAYO	MÉTODO	UNIDADES	LC	FECHA DE ANÁLISIS	RESULTADO
AS Pseudomona aeruginosa	SM 9213 E	UFC/100 mL	N. R	2022-05-14	0

(AC) Análisis medido en Campo  
 (AL) Análisis de laboratorio  
 (AS) Análisis Subcontratados  
 (DC) Dato entregado por el cliente  
 N.A - No Aplica / N.R - No Reporta / N.E - No Establecido / N.D No Detectado / LC - Limite de Cuantificación

OBSERVACIONES:

2022-05-13

2022-05-26

2022-05-26

FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA

FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS

FECHA DE EMISIÓN DE INFORME

Elaborado por: Catalina Castillo Serrano

Revisado por: Lorena Bautista

Aprobado por: Juan Felipe Parra

Nota:

Analisis autorizados por el Ministerio de Salud Resolución 2625 de 2019  
 Resultados validos unicamente para la muestra analizada  
 H2O es vida SAS no se hace responsable por los datos entregados por el cliente  
 Este Reporte de Resultados es valido en formato digital con firma y sello del Laboratorio  
 Este informe solo puede ser reproducido íntegramente y con la aprobación escrita del laboratorio.  
 La autenticidad de este documento puede ser verificada mediante solicitud al correo calidad@h2oesvida.com.co



JESIKA MARITZA MUÑOZ PULIDO  
 Analista Lider  
 TP PQ 06893



Fin de Reporte

**Reporte No. 15630-22**

<b>SEÑOR(ES):</b>	Andrea Jimena Jaramillo Lozada	<b>FECHA DE TOMA :</b>	2022-05-13	<b>CODIGO DE MUESTRA:</b>	
<b>CONTACTO:</b>	Andrea Jimena Jaramillo	<b>HORA INICIO:</b>	2:15 p. m.		
<b>DIRECCIÓN:</b>	N.R	<b>FECHA RECEPCIÓN :</b>	2022-05-13		15630-22
<b>PUNTO:</b>	Frasco 3	<b>TIPO MUESTREO:</b>	Puntual ( X )		
<b>TELÉFONO:</b>	3203526746		Compuesto ( )		
<b>CIUDAD:</b>	El Rosal - Cundinamarca		Integrado ( )		
<b>No. HORAS:</b>	NA	<b>COORDENADAS:</b>	N: N.R		
<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Potable		W: N.R		
<b>MUESTREO POR:</b>	Cliente		A: N.R		

**RESULTADOS**

ENSAYO	MÉTODO	UNIDADES	LC	FECHA DE ANÁLISIS	RESULTADO
AS Pseudomona aeruginosa	SM 9213 E	UFC/100 mL	N. R	2022-05-14	0

(AC) Análisis medido en Campo  
 (AL) Análisis de laboratorio  
 (AS) Análisis Subcontratados  
 (DC) Dato entregado por el cliente  
 N.A - No Aplica / N.R - No Reporta / N.E - No Establecido / N.D No Detectado / LC - Limite de Cuantificación

**OBSERVACIONES:**

2022-05-13

2022-05-26

2022-05-26

**FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA**

**FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS**

**FECHA DE EMISIÓN DE INFORME**

Elaborado por: Catalina Castillo Serrano

Revisado por: Lorena Bautista

Aprobado por: Juan Felipe Parra

**Nota:**

Analisis autorizados por el Ministerio de Salud Resolución 2625 de 2019  
 Resultados validos unicamente para la muestra analizada  
 H2O es vida SAS no se hace responsable por los datos entregados por el cliente  
 Este Reporte de Resultados es valido en formato digital con firma y sello del Laboratorio  
 Este informe solo puede ser reproducido íntegramente y con la aprobación escrita del laboratorio.  
 La autenticidad de este documento puede ser verificada mediante solicitud al correo calidad@h2oesvida.com.co



