

Evaluación de la eficiencia del sistema de tratamiento de la Planta principal de agua potable del
municipio de Málaga, Santander.

Leidy Yurany Gualdrón Sandoval

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Química Ambiental

Directora

MSc. Yaneth Quintero López

Magister en Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Especialización en Química ambiental

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Este proyecto va dedicado a mi hija Mariángel, quien fue inspiración y motivo para querer crecer académica y profesionalmente. A mí, porque a pesar de las dificultades me demostré que soy capaz y que puedo alcanzar cada meta que me propongo.

A David, quien siempre ha creído en mi potencial y me ha motivado a ser mejor, a mis padres y mis hermanos por su apoyo y ayuda incondicional.

A Ender, porque donde quiera que esté estará muy orgulloso de mi y de mis logros.

Agradecimientos

Agradezco a mi alma mater la Universidad Industrial de Santander a quien le debo indudablemente mi excelente formación profesional. A la Escuela de Química de la UIS por ofertar la cohorte a quienes en su momento anhelábamos ingresar al programa. A las Empresas Públicas Municipales de Málaga, quienes durante estos años me han acogido y han contribuido significativamente en mi desarrollo laboral, así como en el apoyo para el desarrollo de mis actividades de trabajo de grado.

A mi querida profe Yaneth, quien afianzó mis conocimientos en el área, me orientó y encaminó en la elección de mi trabajo de grado y quien nos acogió con tanto cariño y dedicación al impartir sus asignaturas.

Tabla de Contenido

Introducción	17
1. Objetivos	19
1.1 Objetivo General	19
1.2 Objetivos Específicos.....	19
2. Planteamiento del problema.....	20
3. Marco Teórico.....	21
3.1 Tratamiento para potabilizar el agua.....	21
3.1.1 Coagulación y floculación	22
3.1.2 Sedimentación.....	22
3.1.3 Filtración.....	23
3.1.4 Desinfección	23
3.1.5 Ajuste del pH	23
3.1.6 Adsorción y tratamiento avanzado.....	23
3.2 Periodos críticos en una PTAP	31
3.2.1 Periodos de alta demanda.....	31
3.2.2 Periodos de lluvia intensa o inundaciones	31
3.2.3 Cambios climáticos.....	31
3.2.4 Mantenimiento y limpieza de equipos o etapas	32
3.2.5 Cambios en la calidad del agua natural.....	32
3.3 Períodos críticos para las PTAP y la calidad del agua.....	33

3.3.1 Temporadas de lluvias	33
3.3.2 Temporadas de sequía.....	33
3.3.3 Eventos naturales	33
3.4 Medidas de mitigación.....	33
3.4.1 Monitoreo continuo de la calidad del agua	34
3.4.2 Plan de respuesta a emergencias	34
3.4.3 Mantenimiento preventivo.....	34
3.5 Factores que alteran la calidad del agua	34
3.5.1 Contaminación	34
3.5.2 Fallas en el proceso de tratamiento	35
3.5.3 Mantenimiento inadecuado de la planta	35
3.6 Ajustes en los procesos de tratamiento	35
3.6.1 Coagulación y floculación	35
3.6.2 Filtración	36
3.6.3 Desinfección	36
3.6.4 Monitoreo y ajuste continuo	37
3.7 Marco regulatorio.....	37
3.7.1 El Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA)	39
3.8 Evaluación de la eficiencia de una PTAP	41
3.8.1 Cumplimiento de los estándares de calidad del agua.....	41
3.8.2 Remoción de contaminantes	41
3.8.3 Utilización de productos químicos.....	42
3.8.4 Mantenimiento y operación	42

3.9 Métodos de evaluación de la eficiencia de un sistema de tratamiento	42
3.9.1 Monitoreo de la calidad del agua	43
3.9.2 Análisis de los registros de operación.....	43
3.9.3 Inspección visual de las instalaciones.....	43
3.9.4 Eficiencia en la eliminación de contaminantes.....	43
3.9.5 Eficiencia en el uso de los recursos	43
3.9.6 Eficiencia en la operación y el mantenimiento	44
3.10 Parámetros que evalúan la eficiencia.....	44
3.10.1 Parámetros para evaluar la eficiencia de la remoción.....	44
3.10.2 Parámetros de calidad	44
3.11 Pruebas de laboratorio.....	45
3.11.1 Análisis de turbidez.....	45
3.11.2 Análisis de color	45
3.11.3 Sólidos suspendidos totales (SST).....	46
3.11.4 Concentración de nutrientes.....	46
3.11.5 Concentración de metales	47
3.11.6 pH.....	47
3.11.7 Temperatura	47
3.11. 8 Análisis de concentración de desinfectantes.....	48
3.11.9 Análisis de metales pesados y otros contaminantes.....	48
3.11.10 Análisis microbiológicos	48
3.12 Impactos de la calidad del agua	49
3.12. 1 Impactos en la salud humana	49

3.12.2 Impactos en el medio ambiente.....	49
3.12.3 Impactos en la economía.....	49
4. Metodología	50
4.1 Muestreo	50
4.2 Análisis de laboratorio	52
4.2.1 Determinación de Turbidez.....	57
4.2.2 Determinación de color.....	58
4.2.3 Reducción de Cloruros.....	58
4.2.4 Reducción de Dureza total	59
4.2.5 Reducción de Hierro total	60
4.2.6 Reducción de Sulfatos.....	61
4.2.7 Reducción de sólidos suspendidos.....	62
4.2.8 Determinación de coliformes	64
4.2.9 Cloro residual libre	65
4.2.10 pH.....	67
4.3 Análisis de cumplimiento	67
4.3.1 Turbidez	67
4.3.2 Color	68
4.3.3 Cloruros.....	68
4.3.4 Dureza total	68
4.3.5 Hierro total	68
4.3.6 Sulfatos	68
4.3.7 Coliformes totales	69

4.3.8 Coliformes fecales	69
4.4 Eficiencia del sistema de tratamiento	69
4.5 Índice de riesgo de la calidad del agua IRCA para EPMM	69
5. Resultados y análisis de resultados	70
6. Conclusiones	108
7. Recomendaciones	112
Referencias Bibliográficas	114
Apéndices.....	120

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Georreferenciación puntos de captación</i>	24
Tabla 2. <i>Valores máximos aceptables para las características analizadas</i>	37
Tabla 3. <i>Puntajes de riesgo asignados a los parámetros según el IRCA</i>	39
Tabla 4. <i>Requisitos especiales de muestreo</i>	52
Tabla 5. <i>Procedimientos de análisis del laboratorio de aguas EPMM</i>	55
Tabla 6. <i>Descripción analítica parámetro Turbidez</i>	57
Tabla 7. <i>Descripción analítica parámetro Color aparente</i>	58
Tabla 8. <i>Descripción analítica parámetro Cloruros</i>	58
Tabla 9. <i>Descripción analítica parámetro Dureza Total</i>	59
Tabla 10. <i>Descripción analítica parámetro Hierro total</i>	60
Tabla 11. <i>Descripción analítica parámetro Sulfatos</i>	61
Tabla 12. <i>Descripción analítica parámetro Sólidos Suspendidos Totales</i>	62
Tabla 13. <i>Descripción analítica parámetros Coliformes Fecales y totales</i>	64
Tabla 14. <i>Descripción analítica parámetro Cloro residual libre</i>	65
Tabla 15. <i>Descripción analítica parámetro pH</i>	67
Tabla 18. <i>Caracterización Muestreo 1 día seco</i>	72
Tabla 19. <i>Caracterización Muestreo 2 día seco</i>	75
Tabla 20. <i>Caracterización Muestreo 3 día seco</i>	76
Tabla 21. <i>Caracterización Muestreo 1 día lluvia</i>	78
Tabla 22. <i>Caracterización Muestreo 2 día lluvia</i>	79

Tabla 23. <i>Caracterización Muestreo 3 día lluvia</i>	81
Tabla 24. <i>Reporte IRCA para el primer muestreo</i>	100
Tabla 25. <i>Reporte IRCA para el segundo muestreo</i>	101
Tabla 26. <i>Reporte IRCA para el tercer muestreo</i>	102
Tabla 27. <i>Reporte IRCA para el cuarto muestreo</i>	103
Tabla 28. <i>Reporte IRCA para el quinto muestreo</i>	104
Tabla 29. <i>Reporte IRCA para el sexto muestreo</i>	105

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Fuentes abastecedoras PTAP</i>	24
Figura 2. <i>Ingreso fuentes superficiales PTAP principal Málaga</i>	25
Figura 3. <i>Cámara de quietamiento</i>	25
Figura 4. <i>Escaleras de oxigenación</i>	26
Figura 5. <i>Vista lateral Prefiltros</i>	26
Figura 6. <i>Vista frontal Prefiltros</i>	27
Figura 7. <i>Filtros rápidos</i>	27
Figura 8. <i>Tanques de almacenamiento</i>	28
Figura 9. <i>Estructura tanque de almacenamiento</i>	28
Figura 10. <i>Desinfección</i>	29
Figura 11. <i>Tanques de distribución</i>	29
Figura 12. <i>Instalaciones laboratorio de aguas EPMM</i>	53
Figura 13. <i>Instalaciones laboratorio de aguas EPMM</i>	53
Figura 14. <i>Material laboratorio de aguas EPMM</i>	54
Figura 15. <i>Insumos y reactivos químicos laboratorio de aguas EPMM</i>	54
Figura 16. <i>Equipos de análisis laboratorio de aguas EPMM</i>	55
Figura 17. <i>Promedio mensual de lluvia en el mes de septiembre de 2023 para Málaga</i>	70
Figura 18. <i>Promedio mensual de lluvia en el mes de octubre de 2023 para Málaga</i>	71
Figura 19. <i>Promedio mensual de lluvia en el mes de noviembre de 2023 para Málaga</i>	71
Figura 20. <i>Variación de la turbidez por etapa muestreada</i>	83

Figura 21. <i>Variación del color aparente por etapa muestreada</i>	84
Figura 22. <i>Variación del pH por etapa muestreada</i>	85
Figura 23. <i>Variación del Hierro Total por etapa muestreada</i>	86
Figura 24. <i>Variación de la Dureza Total por etapa muestreada</i>	87
Figura 25. <i>Variación de los sulfatos por etapa muestreada</i>	88
Figura 26. <i>Variación de los cloruros por etapa muestreada</i>	89
Figura 27. <i>Variación de los SST por etapa muestreada</i>	90
Figura 28. <i>Variación de E.Coli por etapa muestreada</i>	91
Figura 29. <i>Variación de Coliformes totales por etapa muestreada</i>	91
Figura 30. <i>Eficiencia remoción Turbiedad</i>	93
Figura 31. <i>Eficiencia remoción color aparente</i>	93
Figura 32. <i>Eficiencia remoción Hierro total</i>	94
Figura 33. <i>Eficiencia remoción Dureza total</i>	95
Figura 34. <i>Eficiencia remoción sulfatos</i>	95
Figura 35. <i>Eficiencia remoción cloruros</i>	96
Figura 36. <i>Eficiencia remoción SST</i>	97
Figura 37. <i>Eficiencia remoción E. Coli</i>	98
Figura 38. <i>Eficiencia remoción coliformes totales</i>	98

Lista de Apéndices

Apéndice A. *Autorización del laboratorio de aguas por el Ministerio de Salud y protección social*

Apéndice B. *POE laboratorio de aguas EPMM*

Apéndice C. *Informes de mantenimiento equipos laboratorio de aguas EPMM*

Apéndice D. *Formato 1160.04.01 control reactivos químicos e insumos de laboratorio*

Apéndice E. *Formato 1160.06.10 Identificación de la muestra*

Glosario

Análisis físico y químico del agua: Son aquellos procedimientos de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para evaluar sus características físicas, químicas o ambas.

Característica: Término usado para identificar elementos, compuestos, sustancias y microorganismos presentes en el agua para consumo humano.

Cloro residual libre: Es aquella porción que queda en el agua después de un período de contacto definido, que reacciona química y biológicamente como ácido hipocloroso o como ión hipoclorito.

Coliformes: Bacterias Gram Negativas en forma bacilar que fermentan la lactosa a temperatura de 35 a 37°C, produciendo ácido y gas (CO₂) en un plazo de 24 a 48 horas. Se clasifican como aerobias o anaerobias facultativas, son oxidasa negativa, no forman esporas y presentan actividad enzimática de la β galactosidasa. Es un indicador de contaminación microbiológica del agua para consumo humano.

Eficiencia del tratamiento: relación entre la masa o concentración removida y la masa o concentración en el efluente para un proceso o planta de tratamiento y un parámetro específico, normalmente se expresa en porcentaje.

Escherichia coli – E.coli: Bacilo aerobio Gram Negativo no esporulado que se caracteriza por tener enzimas específicas como la β galactosidasa y β glucoronidasa. Es el indicador microbiológico preciso de contaminación fecal en el agua para consumo humano.

Tratamiento o potabilización: Es el conjunto de operaciones y procesos que se realizan sobre el agua natural, con el fin de modificar sus características físicas, químicas y microbiológicas, para hacerla apta para el consumo humano.

Valor aceptable: Es el establecido para la concentración de un componente o sustancia, que garantiza que el agua para consumo humano no representa riesgos conocidos a la salud.

Resumen

Título: Evaluación de la eficiencia del sistema de tratamiento de la Planta principal de agua potable del municipio de Málaga, Santander.*

Autor: Leidy Yurany Gualdrón Sandoval **

Palabras Clave: Eficiencia, sistema de tratamiento, agua potable, Índice de riesgo de la calidad del agua, etapas de tratamiento, Parámetros de calidad.

Descripción:

El tratamiento de agua potable es un conjunto de procesos fisicoquímicos diseñados para eliminar las sustancias en exceso y contaminantes presentes en el agua natural para hacerla segura para el consumo humano.

El sistema de tratamiento de la planta principal de agua potable de Málaga, Santander, se basa principalmente en las operaciones unitarias de filtración y desinfección. Este sistema ha evidenciado alto índice de riesgo de la calidad del agua suministrada a la población municipal en periodos críticos de cambio climático y temporada de lluvia.

Una evaluación de la eficiencia del sistema conlleva a determinar las principales falencias del proceso a través de la toma de muestras en época de lluvia y en época seca y el análisis fisicoquímico de las aguas, para establecer un plan de acción que permita mejorar y optimizar el funcionamiento de la planta de tratamiento de potabilización.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Especialización en Química ambiental. Director: MSc. Yaneth Quintero López, Magister en Química.

Abstract

Title: Evaluation of the efficiency of the treatment system in the main potable water plant in the municipality of Málaga, Santander.*

Author(s): Leidy Yurany Gualdrón Sandoval (1)**

Key Words: Efficiency, treatment system, potable water, water quality risk index, treatment stages, quality parameters.

Description:

The potable water treatment is a set of physicochemical processes which are designed to remove excess substances and pollutants found in natural water to make it safe for human consumption.

The treatment system of the main potable water plant in Malaga, Santander, is mainly based on individual filtration and disinfection operations. This system has evidenced a high-risk index of the water quality supplied to the residents, in critical periods of climate change and rainy seasons.

An evaluation of the system efficiency leads to determine the main shortcomings of the process through samples taken during rainy and dry seasons. The physicochemical analysis of water samples aims at establishing an action plan that allows the improvement and optimization of the operation in the potable water treatment plant.

* Degree Work

** Science Faculty. Chemistry School. Specialization in Environmental Chemistry. Director: Master of Science. Yaneth Quintero López, Master in Chemistry.

Introducción

El municipio de Málaga se encuentra localizado al nororiente de Departamento de Santander, en la Provincia de García Rovira a $06^{\circ} 42'$ de Latitud Norte y $72^{\circ} 44'$ de Longitud Occidente en una de las derivaciones de la Cordillera Oriental. A la fecha cuenta con un número de 21.600 habitantes.

Málaga, posee dos plantas de tratamiento de agua potable (PTAP): La PTAP principal ubicada en las coordenadas $6^{\circ}42'11''\text{N}$ y $72^{\circ}44'13''\text{W}$ y la PTAP María Auxiliadora ubicada en las coordenadas $6^{\circ}41'37''\text{N}$ y $72^{\circ}44'17''\text{W}$. La primera actualmente abastece 5.400 suscriptores y fue puesta en marcha en el año 1994 y la segunda abastece 1.227 suscriptores e inició su funcionamiento en el año 2019.

Las dos plantas se abastecen de seis fuentes hídricas, concesionadas ante la Corporación Autónoma Regional de Santander y denominadas: Cuzagueta, Carraca, La Magnolia, Laureano Gómez, Cortaderas y Molinos. Estas fuentes permiten el funcionamiento continuo de las PTAP durante los siete días de la semana, las 24 horas del día; con excepción en temporada seca, donde no hay continuidad del servicio debido a la disminución de los caudales de las fuentes y se hace necesario realizar racionamiento de agua.

La planta principal objeto de este estudio, está constituida por los procesos de filtración y desinfección: A la fecha cuenta con siete etapas mencionadas a continuación: Cámara de quietamiento, escaleras de aireación, filtración lenta (Prefiltros), filtración rápida, almacenamiento, cloración y distribución.

A través de los años esta PTAP, ha presentado graves falencias operativas sobre todo en época de lluvia considerándose un periodo crítico, donde las condiciones fisicoquímicas de las fuentes abastecedoras se alteran de forma natural y en ocasiones las etapas que conforman el sistema de tratamiento no permiten el suministro de agua en óptimas condiciones, pues aumentan los niveles de turbiedad, color y arrastre de material particulado entre otras características fisicoquímicas; situación que pone en riesgo la continuidad en la prestación del servicio de agua al municipio de Málaga; afectando considerablemente el índice de riesgo de la calidad del agua suministrada a la población malagueña.

Este trabajo de grado contempla la evaluación de la eficiencia del sistema de tratamiento y la determinación de la calidad del agua generada; mediante la toma y caracterización fisicoquímica de muestras en las diferentes etapas que componen la planta principal de agua potable del municipio de Málaga Santander.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar la eficiencia del sistema de tratamiento de la Planta principal de agua potable del municipio de Málaga, Santander.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar la caracterización fisicoquímica de las aguas a la entrada y la salida del sistema de tratamiento de la planta principal de agua potable del municipio de Málaga Santander.

Evaluar los resultados obtenidos en la caracterización fisicoquímica con base a la resolución 2115 de 2007.

Determinar el comportamiento de la Planta principal de agua potable del municipio de Málaga, Santander en periodo normal y periodo crítico.

2. Planteamiento del problema

A través de los años, la planta principal de tratamiento de agua potable de Málaga, ha presentado problemas en el suministro de agua apta para consumo humano.

El IRCA (Índice de riesgo de la calidad del agua establecido en la resolución 2115 de 2007) evaluado, ha arrojado valores con resultados medio y alto; asociado principalmente a problemas que se presentan en épocas de lluvia, donde las condiciones de las fuentes abastecedoras se alteran de forma natural y en ocasiones las operaciones unitarias que conforman el sistema de tratamiento no realizan de manera adecuada su función. En este caso, aumentan las concentraciones de las características fisicoquímicas, lo que conlleva a alterar negativamente los parámetros de calidad, poner en riesgo la continuidad en la prestación del servicio, el concepto sanitario y la calidad del agua suministrada a la población Malagueña.

Algunas de las falencias que presenta este proceso de potabilización son debido a: el deterioro gradual de la fuente abastecedora, alteraciones fisicoquímicas del agua natural en época de lluvias, inadecuados manejos de los sistemas que componen las operaciones unitarias del sistema y errores o fallas técnicas, entre otras.

Por lo anterior, se hace indispensable evaluar la eficiencia del sistema de tratamiento de agua potable a través de la determinación de parámetros in situ como: pH, Temperatura del agua y cloro residual libre y del laboratorio como: coliformes totales, coliformes fecales, turbidez, color, sólidos suspendidos, hierro total, sulfatos, cloruros, color aparente y dureza total, con el fin de dar respuesta a los siguientes interrogantes: ¿Cuáles son los problemas técnicos que influyen en la producción de agua de buena calidad en la PTAP principal de Málaga? y ¿Qué actividades se pueden mejorar para emplear eficientemente las instalaciones con las que cuenta la PTAP?

3. Marco Teórico

La potabilización es un proceso compuesto de operaciones unitarias que permiten disminuir las concentraciones de sustancias químicas, eliminar impurezas, sustancias contaminantes y organismos patógenos que puedan causar problemas para la salud humana. (Vargas, 2004)

Existen diferentes modelos de plantas de potabilización del agua, entre ellas se destacan: solo filtración, filtración y desinfección, filtración directa, convencional, compacta, integral y de filtración lenta, así como diversos procesos modernos con microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis, entre otras.

Según Jairo Romero, la calidad del agua natural cambia de una fuente a otra, por ello, el tipo de tratamiento requerido para producir agua potable también varía. Una planta eficiente requiere previamente el estudio de la calidad de la fuente abastecedora y la selección apropiada de procesos y operaciones de tratamiento adecuado para producir agua de calidad mediante estudios de tratabilidad (Romero, 1999).

3.1 Tratamiento para potabilizar el agua

El tratamiento de agua potable es un proceso complejo que requiere una combinación de procesos y tecnologías para garantizar que el agua natural se convierta en agua potable segura y de alta calidad. Los avances en la tecnología de tratamiento de agua han mejorado la eficiencia y la efectividad de estos procesos, permitiendo el suministro de agua potable confiable a

comunidades en todo el mundo. Sin embargo, es importante destacar que el monitoreo continuo de la calidad del agua y el mantenimiento adecuado de las instalaciones de tratamiento son fundamentales para garantizar la seguridad del suministro de agua potable a largo plazo.

El tratamiento del agua potable varía según las características del agua natural y los estándares de calidad del agua establecidos por las autoridades sanitarias. Dentro de los procesos característicos del tratamiento de agua potable se encuentran:

3.1.1 Coagulación y floculación

Son procesos químicos que se utilizan para coagular las partículas finas del agua y formar flóculos. Este proceso implica la adición de sustancias químicas, como sulfato de aluminio o cloruro férrico, para neutralizar las cargas negativas de los contaminantes, permitiendo que se aglomeren o agrupen las partículas suspendidas formando flóculos más grandes. Los flóculos facilitan la eliminación en etapas posteriores del tratamiento como la sedimentación o la filtración, de sólidos y contaminantes pequeños y dispersos convirtiéndolas en partículas grandes y pesadas. (Pico, 2015)

3.1.2 Sedimentación

Es un proceso físico que se utiliza para separar los flóculos del agua. Después de la coagulación y floculación, el agua pasa a través de tanques de sedimentación donde los flóculos se asientan por gravedad. El agua clarificada se recoge en la parte superior, mientras que los lodos sedimentados se eliminan. (RAS, 2000)

3.1.3 Filtración

La filtración es un proceso físico que se utiliza para eliminar los contaminantes restantes del agua. En ella, el agua pasa a través de medios filtrantes, como arena, grava y carbón activado, para eliminar partículas suspendidas adicionales, microorganismos y compuestos orgánicos disueltos pues quedan atrapados en el medio filtrante. (RAS, 2000)

3.1.4 Desinfección

La desinfección es un proceso químico crucial para eliminar o inactivar los microorganismos patógenos presentes en el agua. Los métodos comunes de desinfección incluyen la cloración, la cloraminación, la ozonización y la irradiación ultravioleta. (Barrecechea, 2004).

3.1.5 Ajuste del pH

En algunos casos, el agua puede requerir ajuste del pH para cumplir con los estándares de calidad. Esto se puede lograr mediante la adición de sustancias químicas alcalinas o ácidas. (RAS, 2000)

3.1.6 Adsorción y tratamiento avanzado

Dependiendo de la calidad del agua natural y los requisitos de tratamiento, pueden ser necesarios procesos adicionales, como la adsorción en carbón activado granular (GAC), la membrana de ósmosis inversa y la desalinización.

El agua tratada se almacena en tanques de almacenamiento antes de ser distribuida a los consumidores. El agua se analiza regularmente para garantizar que cumple con los estándares de calidad establecidos por las autoridades sanitarias. (RAS, 2000)

La Planta principal de tratamiento de agua potable de Málaga, es una planta de tipo convencional construida en concreto, de funcionamiento hidráulico, que emplea filtración y desinfección. Está conformada inicialmente por una cámara de quietamiento donde se reúnen las aguas captadas en las bocatomas de las fuentes Cuzagueta, Carraca, Cortaderas (Km 8), Laureano Gómez, Los Molinos y La Magnolia mostradas en la tabla 1 y la Figura 1, que permiten el ingreso de un caudal promedio de 52 L/s para iniciar operaciones.

