

Área del Conocimiento de Agricultura

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOS MÉTODOS DE
TRATAMIENTO DE AGUA USADA EN FORMULACIÓN DE
BEBIDA CARBONATADA: COAGULACIÓN-
FLOCULACIÓN Y NANOFILTRACIÓN**

Trabajo Monográfico para optar al título de Ingeniero Químico

Elaborado por:

Tutor:

Br. Julissa
Dayana Membreño
Rodríguez
2019-0842U

Br. Rebeca
Fernanda
Villanueva Espinoza
2019-0769U

Ing. Nelly Ivette
Betanco Figueroa

07 de agosto de 2026
Managua, Nicaragua

DEDICATORIA

Rebeca Fernanda Villanueva

En primer lugar, a Dios, por otorgarme la fuerza y el acompañamiento necesario para seguir luchando por mis metas y sueños, y por brindarme esperanza para continuar a pesar de los desafíos enfrentados.

A mi madre, por estar a mi lado, apoyándome, dándome las fuerzas y el valor para seguir adelante, por su gran apoyo en formarme y llevarme siempre en los pasos correctos.

A mi hermana, quien desde el cielo sé que me acompaña y continúa brindándome su amor y apoyo incondicional, tal como lo hizo siempre en vida.

Julissa Dayana Membreño Rodríguez

La presente tesis está primeramente dedicada a Dios, ya que él ha sido bueno y perfecto para conmigo. Como dice Proverbios 2:6; Jehová es el que da la sabiduría y este trabajo monográfico es un testimonio de su fidelidad y guía.

A mis padres, quienes dan todo de sí con amor y esfuerzo cada día para que yo pueda formarme como persona y profesional. Gracias por su apoyo y consejos incondicionales, este título es tanto mío como de ellos.

Así mismo, gracias a mi familia y a quienes compartieron conmigo el día a día de este proceso.

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó una comparación entre dos sistemas de tratamiento de agua utilizados en la planta de producción de Kola Shaler Industrial S.A: el sistema convencional de coagulación-floculación, actualmente empleado en el proceso productivo, y un sistema de nanofiltración, el cual se encuentra instalado en la planta, pero actualmente en desuso. El objetivo fue evaluar la viabilidad y eficiencia de ambos sistemas para el tratamiento del agua utilizada en la elaboración de la bebida.

Para ello se realizaron análisis fisicoquímicos, microbiológicos y de metales pesados, evaluando los puntos de entrada y salida de cada sistema con el fin de determinar su eficiencia de remoción y desempeño en el tratamiento del agua. Así mismo, se aplicaron análisis estadísticos para identificar diferencias significativas entre los puntos de muestreo, incluyendo análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey, además del cálculo de porcentaje de remoción para cada parámetro evaluado. Obteniéndose rangos de remoción entre 1.06% y 99.76% para el tratamiento de coagulación-floculación, y entre 38.75% y 100% para el sistema de nanofiltración

Los resultados mostraron que el sistema de nanofiltración presentó mejores resultados en la eliminación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, mientras que en ambos sistemas se observó ausencia de metales pesados. En general, la nanofiltración demostró mayor eficiencia en la remoción de contaminantes en comparación con el tratamiento convencional. En el cual se determinó un promedio de porcentaje de remoción por todos los parámetros de 83.2 % para el sistema de nanofiltración y de un 45 % para el sistema convencional de coagulación-floculación.

No obstante, se recomienda realizar estudios adicionales para evaluar el posible impacto del cambio de sistema en las características sensoriales de la bebida, ya que las diferencias en los parámetros fisicoquímicos del agua como alcalinidad y dureza podrían influir en el sabor final del producto.

INDICE

Dedicatoria	i
Resumen	ii
I. Introducción.....	1
II. Objetivos	2
2.1 <i>Objetivo General</i>	2
2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	2
III. Marco Teórico	3
3.1 <i>Generalidades del Agua</i>	3
3.2 <i>Características Físicas</i>	3
3.2.1 <i>Temperatura</i>	3
3.2.2 <i>Turbiedad</i>	4
3.2.3 <i>Conductividad</i>	4
3.3 <i>Características Químicas</i>	4
3.4 <i>Características Microbiológicas</i>	4
3.4.1 <i>Coliformes Totales</i>	4
3.4.2 <i>Coliformes Termotolerantes</i>	5
3.5 <i>Estándares de Calidad del Agua</i>	5
3.5.1 <i>NTON para la clasificación de los recursos hídricos</i>	5
3.5.2 <i>Normas CAPRE</i>	7
3.6 <i>Tipos de Tratamiento de Agua</i>	8
3.6.1 <i>Tratamientos de Aguas Convencionales</i>	8
3.7 <i>NTON de Bebidas Carbonatadas</i>	10
3.8 <i>Tratamiento de Agua en Kola Shaler</i>	12
3.8.1 <i>Descripción del Sistema Convencional: Coagulación-Floculación</i>	12
3.8.2 <i>Descripción del sistema por Nanofiltración</i>	13
IV. Metodología	15
4.1. <i>Tipo de Investigación</i>	15
4.2. <i>Ubicación y Área de Estudio</i>	15
4.3. <i>Identificación de los Puntos de Muestreo</i>	15
4.4. <i>Caracterización de la Fuente de Agua</i>	15
4.5. <i>Evaluación de los Sistemas de Tratamiento</i>	16

4.5.1.	<i>Caracterización Fisicoquímica y de Metales Pesados.....</i>	<i>16</i>
4.5.2.	<i>Caracterización Microbiológica.....</i>	<i>18</i>
4.6.	<i>Comparación con Normativas.....</i>	<i>18</i>
4.7.	<i>Comparación de Ambos Sistemas y Análisis de Resultados</i>	<i>19</i>
4.7.1.	<i>Análisis Estadístico</i>	<i>19</i>
4.7.2.	<i>Hipótesis</i>	<i>19</i>
4.7.3.	<i>Evaluación de Resultados.....</i>	<i>19</i>
V.	Análisis y Presentación de Resultados	21
5.1	<i>Resultados de la Caracterización de la Fuente y de ambos Sistemas</i>	<i>21</i>
5.2	<i>Análisis de Parámetros Fisicoquímicos y Metales Pesados obtenidos</i>	<i>23</i>
5.3	<i>Resultados de la Caracterización Microbiológica.....</i>	<i>27</i>
5.4	<i>Análisis de Parámetros Microbiológicos Obtenidos</i>	<i>28</i>
5.5	<i>Porcentaje de Remoción de cada sistema</i>	<i>31</i>
VI.	Conclusiones	33
VII.	Recomendaciones	34
VIII.	Nomenclatura.....	35
IX.	Bibliografía.....	37
X.	Anexos	40
10.1.	<i>Anexos de Figuras.....</i>	<i>40</i>
10.1.1.	<i>Equipos y sistemas de procesos de tratamiento de agua.....</i>	<i>40</i>
10.1.2.	<i>Instrumentos y equipos utilizados en los análisis</i>	<i>42</i>
10.1.3.	<i>Proceso de recolección de muestras</i>	<i>42</i>
10.2.	<i>Métodos.....</i>	<i>44</i>
10.2.2.	<i>Determinación de cloro residual.....</i>	<i>44</i>
10.2.3.	<i>Determinación de alcalinidad.....</i>	<i>45</i>
10.2.4.	<i>Determinación de la dureza</i>	<i>46</i>
10.2.5.	<i>Determinación de sulfato</i>	<i>46</i>
10.2.6.	<i>Determinación de ST</i>	<i>47</i>
10.2.7.	<i>Determinación de SDT.....</i>	<i>48</i>
10.2.8.	<i>Determinación de manganeso</i>	<i>48</i>
10.2.9.	<i>Determinación de aluminio</i>	<i>50</i>
10.2.10.	<i>Determinación de cadmio</i>	<i>51</i>