**JESIKA MARITZA MUÑOZ PULIDO**  
 Analista Lider  
 TP PQ 06893



**Fin de Reporte**

**Reporte No. 15739-22**

<b>SEÑOR(ES):</b>	Andrea Jimena Jaramillo Lozada	<b>FECHA DE TOMA :</b>	2022-05-26	<b>CODIGO DE MUESTRA:</b>	
<b>CONTACTO:</b>	-	<b>HORA INICIO:</b>	2:10 p. m.		
<b>DIRECCIÓN:</b>	N.R	<b>FECHA RECEPCIÓN :</b>	2022-05-26		15739-22
<b>PUNTO:</b>	Frasco 4	<b>TIPO MUESTREO:</b>	Puntual ( X )		
<b>TELÉFONO:</b>	3203526746		Compuesto ( )		
<b>CIUDAD:</b>	El Rosal - Cundinamarca		Integrado ( )		
<b>No. HORAS:</b>	NA	<b>COORDENADAS:</b>	N:		
<b>TIPO DE MUESTRA:</b>	Potable		W:		
<b>MUESTREO POR:</b>	Cliente		A:		

**RESULTADOS**

ENSAYO	MÉTODO	UNIDADES	LC	FECHA DE ANÁLISIS	RESULTADO
AS Pseudomona Aeruginosa	SM 9213 E	UFC/100mL	N. R	2022-05-27	0

(AC) Análisis medido en Campo  
(AL) Análisis de laboratorio  
(AS) Análisis Subcontratados  
(DC) Dato entregado por el cliente  
N.A - No Aplica / N.R - No Reporta / N.E - No Establecido / N.D No Detectado / LC - Limite de Cuantificación

**OBSERVACIONES:**

2022-05-26

2022-06-09

2022-06-10

**FECHA DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA**

**FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS**

**FECHA DE EMISIÓN DE INFORME**

Elaborado por: Catalina Castillo Serrano

Revisado por: Lorena Bautista

Aprobado por: Juan Felipe Parra

**Nota:**

Analisis autorizados por el Ministerio de Salud Resolución 2625 de 2019  
Resultados validos unicamente para la muestra analizada  
H2O es vida SAS no se hace responsable por los datos entregados por el cliente  
Este Reporte de Resultados es valido en formato digital con firma y sello del Laboratorio  
Este informe solo puede ser reproducido íntegramente y con la aprobación escrita del laboratorio.  
La autenticidad de este documento puede ser verificada mediante solicitud al correo calidad@h2oesvida.com.co

*Catalina Castillo s.*  
\_\_\_\_\_  
CATALINA CASTILLO SERRANO  
Microbióloga

*Jesika Maritza Muñoz Pulido*  
\_\_\_\_\_  
JESIKA MARITZA MUÑOZ PULIDO  
Analista Lider  
TP PQ 06893



*Fin de Reporte*

## **ANEXO XII.**

### **RECOMENDACIONES**

- Verificar que el punto de estudio en la red, cuente con las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas que favorezcan la formación de biopelícula en un corto plazo, antes del diseño metodológico para facilitar el desarrollo experimental en futuros proyectos relacionados.
- Contemplar la posibilidad de hacer otras pruebas de parámetros de calidad de agua, en relación con las condiciones de formación de biopelícula, tales como Carbono Orgánico Total (COT), Fosfatos, Nitratos, Manganeso y pruebas microbiológicas que se consideren necesarias.
- Realizar la experimentación haciendo uso de otros desinfectantes, con el fin de comparar el efecto, teniendo en cuenta adicionalmente, otras variables como la dosificación, el tiempo de retención, caudal y diferentes materiales de tubería.
- Asegurarse de presupuestar desde un principio las pruebas que requieran un análisis externo, cotizando con diferentes laboratorios especializados.
- En caso de requerir el respaldo de los laboratorios de la universidad, comprobar desde un principio, la disponibilidad de materiales, equipos y reactivos para realizar las pruebas que se consideran necesarias.
- Solicitar el apoyo técnico y en cuanto a investigación, cuantas veces sea necesario, en caso de ser requerido, ya que favorece a una mejor planeación en las actividades propuestas para dar cumplimiento de los objetivos planteados.
- Realizar la medición de la temperatura en los ensayos, en caso de indagar alrededor de las condiciones climáticas que tienen influencia sobre los parámetros de calidad.
- Indagar sobre otras especies de microorganismos que forman películas en la PTAP, e incluir otras metodologías de determinación del tipo y número de microorganismos presentes en estas biopelículas.