Tabla 1. Georreferenciación puntos de captación

<i>Corriente</i>	<i>Coordenadas Geográficas</i>		<i>Msnm</i>
<i>Cuzagueta</i>	<i>6° 45' 50" N</i>	<i>72° 43' 43" W</i>	<i>2496</i>
<i>Carraca</i>	<i>6° 42' 37" N</i>	<i>72° 44' 25" W</i>	<i>2380</i>
<i>La magnolia</i>	<i>6° 41' 53" N</i>	<i>72° 44' 33" W</i>	<i>2343</i>
<i>Laureano Gómez</i>	<i>6° 41' 48" N</i>	<i>72° 44' 46" W</i>	<i>2484</i>
<i>Cortaderas</i>	<i>6° 42' 50" N</i>	<i>72° 45' 14" W</i>	<i>2837</i>
<i>Molinos</i>	<i>6° 42' 43" N</i>	<i>72° 45' 1" W</i>	<i>2722</i>

Figura 1. Fuentes abastecedoras PTAP

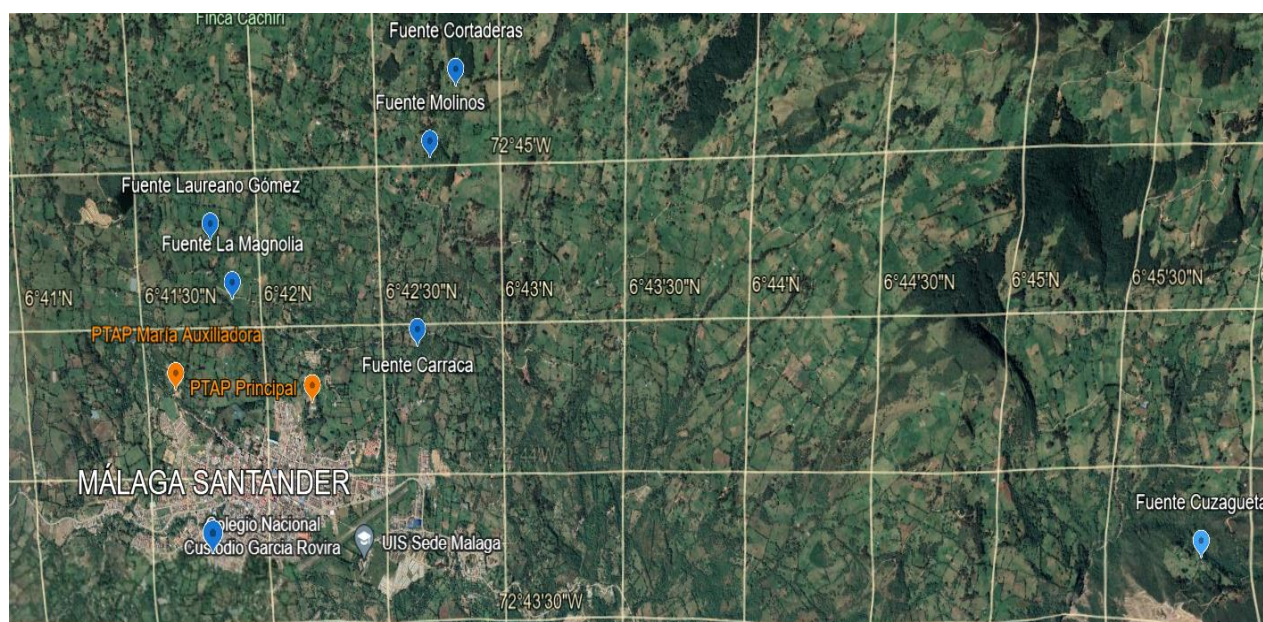


Figura 2. *Ingreso fuentes superficiales PTAP principal Málaga*



Figura 3. *Cámara de quietamiento*



Luego, el agua pasa a la estructura de aireación tipo cascada donde se oxida el hierro y disminuye la concentración de sustancias volátiles contenidas en ella.

Figura 4. *Escaleras de oxigenación*



De allí se conduce el caudal al proceso de filtración lenta, de flujo ascendente donde se pretende eliminar gran parte de los sedimentos y material particulado con el que venga el agua mediante grava, arena, carbón coque y antracita.

Figura 5. *Vista lateral Prefiltros*



Figura 6. *Vista frontal Prefiltros*



Por medio de un canal que termina en un vertedero el agua prefiltrada llega hasta los filtros rápidos, conformados por cuatro unidades de filtros con carbón activado, los cuales cuentan con un sistema de retrolavado dirigido por la acción manual de válvulas.

Figura 7. *Filtros rápidos*



Luego, pasa a los tanques de almacenamiento de agua sin clorar, empleados como reserva para períodos secos. En total son ocho tanques que se llenan para suplir el caudal proveniente de las captaciones cuando este disminuye ostensiblemente.

Figura 8. *Tanques de almacenamiento*



Figura 9. *Estructura tanque de almacenamiento*



La última operación unitaria que se lleva a cabo es la desinfección por medio de la adición de cloro gaseoso, el cual se efectúa antes de llegar a los tanques de distribución del municipio.

Figura 10. *Desinfección*



Figura 11. *Tanques de distribución*



Según lo anterior, se evidencia que en la PTAP Principal de Málaga, no cuenta con los procesos de coagulación/floculación, los dos procesos prevalecientes son la filtración y la desinfección, la filtración en una PTAP consiste en hacer pasar el agua a través de un medio poroso, normalmente de arena, en el cual actúan una serie de mecanismos de remoción cuya eficiencia depende de las características de la suspensión y del medio poroso. (Vargas, 2004)

De acuerdo con las investigaciones realizadas por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, el filtro debe producir un efluente con una turbiedad menor o igual a 0,10 UNT para impedir la interferencia por turbiedad en la desinfección. Por su parte, la desinfección es una operación unitaria que tiene como función principal completar la remoción de microorganismos patógenos que no quedaron retenidos en el filtro y servir de protección contra la contaminación que el agua pueda encontrar en el sistema de distribución. (Barrenechea, 2004).

En muchos sistemas de tratamiento de agua potable, las operaciones unitarias del sistema de potabilización no satisfacen las normas mínimas para brindarle a la población agua apta para consumo humano, en la mayoría de casos porque las unidades de tratamiento resultan ineficientes (Cepis, 2005) y no permiten tener el cumplimiento respecto la resolución 2115 del 22 de junio de 2007, donde se establecen los valores máximos aceptables asociados a cada una de las características físicas, químicas y microbiológicas del agua y los puntajes de riesgo cuando no se cumple con los valores aceptables establecidos en la misma normativa.

3.2 Periodos críticos en una PTAP

En una planta de tratamiento de agua potable (PTAP), hay varios periodos críticos que requieren una atención especial. Estos periodos pueden variar según las condiciones locales y las características específicas de la planta. A continuación, se mencionan algunos de los periodos más comunes:

3.2.1 Periodos de alta demanda

Durante los periodos de alta demanda de agua potable, como en temporadas secas o durante eventos especiales, la planta puede enfrentar un aumento significativo en la cantidad de agua que debe tratar. Esto puede sobrecargar los equipos de tratamiento y los procesos de la planta, lo que requiere una atención adicional para mantener la eficiencia y la calidad del agua tratada. (Crittenden, 2012)

3.2.2 Periodos de lluvia intensa o inundaciones

Durante los periodos de lluvia intensa o inundaciones, el agua natural puede contener una mayor carga de sedimentos, materia orgánica y otros contaminantes. Estas condiciones pueden afectar la eficiencia de los procesos de tratamiento, especialmente la remoción de sólidos y la clarificación del agua. Es importante monitorear y ajustar el proceso de tratamiento para garantizar una remoción adecuada de los contaminantes presentes en el agua natural. (Mount, 2012)

3.2.3 Cambios climáticos

Algunas características del agua natural, como la temperatura, la turbidez y la concentración de nutrientes, pueden fluctuar durante diferentes condiciones climáticas, afectando

la eficiencia de ciertos procesos de tratamiento, como la coagulación y la desinfección. Se deben realizar ajustes en los parámetros de tratamiento para adaptarse a las condiciones cambiantes y mantener la calidad del agua tratada. (Mount, 2012)

3.2.4 Mantenimiento y limpieza de equipos o etapas

Los periodos de mantenimiento planificado y limpieza de equipos, así como mantenimiento de las etapas son críticos para el funcionamiento adecuado de una PTAP. Durante estos periodos, se deben llevar a cabo inspecciones, reparaciones y limpieza de los equipos de tratamiento para garantizar su buen funcionamiento y prolongar su vida útil. Es importante programar estos periodos de manera cuidadosa para minimizar el tiempo de inactividad de la planta y asegurar la continuidad en la producción de agua potable.

3.2.5 Cambios en la calidad del agua natural

Si hay cambios en la calidad del agua natural, como la presencia de nuevos contaminantes o un aumento en la concentración de ciertos parámetros, la planta puede requerir ajustes en el proceso de tratamiento para mantener la calidad del agua potable. Es necesario monitorear regularmente la calidad del agua natural y realizar análisis de laboratorio para detectar cambios y tomar las medidas preventivas y/o correctivas necesarias. (Acodal, 2022)

Adicionalmente, es fundamental recordar que los ajustes específicos pueden variar según las características y necesidades de cada planta de tratamiento de agua potable. Por lo tanto, es importante contar con personal capacitado y experiencia en el funcionamiento de la PTAP para realizar los ajustes necesarios de manera adecuada y segura.

3.3 Períodos críticos para las PTAP y la calidad del agua

Según lo indica Mount (2012) los periodos críticos en una planta de tratamiento de agua potable y la calidad del agua incluyen:

3.3.1 Temporadas de lluvias

Las lluvias pueden causar la escorrentía de contaminantes de las tierras agrícolas, las carreteras y otras fuentes. La escorrentía puede aumentar la carga de contaminantes en el agua bruta, lo que puede dificultar la eliminación de los contaminantes por parte de la PTAP.

3.3.2 Temporadas de sequía

Las sequías pueden reducir los niveles de agua en las fuentes de agua, lo que puede concentrar los contaminantes en el agua bruta. La concentración de contaminantes puede dificultar la eliminación de los contaminantes por parte de la PTAP.

3.3.3 Eventos naturales

Eventos naturales como deslizamientos, remoción en masa e inundaciones pueden dañar las PTAP y causar fallas en el proceso de tratamiento. Las fallas en el proceso de tratamiento pueden permitir que los contaminantes pasen al agua tratada.

3.4 Medidas de mitigación

Según Edzwald (2011) para reducir los efectos de los períodos críticos, las PTAP deben implementar medidas de mitigación, tales como:

3.4.1 Monitoreo continuo de la calidad del agua

El monitoreo continuo de la calidad del agua permite a las PTAP identificar los cambios en la calidad del agua y tomar medidas para mitigar los efectos de estos cambios.

3.4.2 Plan de respuesta a emergencias

Las PTAP deben tener un plan de respuesta a emergencias para abordar los eventos naturales y otras situaciones que pueden causar fallas en el proceso de tratamiento.

3.4.3 Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo del equipo y los sistemas de la PTAP ayuda a reducir el riesgo de fallas en el proceso de tratamiento, actividades que son esenciales para garantizar que las PTAP puedan proporcionar agua segura y potable a la población, incluso durante los períodos críticos.

3.5 Factores que alteran la calidad del agua

La alteración negativa de la calidad del agua potable en plantas de tratamiento puede ocurrir por una variedad de factores, incluyendo:

3.5.1 Contaminación

La contaminación del agua natural que ingresa a la planta de tratamiento puede ser causada por una variedad de fuentes, incluyendo aguas residuales, desechos industriales y agrícolas. Si la contaminación no se elimina adecuadamente, puede afectar la calidad del agua tratada. (García, 2021)

3.5.2 Fallas en el proceso de tratamiento

Los procesos de tratamiento de agua potable están diseñados para eliminar una variedad de contaminantes del agua. Sin embargo, si hay fallas en el proceso de tratamiento, los contaminantes pueden permanecer en el agua tratada. (Krause, 2015)

3.5.3 Mantenimiento inadecuado de la planta

El mantenimiento adecuado de la planta de tratamiento es esencial para garantizar que los procesos de tratamiento funcionen correctamente. Si la planta no se mantiene adecuadamente, los contaminantes pueden acumularse y afectar la calidad del agua tratada. (García, 2021)

3.6 Ajustes en los procesos de tratamiento

Durante los cambios climáticos en una planta de tratamiento de agua potable (PTAP), pueden ser necesarios varios ajustes en los procesos de tratamiento para adaptarse a las nuevas condiciones. Algunos de los ajustes comunes que se pueden realizar son los siguientes:

3.6.1 Coagulación y floculación

La dosificación de coagulantes y floculantes puede requerir ajustes durante los cambios climáticos. Por ejemplo, durante los periodos de lluvia intensa, es posible que se necesite aumentar la dosis de coagulantes para tratar la mayor carga de sólidos y turbidez presentes en el agua natural.

Además, los cambios en la temperatura del agua pueden afectar la eficiencia de la coagulación y la floculación, por lo que puede ser necesario ajustar los parámetros de dosificación y los tiempos de retención para lograr una óptima formación de flóculos. (Barreto, 2020)

Los coagulantes más empleados en las PTAP son el Sulfato de aluminio tipo A y tipo B, el cloruro férrico, el Policloruro de aluminio (PAC), el Sulfato ferroso, Sulfato férrico, Aluminato de sodio y el Hidróxido de magnesio.

3.6.2 Filtración

En algunos casos, los cambios climáticos pueden requerir ajustes en los procesos de filtración. Por ejemplo, si hay un aumento en la concentración de sólidos suspendidos en el agua cruda debido a las lluvias, se puede requerir una mayor frecuencia de lavado de los filtros para mantener su eficiencia. Además, los cambios en la temperatura pueden afectar la eficiencia de los medios de filtración, por lo que se pueden necesitar ajustes en la velocidad de filtración o en la dosificación de coadyuvantes para optimizar la remoción de partículas. (Torres, 2018).

3.6.3 Desinfección

La desinfección es un paso crítico en el tratamiento de agua potable para garantizar la eliminación de microorganismos patógenos. Durante los cambios climáticos, es posible que se requieran ajustes en los procesos de desinfección para mantener una adecuada eficacia. Por ejemplo, las altas temperaturas pueden aumentar la demanda de desinfectante, como el cloro, por lo que puede ser necesario incrementar la dosis de desinfectante o ajustar los tiempos de contacto. Además, los cambios en la calidad del agua natural, como la presencia de algas o materia orgánica, pueden requerir el uso de desinfectantes adicionales o técnicas de desinfección alternativas. (Velandia, 2019).

Los compuestos más empleados en las PTAP para la desinfección son el cloro gaseoso y los hipocloritos de sodio y de calcio. Sin embargo, existen técnicas alternativas que incluyen

sustancias como el Yodo, el bromo, la plata y técnicas con Radiación Ultravioleta, Ozono y Dióxido de cloro.

3.6.4 Monitoreo y ajuste continuo

Es importante realizar un monitoreo continuo de los parámetros de calidad del agua natural y tratada durante los cambios climáticos. Esto permite detectar cualquier desviación en los valores objetivo y tomar las medidas correctivas necesarias de manera oportuna. Los datos recopilados durante estos periodos pueden ser utilizados para ajustar los parámetros de tratamiento y optimizar la eficiencia de la PTAP.

3.7 Marco regulatorio

El Ministerio de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, a través de la Resolución 2115 del 22 de junio del 2007, señaló las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. A su vez, presenta los valores máximos aceptables para cada característica física, química y microbiológica de los análisis de agua, según tengan efecto adverso, implicaciones o consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana, tal como se presenta a continuación en la tabla 2:

Tabla 2. *Valores máximos aceptables para las características analizadas*

CARACTERÍSTICA	UNIDADES	VALOR MÁXIMO ACEPTABLE Y/O RANGO DE ACEPTACIÓN
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto	15
Olor y sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2
Antimonio	mg/L Sb	0,02

Arsénico	mg/L As	0,01
Bario	mg/L Ba	0,7
Cadmio	mg/L Cd	0,003
Cianuro libre y disociable	mg/L CN ⁻	0,05
Cobre	mg/L Cu	1,0
Cromo total	mg/L Cr	0,05
Mercurio	mg/L Hg	0,001
Níquel	mg/L Ni	0,02
Plomo	mg/L Pb	0,01
Selenio	mg/L Se	0,01
Trihalometanos Totales	mg/L THMs	0,2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L HAP	0,01
Carbono orgánico total (COT)	mg/L COT	5,0
Nitritos	mg/L NO ₂ ⁻	0,1
Nitratos	mg/L NO ₃ ⁻	10
Fluoruros	mg/L F-	1,0
Calcio	mg/L Ca	60
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	200
Aluminio	mg/L Al ³⁺	0,2
Magnesio	mg/L Mg	36
Manganeso	mg/L Mn	0,1
Molibdeno	mg/L Mo	0,07
Zinc	mg/L Zn	3
Fosfatos	mg/L PO ₄ ³⁻	0,5
Dureza total	mg/L CaCO ₃	300
Hierro Total	mg/L Fe	0,3
Sulfatos	mg/L SO ₄ ²⁻	250
pH	Unidades de pH	6,5-9
Cloruros	mg/L Cl ⁻	250
Cloro residual libre	mg/L	0,3-2,0
Coliformes fecales	UFC/ 100 cm ³	0
Coliformes totales	UFC/ 100 cm ³	0

A partir de estos límites o valores aceptables se puede llegar a determinar el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA) cuando hay incumplimiento en alguno de ellos.

3.7.1 El Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA)

El Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA) es una metodología que se utiliza para evaluar la calidad del agua potable en Colombia. El IRCA se basa en los resultados de los análisis de muestras de agua para consumo humano, y se utiliza para determinar el riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el consumo de agua no apta para el consumo humano según lo indica la Resolución 2115 del 22 de Junio de 2007.

Este índice, se calcula a partir de los puntajes de riesgo asignados a las características no aceptables relacionadas en su mayoría de veces con los periodos críticos de las PTAP y los puntajes de riesgo asignados a todas las características analizadas según la tabla 3:

Tabla 3. Puntajes de riesgo asignados a los parámetros según el IRCA

CARACTERÍSTICA	PUNTAJE DE RIESGO
Color aparente	6
Turbiedad	15
Dureza total	1
Hierro Total	1,5
Sulfatos	1
pH	1,5
Cloruros	1
Cloro residual libre	15
Alcalinidad total	1
Calcio	1
Fosfatos	1
Manganeso	1
Molibdeno	1
Magnesio	1
Zinc	1
Nitratos	1
Nitritos	3
Aluminio	3
Fluoruros	1
COT	3
Coliformes fecales (E.Coli)	25
Coliformes totales	15
Sumatoria puntajes asignados	100

El valor de IRCA es cero (0%) cuando hay cumplimiento de los valores aceptables para las características analizadas, y cien (100%) para el más alto riesgo cuando no hay cumplimiento de ninguna característica lo que hará al agua inviable sanitariamente. (Ministerio de salud y protección social, 2007).

El IRCA se clasifica en cinco categorías, de acuerdo con el riesgo de ocurrencia de enfermedades relacionadas con el agua para el consumo humano:

- Sin riesgo: El IRCA se encuentra entre el 0 y el 5%.
- Riesgo bajo: El IRCA se encuentra entre el 5.1 % y el 14%.
- Riesgo medio: El IRCA se encuentra entre el 14.1% y el 35%.
- Riesgo alto: El IRCA se encuentra entre el 35.1% y el 80%.
- Inviabile sanitariamente: El IRCA se encuentra entre el 80.1 y el 100%.

En Colombia, el IRCA se determina para todos los sistemas de abastecimiento de agua potable, independientemente de su tamaño o ubicación, permitiendo monitorear la calidad del agua potable y tomar medidas correctivas cuando sea necesario.

Cuando se requiere evaluar un sistema y su eficiencia, se debe determinar el comportamiento que pueden llegar a presentar los componentes del mismo y los parámetros que influyen en la calidad del agua, la evaluación de la eficiencia, indicada como porcentaje se calcula a partir las concentraciones a la entrada y a la salida del tratamiento, determinando la remoción de turbiedad, color y sólidos totales.

3.8 Evaluación de la eficiencia de una PTAP

La evaluación de la eficiencia de una planta de tratamiento de agua potable es un proceso importante para garantizar que el sistema esté funcionando correctamente y produciendo agua potable de alta calidad de manera eficiente. A continuación, se presentan algunos aspectos clave a considerar al evaluar la eficiencia de una planta de tratamiento de agua potable:

3.8.1 Cumplimiento de los estándares de calidad del agua

La eficiencia de una planta de tratamiento de agua potable se evalúa en función de su capacidad para cumplir con los estándares de calidad del agua establecidos por las autoridades sanitarias. Se deben realizar análisis regulares del agua tratada para asegurarse de que cumpla con los límites establecidos para los diferentes parámetros, como turbidez, pH, cloro residual, contenido de sustancias orgánicas e inorgánicas, y presencia de microorganismos patógenos. (Krause, 2015)

3.8.2 Remoción de contaminantes

La eficiencia de la planta se evalúa en términos de su capacidad para eliminar los contaminantes presentes en el agua natural. La planta debe ser capaz de eliminar eficazmente sólidos suspendidos, materia orgánica, microorganismos patógenos, productos químicos y otros contaminantes, según sea necesario. Se deben realizar pruebas de laboratorio para evaluar la eficiencia de remoción de la planta en relación con diferentes contaminantes.

3.8.3 Utilización de productos químicos

El uso de productos químicos en el proceso de tratamiento de agua potable puede tener un impacto en la eficiencia y la sostenibilidad del sistema. Se debe evaluar la dosificación de productos químicos utilizados, como coagulantes, desinfectantes y ajustadores de pH, para asegurarse de que se estén utilizando de manera óptima. Además, se pueden explorar alternativas y tecnologías más sostenibles para reducir la dependencia de productos químicos y minimizar los impactos ambientales.

3.8.4 Mantenimiento y operación

La eficiencia de una planta de tratamiento de agua potable también depende de la adecuada operación y mantenimiento de los equipos y sistemas. Es importante llevar a cabo un programa de mantenimiento preventivo regular, que incluya la limpieza, calibración y reparación de equipos, para garantizar su funcionamiento óptimo. Asimismo, se deben capacitar y actualizar constantemente al personal encargado de operar la planta, para asegurar que estén utilizando adecuadamente los equipos y siguiendo los procedimientos operativos estándar.

3.9 Métodos de evaluación de la eficiencia de un sistema de tratamiento

La evaluación de la eficiencia de un sistema de tratamiento de agua puede realizarse mediante una variedad de métodos, incluyendo:

3.9.1 Monitoreo de la calidad del agua

El monitoreo de la calidad del agua es el método más importante para evaluar la eficiencia de un sistema de tratamiento. El monitoreo debe realizarse en las etapas de captación, pretratamiento, tratamiento y distribución del agua.

3.9.2 Análisis de los registros de operación

El análisis de los registros de operación de la planta permite identificar cualquier problema o deficiencia en el funcionamiento del sistema.

3.9.3 Inspección visual de las instalaciones

La inspección visual de las instalaciones de la planta permite identificar cualquier problema o deficiencia en el equipo y los sistemas de la planta.

La evaluación de la eficiencia de un sistema de tratamiento de agua debe centrarse en los siguientes aspectos:

3.9.4 Eficiencia en la eliminación de contaminantes

La evaluación debe determinar si el sistema de tratamiento es capaz de eliminar los contaminantes del agua para cumplir con los estándares de calidad establecidos.

3.9.5 Eficiencia en el uso de los recursos

La evaluación debe determinar si el sistema de tratamiento es eficiente en el uso de los recursos, como la energía, el agua y los productos químicos.

3.9.6 Eficiencia en la operación y el mantenimiento

La evaluación debe determinar si el sistema de tratamiento está siendo operado y mantenido de manera adecuada.