10.2.11.	<i>Determinación de turbidez</i>	51
10.2.12.	<i>Determinación de hierro total</i>	52
10.2.13.	<i>Determinación de conductividad eléctrica.....</i>	52
10.2.14.	<i>Determinación de nitratos.....</i>	53
10.2.15.	<i>Determinación de cloruros.....</i>	53
10.2.16.	<i>Determinación de carbonatos.....</i>	54
10.2.17.	<i>Determinación de color real</i>	54
10.2.18.	<i>Determinación de magnesio</i>	55
10.2.19.	<i>Determinación de cobre</i>	56
10.2.20.	<i>Determinación de zinc.....</i>	56
10.2.21.	<i>Determinación de nitritos.....</i>	57
10.2.22.	<i>Determinación de calcio.....</i>	58
10.2.23.	<i>Determinación de plomo</i>	59
10.2.24.	<i>Determinación de mercurio.....</i>	59
10.2.25.	<i>Determinación de arsénico</i>	60

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Aguas Tipo 1	6
Tabla 2 Categoría 1 - B Continuación	6
Tabla 3 Parámetros Organolépticos	7
Tabla 4 Parámetros Fisicoquímicos	7
Tabla 5 Parámetros Microbiológicos	8
Tabla 6 Tipos de coagulantes/floculantes	9
Tabla 7 Requisitos fisicoquímicos de las aguas gaseosas con sabor	10
Tabla 8 Requisitos microbiológicos para áreas de trabajo y productos terminados	11
Tabla 9 Contaminantes Metales Tóxicos	11
Tabla 10 Métodos de análisis de parámetros para cada punto de muestreo	16
Tabla 11 Métodos de caracterización microbiológica para cada punto de muestreo	18
Tabla 12 Caracterización fisicoquímica obtenida para cada punto de muestreo	20
Tabla 13 Caracterización de metales pesados obtenida para cada punto de muestreo	21
Tabla 14. Caracterización microbiológica obtenida para cada punto de muestreo	26
Tabla 15 Comparación de porcentaje de remoción entre cada sistema de tratamiento	30
Tabla 16 Resultados obtenidos de pH en las 4 repeticiones	43
Tabla 17 Resultados obtenidos de temperatura en las 4 repeticiones	43
Tabla 18 Resultados obtenidos de cloro residual en las 4 repeticiones	44
Tabla 19 Resultados obtenidos de alcalinidad en las 4 repeticiones	45
Tabla 20 Resultados obtenidos de dureza total en las 4 repeticiones	45
Tabla 21 Resultados obtenidos de sulfatos en las 4 repeticiones	46
Tabla 22 Resultados obtenidos de sólidos totales en las 4 repeticiones	46
Tabla 23 Resultados obtenidos de SDT en las 4 repeticiones	47
Tabla 24 Resultados obtenidos de manganeso en las 4 repeticiones	48
Tabla 25 Resultados obtenidos de aluminio en las 4 repeticiones	49
Tabla 26 Resultados obtenidos de cadmio en las 4 repeticiones	50
Tabla 27 Resultados obtenidos de turbidez en las 4 repeticiones	51
Tabla 28 Resultados obtenidos de hierro total en las 4 repeticiones	51
Tabla 29 Resultados obtenidos de conductividad eléctrica en las 4 repeticiones	52
Tabla 30 Resultados obtenidos de nitratos en las 4 repeticiones	52

Tabla 31 Resultados obtenidos de cloruros en las 4 repeticiones	53
Tabla 32 Resultados obtenidos de carbonatos en las 4 repeticiones	53
Tabla 33 Resultados obtenidos de color real en las 4 repeticiones	54
Tabla 34 Resultados obtenidos de magnesio en las 4 repeticiones	54
Tabla 35 Resultados obtenidos de cobre en las 4 repeticiones	55
Tabla 36 Resultados obtenidos de zinc en las 4 repeticiones	56
Tabla 37 Resultados obtenidos de nitritos en las 4 repeticiones	57
Tabla 38 Resultados obtenidos de calcio en las 4 repeticiones	57
Tabla 39 Resultados obtenidos de plomo en las 4 repeticiones	58
Tabla 40 Resultados obtenidos de mercurio en las 4 repeticiones	59
Tabla 41 Resultados obtenidos de arsénico en las 4 repeticiones	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de tratamiento convencional coagulación-floculación.	13
Figura 2. Sistema de tratamiento de nanofiltración.....	14
Figura 3. Comparación de la concentración de SDT, ST y cloruros en los diferentes puntos de muestreo.....	23
Figura 4. Comparación de la concentración de Manganeseo en los diferentes puntos de muestreo	24
Figura 5. Comparación de la concentración de dureza total en los diferentes puntos de muestreo.....	25
Figura 6. Comparación de los resultados de alcalinidad entre los 3 puntos de muestreo	25
Figura 7. Comparación de la concentración de Turbidez (UNT) en los diferentes puntos de muestreo	26
Figura 8. Comparativa de la concentración de recuentos totales aerobios entre los puntos de muestreo	28
Figura 9. Comparativa de la concentración de Coliformes totales.	29
Figura 10. Comparativa de la concentración de Mohos y Levaduras	30
Figura 11. Comparación del % de remoción del sistema convencional vs nanofiltración.....	32

I. Introducción

Desde los inicios de la producción de bebidas carbonatadas, la calidad del agua ha sido un factor determinante en el sabor y la seguridad de estas, pues, el agua es la materia prima principal de las bebidas, al ser el ingrediente utilizado en mayor proporción para su elaboración. De acuerdo con Cancino & Guevara (2015), el agua es el componente mayoritario, alrededor del 90% del producto.