3.10 Parámetros que evalúan la eficiencia

Los parámetros que evalúan la eficiencia de una etapa de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) varían en función de la etapa en cuestión. Sin embargo, en general, estos parámetros se pueden clasificar en dos categorías principales:

3.10.1 Parámetros para evaluar la eficiencia de la remoción

Estos parámetros miden la capacidad de la etapa para eliminar altas concentraciones de sustancias en el agua, tales como color, turbidez, cloruros, dureza total, hierro total, sulfatos, sólidos suspendidos totales, concentración de desinfectante, coliformes totales y Escherichia Coli.

3.10.2 Parámetros de calidad

Estos parámetros miden la calidad del agua después del tratamiento, a su vez permiten el cálculo del IRCA como son color aparente, turbiedad, pH, cloro residual libre, dureza total, sulfatos, hierro total, cloruros, coliformes totales y Escherichia Coli.

3.11 Pruebas de laboratorio

Desde la parte técnica, para evaluar la eficiencia de remoción de una planta de tratamiento de agua potable, se pueden realizar varias pruebas de laboratorio para analizar la calidad del agua antes y después del proceso de tratamiento. A continuación, se presentan algunas pruebas comunes que se llevan a cabo:

3.11.1 Análisis de turbidez

La turbidez es una medida de la cantidad de partículas suspendidas en el agua. La planta de tratamiento debe ser capaz de reducir la turbidez a niveles aceptables, es decir menores a 2 NTU. Se realiza un análisis de turbidez antes y después del proceso de tratamiento para evaluar la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos. La turbidez en el agua puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión, desde coloides hasta material particulado de mayor tamaño compuesto por limo, arcilla, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, organismos planctónicos, microorganismos, etc. (Romero, 1996). Un aumento en la turbidez puede afectar la eficiencia de los procesos de coagulación, floculación y filtración en la planta de tratamiento. Por lo tanto, es importante monitorear regularmente la turbidez del agua natural para detectar cambios y ajustar los parámetros de tratamiento en consecuencia. (Torres, 2018)

3.11.2 Análisis de color

Las causas más comunes de color en el agua se deben principalmente a la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución, así como su contacto con desechos orgánicos. El color aparente incluye el color de las sustancias en solución y coloidales y también el color suspendido. Para la determinación de color se emplean los métodos de comparación visual y espectrofotométrico, el primero proporciona de forma aproximada información cuantitativa de la

concentración del color, mientras el segundo proyecta a través de la muestra un haz de luz a determinada longitud de onda midiendo la cantidad de luz que es absorbida o transmitida a través de la muestra. La eficiencia en la remoción de color en una planta de tratamiento de agua potable se refiere a la capacidad del sistema para reducir o eliminar los compuestos que causan color en el agua, como los pigmentos orgánicos y los compuestos inorgánicos de metales pesados. (Pradana, 2018)

3.11.3 Sólidos suspendidos totales (SST)

Los sólidos suspendidos totales son una medida de la cantidad total de partículas sólidas en el agua, incluyendo materia orgánica, sedimentos y otros materiales suspendidos. Este material es transportado gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua. (Romero, 1996). Durante los cambios climáticos, la concentración de SST puede fluctuar, un aumento en la concentración de SST puede afectar la eficiencia de los procesos de sedimentación y filtración en la planta de tratamiento. La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que los niveles de SST en el agua potable no superen los 50 mg/L. Los niveles de SST superiores a 50 mg/L pueden causar turbidez, sabor y olor desagradables en el agua potable. También pueden dificultar la filtración y el tratamiento del agua. Por lo tanto, es importante monitorear los niveles de SST en el agua natural para realizar ajustes en el tratamiento si es necesario.

3.11.4 Concentración de nutrientes

Durante los cambios climáticos, los niveles de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo en el agua cruda pueden variar debido a factores como la escorrentía agrícola o la proliferación de algas. Estos nutrientes pueden tener un impacto en la calidad del agua potable y en los procesos de tratamiento, como la formación de subproductos de desinfección. Por lo tanto, es importante

monitorear la concentración de nutrientes en el agua natural y realizar ajustes en el proceso de tratamiento si es necesario. (Pradana, 2018)

3.11.5 Concentración de metales

La concentración de metales en agua puede variar en función de una serie de factores, como la fuente del agua, las condiciones geológicas del entorno y las actividades humanas. La concentración de metales en agua natural suele ser baja. Sin embargo, la concentración de metales puede aumentar debido a la actividad humana, como la minería, la industria y la agricultura. La contaminación por metales pesados puede tener una serie de efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente, de aquí la importancia de su monitoreo. (Krause, 2015)

3.11.6 pH

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad del agua. Los cambios climáticos, como las lluvias intensas, pueden afectar el pH del agua natural debido a la entrada de ácidos o bases naturales. El pH puede influir en la eficiencia de los procesos de coagulación, floculación y desinfección. Por lo tanto, es importante monitorear el pH del agua natural y realizar ajustes si es necesario para optimizar el tratamiento. El valor para el potencial de hidrógeno pH del agua para consumo humano, deberá estar comprendido entre 6,5 y 9,0. (Ministerio de protección social, 2007).

3.11.7 Temperatura

La temperatura del agua natural puede variar durante los cambios climáticos y puede afectar la eficiencia de los procesos de tratamiento, como la coagulación, la floculación y la desinfección. Es importante monitorear la temperatura del agua natural para detectar cambios y realizar ajustes en los parámetros de tratamiento si es necesario.

3.11. 8 Análisis de concentración de desinfectantes

Si la planta utiliza desinfectantes como el cloro o la cloramina, se deben medir las concentraciones residuales de estos desinfectantes en el agua tratada. Esto es importante para garantizar que se mantenga un nivel adecuado de desinfección.

3.11.9 Análisis de metales pesados y otros contaminantes

Dependiendo de las características del agua natural y los requisitos de calidad, se pueden realizar análisis de metales pesados, productos químicos orgánicos y otros contaminantes específicos para evaluar la eficiencia de remoción de estos compuestos.

3.11.10 Análisis microbiológicos

Se pueden realizar análisis microbiológicos para evaluar la eficiencia de remoción de microorganismos patógenos. Estos análisis incluyen la detección de bacterias indicadoras, como coliformes totales y *Escherichia coli* (*E. coli*) a través de técnicas como Filtración por membrana, Sustrato Definido, enzima sustrato y presencia – ausencia, Las características microbiológicas del agua para consumo humano deben enmarcarse dentro de los valores máximos aceptables desde el punto de vista microbiológico, los cuales son establecidos teniendo en cuenta los límites de confianza del 95% y para técnicas con habilidad de detección desde 1 Unidad Formadora de Colonia (UFC) ó 1 microorganismo en 100 cm³ de muestra.

Los análisis mencionados anteriormente, permiten determinar el Índice de Riesgo de la calidad del agua (IRCA). La calidad del agua potable tiene un impacto significativo en la salud humana, el medio ambiente y la economía.

3.12 Impactos de la calidad del agua

Los impactos de la calidad del agua potable se pueden clasificar en tres categorías:

3.12.1 Impactos en la salud humana

El agua potable de baja calidad puede causar una variedad de problemas de salud, incluyendo enfermedades gastrointestinales, diarrea, cólera, hepatitis A, fiebre tifoidea y poliomielitis. Estas enfermedades pueden causar una morbilidad y mortalidad significativas, especialmente en niños y personas de edad avanzada.

3.12.2 Impactos en el medio ambiente

El agua potable de baja calidad puede contaminar el medio ambiente, afectando la flora y la fauna. La contaminación del agua puede causar la muerte de peces y otros organismos acuáticos, y puede también contaminar el suelo y el aire.

3.12.3 Impactos en la economía

El agua potable de baja calidad puede tener un impacto negativo en la economía, causando pérdidas de productividad y aumento de los costos de atención médica. Las personas que se enferman por consumir agua potable de baja calidad pueden perder días de trabajo o escuela, lo que puede reducir la productividad. Además, el tratamiento de las enfermedades relacionadas con el agua puede ser costoso, lo que puede aumentar los costos de atención médica.

4. Metodología

Con el fin de llevar a cabo la evaluación de la eficiencia del sistema de tratamiento de la Planta de agua potable principal del municipio de Málaga, Santander, se realizaron seis (6) tomas de muestras de agua en diferentes jornadas de operación del sistema, tres (3) en días de lluvia y tres (3) en días secos. A su vez, cada muestreo se realizó en las siguientes secciones: 1. Entrada PTAP tanquilla recolectora, 2. Entrada en prefiltros, 3. Salida de los prefiltros, 4. Entrada a los filtros rápidos, 5. Salida de los filtros rápidos y 6. Salida de la PTAP muestreo de distribución.

Las tres muestras para días secos se tomaron en la segunda, tercera y cuarta semana de septiembre correspondiente a las fechas lunes 11 de septiembre, lunes 18 de septiembre y lunes 25 de septiembre respectivamente, las muestras para días de lluvia se tomaron la tercera y cuarta semana de octubre y la primera semana de noviembre que se presentaron lluvias intensas en el municipio, correspondiente a las fechas miércoles 18 de octubre, martes 24 de octubre y lunes 6 de noviembre respectivamente. De esta manera en cada muestreo se recolectaron seis (6) muestras en el interior de la planta para los seis (6) días muestreados, para un total de treinta y seis (36) muestras de agua, a las cuales se les realizó la caracterización fisicoquímica y microbiológica, determinando los cambios que tiene un agua natural de las fuentes abastecedoras al agua tratada suministrada a los usuarios del sistema.

4.1 Muestreo

El muestreo se realizó de forma puntual, las variables medidas In situ en este caso fueron la temperatura medida con el equipo portátil de Electrodo combinado para uso General, con código

HI 1230B, serie 04023C7N, Sonda de temperatura con serie CO13124E de Hanna Instruments, el cloro residual libre y el pH medidos con Fotómetro portátil código HI 97710C.

Las condiciones de recolección y preservación de las muestras, se realizaron según los protocolos establecidos en el Manual de instrucciones para la toma, preservación y transporte de muestras de agua de consumo humano para análisis de laboratorio del Instituto Nacional de Salud ISBN: 978-958-13-0147-8 y el protocolo establecido en el laboratorio de aguas de las Empresas Públicas Municipales de Málaga, garantizando el cumplimiento de los requisitos de muestreo, preservación y manipulación de las muestras de agua. Dado que las instalaciones del laboratorio de aguas de las EPMM se encuentran ubicadas dentro del predio correspondiente a la PTAP principal, las muestras se trasladaron al laboratorio de aguas inmediatamente después de la toma.

Cada muestra fue etiquetada y registrada con la información requerida por el formato con código interno 1160.06.10 Identificación de la muestra (Ver apéndice E) y garantizando que los equipos empleados en las lecturas In situ y en el laboratorio de aguas tengan su debido mantenimiento y calibración.

El muestreo se estableció de forma No aleatoria, según el avance de cada etapa dentro del proceso, iniciando por la tanquilla colectora, luego los prefiltros, los filtros rápidos y por último la cloración-distribución, estas etapas son las que conforman la PTAP principal del municipio de Málaga. Los controles de laboratorio realizados fueron los blancos y los duplicados de las muestras.

Los requisitos especiales de muestreo como tamaños de muestra, manejo de muestras, tipo de recipiente y preservación para algunas de las características a determinar se presentan en la tabla 4:

Tabla 4. *Requisitos especiales de muestreo*

Parámetro	Tipo de recipiente	Tamaño mínimo de muestra (mL)	Preservación	Almacenamiento regulatorio
pH	Plástico o vidrio	50	Análisis inmediato	0,25 h
Turbiedad	Plástico o vidrio	100	Analizar el mismo día, almacenar en la oscuridad hasta las 24 h siguientes, Refrigerar $\leq 6^{\circ}\text{C}$	24 h
Cloruros	Plástico o vidrio	50	No requiere	28 d
Dureza total	Plástico o vidrio	100	Adicionar HNO_3 o H_2SO_4 y llevar a $\text{pH} < 2$	6 meses
Metales	Plástico o vidrio Enjuague con HNO_3	1000	Para metales disueltos filtrar inmediatamente, adicionar HNO_3 y llevar a pH	6 meses
Sulfatos	Plástico o vidrio	100	Refrigerar $\leq 6^{\circ}\text{C}$	28 d
Coliformes totales y E.Coli	Vidrio (Esterilizado)	200	Refrigerar $\leq 6^{\circ}\text{C}$; agregar 0,1 mL de Tiosulfato de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) al 3% para agua potable.	24 h

4.2 Análisis de laboratorio

Durante los cambios climáticos en la planta principal de tratamiento de agua potable de Málaga, se monitorearon parámetros relacionados con la calidad del agua, que permiten detectar cualquier desviación en la composición y tomar las medidas adecuadas.

Cabe resaltar que el laboratorio de aguas EPMM se encuentra autorizado para la realización de análisis físicos, químicos y Microbiológicos de agua para consumo humano por parte del

Ministerio de Salud y Protección social en la resolución N° 172 del 4 de febrero de 2022. (Ver anexo A)

Figura 12. *Instalaciones laboratorio de aguas EPMM*



Figura 13. *Instalaciones laboratorio de aguas EPMM*



Figura 14. *Material laboratorio de aguas EPMM*



Figura 15. *Insumos y reactivos químicos laboratorio de aguas EPMM*



Figura 16. Equipos de análisis laboratorio de aguas EPMM



La fase analítica se llevó a cabo según los procedimientos de análisis fisicoquímico del laboratorio de aguas de las Empresas Públicas Municipales de Málaga, basados en los lineamientos establecidos por el Standard Methods for the examination of Water and Wastewater edición 23 de 2017, según la tabla 5:

Tabla 5. Procedimientos de análisis del laboratorio de aguas EPMM

Parámetro	Método	Técnica
pH	SM 4500 H+B	Potenciométrica
Turbidez	SM 2130 B	Nefelométrica
Sólidos suspendidos totales	SM 2540 D	Gravimétrica (Secados a 103-105°C)

Los parámetros: sulfatos, Cloro residual libre, color aparente, hierro total, dureza total y cloruros se realizaron con kit de test MERCK análogos a los procedimientos establecidos por la EPA, APHA, ISO y la ASTM, los cuales son medidos con el Fotómetro Spectroquant NOVA 60.

A su vez, también se realizaron análisis microbiológicos respecto a E.Coli y Coliformes totales, según el procedimiento ISO 9308-1:2014 Filtración por membrana.

Todas las técnicas se realizaron teniendo en cuenta los controles analíticos de cada método, la frecuencia y criterios de aceptación definidos en los diferentes POE (Procedimientos Operativos Estándar) para cada técnica, garantizando así que los análisis de laboratorio se realicen de forma segura y secuencial por el analista y lo establecido por el método estándar para el control de calidad adecuado, así como materiales, reactivos y equipos necesarios para garantizar RPD (Diferencia Porcentual Relativa) menor al 10% según corresponda, debido a que se analizarán muestras por duplicado permitiendo determinar si existe algún error grave en la medición de forma inmediata (si el cálculo del RPD supera el 10%), así como la precisión de los análisis según el proceso de validación y lo establecido por el método estándar.

De esta manera se obtuvieron resultados correspondientes a la caracterización analítica de las aguas en el laboratorio para los parámetros fisicoquímicos analizados, estableciendo las variaciones a de la calidad del agua través de tabulación y gráficas que permitieron realizar una comparación con la normativa inherente a la resolución 2115 de 2007.

Las fórmulas empleadas para evaluar la eficiencia de parámetros de rendimiento y calidad de las etapas de la PTAP varían en función del parámetro específico que se esté evaluando. Sin embargo, en general, estas fórmulas se pueden clasificar en dos categorías principales:

- Fórmulas de reducción: Estas fórmulas miden la reducción del contaminante o la mejora de la calidad del agua después de que ha pasado por la etapa.

- **Fórmulas de cumplimiento:** Estas fórmulas miden si el agua cumple con los límites máximos permisibles establecidos por las regulaciones.

Las fórmulas de reducción para evaluar la eficiencia de parámetros de rendimiento realizados en el laboratorio de las Empresas Públicas Municipales de Málaga incluyen:

4.2.1 Determinación de Turbidez

Una planta de tratamiento de agua potable debe estar en capacidad del sistema de eliminar las partículas suspendidas en el agua y reducir su turbidez a niveles aceptables.

Este parámetro se determinará según tabla 6:

Tabla 6. Descripción analítica parámetro Turbidez

Parámetro	Turbidez
Equipo análisis	Turbidímetro portátil
Marca	VELP SCIENTIFICA
Patrones de calibración	TB1 800 NTU, 100 NTU, 20 NTU y 0,02 NTU
Código	CE0012020
Fecha de vencimiento patrones	2024/01
Método análisis	SM 4500 H+B
Técnica	Potenciométrica

$$\text{Eficiencia remoción de turbidez etapa} = \frac{(\text{turbidez inicial} - \text{turbidez final})}{\text{turbidez inicial}} * 100\% \quad (\text{EC. 1})$$

$$\text{Eficiencia remoción de turbidez proceso} = \frac{(\text{Turbidez agua natural} - \text{Turbidez agua tratada})}{\text{Turbidez agua natural}} * 100\% \quad (\text{EC. 2})$$

4.2.2 Determinación de color

Una planta de tratamiento de agua potable debe estar en capacidad para reducir o eliminar los compuestos que causan color en el agua. Este parámetro se determinará según tabla 7:

Tabla 7. Descripción analítica parámetro Color aparente

Parámetro	Color aparente
Equipo análisis	Spectroquant nova 60
Marca	Merck
Número de serie	11330727
Fecha de mantenimiento	2023/04
Método análisis	SM 2120 C

$$\text{Eficiencia remoción de color etapa} = \frac{(\text{Color inicial} - \text{Color final})}{\text{Color inicial}} * 100\% \quad (\text{EC. 3})$$

$$\text{Eficiencia remoción de color proceso} = \frac{(\text{Color agua natural} - \text{Color agua tratada})}{\text{Color agua natural}} * 100\% \quad (\text{EC. 4})$$

4.2.3 Reducción de Cloruros

La eficiencia de remoción de cloruros es la capacidad de un proceso de tratamiento de agua para eliminar los cloruros del agua. Los cloruros son un tipo de ión que se encuentra naturalmente en el agua y también se pueden añadir al agua como desinfectante.

Este parámetro se determinará según tabla 8:

Tabla 8. Descripción analítica parámetro Cloruros

Parámetro	Cloruros
Equipo análisis	Spectroquant nova 60
Marca	Merck
Número de serie	11330727
Fecha de mantenimiento	Abril de 2023
Método análisis	ASTM D512
Reactivo empleado:	Chloride test Merck
Lote:	HC291076

Referencia:	1.14897.0001
Fecha de vencimiento:	2024/05/31

$$\text{Eficiencia remoción de cloruros etapa} = \frac{(\text{Cloruros inicial} - \text{Cloruros final})}{\text{Cloruros inicial}} * 100\% \quad (\text{EC. 5})$$

$$\text{Eficiencia remoción de cloruros proceso} = \frac{(\text{Cloruros agua natural} - \text{Cloruros agua tratada})}{\text{Cloruros agua natural}} * 100\% \quad (\text{EC. 6})$$

4.2.4 Reducción de Dureza total

La eficiencia de remoción de dureza total en agua es la capacidad de un proceso de tratamiento de agua para eliminar los iones de calcio y magnesio del agua. La dureza total es una medida de la cantidad de estos iones presentes en el agua.

Este parámetro se determinará según tabla 9:

Tabla 9. Descripción analítica parámetro Dureza Total

Parámetro	Dureza total
Equipo análisis	Plancha de agitación
Marca	Exit-1
Número de serie	45513
Fecha de mantenimiento	20 de enero de 2023
Método análisis	ASTM 1126-02
Reactivo empleado:	Total hardness test Merck
Lote:	HC157436
Referencia:	1.080040.0001
Fecha de vencimiento:	2024/03/31

$$\text{Eficiencia remoción de Dureza total etapa} = \frac{(\text{Dureza total inicial} - \text{Dureza total final})}{\text{Dureza total inicial}} * 100\% \quad (\text{EC. 7})$$

$$\text{Eficiencia remoción de Dureza total proceso} = \frac{(\text{Dureza total agua natural} - \text{Dureza total agua tratada})}{\text{Dureza total agua natural}} * 100\% \quad (\text{EC. 8})$$

4.2.5 Reducción de Hierro total

La eficiencia de remoción de hierro en agua es la capacidad de un proceso de tratamiento de agua para eliminar el hierro del agua. El hierro es un metal que se puede encontrar naturalmente en el agua y puede causar una serie de problemas, como el sabor desagradable, el olor y el color del agua.

Este parámetro se determinará según tabla 10:

Tabla 10. Descripción analítica parámetro Hierro total

Parámetro	Hierro total
Equipo análisis	Spectroquant nova 60
Marca	Merck
Número de serie	11330727
Fecha de mantenimiento	Abril de 2023
Método análisis	SM 3500 Fe B
Reactivo empleado:	Iron test merck
Lote:	HC167182
Referencia	1.14761.0002
Fecha de vencimiento:	2024/07/31

La eficiencia en la remoción de metales en una planta de tratamiento de agua potable se refiere a la capacidad del sistema para eliminar los metales presentes en el agua, como el plomo, el arsénico, el mercurio, el cadmio, el cobre y otros metales pesados que pueden ser perjudiciales para la salud humana, así como metales que pueden dar indicio de algún tipo de contaminación externa del agua.

Para evaluar la eficiencia en la remoción de metales, se pueden realizar las siguientes pruebas y mediciones:

1. Análisis de metales en el agua natural: Se toma una muestra de agua natural antes de que ingrese al proceso de tratamiento y se mide la concentración de metales presentes. Esto proporciona una referencia para comparar la eficiencia de remoción de metales de la planta.

2. Análisis de metales en el agua tratada: Se toma una muestra de agua después de que ha pasado por el proceso de tratamiento y se mide la concentración de metales final. Esta medición permite determinar la cantidad de metales que se han removido durante el proceso de tratamiento.

3. Eficiencia de remoción de metales: La eficiencia en la remoción de metales se calcula comparando la concentración de metales inicial en el agua cruda con la concentración de metales final en el agua tratada. El cálculo se realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia remoción de Hierro total etapa} = \frac{(\text{Hierro total inicial} - \text{Hierro total final})}{\text{Hierro total inicial}} * 100\% \quad (\text{EC. 9})$$

$$\text{Eficiencia remoción de hierro total proceso} = \frac{(\text{Hierro total agua natural} - \text{Hierro total agua tratada})}{\text{Hierro total agua natural}} * 100\% \quad (\text{EC. 10})$$

4.2.6 Reducción de Sulfatos

La eficiencia de remoción de sulfatos en agua es la capacidad de un proceso de tratamiento de agua para eliminar los iones de sulfato del agua. Los sulfatos son un tipo de ión que se encuentra naturalmente en el agua y también se pueden añadir al agua como materia prima para la producción de productos químicos.

Este parámetro se determinará según tabla 11:

Tabla 11. Descripción analítica parámetro Sulfatos

Parámetro	Sulfatos
Equipo análisis	Spectroquant nova 60

Marca	Merck
Número de serie	11330727
Fecha de mantenimiento	Abril de 2023
Método análisis	ASTM D 516
Reactivo empleado:	Sulfate test Merck
Lote:	HC282899
Referencia	1.02537.0001
Fecha de vencimiento:	2024/01/31

$$\text{Eficiencia remoción de sulfatos etapa} = \frac{(\text{Sulfatos inicial} - \text{Sulfatos final})}{\text{Sulfatos inicial}} * 100\% \quad (\text{EC. 11})$$

$$\text{Eficiencia remoción de sulfatos proceso} = \frac{(\text{Sulfatos agua natural} - \text{Sulfatos agua tratada})}{\text{Sulfatos agua natural}} * 100\% \quad (\text{EC. 12})$$

4.2.7 Reducción de sólidos suspendidos

La eficiencia en la remoción de sólidos en una planta de tratamiento de agua potable se refiere a la capacidad del sistema para eliminar las partículas sólidas suspendidas en el agua, como sedimentos, arcillas, materia orgánica y otros sólidos presentes en el agua natural.