Las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua influyen directamente en aspectos como la estabilidad del producto, el sabor y la seguridad sanitaria. Por ello, las industrias de bebidas carbonatadas han puesto mayor énfasis en la aplicación de procesos de tratamiento cada vez más eficientes que garanticen una calidad de agua acorde con los estándares exigidos, tanto a nivel nacional como internacional.

En este sentido, Kola Shaler Industrial S.A., desde su traslado a Managua en 1925 ha utilizado un sistema de tratamiento convencional de coagulación-floculación que, aunque ha mantenido la identidad sensorial de la bebida, requería una evaluación frente a las demandas actuales de producción y eficiencia.

En 2024, la empresa instaló un sistema de nanofiltración, sin embargo, actualmente no está siendo operado debido a que se requería de una validación técnica que asegurara que esta nueva tecnología no alterara la fórmula tradicional ni el perfil fisicoquímico requerido por las normativas.

Ante esta necesidad, el presente trabajo de investigación realizó una comparación entre ambos sistemas de tratamientos (coagulación-floculación vs nanofiltración). Este estudio se enfocó además de determinar qué sistema se adapta mejor a las normas CAPRE y NTON de agua potable y NTON de bebidas carbonatadas, como también cuál de los dos es más eficiente a la hora de remover los contaminantes.

Para cumplir con este objetivo, se caracterizó de manera fisicoquímica, microbiológica y carga de metales pesados al agua de pozo a la salida del clorinador, y por último al agua ya tratada por ambos tratamientos. La evaluación permitió comparar la carga orgánica y la eficiencia de remoción de cada sistema.

Finalmente, los resultados obtenidos fueron interpretados por medio de análisis estadísticos y gráficos utilizando Microsoft Excel LTSC Professional Plus 2021 y así se estableció cuál de estas tecnologías es más adecuada para el proceso productivo de Kola Shaler.

Esta evaluación resulta relevante debido a que, ambos sistemas de tratamiento se encuentran presentes en la planta, lo que permite comparar su desempeño y determinar cuál de ellos resulta más eficiente en la mejora de la calidad del agua utilizada en el proceso productivo.

II. Objetivos

2.1 Objetivo General

Desarrollar un análisis comparativo de dos métodos de tratamiento de agua de pozo con coagulación-floculación vs. nanofiltración para ser utilizados en la formulación de una bebida carbonatada en la planta industrial Kola Shaler Industrial S.A.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el perfil de calidad del agua cruda proveniente de la fuente de abastecimiento de agua de Kola Shaler.
- Determinar los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de metales pesados mediante el análisis del agua tratada por coagulación-floculación vs nanofiltración.
- Comparar los resultados obtenidos con los parámetros establecidos por las normas CAPRE y NTON 03 030 00, para verificar el cumplimiento de los estándares de calidad de cada tratamiento.
- Identificar cuál es el sistema de tratamiento más adecuado para la formulación de la bebida, considerando su eficiencia operativa.

III. Marco Teórico

3.1 Generalidades del Agua

El agua es el recurso más importante y fundamental para la vida humana, y además es el disolvente universal principal. De acuerdo con Ribeter.org (s. f.), esta constituye entre el 90-95% de la materia prima en la elaboración de una bebida carbonatada, por ende, el proceso utilizado para tratar dicho recurso es muy importante para obtener el producto final deseado, ya que de este dependerá tanto de las características fisicoquímicas del agua obtenida como de las microbiológicas.

El recurso hídrico en función de su ubicación o de su procedencia se puede clasificar en aguas superficiales y aguas subterráneas. Según National Geographic Society (2025), El agua superficial es cualquier masa de agua presente en la superficie terrestre, incluyendo tanto el agua salada del océano como el agua dulce de ríos, arroyos y lagos. Una masa de agua superficial puede persistir durante todo el año o solo durante una parte de este.

Las aguas subterráneas, por otro lado, como explica Fundación Aquae (2024), son un recurso natural de agua dulce que se sitúan a nivel superficial en la corteza terrestre. Suelen encontrarse en formaciones geológicas impermeables llamadas acuíferos. El agua subterránea tiene un papel fundamental en la actividad humana y en el mantenimiento de los ecosistemas.

3.2 Características Físicas

Las características físicas del agua son aquellas que pueden ser medidas sin necesidad de una reacción química, son importantes para determinar la calidad y asegurar que sea adecuada para el consumo humano.

Entre las propiedades físicas del agua están las características organolépticas: las propiedades organolépticas del agua, como el color, el olor y el sabor, pueden ser percibidas por los sentidos humanos. En general, todas estas propiedades deben ser ausentes, es decir, incolora, sin olor y sin sabor. Aquae Fundación (2020) indica que el agua “es un líquido inodoro: no tiene olor salvo cuando contiene sustancias disueltas”. Es insípido, lo que significa que no posee un sabor determinado. Y es incoloro, es decir, no tiene color y, en su estado puro, es completamente transparente.”

3.2.1 Temperatura

La temperatura es considerada como un parámetro fisicoquímico ya que influye tanto en sus propiedades físicas, como en reacciones químicas, es uno de los parámetros de mayor importancia en la calidad del agua, ya que este puede influir

sobre otros parámetros, como el pH, viscosidad, solubilidad, conductividad, etc.

De acuerdo con Rodríguez (2009), La temperatura es una constante física crucial para los fenómenos en el agua, como la solubilidad de gases (especialmente oxígeno) y sales, así como para las reacciones biológicas que tienen una temperatura óptima. Según el Reglamento de Calidad de Agua Potable N° 32327, la temperatura debe controlarse con un valor recomendado de 18°C y un máximo admisible de 30°C.

3.2.2 Turbiedad

Otro parámetro fundamental en la calidad del agua, ya que este nos ayuda a identificar sólidos disueltos y presencia de otros contaminantes disueltos. "La turbiedad es el grado de opacidad en el agua debido a la presencia de material particulado en suspensión. La concentración de sustancias determina la transparencia del agua debido a que limita el paso de luz" (Gualdrón, 2016).

3.2.3 Conductividad

La conductividad del agua es un parámetro que indica la capacidad de esta misma para conducir electricidad. Esto nos puede indicar que se refiere a un parámetro físico, no obstante, Gualdrón (2016) indica que, la conductividad eléctrica del agua es una medida de la concentración de sales disueltas, como cloruros y carbonatos. Este parámetro nos permite estimar la cantidad total de sólidos disueltos en una muestra de agua. Por tanto, la conductividad puede ser determinada como un parámetro físico y químico a la vez.