Este parámetro se determinará según tabla 12:

Tabla 12. Descripción analítica parámetro Sólidos Suspendidos Totales

Parámetro	Sólidos Suspendidos totales	
Equipo análisis	Estufa	Marca: WTC Binder
	Desecador	Marca: Labscient
	Balanza Analítica	Marca: AND Electronic Balance
	Bomba de vacío	Marca: Merck Millipore
Marca		
Método análisis	Standard Methods Ed 23 de 2017. Método 2540 D Sólidos totales secados a 103-105°C	

Para evaluar la eficiencia en la remoción de sólidos, se pueden realizar las siguientes pruebas y mediciones:

1. Análisis de sólidos suspendidos en el agua natural: Se toma una muestra de agua natural antes de que ingrese al proceso de tratamiento y se mide la concentración de sólidos suspendidos. Esto proporciona una referencia para comparar la eficiencia de remoción de sólidos de la planta.

2. Análisis de sólidos suspendidos en el agua tratada: Se toma una muestra de agua después de que ha pasado por el proceso de tratamiento y se mide la concentración de sólidos suspendidos final. Esta medición permite determinar la cantidad de sólidos suspendidos que se han removido durante el proceso de tratamiento.

3. Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales: La eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos se calcula comparando la concentración de sólidos suspendidos inicial en el agua cruda con la concentración de sólidos suspendidos final en el agua tratada. El cálculo se realiza utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia remoción de SST etapa} = \frac{(SST \text{ inicial} - SST \text{ final})}{SST \text{ inicial}} * 100\% \quad (EC. 13)$$

$$\text{Eficiencia remoción de SST proceso} = \frac{(SST \text{ agua natural} - SST \text{ agua tratada})}{SST \text{ agua natural}} * 100\% \quad (EC. 14)$$

4.2.8 Determinación de coliformes

La eficiencia de remoción de coliformes en agua es la capacidad de un proceso de tratamiento de agua para eliminar las bacterias coliformes del agua. Las bacterias coliformes son un grupo de bacterias que se encuentran en los intestinos de los animales de sangre caliente, incluidos los humanos. Pueden causar enfermedades, como la diarrea, la gastroenteritis y la fiebre tifoidea.

Estos parámetros se determinarán según tabla 13:

Tabla 13. Descripción analítica parámetros Coliformes Fecales y totales

Parámetro	Coliformes fecales y totales
Equipo análisis	Equipo de filtración Bomba de vacío
Marca	Millipore
Número de serie	2461
Método análisis	ISO 9308-1:2014 Filtración por membrana
Reactivo empleado:	Ready Plate 55 CC ISO9308-1
Lote:	027134
Referencia	1467570200
Fecha de vencimiento:	2024/03/14

$$\text{Eficiencia remoción de coliformes etapa} = \frac{(\text{Coliformes entrada} - \text{Coliformes Salida})}{\text{SST entrada}} * 100\% \quad (\text{EC. 15})$$

$$\text{Eficiencia remoción de SST proceso} = \frac{(\text{Coliformes agua natural} - \text{coliformes agua tratada})}{\text{Coliformes agua natural}} * 100\% \quad (\text{EC. 16})$$

4.2.9 Cloro residual libre

La desinfección es una etapa esencial del tratamiento del agua potable, ya que ayuda a eliminar los microorganismos patógenos, como bacterias, virus y protozoos. La eficacia de la desinfección se mide mediante una serie de parámetros, que incluyen:

- El residual de cloro: El residual de cloro es la cantidad de cloro libre que queda en el agua después del proceso de desinfección. Un residual de cloro adecuado garantiza que el agua esté segura para el consumo humano.

El método más adecuado para medir la desinfección en las PTAP depende de una serie de factores, que incluyen el tipo de desinfectante utilizado, la calidad del agua bruta y las necesidades específicas de la planta.

En Colombia, el Ministerio de Salud y Protección Social establece los parámetros de calidad del agua potable, incluyendo los parámetros para medir la desinfección. Estos parámetros se encuentran en la Resolución 2115 de 2007.

En general, se considera que la desinfección es eficaz cuando el residual de cloro es superior a 0,2 mg/L y la reducción de coliformes fecales es superior a 99,9%.

Este parámetro se determinará según tabla 14:

Tabla 14. Descripción analítica parámetro Cloro residual libre

Parámetro	Cloro residual libre
Equipo análisis	Fotómetro Cloro Libre, Cloro Total y pH
Marca	Hanna Instruments
Número de serie	903190029111
Fecha de mantenimiento	Marzo de 2023
Código	HI 97710C

Método análisis	SM 4500 G Método colorimétrico DPD
Reactivo empleado:	Chlorine Test Merck
Lote:	HC201433
Referencia	1.00598.0001
Fecha de vencimiento:	2024/01/31

La eficiencia en la desinfección de las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) es un factor importante para garantizar la seguridad del agua potable. Una desinfección eficaz ayuda a eliminar los microorganismos patógenos, como bacterias, virus y protozoos, que pueden causar enfermedades transmitidas por el agua.

La eficiencia de la desinfección depende de una serie de factores, que incluyen:

- El tipo de desinfectante utilizado: Los desinfectantes más comunes son el cloro, el ozono y el dióxido de cloro. Cada desinfectante tiene sus propias ventajas y desventajas.
- La calidad del agua natural: La calidad del agua natural puede afectar la eficacia de la desinfección. El agua natural que contiene altos niveles de turbidez o materia orgánica puede dificultar la desinfección.
- El tiempo de contacto: El tiempo de contacto es el tiempo que el agua permanece en contacto con el desinfectante. Un tiempo de contacto adecuado es esencial para garantizar una desinfección eficaz.
- La temperatura del agua: La temperatura del agua puede afectar la eficacia de la desinfección. El cloro es más eficaz a temperaturas más altas.

4.2.10 pH

Este parámetro se determinará según la tabla 15:

Tabla 15. Descripción analítica parámetro pH

Parámetro	pH
Equipo análisis	pHmetro portátil + Electrodo combinado de pH
Marca	Hanna Instruments
Número de serie	J0076117 y 04023C7N
Fecha de mantenimiento	Marzo de 2023
Método análisis	EPA 9040 C
Reactivo empleado:	Buffer 7.0 Buffer 4.0
Lote:	HC15172877 HC16383775
Referencia	1.09477.0500 1.09475.0500
Fecha de vencimiento:	2024/03/31 2024/06/30

4.3 Análisis de cumplimiento

La evaluación de la eficiencia de los parámetros de calidad del agua potable se puede realizar mediante un análisis de cumplimiento. Este análisis consiste en comparar los resultados de los análisis de agua potable con los valores establecidos en la Resolución 2115 de 2007. Las fórmulas de cumplimiento para evaluar la eficiencia de parámetros de calidad, incluyen los valores reportados analíticamente y los límites máximos permisibles de cada parámetro, según lo indica la tabla 2.

4.3.1 Turbidez

$$\text{Cumplimiento de turbidez} = \frac{\text{Turbidez del agua tratada}}{\text{Límite máximo permisible del Turbidez}} \quad (\text{EC. 17})$$

4.3.2 Color

$$\text{Cumplimiento de color} = \frac{\text{Color del agua tratada}}{\text{Límite máximo permisible del Color}} \quad (\text{EC. 18})$$

4.3.3 Cloruros

$$\text{Cumplimiento de Cloruros} = \frac{\text{Cloruros del agua tratada}}{\text{Límite máximo permisible del Cloruros}} \quad (\text{EC. 19})$$

4.3.4 Dureza total

$$\text{Cumplimiento de Dureza total} = \frac{\text{Dureza total del agua tratada}}{\text{Límite máximo permisible del Dureza total}} \quad (\text{EC. 20})$$

4.3.5 Hierro total

$$\text{Cumplimiento de Hierro total} = \frac{\text{Hierro total del agua tratada}}{\text{Límite máximo permisible del Hierro total}} \quad (\text{EC. 21})$$

4.3.6 Sulfatos

$$\text{Cumplimiento de Sulfatos} = \frac{\text{Sulfatos del agua tratada}}{\text{Límite máximo permisible del Sulfatos}} \quad (\text{EC. 22})$$

4.3.7 Coliformes totales

$$\text{Cumplimiento de Coliformes totales} = \frac{\text{Coliformes totales del agua tratada}}{\text{Límite máximo permisible del Coliformes totales}} \quad (\text{EC. 23})$$

4.3.8 Coliformes fecales

$$\text{Cumplimiento de Coliformes fecales} = \frac{\text{Coliformes fecales del agua tratada}}{\text{Límite máximo permisible del Coliformes fecales}} \quad (\text{EC. 24})$$

4.4 Eficiencia del sistema de tratamiento

La eficiencia del sistema se determinará con cada característica a la entrada y la salida del sistema, y en las etapas de filtración lenta y filtración rápida indicándose el cálculo como porcentaje para los diferentes parámetros a partir de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Eficiencia} = \left[\frac{\text{Concentración a la entrada} - \text{Concentración a la salida}}{\text{Concentración a la entrada}} \right] * 100 \quad (\text{EC. 25})$$

4.5 Índice de riesgo de la calidad del agua IRCA para EPMM

El IRCA se calculó en base a los parámetros analizados en el laboratorio de aguas de las Empresas Públicas Municipales de Málaga EPMM, empleando la fórmula:

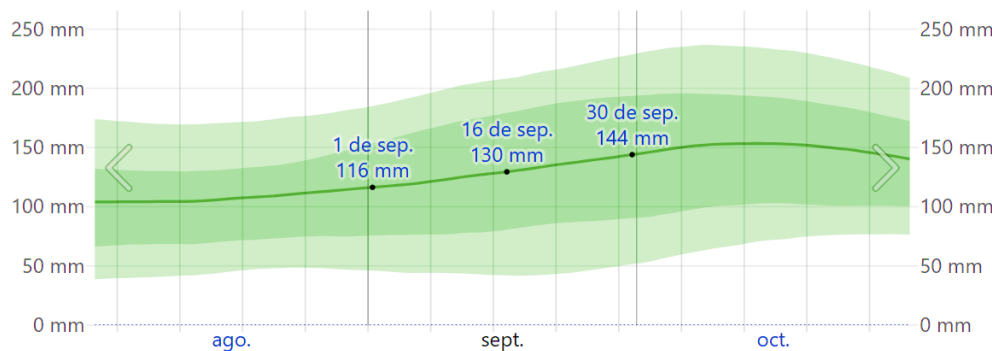
$$\text{IRCA (\%)} = \frac{\sum \text{puntajes de riesgo asignados a las características No aceptables}}{\sum \text{Puntajes de riesgo asignados a todas las características analizadas}} * 100 \quad (\text{EC. 26})$$

A partir de los datos y cálculos obtenidos se realizará el análisis de los mismos para brindar los diagnósticos y recomendaciones que puedan ser base en el funcionamiento de la planta y los parámetros controlados y así promover la mejora y/o optimización de la planta principal de tratamiento de agua potable del municipio de Málaga.

5. Resultados y análisis de resultados

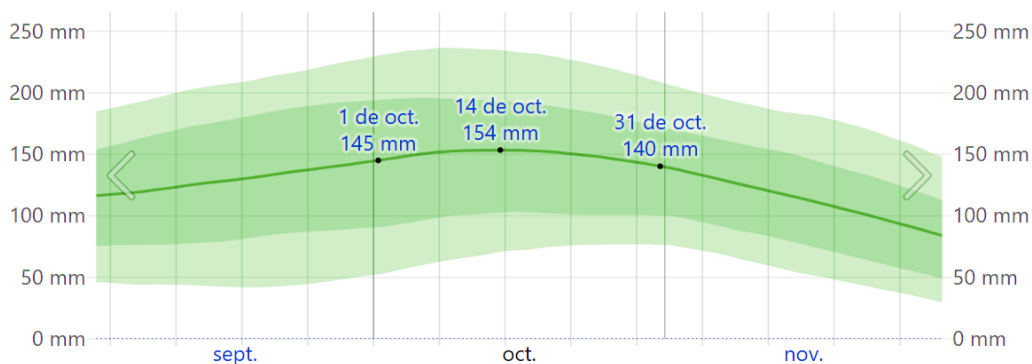
A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada uno de los muestreos establecidos, así como el nivel de lluvias durante los períodos de muestreo.

Figura 17. Promedio mensual de lluvia en el mes de septiembre de 2023 para Málaga



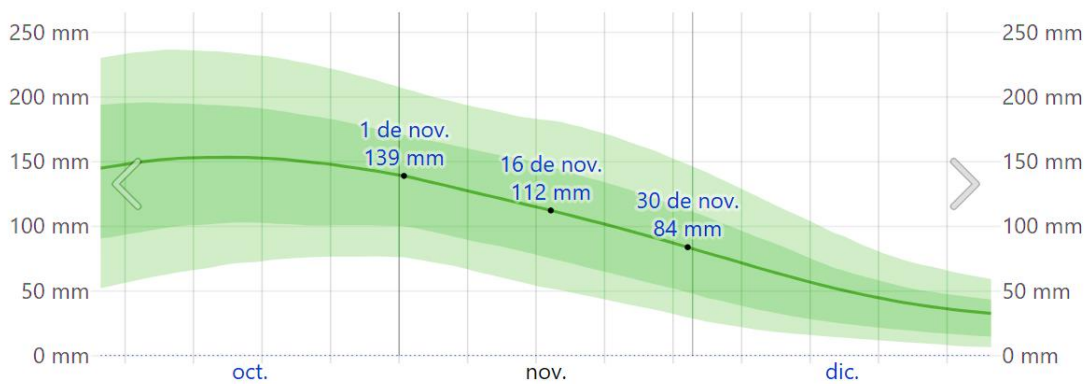
Nota. El gráfico representa la distribución de las lluvias para el Municipio de Málaga Santander. La lluvia promedio (línea sólida) acumulada en un periodo de 31 días en una escala móvil. Tomado de: Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/m/25290/9/Tiempo-promedio-en-septiembre-en-M%C3%A1laga-Colombia#Figures-Rainfall>

Figura 18. Promedio mensual de lluvia en el mes de octubre de 2023 para Málaga



Tomado de: Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/m/25290/10/Tiempo-promedio-en-octubre-en-M%C3%A1laga-Colombia#Figures-Rainfall>

Figura 19. Promedio mensual de lluvia en el mes de noviembre de 2023 para Málaga



Tomado de: Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/m/25290/11/Tiempo-promedio-en-noviembre-en-M%C3%A1laga-Colombia#Figures-Rainfall>

Tabla 16. Caracterización Muestreo 1 día seco

LUNES 11 DE SEPTIEMBRE DE 2023 8:00 AM- MUESTREO 1 - DIA SECO											
PARÁMETRO	Unidades	SITIO MUESTREO			EFICIENCIA REMOCIÓN ETAPA PREFILTROS (%)	SITIO MUESTREO		EFICIENCIA REMOCIÓN ETAPA FILTROS RÁPIDOS (%)	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN	EFICIENCIA REMOCIÓN PROCESO PTAP (%)	CUMPLIMIENTO
		ENTRADA PTAP TANQUILLA RECOLECTORA	ENTRADA PREFILTROS	SALIDA PREFILTROS		ENTRADA FILTROS RÁPIDOS	SALIDA FILTROS RÁPIDOS				
Temperatura	°C	11	11	11	NA	11	11	NA	11	NA	NA
Turbidez	NTU	2,56	5,53	2,76	50,09	2,64	0,59	77,65	0,89	65,23	0,45
Color Aparente	UPC	13	13	7	46,15	7	2	71,43	2	84,62	0,13
Cloro residual libre	mg/L Cloro	0	0	0	NA	0	0	NA	1,5	NA	NA
pH	Unidad de pH	7,64	7,64	7,85	NA	7,35	7,46	NA	7,65	NA	NA
Hierro total	mg/L Fe	0,36	0,25	0,23	8,00	0,23	0,21	8,70	0,26	27,78	0,87
Dureza total	mg/L CaCO ₃	118	118	95	19,49	94	86	8,51	105	11,02	0,35
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	45	43	37	13,95	32	38	-18,75	40	11,11	0,16
Cloruros	mg/L Cl ⁻	11,5	11	9,3	15,45	9,1	8,9	2,20	8,5	26,09	0,03
SST	mg/L	15,5	14,9	10,7	28,19	10,2	5,9	42,16	3,2	79,35	NA
E.Coli	UFC	53	45	57	-26,67	63	52	17,46	0	100,00	1,00
Coliformes totales	UFC	435	396	467	-17,93	333	379	-13,81	0	100,00	1,00

Nota: la abreviatura NA indica que para el parámetro el cálculo de eficiencia de remoción o cumplimiento no aplica.

Cada uno de los valores presentados indican la caracterización fisicoquímica realizada, según los procedimientos operativos del laboratorio de aguas EPMM. Para todas las muestras se realizó control con duplicado y garantizando un RPD (Diferencia Porcentual Relativa) menor al 10%. La determinación de la Eficiencia de remoción para cada etapa y la Eficiencia de remoción para el proceso,

fueron determinadas con las ecuaciones de la 1 a la 16 y la determinación del cumplimiento con las ecuaciones 17 a la 24 presentadas en la metodología según el parámetro analizado.

El aumento de valores de turbidez de la tanquilla colectora a los prefiltros indica que hubo arrastre de material particulado que se encontraba depositado en la etapa intermedia correspondiente a escaleras de oxigenación, relacionado con labores de mantenimiento y lavado de las escaleras que no se realizaron de forma regular como lo establece el Procedimiento de mantenimiento, lavado y desinfección de las EPMM.

A su vez, cuando no se ha realizado un correcto lavado y desinfección a cada estructura y componente del lecho filtrante; la Turbiedad y los Sólidos Suspendidos Totales pueden proporcionar protección a los Coliformes de la acción de los desinfectantes y dificultar su detección, lo que pudo incidir directamente en el aumento de E. Coli en la etapa de filtración lenta y el aumento de Coliformes totales en la etapa de filtración rápida. Cabe resaltar que las conexiones intermedias entre las etapas las constituyen canales abiertos, lo que puede permitir el aumento de Coliformes por contaminación con el medio externo.

Para el caso de los Coliformes en prefiltros y filtros rápidos y de los Sulfatos en los filtros rápidos, no se presentó remoción pues la concentración de salida fue mayor a la concentración de ingreso para el parámetro evaluado.

El aumento de sulfatos en la etapa de filtración rápida puede estar relacionado con la acumulación de material particulado en el lecho, a su vez si no se realiza continuamente el lavado este lecho puede saturarse contribuyendo al aumento gradual de la concentración del parámetro.

El aumento de la concentración de Hierro total de los filtros rápidos a la salida de los tanques de distribución se debe a la existencia de una tanquilla, llamada por la parte operativa caseta de cloración, en este lugar el agua entra en contacto directo con una estructura metálica que incluso por la misma acción del cloro gaseoso, al ser corrosivo, está alterando el aspecto de la estructura, se corroe y libera hierro al agua, disolviéndose en ella y contaminándola.

A nivel general la remoción del proceso, es decir evaluando las concentraciones del agua natural en la tanquilla colectora y del agua tratada en los tanques de distribución para el muestreo 1 en día seco; evidencian porcentajes de remoción que permiten garantizar cumplimiento con los valores de concentración permisibles por la normativa para el agua potable en Colombia.

El proceso de desinfección en la PTAP de Málaga es 100% efectivo ya que logra remover completamente los Coliformes fecales y totales en el agua, a su vez garantiza que el agua suministrada tenga un remanente de Cloro residual libre dentro del rango de concentración permisible por la norma.

Tabla 17. Caracterización Muestreo 2 día seco

LUNES 18 DE SEPTIEMBRE DE 2023 2:30 PM - MUESTREO 2 - DIA SECO											
PARÁMETRO	Unidades	SITIO MUESTREO			EFICIENCIA REMOCIÓN ETAPA PREFILTROS (%)	SITIO MUESTREO		EFICIENCIA REMOCIÓN ETAPA FILTROS RÁPIDOS (%)	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN	EFICIENCIA REMOCIÓN PROCESO PTAP (%)	CUMPLIMIENTO
		ENTRADA PTAP TANQUILLA RECOLECTORA	ENTRADA PREFILTROS	SALIDA PREFILTROS		ENTRADA FILTROS RÁPIDOS	SALIDA FILTROS RÁPIDOS				
Temperatura	°C	14	14	14	NA	14	14	NA	14	NA	NA
Turbidez	NTU	3,34	7,46	3,45	53,75	4,26	0,87	79,58	1,1	67,07	0,55
Color Aparente	UPC	24	22	12	45,45	10	7,5	25,00	5	79,17	0,33
Cloro residual libre	mg/L Cloro	0	0	0	NA	0	0	NA	1,76	NA	NA
pH	Unidad de pH	7,36	7,84	7,53	NA	7,77	7,63	NA	7,87	NA	NA
Hierro total	mg/L Fe	0,21	0,17	0,15	11,76	0,15	0,13	13,33	0,13	38,10	0,43
Dureza total	mg/L CaCO ₃	200	193	150	22,28	145	128	11,72	143	28,50	0,48
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	58	58	37	36,21	33	24	27,27	35	39,66	0,14
Cloruros	mg/L Cl ⁻	15,1	11	8	27,27	8	7,5	6,25	7,1	52,98	0,03
SST	mg/L	32	32	15	53,13	13	8	38,46	4,6	85,63	--
E.Coli	UFC	30	36	52	-44,44	45	39	13,33	0	100,00	1,00
Coliformes totales	UFC	324	256	301	-17,58	280	222	20,71	0	100,00	1,00

El comportamiento de los parámetros Turbidez y Coliformes, es similar al reportado en el muestreo 1, indicando situaciones relacionadas con el mantenimiento y lavado de las estructuras, así como contaminación por material acumulado en los prefiltros e incidencia de los canales abiertos de conexión entre etapas. La caracterización del muestreo en el día 2 seco, evidencia que la remoción del proceso permite garantizar cumplimiento con los valores de concentración permisibles por la normativa para el agua potable y es 100% efectivo para la desinfección y el remanente de Cloro residual libre.

Se evidencian valores negativos en el porcentaje de remoción de Coliformes en los prefiltros indicando que para esta etapa la concentración de salida fue mayor a la concentración de ingreso para el parámetro evaluado.

A nivel general la remoción del proceso evidencia que se garantiza cumplimiento con los valores de concentración permisibles por la normativa para el agua potable.

Tabla 18. Caracterización Muestreo 3 día seco

LUNES 25 DE SEPTIEMBRE DE 2023- 10:45 AM MUESTREO 3 - DIA SECO											
PARÁMETRO	Unidades	SITIO MUESTREO			EFICIENCIA REMOCIÓN ETAPA PREFILTROS (%)	SITIO MUESTREO		EFICIENCIA REMOCIÓN ETAPA FILTROS RÁPIDOS (%)	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN	EFICIENCIA REMOCIÓN PROCESO PTAP (%)	CUMPLIMIENTO
		ENTRADA PTAP TANQUILLA RECOLECTORA	ENTRADA PREFILTROS	SALIDA PREFILTROS		ENTRADA FILTROS RÁPIDOS	SALIDA FILTROS RÁPIDOS				
Temperatura	°C	14	14	14	NA	13	13	NA	13	NA	NA
Turbidez	NTU	4,21	4,11	1,87	54,50	1,8	0,69	61,67	1,1	73,87	0,55
Color Aparente	UPC	18	15	10	33,33	10	5	50,00	10	44,44	0,67
Cloro residual libre	mg/L Cloro	0	0	0	NA	0	0	NA	1,39	NA	NA
pH	Unidad de pH	7,73	7,58	7,33	NA	7,33	7,27	NA	7,77	NA	NA
Hierro total	mg/L Fe	0,18	0,15	0,1	33,33	0,1	0,09	10,00	0,09	50,00	0,30
Dureza total	mg/L CaCO ₃	176	176	158	10,23	150	121	19,33	142	19,32	0,47
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	25	23	18	21,74	17	15	11,76	15	40,00	0,06
Cloruros	mg/L Cl-	21,7	21,3	15	29,58	14,1	13	7,80	11,3	47,93	0,05
SST	mg/L	47	43	25	41,86	22	10	54,55	6,9	85,32	--
E.Coli	UFC	65	60	49	18,33	58	41	29,31	0	100,00	1,00
Coliformes totales	UFC	476	460	431	6,30	419	510	-21,72	0	100,00	1,00

El comportamiento del parámetro Coliformes fecales, nuevamente indica situaciones relacionadas con el mantenimiento y lavado de las estructuras, así como contaminación por material acumulado en los prefiltros e incidencia de los canales abiertos de conexión entre etapas.