3.3 Características Químicas

Dentro de las características químicas del agua se encuentran una gran variedad, desde propiedades como dureza, alcalinidad, pH, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) hasta propiedades como arsénico, hierro, manganeso, entre otros.

3.4 Características Microbiológicas

Una de las maneras de asegurar la calidad del agua destinada al consumo humano es que esta se encuentre libre de cualquier tipo de microorganismo patógeno, esto es fundamental ya que así se evita la propagación de enfermedades.

3.4.1 Coliformes Totales

Las bacterias coliformes a menudo se denominan "organismos indicadores" porque indican la presencia potencial de bacterias que causan enfermedades en el agua. La presencia de coliformes en el agua no garantiza que beber el agua cause una enfermedad. Más bien, su presencia indica que existe una vía de contaminación

entre una fuente de bacterias (agua superficial, sistema séptico, desechos animales, etc.) y el suministro de agua. Las bacterias que causan enfermedades pueden utilizar esta vía para ingresar al suministro de agua (Swistock, 2023).

Según la Organización Panamericana de la Salud (1987, citado en Camacho et al., 2015): las bacterias coliformes no deberían ser detectadas en sistemas de tratamiento de abastecimiento de agua y, si así ocurriese, ello es indicio de que el tratamiento fue inadecuado o que hubo una recontaminación posterior a este. En este sentido la prueba de coliformes se usa como indicador de la eficiencia del tratamiento. Si bien las bacterias coliformes pueden no tener una relación directa con la presencia de virus en el agua potable, el uso de la prueba de coliformes sigue siendo esencial para vigilar la calidad microbiana del agua en los sistemas de abastecimiento público.

3.4.2 Coliformes Termotolerantes

“Son un grupo de bacterias coliformes totales, que están relacionados con la contaminación fecal, esta no se multiplica en el ambiente acuático, crecen a una temperatura de incubación de 42 – 44.5 °C, esta temperatura inhibe a los no tolerantes” (Camacho et al., 2015).

Dentro de los coliformes Termotolerantes se encuentra la *Escherichia coli*, conocida comúnmente como *E. coli*, es una bacteria que por lo general se encuentra en el intestino de las personas y animales. Sin embargo, esta no debe de estar presente en el agua potable.

3.5 Estándares de Calidad del Agua

3.5.1 NTON para la clasificación de los recursos hídricos

La norma técnica obligatoria nicaragüense para la clasificación de los recursos hídricos (NTON 05 007 – 98), establece los parámetros para determinar la calidad de los cuerpos de agua dependiendo de su origen y su uso.

Las aguas tipo 1 destinadas al uso doméstico o industrial para consumo humano se divide en dos categorías. La categoría 1-A y la categoría 1-B.

La categoría 1-B la conforman las aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales, tales como coagulación, floculación, sedimentación, filtración y/o cloración.

A continuación, en la tabla 1 se muestran los parámetros a tomar en cuenta con su límite y rango máximo permitido; y en la tabla 2 se muestran los parámetros de la categoría 1 – B:

Tabla 1*Aguas Tipo 1*

Parámetro	Límite o rango máximo	
	Categoría 1 - A	Categoría 1 - B
Oxígeno disuelto (OD)	> 4.0 mg/l	> 4.0 mg/l
DBO ₅	2.0 mg/l	5.0 mg/l
pH	mín. 6.0 y máx.8.5	mín. 6.0 y máx. 8.5
Color real	< 15 U Pt-Co	< 150 U Pt-Co
Turbiedad	< 5 UNT	< 250 UNT
Fluoruros	mín. 0.7 y máx. 1.5	< 1.7 mg/l
Hierro total	0.3 mg/l	3 mg/l
Mercurio total	0.001 mg/l	0.01 mg/l
Plomo total	0.01 mg/l	0.05 mg/l
Sólidos totales disueltos	1000 mg/l	1500 mg/l
Sulfatos	250 mg/l	400 mg/l
Zinc	3 mg/l	5 mg/l
Cloruros	250 mg/l	600 mg/l
Organismos Colif. Totales	0	0

Nota. Asamblea Nacional de Nicaragua (2000)

Tabla 2*Categoría 1 - B Continuación*

Parámetro	Limite o rango máximo
Cianuro total	0.1 mg/l
Cobre total	2.0 mg/l
Cromo total	0.05mg/l
Detergentes	1.0 mg/l
Dispersantes	1.0 mg/l
Dureza como CaCO ₃	400 mg/l
Extracto de carbono al cloroformo	0.15mg/l
Fenoles	0.002 mg/l
Manganeso total	0.5 mg
Kitritos + Nitratos (N)	10.0 mg/l
Plata total	0.05 mg/l
Selenio	0.01 mg/l
Sodio	200 mg/l
Organofosforados y Carbamatos	0.1 mg/l
Organoclorados	0.2 mg/l
Actividad α	máx. 0.1 becquerelio por litro (Bq/l)
Actividad β	máx. 1.0 becquerelio por litro (Bq/l)

Nota. Asamblea Nacional de Nicaragua (2000)

3.5.2 Normas CAPRE

Las normas CAPRE (Normas de Calidad del Agua de Consumo Humano): “Establecen los requisitos básicos a los cuales debe de responder la calidad del agua suministrada a los servicios para consumo humano y para todo uso doméstico, independientemente de su estado, origen o después de su tratamiento”. CAPRE (1994). Los parámetros organolépticos se muestran en la Tabla 3 a continuación:

Tabla 3

Parámetros Organolépticos

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR RECOMENDADO	VALOR MAXIMO ADMISIBLE
Color	mg/L (Pt-Co)	1	15
Turbiedad	UNT	1	5
Olor	Factor dilución	0	2 a 12 °C
Sabor	Factor dilución	0	3 a 25 °C

Nota. CAPRE (1994)

Los parámetros físicos y químicos que las normas CAPRE establecen, se muestran a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4

Parámetros Fisicoquímicos

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR RECOMENDADO	VALOR MAXIMO ADMISIBLE
Temperatura	° C	18 a 30	-
[] Iones de hidrogeno	Valor de pH	6.5 a 8.5	-
Cloro residual	mg/L	0.5 a 1.0	-
Cloruros	mg/L	25	250
Conductividad	µS/cm	400	-
Dureza	mg/L CaCO ₃	400	-
Sulfatos	mg/L	25	250
Aluminio	mg/L	-	0.2
Calcio	mg/L CaCO ₃	100	-
Cobre	mg/L	1	2
Magnesio	mg/L CaCO ₃	30	50
Sodio	mg/L	25	200
Potasio	mg/L	-	10
SDT	mg/L	-	1000
Zinc	mg/L	-	3

Nota. CAPRE (1994)

A continuación, los valores microbiológicos establecidos por CAPRE se muestran en la tabla 5.