La caracterización del muestreo en el día 3, evidencia que la remoción del proceso permite garantizar cumplimiento con los valores de concentración permisibles por la normativa para el agua potable, es 100% efectivo para la desinfección y garantiza el remanente de Cloro residual libre.

Se evidencian valores negativos en el porcentaje de remoción de Coliformes en los prefiltros indicando que para esta etapa la concentración de salida fue mayor a la concentración de ingreso para el parámetro evaluado. A nivel general la remoción del proceso evidencia que se garantiza cumplimiento con los valores de concentración permisibles por la normativa para el agua potable.

Tabla 19. Caracterización Muestreo 1 día lluvia

MIÉRCOLES 18 DE OCTUBRE DE 2023- 9:37 AM MUESTREO 1 - DIA LLUVIA											
PARÁMETRO	Unidades	SITIO MUESTREO			EFICIENCIA REMOCIÓN ETAPA PREFILTROS (%)	SITIO MUESTREO		EFICIENCIA REMOCIÓN ETAPA FILTROS RÁPIDOS (%)	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN	EFICIENCIA REMOCIÓN PROCESO PTAP (%)	CUMPLIMIENTO
		ENTRADA PTAP TANQUILLA RECOLECTORA	ENTRADA PREFILTROS	SALIDA PREFILTROS		ENTRADA FILTROS RÁPIDOS	SALIDA FILTROS RÁPIDOS				
Temperatura	°C	11	11	11	NA	11	11	NA	11	NA	NA
Turbidez	NTU	189	176	25	85,80	17	3,45	79,71	4,11	97,83	2,06
Color Aparente	UPC	57	50	32	36,00	29	17	41,38	16	71,93	1,07
Cloro residual libre	mg/L Cloro	0	0	0	NA	0	0	NA	0,67	NA	NA
pH	Unidad de pH	8,37	8,26	7,94	NA	7,9	7,77	NA	7,84	NA	NA
Hierro total	mg/L Fe	0,36	0,23	0,21	8,70	0,19	0,15	21,05	0,23	36,11	0,77
Dureza total	mg/L CaCO ₃	245	238	179	24,79	175	133	24,00	149	39,18	0,50
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	83	80	66	17,50	61	45	26,23	43	48,19	0,17
Cloruros	mg/L Cl-	15	12	10	16,67	10	7	30,00	7	53,33	0,03
SST	mg/L	542	510	367	28,04	351	101	71,23	45	91,70	--
E.Coli	UFC	105	134	140	-4,48	126	156	-23,81	0	100,00	1,00
Coliformes totales	UFC	843	788	820	-4,06	670	734	-9,55	0	100,00	1,00

El comportamiento de los parámetros Coliformes fecales y totales, nuevamente indica situaciones relacionadas con el mantenimiento y lavado de las estructuras, así como contaminación por material acumulado en los prefiltros e incidencia de los canales abiertos de conexión entre etapas.

La caracterización del muestreo en el día 1 de lluvia, evidencia que la remoción del proceso para los parámetros Turbidez y Color aparente No permite garantizar cumplimiento con los valores de concentración permisibles por la normativa para el agua potable

indicando agua con riesgo medio, no apta para consumo humano aun cuando exista 100% de efectividad para la desinfección y se garantice el remanente de Cloro residual libre para el suministro.

Se evidencian valores negativos en el porcentaje de remoción de Coliformes en los filtros rápidos, indicando que para esta etapa la concentración de salida fue mayor a la concentración de ingreso para el parámetro evaluado.

Tabla 20. *Caracterización Muestreo 2 día lluvia*

MARTES 24 DE OCTUBRE DE 2023 -2:48 PM MUESTREO 2 - DIA LLUVIA											
PARÁMETRO	Unidades	SITIO MUESTREO			EFICIENCIA REMOCIÓN ETAPA PREFILTROS (%)	SITIO MUESTREO		EFICIENCIA REMOCIÓN ETAPA FILTROS RÁPIDOS (%)	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN	EFICIENCIA REMOCIÓN PROCESO PTAP (%)	CUMPLIMIENTO
		ENTRADA PTAP TANQUILLA RECOLECTORA	ENTRADA PREFILTROS	SALIDA PREFILTROS		ENTRADA FILTROS RÁPIDOS	SALIDA FILTROS RÁPIDOS				
Temperatura	°C	14	14	14	NA	14	11	NA	11	NA	NA
Turbidez	NTU	78	73	36	50,68	24	6	75,00	3,2	95,90	1,60
Color Aparente	UPC	17	15	10	33,33	8	5	37,50	5	70,59	0,33
Cloro residual libre	mg/L Cloro	0	0	0	NA	0	0	NA	0,95	NA	NA
pH	Unidad de pH	7,65	7,56	7,78	NA	7,75	7,89	NA	7,63	NA	NA
Hierro total	mg/L Fe	0,27	0,21	0,19	9,52	0,17	0,15	11,76	0,17	37,04	0,57
Dureza total	mg/L CaCO ₃	125	120	109	9,17	97	93	4,12	86	31,20	0,29
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	44	40	27	32,50	25	18	28,00	18	59,09	0,07
Cloruros	mg/L Cl-	21	17	12	29,41	12	9	25,00	10	52,38	0,04
SST	mg/L	42	40	25	37,50	23	12	47,83	8	80,95	--
E.Coli	UFC	55	41	63	-53,66	38	47	-23,68	0	100,00	1,00
Coliformes totales	UFC	489	327	378	-15,60	279	198	29,03	0	100,00	1,00

El comportamiento de los parámetros Coliformes fecales y totales, nuevamente indica situaciones relacionadas con el mantenimiento y lavado de las estructuras, así como contaminación por material acumulado en los prefiltros y los filtros rápidos e incidencia de los canales abiertos de conexión entre etapas.

La caracterización del muestreo en el día 2 de lluvia, evidencia que la remoción del proceso para el parámetro Turbidez No permite garantizar cumplimiento con los valores de concentración permisibles por la normativa para el agua potable indicando agua con riesgo medio, no apta para consumo humano aun cuando exista 100% de efectividad para la desinfección y se garantice el remanente de Cloro residual libre para el suministro.

Se evidencian valores negativos en el porcentaje de remoción de Coliformes en los prefiltros y los filtros rápidos, indicando que para esta etapa la concentración de salida fue mayor a la concentración de ingreso para el parámetro evaluado.

Tabla 21. Caracterización Muestreo 3 día lluvia

LUNES 6 DE NOVIEMBRE DE 2023- 4:35 PM MUESTREO 3 - DIA LLUVIA											
PARÁMETRO	Unidades	SITIO MUESTREO			EFICIENCIA REMOCIÓN ETAPA PREFILTROS (%)	SITIO MUESTREO		EFICIENCIA REMOCIÓN ETAPA FILTROS RÁPIDOS (%)	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN	EFICIENCIA REMOCIÓN PROCESO PTAP (%)	CUMPLIMIENTO
		ENTRADA PTAP TANQUILLA RECOLECTORA	ENTRADA PREFILTROS	SALIDA PREFILTROS		ENTRADA FILTROS RÁPIDOS	SALIDA FILTROS RÁPIDOS				
Temperatura	°C	13	13	13	NA	12	12	NA	12	NA	NA
Turbidez	NTU	231	220	112	49,09	76	22	71,05	4,56	98,03	2,28
Color Aparente	UPC	89	76	40	47,37	37	22	40,54	18	79,78	1,20
Cloro residual libre	mg/L Cloro	0	0	0	NA	0	0	NA	0,85	NA	NA
pH	Unidad de pH	7,24	7,16	7,31	NA	7,3	7,45	NA	7,21	NA	NA
Hierro total	mg/L Fe	0,41	0,26	0,24	7,69	0,19	0,18	5,26	0,16	60,98	0,53
Dureza total	mg/L CaCO ₃	187	184	145	21,20	137	126	8,03	121	35,29	0,40
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	65	69	75	-8,70	64	51	20,31	37	43,08	0,15
Cloruros	mg/L Cl ⁻	15	10	8	20,00	10	8	20,00	10	33,33	0,04
SST	mg/L	126	101	75	25,74	69	38	44,93	10	92,06	--
E.Coli	UFC	42	50	35	30,00	63	43	31,75	0	100,00	1,00
Coliformes totales	UFC	621	553	478	13,56	520	278	46,54	0	100,00	1,00

El comportamiento de los parámetros Coliformes fecales y totales, al igual que en los muestreos 1 y 2 de día de lluvia, indica situaciones relacionadas con el mantenimiento y lavado de las estructuras, así como contaminación por material acumulado en los prefiltros e incidencia de los canales abiertos de conexión entre etapas.

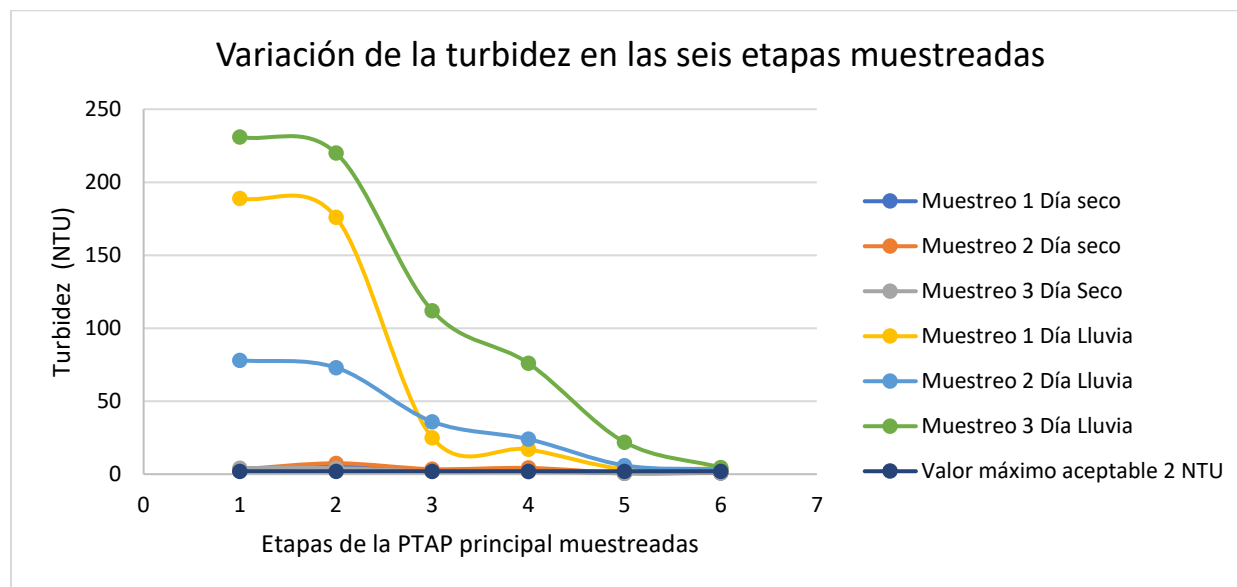
La caracterización del muestreo en el día 3 de lluvia, evidencia que la remoción del proceso para los parámetros Turbidez y Color aparente No permite garantizar cumplimiento con los valores de concentración permisibles por la normativa para el agua potable

indicando agua con riesgo medio, no apta para consumo humano aun cuando exista 100% de efectividad para la desinfección y se garantice el remanente de Cloro residual libre para el suministro.

Las caracterizaciones anteriores alertan de la situación del suministro de agua potable en días de lluvia, pues el incumplimiento en los valores de concentración a la salida del proceso evidencia que la eficiencia de la remoción en el proceso no es adecuada, hay falencias operativas que no garantizan agua apta para consumo humano cuando se presentan lluvias convirtiéndose en problema de calamidad pública para las Empresas Públicas Municipales de Málaga.

A partir de la caracterización anterior para los seis días de muestreo, se presentarán las gráficas comparativas del comportamiento de cada parámetro en los muestreos realizados para cada una de las etapas, cabe anotar que en las gráficas los valores del eje x del 1 al 6 indican el orden de las etapas muestreadas correspondientes a 1. Entrada PTAP tanquilla recolectora, 2. Entrada a los prefiltros, 3. Salida de los prefiltros, 4. Entrada a los filtros rápidos, 5. Salida de los filtros rápidos y 6. Salida de la PTAP muestreo de distribución.

Figura 20. Variación de la turbidez por etapa muestreada

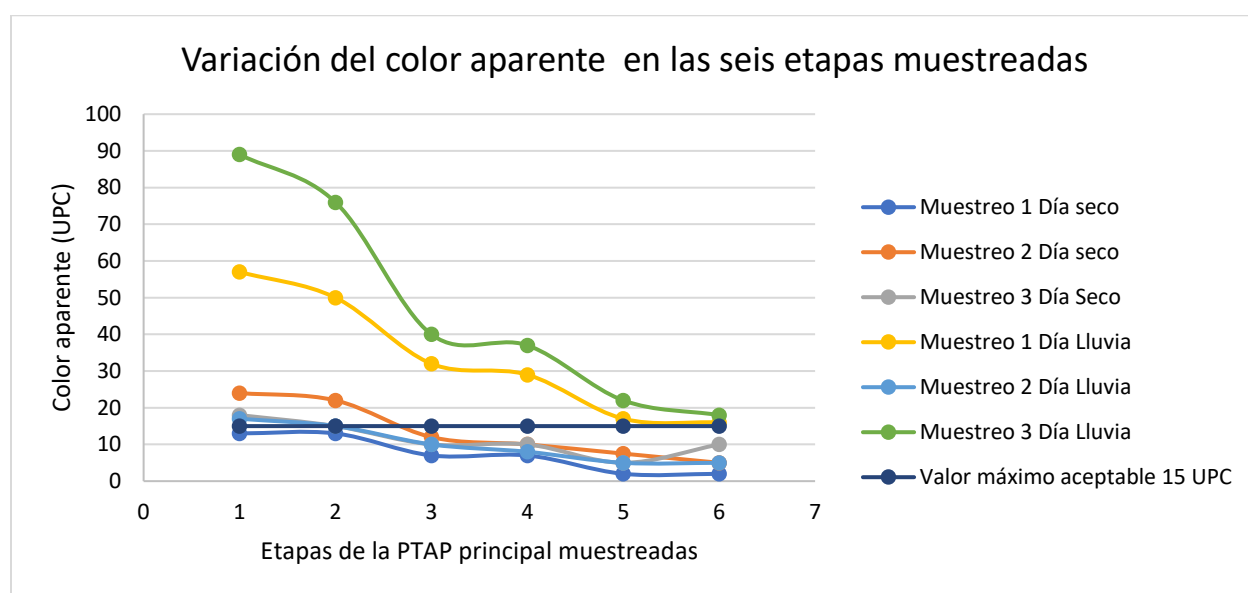


La gráfica anterior representa la variación de los valores de turbidez en cada una de las etapas muestreadas. En días secos o normales, los valores de turbidez de ingreso a la planta no superan las 5 unidades nefelométricas de turbidez (NTU) y el porcentaje de remoción en cada etapa está por encima del 50%, dadas estas condiciones las etapas de filtración lenta y filtración rápida permitieron garantizar que después de que el agua salga de esta última etapa ya se encontrara en el rango permisible de turbidez según la resolución 2115 de 2017.

En los días de lluvia o periodo crítico, se evidenciaron valores de turbidez de hasta 231 unidades nefelométricas de turbidez (NTU) indicando aguas naturales muy afectadas por el arrastre de material particulado suspendido. Sin embargo, los porcentajes de remoción en cada etapa del proceso principalmente en la filtración evidencia alta remoción, pero en esta situación los valores de turbidez en la salida de la PTAP tanques de distribución son 4.11, 3.2 y 4.56 respectivamente, valores que se encuentran por encima del valor permisible por resolución, indicando incumplimiento en remoción. Lo anterior, puede estar relacionado directamente a que la planta no

cuenta con las etapas de coagulación/floculación ni sedimentación. Con la coagulación se adicionarían sustancias químicas al agua, que ayudarían a la sedimentación del material suspendido y partículas coloidales, permitiendo una mayor remoción de sustancias que puedan afectar la calidad del agua.

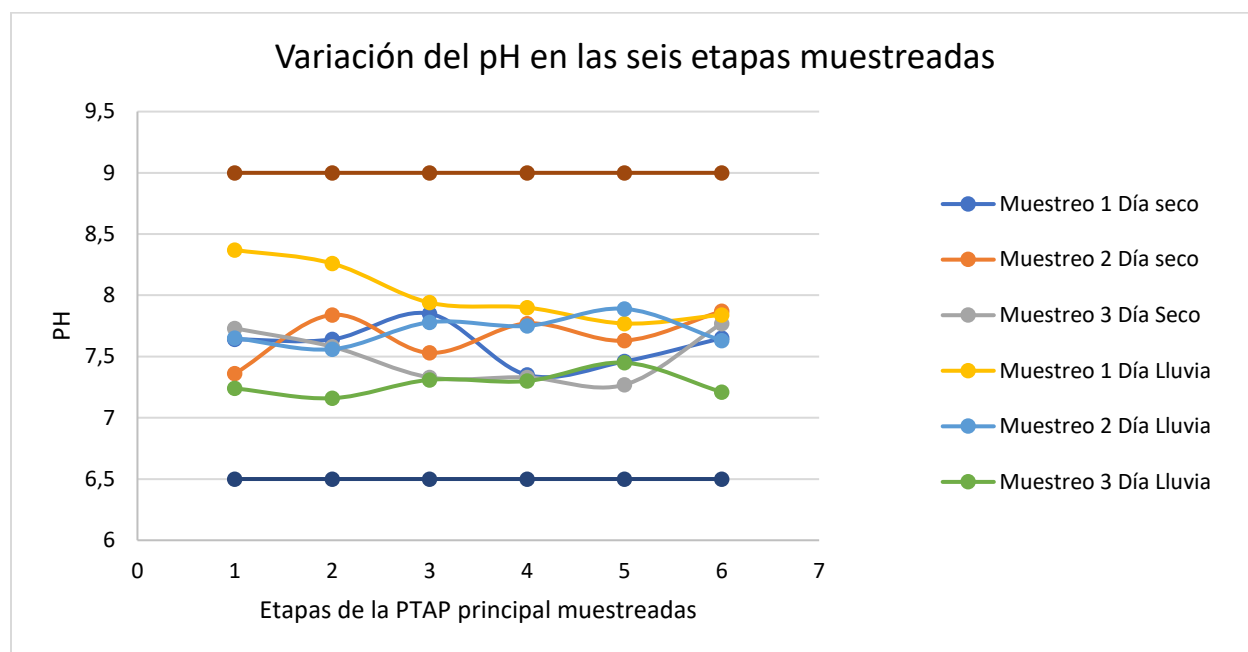
Figura 21. Variación del color aparente por etapa muestreada



La gráfica anterior evidencia que, para los días secos, la remoción del color aparente por la acción de los filtros lentos y los filtros rápidos de la PTAP permitió garantizar que este parámetro en la distribución se encuentra en el valor permisible por normativa, en cambio, para los días de lluvia las condiciones del agua natural evidenciaban alteración con valores altos de color aparente de hasta 89 UPC, en estas situaciones el tratamiento no fue lo suficientemente eficiente pues los análisis a la salida en los tanques de distribución evidenció color aparente por encima de las 15 UPC valor máximo permisible por normativa.

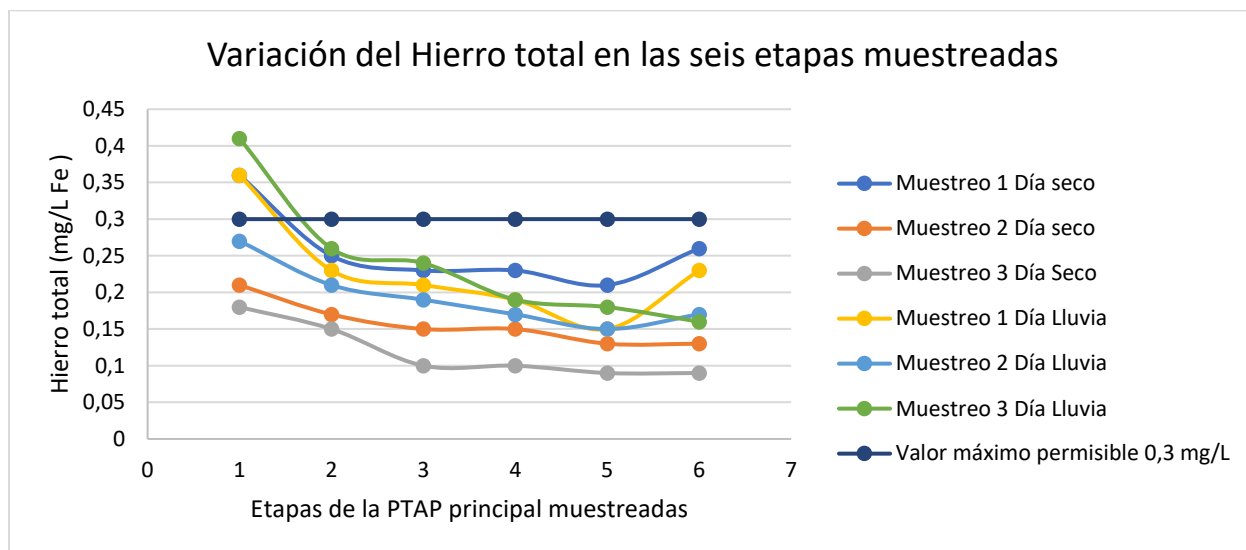
Esta situación se debe principalmente a que no existen procesos de coagulación y sedimentación que permitirían eliminar las sustancias presentes y que inciden en la coloración del agua.

Figura 22. Variación del pH por etapa muestreada



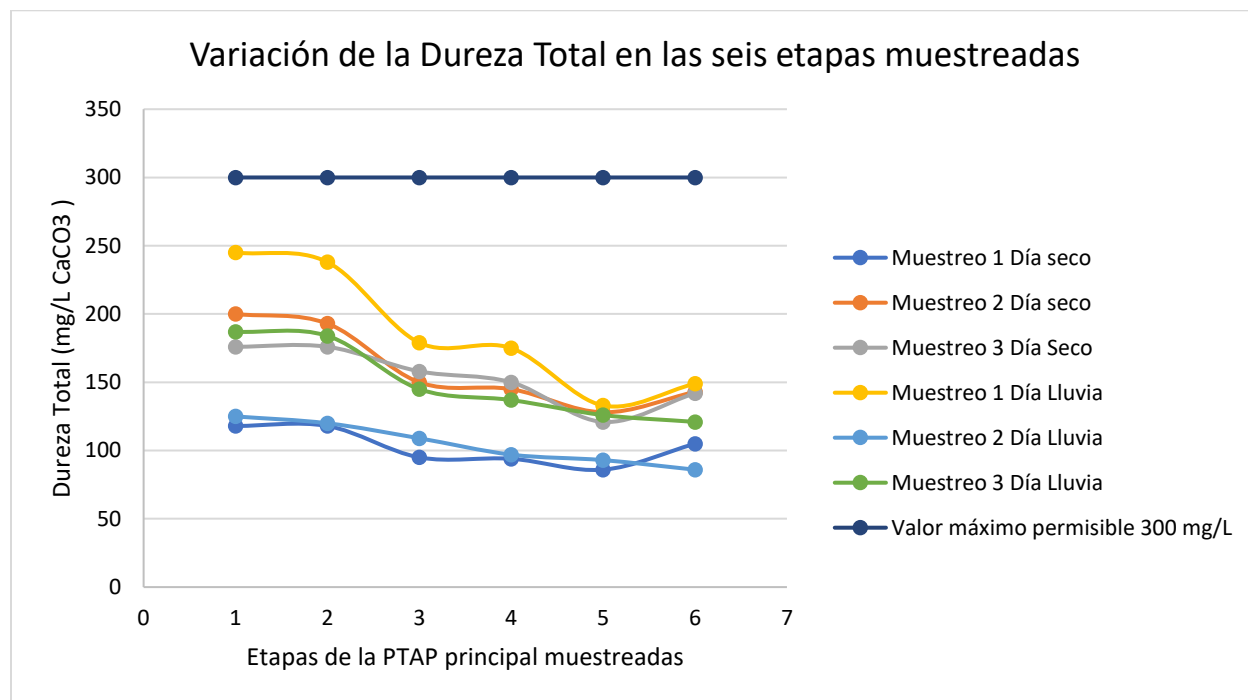
Las variaciones del pH presentadas en las etapas que componen la PTAP principal de Málaga, evidencian incrementos durante el paso del agua por algunas de ellas, lo que se relaciona directamente con valores de eficiencia en las etapas negativas, indicando que los valores de pH a la salida de la etapa son mayores que los reportados en el ingreso. El pH es un parámetro que normalmente se mide conjuntamente con el color, pues la intensidad del color depende del pH, el color aumenta con el incremento del pH.

Figura 23. Variación del Hierro Total por etapa muestreada



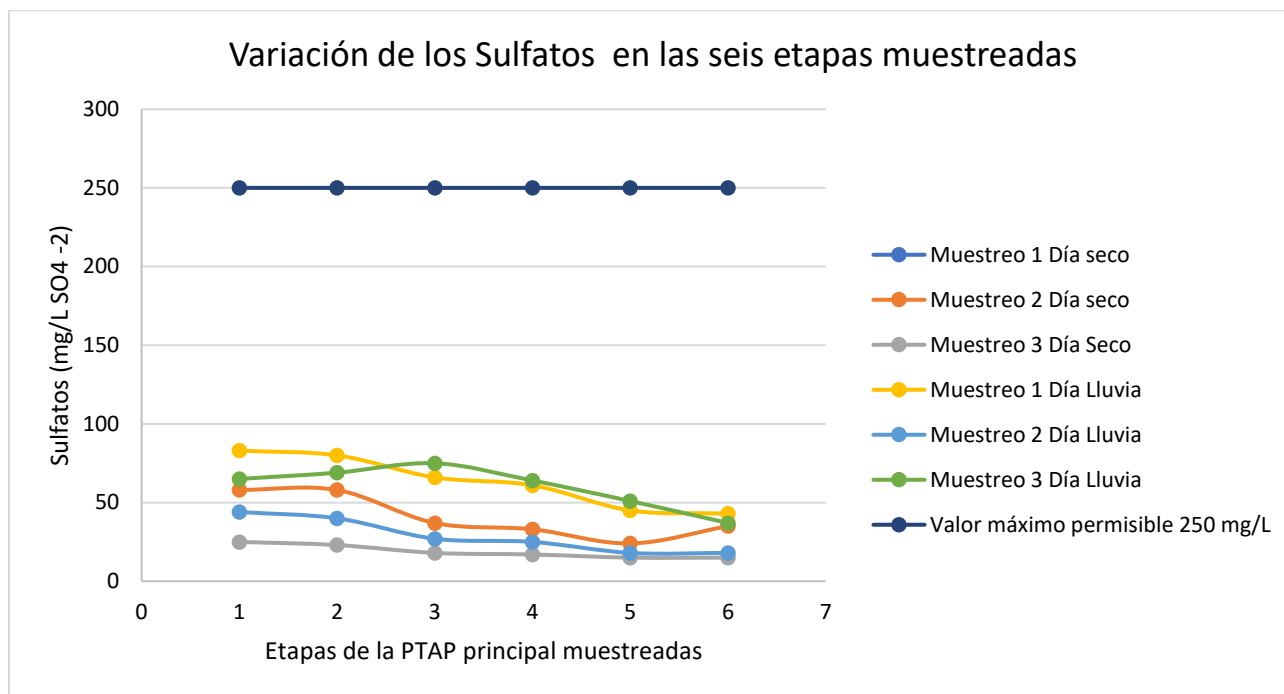
La remoción del valor del hierro a través del proceso de la PTAP evidencia remoción gradual de la concentración de ese metal en el agua natural, sin embargo en algunos de los muestreos se evidencia un aumento del valor de la concentración en la última etapa que es la distribución del agua, lo anterior, se puede deber a que previo a los tanques se cuenta con una tanquilla, llamada por la parte operativa caseta de cloración, en este lugar el agua entra en contacto directo con una estructura metálica que incluso por la misma acción del cloro gaseoso, al ser corrosivo, está alterando el aspecto de la estructura. Cuando las estructuras metálicas se corroen, liberan hierro al agua, disolviéndose en ella y contaminándola.

Figura 24. Variación de la Dureza Total por etapa muestreada



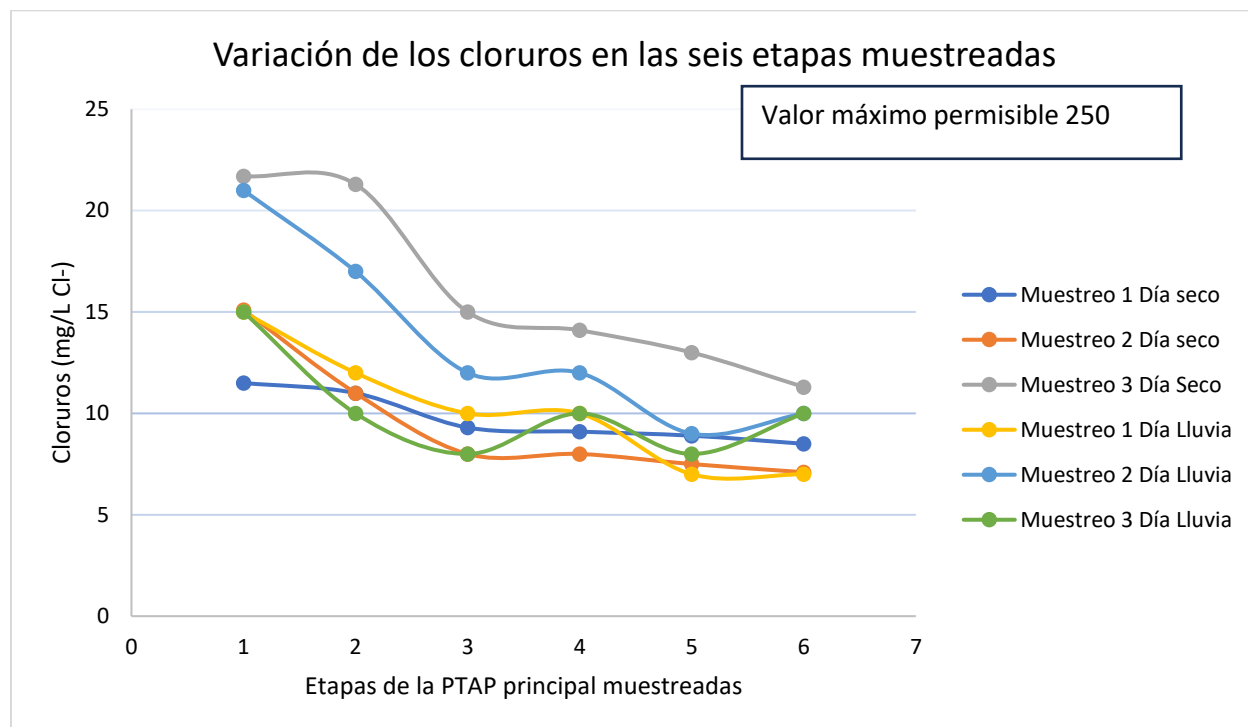
Los análisis realizados para la determinación de dureza total arrojaron en su mayoría aguas moderadamente duras (75 a 150 mg/L CaCO₃) y aguas duras (150 a 300 mg/L CaCO₃). La dureza total, en la mayoría de aguas se considera igual a la dureza producida por los iones de calcio y magnesio. (Romero, 1994). En algunas etapas intermedias o finales, los valores de la dureza total incrementaron con respecto a los valores reportados en la tanquilla colectora, lo anterior se puede deber a que se agrega hipoclorito de calcio en el proceso de desinfección, el cual contiene iones calcio, causantes del aumento de la dureza.

Figura 25. Variación de los sulfatos por etapa muestreada



El ion sulfato es uno de los más comunes en aguas naturales, para las etapas muestreadas, en un día de lluvia se evidencia que en los filtros lentos no hubo remoción de sulfatos, pues el valor de salida es mucho mayor al de ingreso, este valor podría indicar que los filtros se encontraban saturados o no se les había realizado el correcto lavado y/o retrolavado. Cuando un filtro está en óptimas condiciones, es capaz de retener los sulfatos del agua. Sin embargo, a medida que el filtro se satura, deja de retener los sulfatos y, por lo tanto, los sulfatos pasan al agua. Para las demás fechas a medida que el agua ingresa a cada etapa la remoción era efectiva. En todos los casos el valor de sulfatos en la salida cumple con los requisitos normativos.

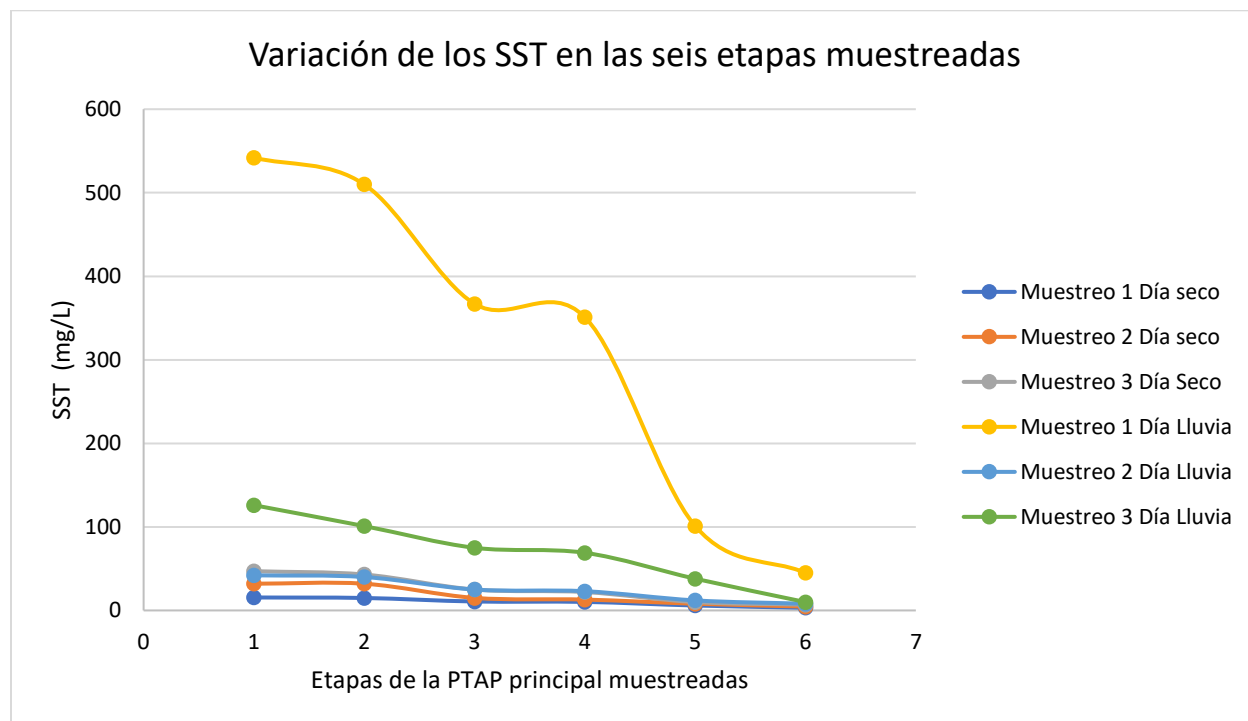
Figura 26. Variación de los cloruros por etapa muestreada



El ion cloruro es una especie de gran importancia, en algunas etapas de los diferentes muestreos se evidencia aumento de los cloruros, situación que se puede relacionar con el uso del hipoclorito de calcio para desinfección en el lavado de las etapas y esta sustancia también contiene iones de cloruro. Estos iones no se combinan con otros iones en el agua y, por lo tanto, permanecen en el agua en forma de cloruros.

Por lo tanto, si se empleó en exceso el hipoclorito de calcio o se dejaron residuos de lavado, esto pudo ocasionar el aumento de la concentración de cloruros en el agua.

Figura 27. Variación de los SST por etapa muestreada



La gráfica de Sólidos suspendidos totales evidencia que en días de lluvia los SST que contiene el agua natural son mucho más altos, pues las lluvias pueden erosionar el suelo y la vegetación, liberando partículas al agua, incluyendo arcilla, limo, arena, materia orgánica y escombros en altas cantidades. Cada fuente que va a ingresar a la PTAP cuenta con pretratamiento compuesto por desarenadores, sin embargo, por constantes lluvias y exceso de caudales en las fuentes, estos desarenadores pueden saturarse y obstruirse rápidamente, acumulando material particulado en la estructura. La PTAP actualmente está conformada por un sistema de filtración lenta y rápida, que permiten tener remoción paulatina de la cantidad de SST. Los valores alcanzados para la distribución son bajos, beneficiando así la calidad del agua suministrada.

Figura 28. Variación de *E.Coli* por etapa muestreada

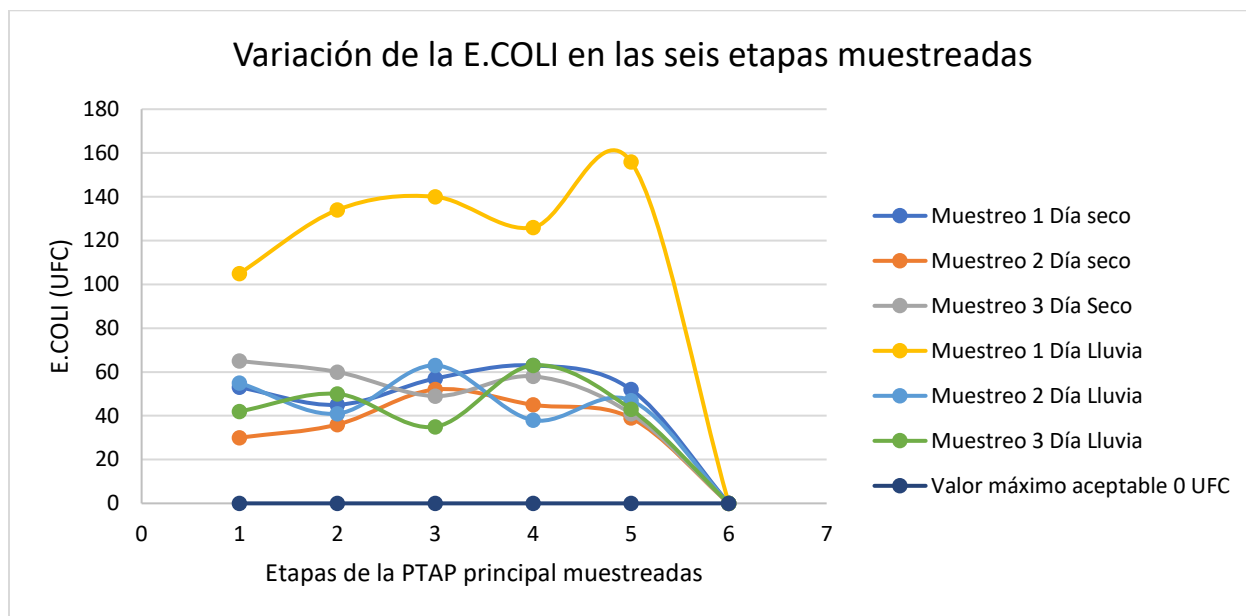
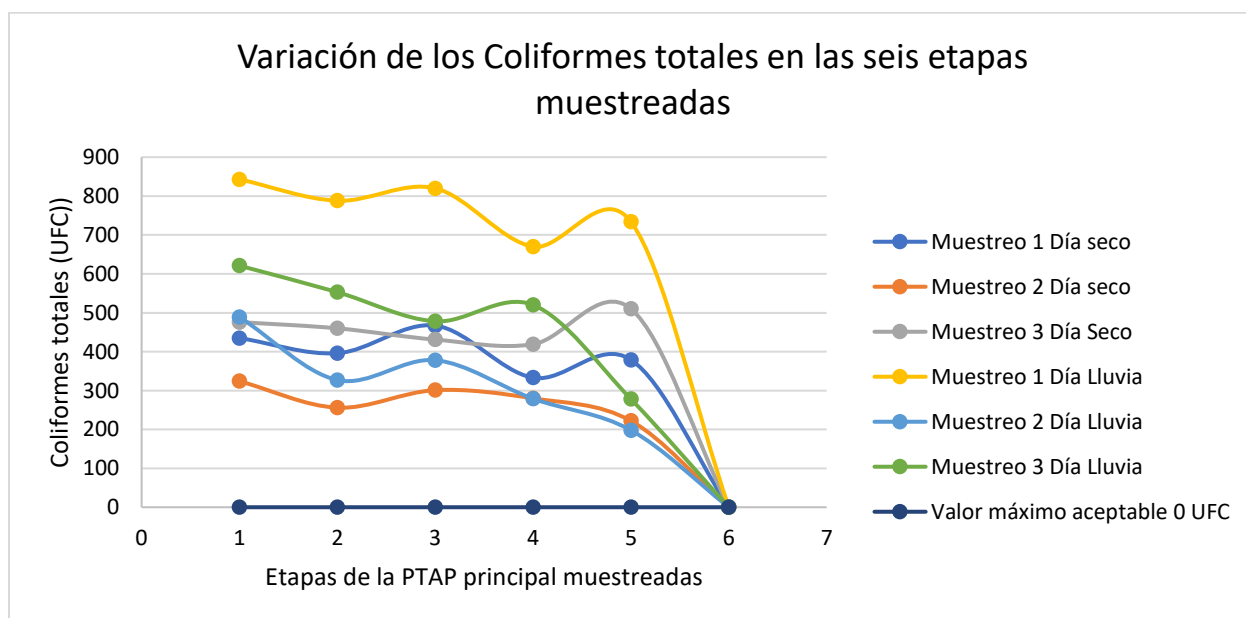


Figura 29. Variación de Coliformes totales por etapa muestreada



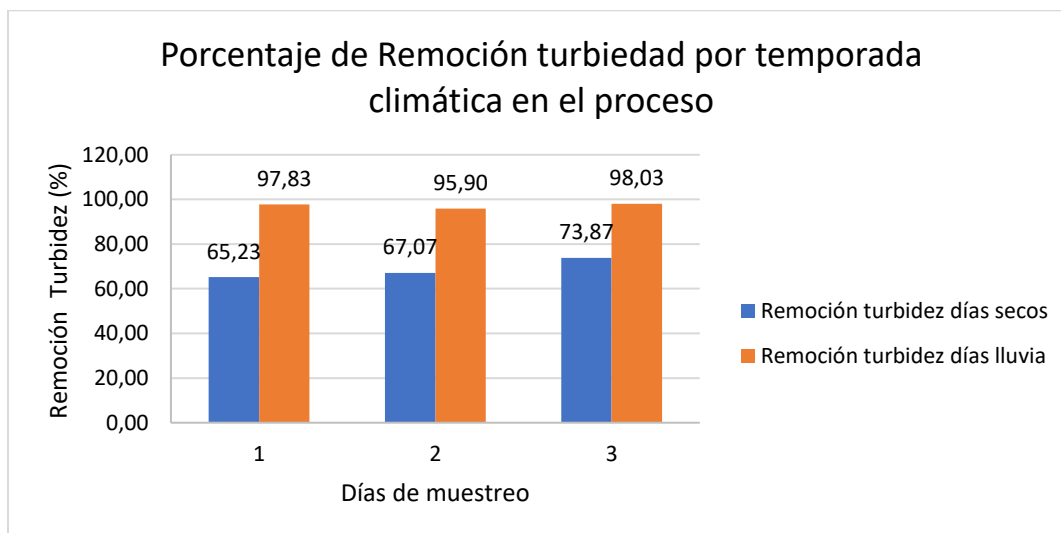
Para el caso de la *E. Coli* y los coliformes totales el muestreo realizado el primer día de lluvia arrojó valores altos con respecto a los demás días y etapas de muestreo, a su vez algunas etapas reportan valores más altos de bacterias coliformes, lo anterior puede deberse a que los

reportes de turbidez y SST también eran altos en la etapa correspondiente, estas características pueden proporcionar protección a la E. coli de los desinfectantes y dificultar su detección, a su vez un mal lavado de estructuras puede dejar residuos de materia orgánica que sirve de alimento para las bacterias coliformes y la no desinfección puede permitir que las bacterias coliformes se propaguen rápidamente en el agua.

Es importante tener en cuenta que a excepción de los tanques de almacenamiento o reserva, todas las estructuras de la PTAP están abiertas al ambiente y están interconectadas por canaletas abiertas que las expone a contaminarse por coliformes incluso fecales derivados de aves.

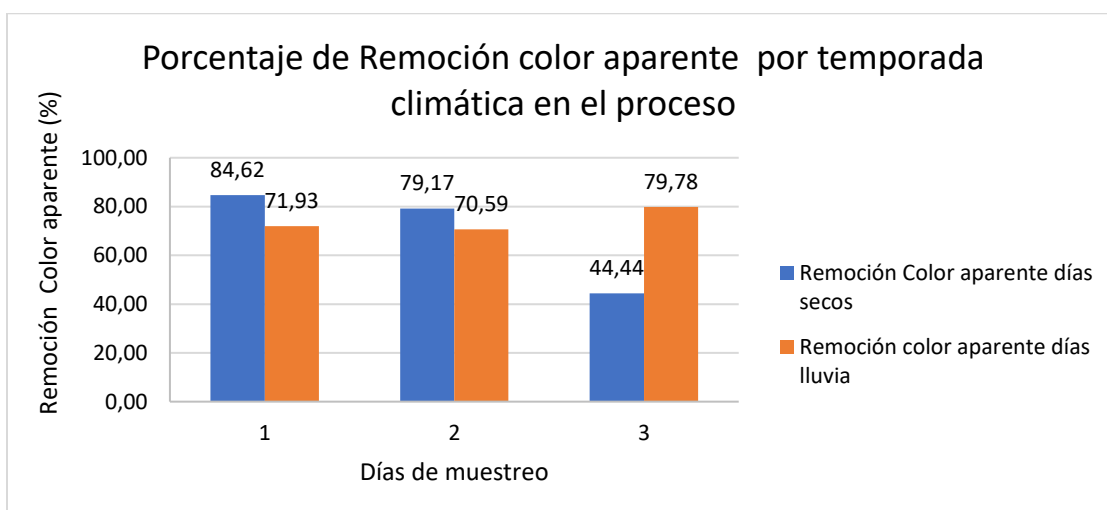
A su vez, se realizaron gráficas para comparar el porcentaje de eficiencia en la remoción de cada parámetro según las condiciones climáticas de día seco o día de lluvia para los seis muestreos realizados. En las gráficas el eje x, representa los tres muestreos realizados en cada temporada, lo que permite determinar el comportamiento del proceso en la PTAP principal del municipio de Málaga según las condiciones del agua natural que ingresa y la respuesta de las etapas en general para la remoción en el proceso completo frente a cada parámetro analizado y las posibles causas de dicho comportamiento.