Tabla 5*Parámetros Microbiológicos*

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR RECOMENDADO	VALOR MAXIMO ADMISIBLE
Coliformes Fecales	NMP/100m L	Negativos	Negativos
Coliformes Totales	NMP/100m L	Negativos	Negativos

Nota. CAPRE (1994)

3.6 Tipos de Tratamiento de Agua

Existen 3 tipos de tratamientos para el agua: los tratamientos físicos, que consisten en la separación de las partículas sólidas del agua, eliminando las partículas que se encuentren en suspensión, separando las de menor peso de las de mayor peso. Los tratamientos químicos; que utilizan productos o reactivos químicos para eliminar las impurezas del agua como coagulantes, floculantes, desinfectantes, ajustadores de pH, entre otros. Y por último están los tratamientos biológicos que se utilizan principalmente para el tratamiento de aguas residuales.

3.6.1 Tratamientos de Aguas Convencionales

Coagulación-Floculación: Según Medrano (2017), las operaciones de coagulación-floculación desestabilizan los coloides y consiguen su sedimentación. El coagulante anula las fuerzas de repulsión entre las partículas coloidales, iniciando la formación de micro flóculos, mientras el floculante engloba estos micro flóculos aumentando su tamaño y densidad de modo que sedimentan más fácil y rápidamente.

Lorenzo-Acosta (2006) señala que, mediante el proceso de coagulación se neutraliza la carga eléctrica del coloide anulando las fuerzas electrostáticas repulsivas, esta neutralización suele realizarse aplicando al agua determinadas sales de aluminio o hierro (coagulantes); de forma que los cationes trivalentes de aluminio o hierro neutralizan las cargas eléctricas negativas que suelen rodear a las partículas coloidales dispersas en el agua.

La función de la floculación es optimizar la tasa de contacto entre las partículas desestabilizadas, por lo tanto, aumenta la tasa de colisión y provoca la unión y agregación de las partículas en flóculos más grandes y densos que sean más susceptibles a la separación por sedimentación, o filtración (Medrano, 2017).

En la tabla 6 se muestra una recopilación de diferentes tipos de coagulantes/floculantes más utilizados.

Tabla 6

Tipos de coagulantes/floculantes.

Tipos de coagulantes/floculantes
Sulfato de aluminio
Policloruro de aluminio
Clorhidrato de aluminio
Aluminato de sodio
Cloruro de aluminio
Cloruro férrico
Sulfato férrico
Sulfato ferroso
Sílice activada
Arcillas
Polielectrolitos

Nota. Elaboración Propia

Decantación: La decantación es el proceso por el cual las partículas suspendidas presentes en el agua son sedimentadas por medio de la acción de la gravedad.

En el caso de la decantación en aguas para tratamiento la unidad de decantación será la que permitirá la eliminación por sedimentación de los sólidos en suspensión presentes. Estas unidades pueden clasificarse de acuerdo con la dirección predominante del flujo de líquido desde la entrada a la salida, en decantadores de flujo horizontal y decantadores de flujo vertical (Romero, 2008).

Filtración: Es un proceso en el cual ocurre una separación sólido-líquido, permitiendo la eliminación de sólidos en suspensión, contaminantes y cualquier impureza que el agua presente.

Dentro de los tipos de filtración se encuentra una gran variedad, como la filtración mecánica, que consiste en la utilización de medios filtrantes como arena y grava, la filtración por carbón activado para la eliminación de contaminantes químicos, la filtración por gravedad, entre otros.

Además de los ya mencionados, también están los tipos de filtración por membranización. Estos incluyen microfiltración (MC), ultrafiltración (UF), ósmosis inversa (OI) y nanofiltración (NF).

Según Ramírez (2006): La NF, también llamada OI a baja presión o endurecimiento por membranas, relaciona la OI y la ultrafiltración en términos de selectividad de la membrana, la cual está diseñada para eliminar iones polivalentes (Calcio y magnesio) en operaciones de ablandamiento. Más recientemente, la NF ha sido empleada para eliminar o separar materia orgánica. En esta técnica los iones monovalentes son rechazados débilmente por la membrana, pues la NF

permite contrapresión osmótica mucho más baja que la de OI, la presión de trabajo es de 0.5 a 1.5 MPa.

Desinfección: Consiste en la destrucción o inactivación de microorganismos infecciosos que puedan causar enfermedades al ser consumidos por el ser humano.

Martínez y Solís (2014), aseguran que “La desinfección es el tratamiento más importante y de mayor trascendencia en la potabilización del agua a nivel mundial”.

La desinfección del agua puede llevarse a efecto por diferentes procesos: con agentes químicos y con medios físicos. Cada uno de ellos tiene sus ventajas y sus desventajas y se emplea uno u otro método según sean las circunstancias.

3.7 NTON de Bebidas Carbonatadas

La NTON 03 - 030 - 00 Norma Técnica de Bebidas Carbonatadas, cumple un papel fundamental para el desarrollo de esta investigación, pues esta incluye los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que toda bebida carbonatada no alcohólica debe cumplir para el consumo humano. Estos parámetros se ven principalmente afectados por la calidad del agua utilizada en la formulación.

Los parámetros fisicoquímicos establecidos por la norma para bebidas carbonatadas se muestran a continuación:

Tabla 7

Requisitos fisicoquímicos de las aguas gaseosas con sabor

CARACTERÍSTICAS	REQUISITOS	
	MÍNIMO	MÁXIMO
° Brix (porcentaje en masa de solidos solubles como sacarosa)	8.0	1.0
Alcohol en porcentaje volumen a 15.56 °C	0%	0.5%
Dióxido de carbono (anhidrido carbónico) en volumen de gas absorbido por cada volumen de agua.	1.0	5.0
Acidez expresada en gramos de ácido cítrico anhidrido por cada 100 cm ³ de muestra.	0.003	0.5
pH	2.4	4.

Nota. MIFIC (2000)

Esta norma establece también requisitos microbiológicos para áreas y productos terminados, estos se muestran a continuación:

Tabla 8

Requisitos microbiológicos para áreas de trabajo y productos terminados.