Figura 30. *Eficiencia remoción Turbiedad*



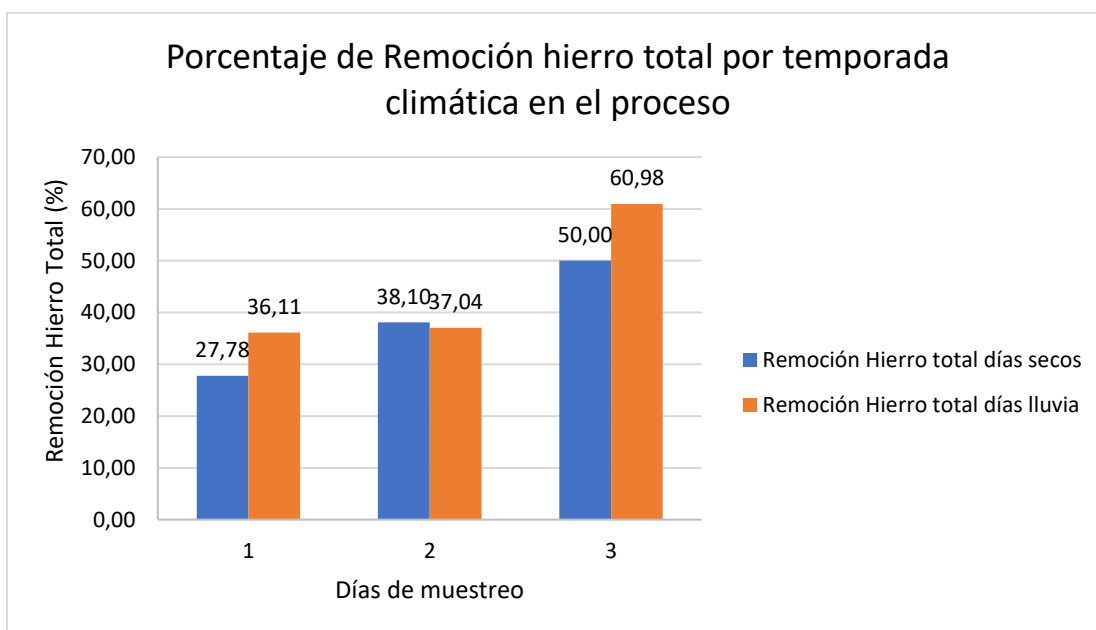
La gráfica evidencia porcentajes de remoción de turbidez en un rango del 65% al 74% para temporada seca alcanzándose valores menores a 2 NTU, y porcentajes de remoción de turbidez por encima del 95% para días de lluvias, aunque la remoción es bastante alta, en los tres muestreos los reportes a la salida de la PTAP no se ajustan al valor máximo permisible por la normativa. Lo que evidenció el mismo comportamiento para la remoción de turbidez en estos tres muestreos en día de lluvia.

Figura 31. *Eficiencia remoción color aparente*

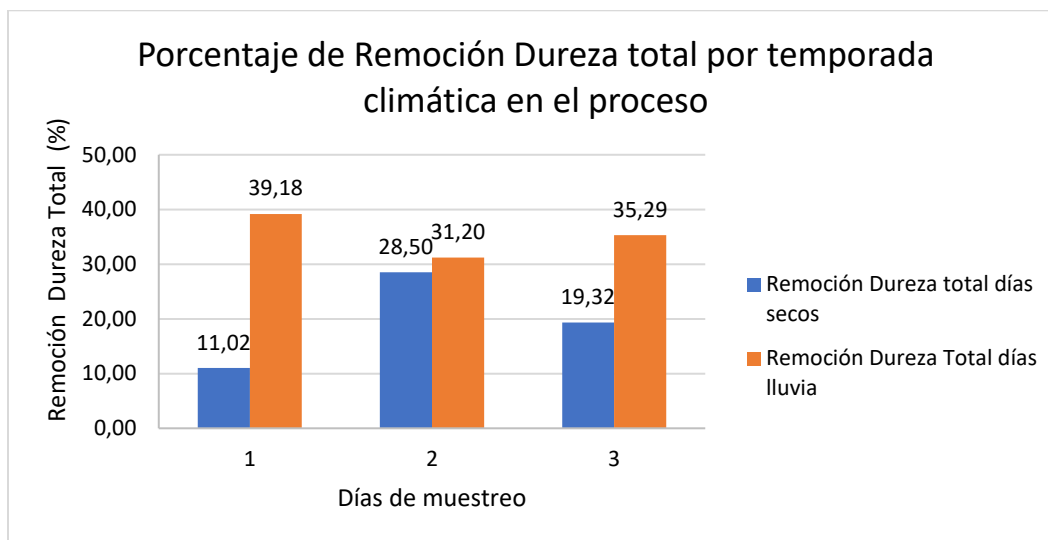


En los días secos la eficiencia de la remoción de color fue la necesaria para asegurar el cumplimiento del valor permisible, para el caso de la remoción del color aparente en días de lluvia, a pesar de estar por encima del 70%, no se alcanzó la concentración permitida por normativa para el parámetro en el agua distribuida.

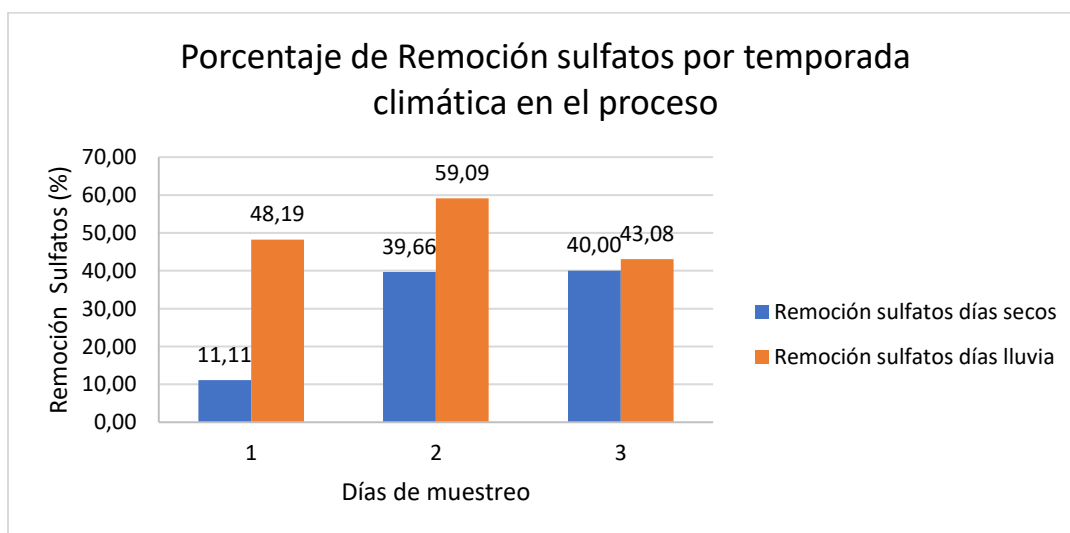
Figura 32. *Eficiencia remoción Hierro total*



La remoción de los valores de concentración de hierro total en el agua fue bueno tanto para días secos como para días de lluvia, permitiendo así que valores de hierro altos al ingreso del proceso se redujeran paulatinamente para lograr la distribución de agua potable con valores permisibles para este parámetro. Los porcentajes de remoción alcanzados estuvieron en el rango del 25 al 61 %.

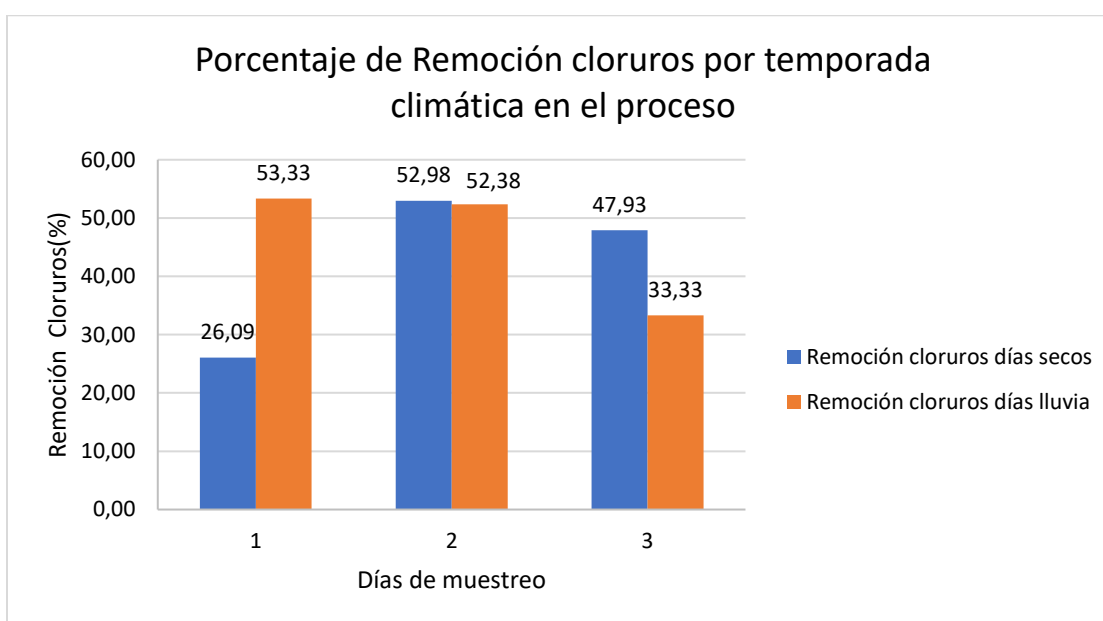
Figura 33. *Eficiencia remoción Dureza total*

El porcentaje de remoción de la dureza total presentó mejor comportamiento para los días de lluvia, se evidencia que la remoción no es superior al 40% para días de lluvia ni superior al 30% en días secos. Es importante recalcar que los valores de dureza reportados para el agua natural que ingresó al proceso no era superior a los 300 mg/L máximos permisibles por normativa para agua tratada.

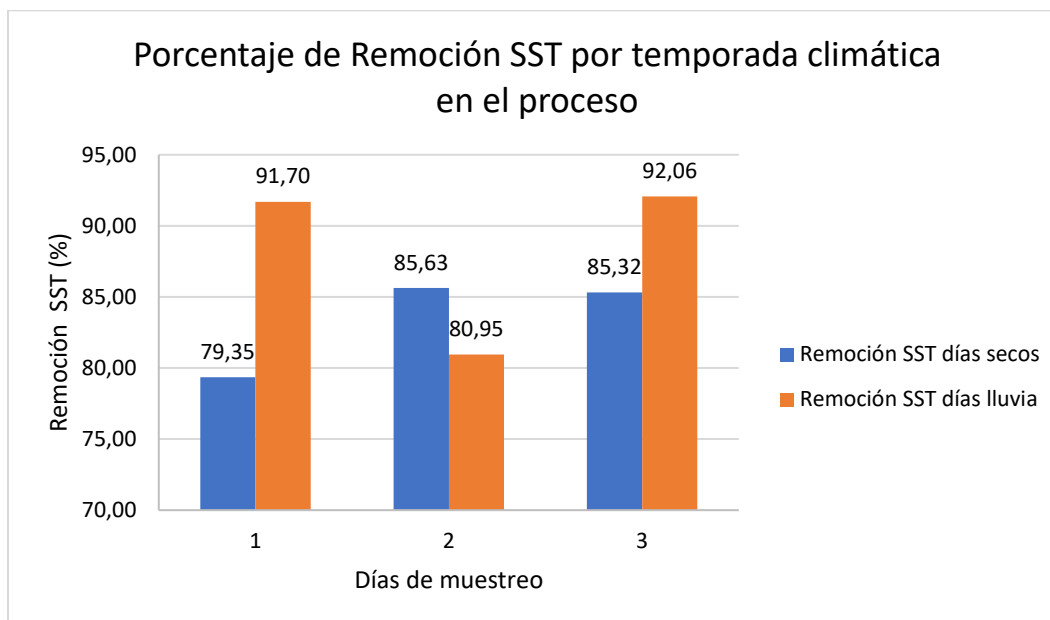
Figura 34. *Eficiencia remoción sulfatos*

La remoción de los valores de concentración de sulfatos en el agua permite una distribución de agua potable con valores normales para este parámetro, sin embargo, desde el ingreso a la PTAP los valores de concentración del parámetro se encontraban por debajo del límite máximo permisible. Los porcentajes de remoción de sulfatos alcanzados fueron máximo del 60% para días de lluvia y de 40% en días secos.

Figura 35. *Eficiencia remoción cloruros*



Los valores de remoción de cloruros, indican que tanto para días de lluvia como para días secos no se alcanzó más del 55% de remoción. Sin embargo, los valores alcanzados de cloruros se ajustan a los valores aceptables por normativa.

Figura 36. *Eficiencia remoción SST*

La remoción alcanzada por los SST en temporada seca y temporada de lluvias estuvo siempre por encima del 78%, indicando efectividad en la disminución de este material particulado en el agua. Es importante tener en cuenta que la eficiencia en la remoción de sólidos puede verse afectada por varios factores, como la operación de las etapas de tratamiento, la dosificación de sustancias químicas, el tiempo de retención en los tanques de almacenamiento o filtros, y la calidad del agua natural.

Figura 37. Eficiencia remoción *E. Coli*

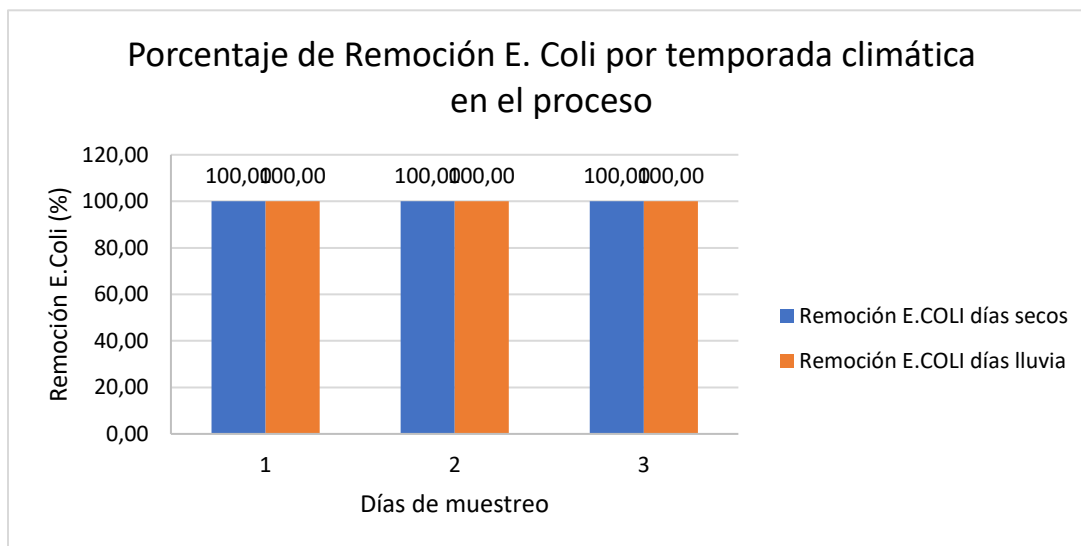
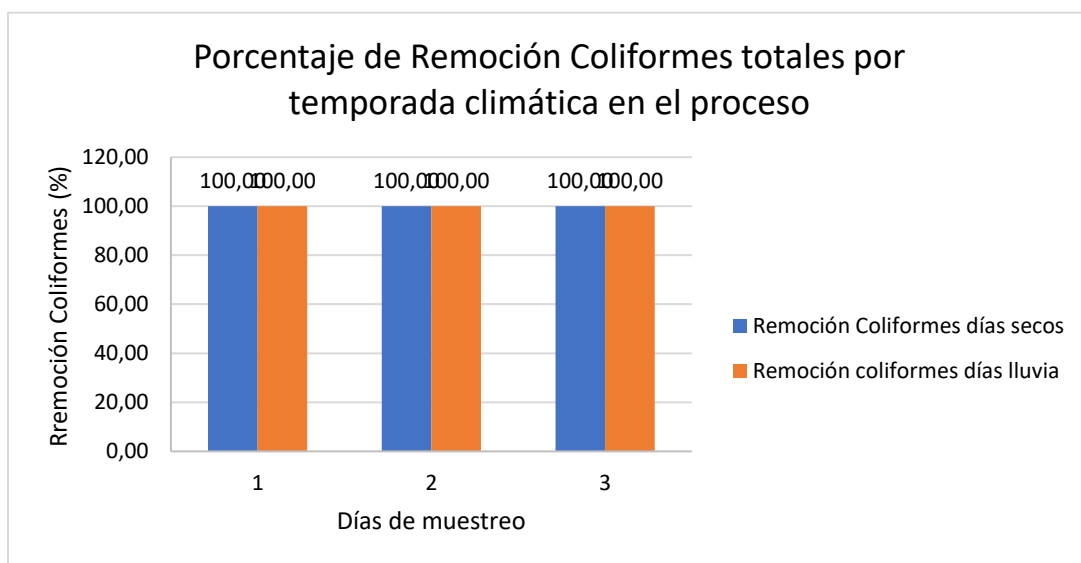


Figura 38. Eficiencia remoción coliformes totales



El proceso de desinfección en la PTAP de Málaga es 100% efectivo ya que logra remover completamente de Coliformes fecales y totales en el agua, a su vez garantiza que el agua

suministrada tenga un remanente de Cloro residual libre dentro del rango de concentración permisible por la norma.

Para el caso de la PTAP principal de Málaga la desinfección se realiza con el cloro gaseoso Número CAS: 7782-50-5 adquirido con Quiminsa – Químicos industriales asociados S.A.S

Los valores numéricos en los que debe estar el análisis de cumplimiento de la evaluación de la eficiencia de los parámetros de calidad del agua potable dependen de los estándares de calidad establecidos por la normativa aplicable. En general, los valores numéricos deben ser inferiores o iguales a los límites establecidos por la normativa. Los valores numéricos más bajos indican que los procesos de tratamiento están funcionando eficazmente y que están eliminando los contaminantes del agua de forma eficiente.

En los muestreos realizados en día seco, todos los parámetros evaluados reportan valor bajo para cumplimiento, como se indicó anteriormente valores numéricos bajos indican tratamiento eficaz, a diferencia de lo que ocurre en día de lluvia, para los parámetros turbiedad y color aparente, el cumplimiento está por encima del valor de 1.0 indicando que el resultado obtenido está por encima del valor permisible por normativa afectando directamente la calidad del agua.

Para la determinación del comportamiento de la Planta principal de agua potable del municipio de Málaga, Santander en periodo normal y periodo crítico, se realizó el cálculo del IRCA a partir de los valores máximos aceptables para las características analizadas presentados en la tabla 16, los puntajes de riesgo asignados a los parámetros presentados en la tabla 17, y la ecuación veintitrés (EC.23) para el cálculo del IRCA

Tabla 22. Reporte IRCA para el primer muestreo

MUESTRA TRATADA 1 - DÍA SECO					
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA					
Ensayos realizados	Fisicoquímico y Microbiológico				
Fuente	Planta de Tratamiento de agua potable PTAP				
Tipo de Agua	Tratada				
Sitio de muestreo	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN				
Punto de muestreo	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN				
Municipio	MÁLAGA				
Tipo de muestreo	Puntual				
Objeto del análisis	Control de calidad del agua				
Fecha de recolección	2023-09-11 Hora: 8:00 AM				
Fecha de análisis	2023-09-11 Hora: 10:00 AM				
Tomada por	Leidy Guadrón				
ANÁLISIS FISICOQUÍMICO					
PARAMETRO	UNIDAD	TECNICA	Res 2115/07	Puntaje de Riesgo	RESULTADO
Turbiedad	NTU	Turbidimétrica	2	15	0,89
Color aparente	UPC	Espectrofotométrica	15	6	2
Cloro Residual	mg/L Cloro	Espectrofotométrica	0.3 - 2	15	1,5
pH	Unidad de pH	Potenciométrica	6.5 - 9.0	1,5	7,65
Hierro Total	mg/L Fe	Colorimétrica	0.3	1,5	0,26
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Volumétrica	300	1	105
Sulfatos	mg/L SO ₄	Espectrofotométrica	250	1	40
Cloruros	mg/L NaCl	Volumétrica	250	1	8,5
ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO					
PARAMETRO	UNIDAD	TECNICA	Res 2115/07	Puntaje de Riesgo	RESULTADO
Coliformes Totales	UFC / 100 cm ³	Filtración por membrana	0	15	0
Coliformes Fecales	UFC / 100 cm ³	Filtración por membrana	0	25	0
IRCA			0		
Nivel de riesgo por muestra			SIN RIESGO		

El informe de muestra presentado resume la información y los valores reportados para cada uno de los parámetros analizados en el laboratorio de aguas, el Índice de riesgo de la calidad del agua IRCA, fue calculado a partir de la ecuación 31, arroja un valor del IRCA de cero (0 %), con nivel de riesgo por muestra: sin riesgo, agua apta para consumo humano, la autoridad sanitaria y el

prestador deben continuar control y vigilancia de la calidad del agua según la resolución 2115 de junio de 2007. Los resultados de todos los parámetros analizados cumplieron con los valores aceptables.

Tabla 23. Reporte IRCA para el segundo muestreo

MUESTRA TRATADA 2 - DÍA SECO					
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA					
Ensayos realizados	Fisicoquímico y Microbiológico				
Fuente	Planta de Tratamiento de agua potable PTAP				
Tipo de Agua	Tratada				
Sitio de muestreo	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN				
Punto de muestreo	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN				
Municipio	MÁLAGA				
Tipo de muestreo	Puntual				
Objeto del análisis	Control de calidad del agua				
Fecha de recolección	2023-09-18 Hora: 2:30 PM				
Fecha de análisis	2023-09-18 Hora: 3:00 PM				
Tomada por	Leidy Gualdrón				
ANÁLISIS FISICOQUÍMICO					
PARAMETRO	UNIDAD	TECNICA	Res 2115/07	Puntaje de Riesgo	RESULTADO
Turbiedad	NTU	Turbidimétrica	2	15	1,1
Color aparente	UPC	Espectrofotométrica	15	6	5
Cloro Residual	mg/L Cloro	Espectrofotométrica	0.3 - 2	15	1,76
pH	Unidad de pH	Potenciométrica	6.5 - 9.0	1.5	7,87
Hierro Total	mg/L Fe	Colorimétrica	0.3	1,5	0,13
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Volumétrica	300	1	143
Sulfatos	mg/L SO ₄	Espectrofotométrica	250	1	35
Cloruros	mg/L NaCl	Volumétrica	250	1	7,1
ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO					
PARAMETRO	UNIDAD	TECNICA	Res 2115/07	Puntaje de Riesgo	RESULTADO
Coliformes Totales	UFC / 100 cm ³	Filtración por membrana	0	15	0
Coliformes Fecales	UFC / 100 cm ³	Filtración por membrana	0	25	0
IRCA			0		
Nivel de riesgo por muestra			SIN RIESGO		

El Índice de riesgo de la calidad del agua IRCA para los parámetros analizados arroja un valor del IRCA de Cero (0 %), con nivel de riesgo por muestra: sin riesgo, agua apta para consumo humano, la autoridad sanitaria y el prestador deben continuar control y vigilancia de la calidad del agua según la resolución 2115 de junio de 2007. Los resultados de todos los parámetros analizados cumplieron con los valores aceptables.

Tabla 24. Reporte IRCA para el tercer muestreo

MUESTRA TRATADA 3 - DÍA SECO					
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA					
Ensayos realizados	Fisicoquímico y Microbiológico				
Fuente	Planta de Tratamiento de agua potable PTAP				
Tipo de Agua	Tratada				
Sitio de muestreo	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN				
Punto de muestreo	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN				
Municipio	MÁLAGA				
Tipo de muestreo	Puntual				
Objeto del análisis	Control de calidad del agua				
Fecha de recolección	2023-09-25 Hora: 10:45 AM				
Fecha de análisis	2023-09-25 Hora: 1:00 PM				
Tomada por	Leidy Gualdrón				
ANÁLISIS FISICOQUÍMICO					
PARAMETRO	UNIDAD	TECNICA	Res 2115/07	Puntaje de Riesgo	RESULTADO
Turbiedad	NTU	Turbidimétrica	2	15	1,1
Color aparente	UPC	Espectrofotométrica	15	6	10
Cloro Residual	mg/L Cloro	Espectrofotométrica	0.3 - 2	15	1,39
pH	Unidad de pH	Potenciométrica	6.5 - 9.0	1.5	7,77
Hierro Total	mg/L Fe	Colorimétrica	0.3	1,5	0,09
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Volumétrica	300	1	142
Sulfatos	mg/L SO ₄	Espectrofotométrica	250	1	15
Cloruros	mg/L NaCl	Volumétrica	250	1	11,3
ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO					
PARAMETRO	UNIDAD	TECNICA	Res 2115/07	Puntaje de Riesgo	RESULTADO
Coliformes Totales	UFC / 100 cm ³	Filtración por membrana	0	15	0
Coliformes Fecales	UFC / 100 cm ³	Filtración por membrana	0	25	0
IRCA			0		
Nivel de riesgo por muestra			SIN RIESGO		

El Índice de riesgo de la calidad del agua IRCA para los parámetros analizados arroja un valor del IRCA de Cero (0%), con nivel de riesgo por muestra: sin riesgo, agua apta para consumo humano, la autoridad sanitaria y el prestador deben continuar control y vigilancia de la calidad del agua según la resolución 2115 de junio de 2007. Los resultados de todos los parámetros analizados cumplieron con los valores aceptables.