PUNTOS DE MUESTREO	MICROORGANISMOS	RECuento MAXIMO PERMITIDO
Agua de lavado de los contenedores y equipos	Recuento Total de Bacterias (UFC/ml)	50
Agua de proceso	Recuento Total de Bacterias (UFC/ml)	50
Jarabe Simple	Levaduras (UFC/ml)	3
Jarabe Terminado	Levaduras (UFC/ml)	3
Bebida terminada	Recuento Total de Bacterias (UFC/ml)	50
Bebida terminada	Mohos (UFC/ml)	5
Bebida terminada	Coliformes (UFC/ml)	3

También indica que no deberán estar presentes en el producto terminado, en cantidades mayores a las expresadas en la Tabla 9 sobre contaminantes tóxicos.

Tabla 9

Contaminantes Metales Tóxicos

METALES TOXICOS	MAXIMO EN mg/kg
Arsénico, como As	0.2
Plomo, como Pb	0.03
Cobre, como Cu	1.5
Hierro, como Fe	0.5
Zinc, como Zn	5.0
Mercurio, como Hg	0.05

Nota. MIFIC (2000)

3.8 Tratamiento de Agua en Kola Shaler

La empresa Kola Shaler Industrial S.A. posee dos tipos de tratamiento de agua: el sistema convencional (coagulación-floculación), que está conformado por cloración, coagulación-floculación, sedimentación, filtración utilizando arena, filtración utilizando carbón activado, filtro pulidor y, por último, rayos UV. Este sistema es el que se utiliza actualmente para la realización de la bebida, y es el que se ha utilizado desde el traslado de la planta hacia Managua, por ende, tiende a ser un sistema que puede necesitar mejoras, y/o cambios.

El otro sistema es un proceso por membranización (nanofiltración); este solamente es utilizado cuando se realiza maquila de otros productos ajenos a la empresa, por tanto, es un sistema nuevo instalado.

3.8.1 Descripción del Sistema Convencional: Coagulación-Floculación

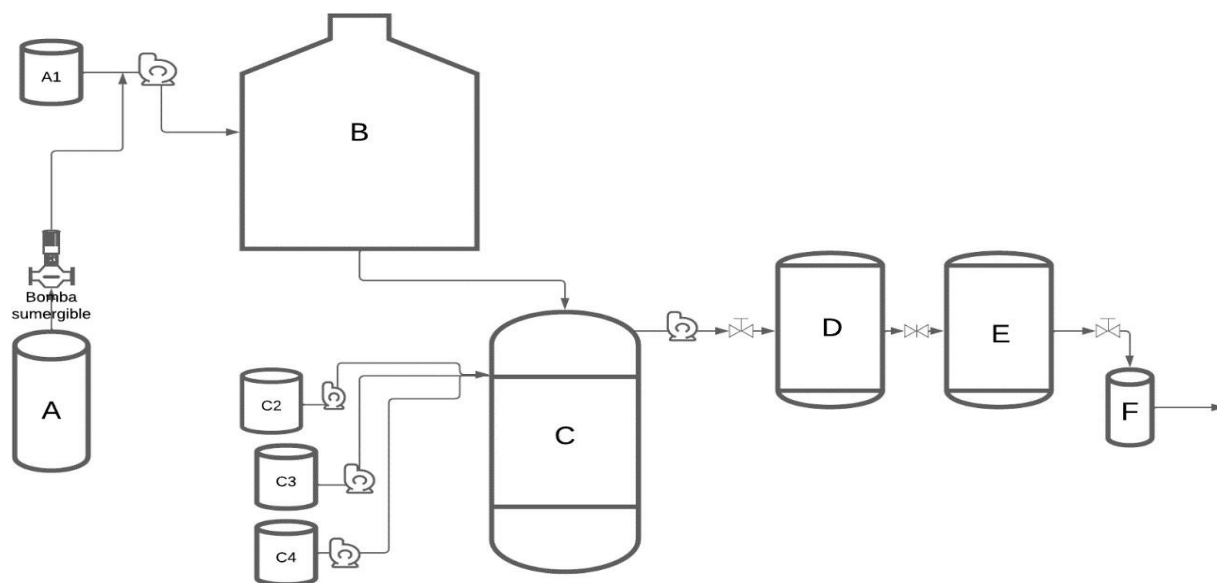
La planta de tratamiento de agua potable (PTAP) se abastece de un pozo, esta agua primeramente pasa por el proceso de potabilización en donde el primer proceso es el de desinfección por cloración utilizando hipoclorito de sodio, este es adicionado de manera automática a través de un dosificador de cloro ubicado en la entrada del pozo a una concentración de 0.5 a 1 ppm, posteriormente, es almacenado en un tanque cisterna con capacidad de 10,000 galones para su posterior proceso de tratamiento de agua, en donde primeramente pasa por el tanque reactor, donde se agrega carbonato de calcio, sulfato de aluminio y cloruro de calcio para neutralizar las cargas de las partículas suspendidas formando micro flóculos, que pasan a ser sedimentados por gravedad.

Una vez que el agua ya se encuentra clarificada, es trasladada a un filtro de arena en donde se utilizan capas de diferentes granulometrías para poder eliminar la turbidez y remover cualquier tipo de partícula indeseada, luego, pasa por un proceso de adsorción utilizando un filtro de carbón que permite que los compuestos orgánicos y químicos como el cloro, queden adheridos en la superficie de los poros del carbón.

Por último, el agua pasa por un filtro pulidor (20 micras) con el objetivo de eliminar cualquier resto de partícula fina no deseada que no haya sido removida en las anteriores etapas de filtración y asegurar la calidad del agua para la formulación de la bebida.

Figura 1.

Sistema de tratamiento convencional coagulación-floculación.



Nota. Elaboración propia con información de planta Kola Shaler.

En la Figura 1. Se observa el sistema de tratamiento convencional que se utiliza actualmente en la empresa Kola Shaler y cuenta con:

A: Entrada al sistema (Pozo)