Tabla 25. Reporte IRCA para el cuarto muestreo

MUESTRA TRATADA 1 - DÍA LLUVIA					
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA					
Ensayos realizados	Fisicoquímico y Microbiológico				
Fuente	Planta de Tratamiento de agua potable PTAP				
Tipo de Agua	Tratada				
Sitio de muestreo	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN				
Punto de muestreo	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN				
Municipio	MÁLAGA				
Tipo de muestreo	Puntual				
Objeto del análisis	Control de calidad del agua				
Fecha de recolección	2023-10-18 Hora: 9:37 AM				
Fecha de análisis	2023-10-18 Hora: 10:30 AM				
Tomada por	Leidy Gualdrón				
ANÁLISIS FISICOQUÍMICO					
PARAMETRO	UNIDAD	TECNICA	Res 2115/07	Puntaje de Riesgo	RESULTADO
Turbiedad	NTU	Turbidimétrica	2	15	4,11
Color aparente	UPC	Espectrofotométrica	15	6	16
Cloro Residual	mg/L Cloro	Espectrofotométrica	0.3 - 2	15	0,67
pH	Unidad de pH	Potenciométrica	6.5 - 9.0	1,5	7,84
Hierro Total	mg/L Fe	Colorimétrica	0.3	1,5	0,23
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Volumétrica	300	1	149
Sulfatos	mg/L SO ₄	Espectrofotométrica	250	1	43
Cloruros	mg/L NaCl	Volumétrica	250	1	7
ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO					
PARAMETRO	UNIDAD	TECNICA	Res 2115/07	Puntaje de Riesgo	RESULTADO
Coliformes Totales	UFC / 100 cm ³	Filtración por membrana	0	15	0
Coliformes Fecales	UFC / 100 cm ³	Filtración por membrana	0	25	0
IRCA			25.6		
Nivel de riesgo por muestra			MEDIO		

El Índice de riesgo de la calidad del agua IRCA para los parámetros analizados arroja un valor del IRCA de 25.6%, con nivel de riesgo por muestra: medio, los valores reportados para los parámetros turbiedad y color aparente incumplen con los valores aceptables según la resolución 2115 de junio de 2007, agua no apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.

Tabla 26. Reporte IRCA para el quinto muestreo

MUESTRA TRATADA 2 - DÍA LLUVIA					
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA					
Ensayos realizados	Fisicoquímico y Microbiológico				
Fuente	Planta de Tratamiento de agua potable PTAP				
Tipo de Agua	Tratada				
Sitio de muestreo	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN				
Punto de muestreo	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN				
Municipio	MÁLAGA				
Tipo de muestreo	Puntual				
Objeto del análisis	Control de calidad del agua				
Fecha de recolección	2023-10-24 Hora: 2:48 PM				
Fecha de análisis	2023-10-24 Hora: 3:30 PM				
Tomada por	Leidy Gualdrón				
ANÁLISIS FISICOQUÍMICO					
PARAMETRO	UNIDAD	TECNICA	Res 2115/07	Puntaje de Riesgo	RESULTADO
Turbiedad	NTU	Turbidimétrica	2	15	3,2
Color aparente	UPC	Espectrofotométrica	15	6	5
Cloro Residual	mg/L Cloro	Espectrofotométrica	0.3 - 2	15	0,95
pH	Unidad de pH	Potenciométrica	6.5 - 9.0	1.5	7,63
Hierro Total	mg/L Fe	Colorimétrica	0.3	1,5	0.17
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Volumétrica	300	1	86
Sulfatos	mg/L SO ₄	Espectrofotométrica	250	1	18
Cloruros	mg/L NaCl	Volumétrica	250	1	10
ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO					
PARAMETRO	UNIDAD	TECNICA	Res 2115/07	Puntaje de Riesgo	RESULTADO
Coliformes Totales	UFC / 100 cm ³	Filtración por membrana	0	15	0
Coliformes Fecales	UFC / 100 cm ³	Filtración por membrana	0	25	0
IRCA			18.29		
Nivel de riesgo por muestra			MEDIO		

El Índice de riesgo de la calidad del agua IRCA para los parámetros analizados arroja un valor del IRCA de 18.29%, con nivel de riesgo por muestra: medio, el valor reportado para el parámetro turbiedad incumple con los valores aceptables según la resolución 2115 de junio de 2007, agua No apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.

Tabla 27. Reporte IRCA para el sexto muestreo

MUESTRA TRATADA 3 - DÍA LLUVIA					
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA					
Ensayos realizados	Fisicoquímico y Microbiológico				
Fuente	Planta de Tratamiento de agua potable PTAP				
Tipo de Agua	Tratada				
Sitio de muestreo	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN				
Punto de muestreo	SALIDA PTAP TANQUES DE DISTRIBUCIÓN				
Municipio	MÁLAGA				
Tipo de muestreo	Puntual				
Objeto del análisis	Control de calidad del agua				
Fecha de recolección	2023-11-06 Hora: 4:35 PM				
Fecha de análisis	2023-11-07 Hora: 7:00 AM				
Tomada por	Leidy Gualdrón				
ANÁLISIS FISIQUÍMICO					
PARAMETRO	UNIDAD	TECNICA	Res 2115/07	Puntaje de Riesgo	RESULTADO
Turbiedad	NTU	Turbidimétrica	2	15	4,56
Color aparente	UPC	Espectrofotométrica	15	6	18
Cloro Residual	mg/L Cloro	Espectrofotométrica	0.3 - 2	15	0,85
pH	Unidad de pH	Potenciométrica	6.5 - 9.0	1.5	7,21
Hierro Total	mg/L Fe	Colorimétrica	0.3	1,5	0,16
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Volumétrica	300	1	121
Sulfatos	mg/L SO ₄	Espectrofotométrica	250	1	37
Cloruros	mg/L NaCl	Volumétrica	250	1	10
ANÁLISIS BACTERIOLÓGICO					
PARAMETRO	UNIDAD	TECNICA	Res 2115/07	Puntaje de Riesgo	RESULTADO
Coliformes Totales	UFC / 100 cm ³	Filtración por membrana	0	15	0
Coliformes Fecales	UFC / 100 cm ³	Filtración por membrana	0	25	0
IRCA			25.60		
Nivel de riesgo por muestra			MEDIO		

El Índice de riesgo de la calidad del agua IRCA para los parámetros analizados arroja un valor del IRCA de 25.6%, con nivel de riesgo por muestra: medio, los valores reportados para los parámetros turbiedad y color aparente incumplen con los valores aceptables según la resolución 2115 de junio de 2007, agua No apta para consumo humano, gestión directa de la persona prestadora.

Evidenciando los resultados de la caracterización que se llevó a cabo para días secos y días de lluvia en la PTAP principal de Málaga, se hace necesario resaltar que la inexistencia de etapas como la coagulación/floculación y sedimentación sobre todo en temporada de lluvia porque contribuiría a que la PTAP pueda funcionar normalmente y no impedir el ingreso al tratamiento, a su vez, garantizaría una reducción de la turbidez, el color, los SST y los coliformes, parámetros que pueden llegar a afectar el proceso de cloración y a generar obstrucciones o fallas por acumulación de material particulado y sedimentos en tuberías y estructuras.

Después de analizar los resultados obtenidos se llevó a cabo una revisión de las bitácoras de los auxiliares operativos y se determinó que hay falencias en el mantenimiento, lavado y desinfección que realizan en cada una de las zonas asignadas, pues no se llevan a cabo de forma rigurosa ni siguiendo las indicaciones que establece la normativa.

A su vez, dejan muchos espacios sin diligenciar y no especifican dentro del diligenciamiento las etapas ni los componentes de las mismas a los cuales deben hacerle reparaciones, cambios o mantenimiento, lo cual dificulta tener una trazabilidad del proceso y de cada una de las etapas que en él intervienen.

Es importante resaltar que los auxiliares operativos de la PTAP tienen un manual de operación en donde se describe la frecuencia para el lavado, desinfección y mantenimiento de cada una de las etapas de la PTAP, así como la inspección preliminar, la operación diaria y el monitoreo

que se debe llevar a cabo clasificándolas en actividades diarias, periódicas y eventuales, sin embargo no se evidencia dicho cumplimiento en la bitácora de actividades ni en los formatos de diligenciamiento de mantenimiento establecidos, situación que puede ser causa directa de que en algunas etapas como son los prefiltros y los filtros rápidos la remoción no sea efectiva para características que alteran la calidad del agua.

6. Conclusiones

El aumento de valores de Turbidez de la tanquilla colectora a los prefiltros indica que hubo arrastre de material particulado que se encontraba depositado en la etapa intermedia correspondiente a escaleras de oxigenación, relacionado con labores de mantenimiento y lavado de las escaleras que no se realizaron de forma regular como lo establece el procedimiento de mantenimiento, lavado y desinfección.

El valor negativo en el porcentaje de remoción indica que para esta etapa la concentración de salida fue mayor a la concentración de ingreso para el parámetro evaluado, como es el caso de los Coliformes en prefiltros y los filtros rápidos, de los Sulfatos en los filtros rápidos.

El aumento de Sulfatos en la etapa de filtración rápida puede estar relacionado con la acumulación de material particulado en el lecho, a su vez si no se realiza continuamente el lavado este lecho puede saturarse contribuyendo al aumento gradual de la concentración de otros parámetros.

El aumento de la concentración de Hierro total de los filtros rápidos a la salida de los tanques de distribución se debe a la existencia de una tanquilla, llamada por la parte operativa caseta de cloración, en este lugar el agua entra en contacto directo con una estructura metálica que incluso por la misma acción del cloro gaseoso, al ser corrosivo, está alterando el aspecto de la estructura, se corroe y libera hierro al agua, disolviéndose en ella y contaminándola.

A nivel general la remoción del proceso, es decir evaluando las concentraciones del agua natural en la tanquilla colectora y del agua tratada en los tanques de distribución para los muestreos

en días secos; evidencian porcentajes de remoción que permiten garantizar cumplimiento con los valores de concentración permisibles por la normativa para el agua potable.

Las caracterizaciones realizadas para los muestreos en días de lluvia, evidencia que la remoción del proceso para los parámetros Turbidez y Color aparente no permite garantizar cumplimiento con los valores de concentración permisibles por la normativa para el agua potable, lo cual indica agua con riesgo medio, no apta para consumo humano aun cuando exista 100% de efectividad para la desinfección y se garantice el remanente de Cloro residual libre para el suministro.

Las caracterizaciones realizadas alertan de la situación del suministro de agua potable en días de lluvia, pues el incumplimiento en los valores de concentración a la salida del proceso, evidencia que la eficiencia en la remoción en el proceso no es adecuada, hay falencias operativas que no garantizan agua apta para consumo humano cuando se presentan lluvias, convirtiéndose en un posible problema de salud pública para el municipio de Málaga.

La eficiencia de remoción alcanzada en los parámetros Turbidez, Color aparente, Sólidos Suspendidos Totales y Coliformes fecales y totales; indica que es necesario implementar mejoras en el tratamiento existente, para que la tasa de filtración sea más efectiva con la acción de procesos de coagulación, floculación y sedimentación, garantizando agua apta para consumo humano bajo cualquier circunstancia o periodo crítico que se presente.

Para determinar las acciones y actividades que se deben llevar a cabo en periodos críticos en la planta de tratamiento de agua potable, es necesario el monitoreo continuo de la calidad del agua, realizar una revisión y verificación periódica de los registros de operación y bitácoras de

seguimiento, así como inspecciones visuales y profesionales de las instalaciones y estructuras para tomar a tiempo acciones preventivas y correctivas en el proceso.

El proceso de desinfección en la PTAP de Málaga es 100% efectivo ya que logra remover completamente de coliformes fecales y totales en el agua, a su vez garantiza que el agua suministrada tenga un remanente de Cloro residual libre dentro del rango de concentración permisible por la norma.

La PTAP principal de Málaga, al ser una planta que opera básicamente con filtración y desinfección, en temporada seca, está en capacidad de remover de contaminantes y sustancias que componen el agua natural en forma muy eficiente; permitiendo cumplir con los valores aceptables asociados a la resolución 2115 de 2007. Sin embargo, en temporada de lluvias hay parámetros que no logran cumplir con los valores aceptables, por tanto, generan un nivel de riesgo para el consumo humano y requieren acciones de urgente cumplimiento por parte del ente prestador del servicio y la autoridad sanitaria competente.

El mantenimiento y la operación de las etapas de la PTAP incluyen como actividades de gran importancia el lavado y la desinfección de las estructuras sobre todo en temporada de lluvia, el hecho de que no se lleve control de las operaciones y un cronograma ajustado a las actividades diarias, periódicas y eventuales, hace que se eleven las alteraciones negativas en el proceso, sobre todo en época de lluvia intensa y periódica, donde evidentemente los filtros lentos y rápidos tienen una sobresaturación de material particulado y no trabajan de la misma manera que en época seca, así como las canaletas y tanques de almacenamiento que acumulan sedimentos y puedan llegar a aumentar la concentración de parámetros como Turbidez, Sólidos, Sulfatos y Coliformes,

requiriendo acciones rápidas y continuas de mantenimiento, que respondan oportunamente a los cambios en la calidad del agua.

7. Recomendaciones

Generar un plan de acción y mejoramiento, con base en los resultados de la evaluación de la eficiencia del sistema de tratamiento de agua para tomar las medidas necesarias que permitan mejorar la eficiencia del sistema.

Las Empresas Públicas Municipales de Málaga debe capacitar al personal en el manejo adecuado de la PTAP, así como en la ejecución continua del Plan de mantenimiento, lavado y desinfección para garantizar que todo el sistema de tratamiento cumpla con las exigencias requeridas para un buen funcionamiento de las etapas con las que cuenta actualmente.

En la PTAP principal es necesario implementar operaciones unitarias de tratamiento adicionales para eliminar los contaminantes que pueden aumentar en la temporada de lluvia. Es así que se pueden agregar filtros adicionales para eliminar los sedimentos y el material particulado en exceso. Es necesario optar por la implementación de la etapa de Coagulación-Floculación, así como la de sedimentación, lo que garantizaría que no se afecte la calidad del agua ni el suministro del preciado líquido a la población malagueña.

Educar a la población sobre la importancia de la calidad del agua permitirá comprender los riesgos asociados con el consumo de agua potable de baja calidad. Las personas pueden tomar medidas para proteger su salud y para el cuidado de las fuentes naturales con el fin de preservarlas.

Aumentar la frecuencia de los análisis de calidad del agua en la planta de tratamiento, con el fin de conocer de forma más detallada el funcionamiento del mismo y analizar de forma más rigurosa el comportamiento del proceso en diferentes temporadas o periodos críticos.

Monitorear continuamente la etapa de cloración para garantizar una desinfección eficiente y que exista un suficiente remanente de Cloro residual libre para cumplir con la normativa.

Se requiere un estudio técnico para la implementación de las etapas de Floculación-Coagulación y sedimentación en la PTAP principal pues la eficiencia de la planta es buena en temporada seca, sin embargo en temporada de lluvias la calidad del agua se ve directamente afectada por la operación del sistema pues no está en capacidad de remoción eficiente en parámetros como la turbidez y el color aparente, que poseen puntajes de riesgo altos en la valoración del índice de riesgo de calidad del agua, reportando IRCA por muestra Bajo, Medio o alto, indicando agua no apta para consumo humano.

Las Empresas Públicas Municipales de Málaga podría suministrar al laboratorio de aguas la dotación en insumos, reactivos y equipos requeridos para ampliar los análisis fisicoquímicos que realiza y poder caracterizar todos los parámetros contemplados para la evaluación del IRCA y establecidos en la Resolución 2115 de 2007.

En la PTAP principal de Málaga se debe establecer un programa de capacitación a los auxiliares operativos del sistema de tratamiento que incluya:

- Inducción y reinducción periódica para el correcto manejo operativo de la PTAP, así como socialización periódica y continua del manual operativo de mantenimiento, lavado y desinfección en donde se especifican las actividades y frecuencias de realización de las labores a desarrollar en cada una de las etapas que componen el sistema de tratamiento.
- Manejo de sustancias químicas, toma de muestras, dosificación de insumos químicos, caracterización básica para medición de Cloro residual libre, Turbiedad y pH.
- Plan de contingencia de la Planta de tratamiento de agua potable y plan de contingencia de la calidad del agua, requerimientos del Ministerio de protección social y de ambiente, vivienda y desarrollo territorial en lo referente a la Resolución N°2115 de 22 de junio del 2007 “por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano”. Así mismo, la resolución N° 000549 del 1 de marzo del 2017 “por la cual se adopta la guía que incorpora los criterios y actividades mínimas de los estudios de riesgo, programa de reducción de riesgo y planes de contingencia de los sistemas de suministros de agua para consumo humano y se dictan otras disposiciones”.

Referencias Bibliográficas

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). (2022). Tratamiento del agua potable. Washington, DC, EE. UU.: EPA.

American Water Works Association AWWA (Ed.). (2006). Water chlorination/ chloramination practices and principles (Second Edition ed.)

Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (Acodal). (2022). Manual de tratamiento de agua potable. Bogotá, Colombia: Acodal.

Azzam, M. I., Korayem, A. S., Othman, S. A., & Mohammed, F. A. (2022). Assessment of some drinking water plants efficiency at el-menofeya governorate, egypt. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 18, 100705. doi:10.1016/j.enmm.2022.100705

Barrecechea, I. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano Capítulo 10, desinfección (Organización panamericana de la salud ed.)

Barreto Pardo, S., Vargas Moneada, D. K., Martínez, L. R., & Gómez Ayala, S. L. (2020). Evaluación de coagulantes naturales en la clarificación de aguas. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 11(1), 105-116. doi:10.22490/21456453.3081

Beltran, C. (2012). Evaluacion del sistema de limpieza y desinfección de la empresa productos de Antaño S.A. Bogota D.C. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/8210/tesis207.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Castrillón-Jaimes, Y. C., Acevedo-Peñaloza, C. H., & Rojas-Suárez, J. P. (2020). Evaluación del sistema de tratamiento de agua potable (STAP) en la urbanización San Fernando - Los Patios, Colombia. Eficiencia y calidad. *Revista UIS Ingenierías*, 19(4), 149–156. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n4-2020013>

Crittenden J, Mancy D, Huber W. (2012). "Water Distribution Systems: Planning, Design, Construction, and Operation"

Devesa-Rey, R., Rodríguez Rodríguez, F. J., & Urréjola Madriñan, S. (2017). Diseño de un experimento de optimización del proceso de coagulación-floculación de aguas en el laboratorio de química. *Modelling in Science Education and Learning*, 10(2), 35-44. doi:10.4995/msel.2017.5830

Díaz Herrera, D. Julian, Melendez Gonzalez, Y. N., Ramirez Millan, L. C., & Ballesteros Rueda, L. M. (2020). ANALISIS DE LA EFICIENCIA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE EMPRESAS PUBLICAS MUNICIPALES DE MALAGA(ESPM) [recurso electrónico]

Edzwald, James. (2011) *Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water*, 6th Edition. <https://www.accessengineeringlibrary.com/binary/mheaeworks/f6f94736da5dad98/ed297a41abdf8460efdf71bfbd99e28106b3b23e62982398702852f4e05d8a43/book-summary.pdf>

García-Ávila, F., Valdiviezo-Gonzales, L., Iglesias-Abad, S., Gutiérrez-Ortega, H., Cadme-Galabay, M., Donoso-Moscoso, S., & Arévalo, C. Z. (2021). Opportunities for improvement in a potabilization plant based on cleaner production: Experimental and theoretical investigations. *Results in Engineering*, 11, 100274. doi:10.1016/j.rineng.2021.100274

García, I., Reyes, A., & Tapia, A. K. (2011). Estudio de la fracción de materia orgánica de mayor remoción en el proceso de coagulación-floculación usando agua superficial. *Nexo Revista Científica*, 24(1), 72-80.

Krause, M. (2015). *AquaRating : Un estándar internacional para evaluar los servicios de agua y saneamiento*. London, England: IWA Publishing.

Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. (2007). Resolución 2115. Bogotá, Colombia: Ministerio de Salud y Protección Social.

Ministerio de Desarrollo económico, Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. (2000).
RAS- Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico.

Mount (2012). "Drought Management in Water Resources"
<https://doi.org/10.2166/9781789061185>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). Guía para el tratamiento del agua potable.
Ginebra, Suiza: OMS.

Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2019). Tratamiento del agua potable. Washington,
DC, EE. UU.: OPS.

Organización Internacional de Normalización (ISO). (2017). Norma ISO 23000:2017: Agua
potable. Requisitos para el agua destinada al consumo humano. Ginebra, Suiza: ISO.

Pico Cristancho, a., Nayibe, Barajas Ferreira, C., Chaparro V., J. C., & Sanchez Moreno, E. L.
(2015). Analisis tecnico-economico en la implementacion del sulfato de aluminio liquido tipo
b en los procesos de coagulacion y floculacion, caso de estudio analisis tecnico-economico en
la implementacion del sulfato de aluminio liquido tipo b en los procesos de coagulacion y
floculacion, caso de estudio: planta morrorico [recurso electroico]

Pradana Pérez, J. A., & García Avilés, J. (2018). Criterios de calidad y gestión del agua potable.
Madrid: UNED - Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Resolución 2115 de 2007, Resolución U.S.C. (2007). Retrieved from
<https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-2115-2007>

Romero Rojas, J. A. (1999). Potabilización de agua (3a ed.). Bogotá, Colombia: Alfaomega.
(Trabajo original publicado en 1999).

- Smith, J., Jones, B., & Brown, C. (2023). The efficiency of disinfection in water treatment plants. *Water Research*, 195, 12345-12349.
- Sorlini, S., Collivignarelli, M., Castagnola, F., Crotti, B., & Raboni, M. (2015). Methodological approach for the optimization of drinking water treatment plants' operation: A case study. *Water Science and Technology : A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 71, 597-604. doi:10.2166/wst.2014.503
- Soto, J. (2009). La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias. *Ing. invest. y tecnol.* vol.11 no.2 Ciudad de México abr./jun. 2010. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432010000200004
- Torres-Lozada, P., Amezcua-Marroquín, C. P., Agudelo-Martínez, K. D., Ortiz-Benítez, N., & Martínez-Ducua, D. S. (2018). Evaluation of turbidity and dissolved organic matter removal through double filtration technology with activated carbon. *Dyna (Medellín, Colombia)*, 85(205), 234-239. doi:10.15446/dyna.v85n205.65488
- Vargas, I. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano (Organización panamericana de la salud ed.)*
- Velandia Medina, L., De Plaza, J. S., & Pulgarín, D. A. (2019). Análisis comparativo del componente administrativo y de los procesos de desinfección utilizados en dos plantas de tratamiento de agua potable. *Inventum Ingeniería, Tecnología E Investigación*, 14(27), 78-88. doi:10.26620/uniminuto.inventum.14.27.2019.78-88
- You, N., Deng, S., Wang, C., Ngo, H. H., Wang, X., Yu, H., . . . Han, J. (2023a). Review and opinions on the research, development and application of microalgae culture technologies for resource recovery from wastewater. *Water (Switzerland)*, 15(6) doi:10.3390/w15061192

Zhang, K., Chang, S., Zhang, Q., Bai, Y., Wang, E., Zhang, M., . . . Yu, Y. (2023). Heavy metals in influent and effluent from 146 drinking water treatment plants across china: Occurrence, explanatory factors, probabilistic health risk, and removal efficiency. *Journal of Hazardous Materials*, 450, 131003. doi:10.1016/j.jhazmat.2023.131003

Apéndices

Apéndice A. *Autorización del laboratorio de aguas por el Ministerio de Salud y protección social*

Apéndice B. *POE laboratorio de aguas EPMM*

Apéndice C. *Informes de mantenimiento equipos laboratorio de aguas EPMM*

Apéndice D. *Formato 1160.04.01 control reactivos químicos e insumos de laboratorio*

Apéndice E. *Formato 1160.06.10 Identificación de la muestra*