A1: Tanque de almacenamiento para dosificación de Cloro

B: Cisterna de almacenamiento

C: Tanque reactor

C1: Tanque dosificador de sulfato de aluminio

C2: Tanque dosificador de carbonato de calcio

C3: Tanque dosificador cloruro de calcio

D: Filtro de arena

E: Filtro de carbón activado

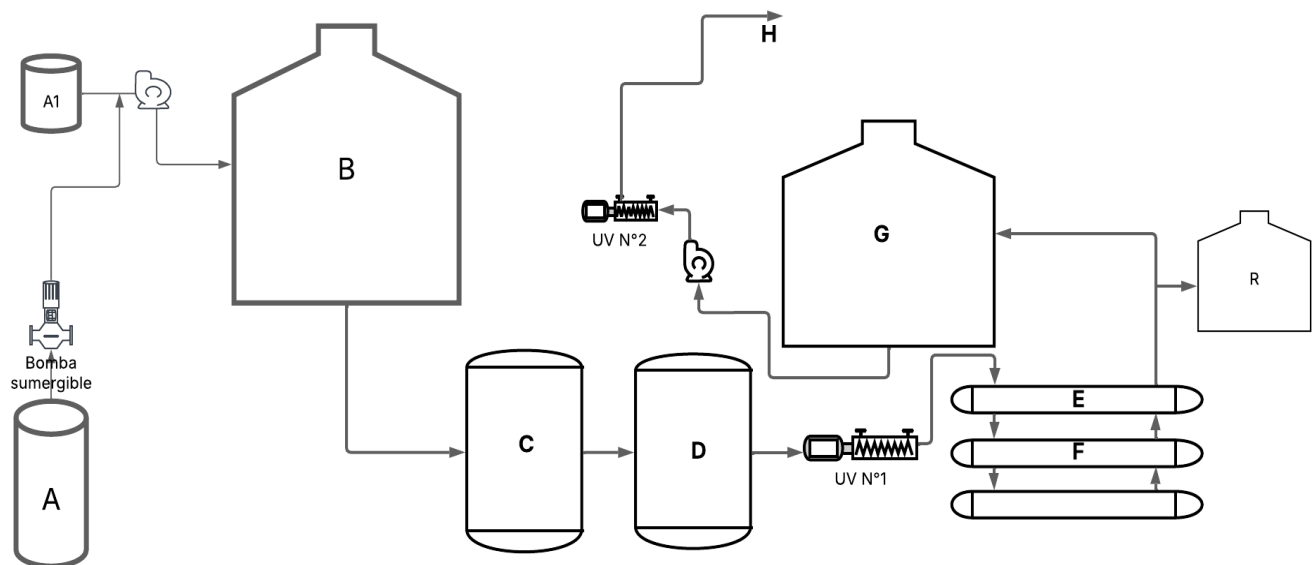
F: Filtro pulidor

3.8.2 Descripción del sistema por Nanofiltración

Al igual que el método convencional, para el proceso de nanofiltración viene desde el abastecimiento del agua de pozo donde el agua se dosifica con cloro a una concentración de 0,5 a 1 ppm, y es almacenada en el tanque cisterna. Posteriormente pasa por un filtro de arena, para eliminar sólidos suspendidos, turbidez y microorganismos grandes. Posteriormente pasa por un filtro de carbón, con el objetivo de eliminar contaminantes químicos y orgánicos disueltos en el agua, y cloro libre. A continuación, un filtro pulidor y una lámpara UV para la eliminación

de microorganismo que pudieran causar la formación de biofilm en las membranas. Luego pasa por dos membranas de 8", este proceso se encarga de remover la dureza del agua y bajar alcalinidad a través de una separación entre agua permeada y agua de rechazo; el agua permeada se refiere a aquella libre de dureza, sales, minerales y baja alcalinidad, y el agua de rechazo es la que es separada del agua permeada, por tanto, es alta en sales, minerales y alcalinidad, esto a través de un proceso de diferencia de concentración y alta presión, sometido en las membranas. Luego, el agua permeada es almacenada en un tanque de 5000 litros, y finalmente pasa por una lámpara UV, antes de ser utilizada en el proceso de producción.

Figura 2.
Sistema de nanofiltración.



Nota. Elaboración propia con información de planta Kola Shaler.

En la Figura 2. se observa el sistema de tratamiento de agua a través de nanofiltración, instalado recientemente en Kola Shaler, el cual es utilizado para la producción de otras bebidas, y cuenta con:

- A: Entrada al sistema (Pozo)
- A1: Tanque de almacenamiento para dosificación de Cloro
- B: Cisterna de almacenamiento
- C: Filtro de Arena
- D: Filtro de carbón
- E y F: membranas de nanofiltración
- G: Tanque de almacenamiento agua permeada
- H: Salida del sistema
- R: Tanque de salida Agua de rechazo
- UV N°1: Lámpara UV a la entrada de las membranas
- UV N°2: Lámpara UV a la salida del sistema.

IV. Metodología

4.1. Tipo de Investigación

Con base en los objetivos establecidos, esta investigación se situó en el diseño y evaluación tecnológica, ya que se buscó analizar dos tipos de tratamientos de agua logrando un proceso en la elaboración de la bebida carbonatada óptimo y eficiente, cumpliendo con estándares de calidad, tanto dentro de la empresa, como estándares nacionales.

4.2. Ubicación y Área de Estudio

La evaluación se llevó a cabo en la empresa Kola Shaler Industrial S.A., ubicada en Sabana Grande; algunos de los análisis fisicoquímicos se realizaron en el laboratorio de calidad de la empresa. Mientras que otra parte de los fisicoquímicos y los microbiológicos fueron enviados y realizados en laboratorio externo.

4.3. Identificación de los Puntos de Muestreo

Los puntos de muestreo fueron 3 en total:

Punto de muestreo 1 (PM1): Salida del pozo, luego del clorinador.

Punto de muestreo 2 (PM2): Salida del sistema de tratamiento convencional.

Punto de muestreo 3 (PM3): Salida del sistema de tratamiento por nanofiltración.

Cabe destacar que se realizaron los análisis en cada punto de muestreo para los parámetros de pH, alcalinidad, temperatura, dureza, cloro residual; y parámetros microbiológicos para recuentos totales aerobios, coliformes totales, *E. Coli*, mohos y levaduras, con los equipos suministrados por el laboratorio de calidad de Kola Shaler Industrial S.A. El resto de los análisis se realizaron en el laboratorio de ambiente en la Universidad Nacional de Ingeniería y otros en PIENSA (UNI).

4.4. Caracterización de la Fuente de Agua

Se realizó un análisis exhaustivo del agua cruda del pozo Kola Shaler, esta, es la fuente de agua de la cual se abastecen ambos sistemas, por ello, esta caracterización fue fundamental, ya que sus resultados sirvieron como la línea base para evaluar y comparar la eficiencia de los dos sistemas de tratamiento.

Muestreo y Análisis del Agua Cruda: Se tomaron muestras de la salida del pozo (PM1) para un análisis completo de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de metales pesados. Los parámetros específicos y los métodos analíticos que se implementaron se detallan en la Tabla 10. Métodos de análisis de parámetros para cada punto de muestreo” y en la Tabla 11 “Métodos de caracterización microbiológica para cada punto de muestreo”.

4.5. Evaluación de los Sistemas de Tratamiento

Una vez que se caracterizó el agua cruda, se evaluaron las muestras del agua tratada por el sistema de coagulación-floculación (PM2) y por el sistema de nanofiltración (PM3). A estas muestras se les realizaron los mismos análisis detallados en las Tablas 11 y 12 para medir la efectividad de cada proceso en la remoción de contaminantes.

4.5.1. Caracterización Fisicoquímica y de Metales Pesados

Las tres muestras de agua analizadas (Muestra de agua cruda, muestra de agua tratada con coagulación-floculación y muestra de agua nanofiltrada), se determinaron los parámetros fisicoquímicos como pH, temperatura, determinación de cloro residual, determinación de alcalinidad y dureza para cada punto de muestreo.

Las caracterizaciones fisicoquímicas y de metales pesados se realizaron con los métodos detallados en la Tabla 10. La cual además nos indica en qué punto de muestra se analizó cada parámetro. La metodología empleada para cada parámetro a medir está detallada en *Anexos. Punto 10.2 Métodos*. Cabe destacar que la metodología se rige bajo la norma de Standard Methods (SM).

Tabla 10

Métodos de análisis de parámetros para cada punto de muestreo

Parámetro	Unidad de medida	Norma	Método de análisis	Puntos de muestreo
pH	N/A	SM 4500 - HB	Electrométrico	M1, M2, M3,
Color real	Factor dilución	SM 2120 C	Comparación visual / Espectrofotométrico	M1, M2, M3
Sabor y Olor	N/A	SM 2150 B SM 2160 B	Inspección organoléptica	M1, M2, M3
Dureza	mg/L CaCO ₃	SM 2340 C	Tritimétrico / Método estándar usando EDTA	M1, M2, M3
Alcalinidad	mg/L CaCO	SM 2320 B	Titulación potenciométrica ácido-base	M1, M2, M3
Cloro residual	ppm	SM 4500-Cl G	DPD Colorimétrico	M2, M3
Temperatura	°C o K	SM 2550 B	Termómetro digital	M1, M2, M3
Turbidez	UNT	SM 2130 B	Nefelométrico	M1, M2, M3

Conductividad eléctrica	μS/cm	SM 2510 B	Conductimetría	M1, M2, M3
Sólidos totales	mg/L	SM 2540 B	Gravimétrico	M1, M2, M3
Sólidos disueltos totales	mg/L	SM 2540 C	Gravimétrico	M1, M2, M3
Cloruros	mg/L	SM 4500-Cl B (Argentométrico)	Método de Mohr	M1, M2, M3
Hierro total	mg/L	SM 3500-Fe D	o-Fenantrolina	M1, M2, M3
Nitratos	mg/L	SM 4500-NO ₃ D	Reducción de Cadmio	M1, M2, M3
Sulfatos	mg/L	SM 4500-SO ₄ ²⁻ E	Nefelométrico Turbidimétrico	M1, M2, M3
Nitritos	mg/L	SM 4500-NO ₂	(Colorimétrico) Reducción de nitratos	M1, M2, M3
Manganeso	mg/L	SM 4500-Mn C	Método colorimétrico	M1, M2, M3
Carbonatos	Meq/L CO ₃ ⁻²	SM 2320 B	Titulación ácido-base	M1, M2, M3
Calcio	mg/L Ca ²⁺	SM 2340 C	Titulación complexométrica EDTA	M1, M2, M3
Magnesio	mg/L CaCO ₃	SM 2340 D	Titulación complexométrica EDTA	M1, M2, M3
Cobre	g/L	SM 3500-Cu B	Yodometría	M1, M2, M3
Zinc	mg/L	SM 3500-Zn B	Volumetría (titulación complexométrica con EDTA)	M1, M2, M3
Aluminio	mg/L	SM 3500-Al D	Cianuro de eriocromo R	M1, M2, M3
Plomo	mg/L	SM 3500-Pb D	Ditizona (Espectrofotométrico)	M1, M2, M3
Mercurio	mg/L	SM 3500-Hg C	Ditizona (Colorimetría)	M1, M2, M3
Arsénico	mg/L	SM 3500-As B	Absorción atómica	M1, M2, M3
Cadmio	mg/L	SM 3113 B	Ditizona para cadmio	M1, M2, M3

4.5.2. Caracterización Microbiológica

Toma y siembra de muestras:

La toma de muestras se realizó en frascos de 500 mL esterilizados y se analizaron en el laboratorio de calidad de Kola Shaler Industrial S.A.

Tabla 11

Métodos de caracterización microbiológica para cada punto de muestreo

Parámetro	Unidad de medida	Norma	Método de análisis	Puntos de muestreo
Recuentos totales aerobios	UFC / ml	SM 9215 B	Siembra en placas Petri / Film de 30-38°C	M1, M2, M3
E. Coli	UFC / ml	SM 9223 B	Siembra en placas Petri / Film de 30-38°C	M1, M2, M3
Coliformes totales	UFC / ml	SM 9223 B	Siembra en placas Petri / Film de 30-38°C	M1, M2, M3
Mohos	UFC / ml	SM 9260 B	Siembra en placas Petri / Film de 30-38°C	M1, M2, M3
Levaduras	UFC / ml	SM 9260 B	Siembra en placas Petri / Film de 30-38°C	M1, M2, M3

Nota. Elaboración propia

4.6. Comparación con Normativas

Los resultados obtenidos del análisis del agua tratada (PM2 y PM3) se compararon directamente con los límites establecidos en las normativas nacionales e internacionales vigentes para el agua potable.

Con la normativa de la CAPRE, con el objetivo de demostrar que ambos sistemas producen agua con parámetros conformes para el consumo humano, y con la Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense (NTON 03 030 00) de Bebidas Carbonatadas, puesto que el agua procesada es para utilizarse en la bebida gaseosa Kola Shaler.

4.7. Comparación de Ambos Sistemas y Análisis de Resultados

4.7.1. Análisis Estadístico

Los datos obtenidos fueron procesados en Microsoft Excel LTSC Professional Plus 2021. Se realizaron cuatro repeticiones independientes de los análisis con el objetivo de reducir el efecto del error experimental, mejorar la precisión de los resultados y obtener una estimación más confiable de la variabilidad de los datos. Estos muestreos se realizaron en un lapso de 18 horas, que es el tiempo de producción establecido en Kola Shaler, por ende, es el tiempo que trabaja la planta de tratamiento de agua.

Posteriormente, se aplicó un análisis de varianza ANOVA de un factor, para determinar si existían diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, además, de una prueba de comparaciones múltiples de Tukey calculada manualmente mediante la tabla del rango (q) para identificar que punto de muestreo era diferente entre sí.

4.7.2. Hipótesis

Con base en los objetivos establecidos se plantean las siguientes hipótesis, ya que, la presente investigación compara dos métodos de tratamiento de agua mediante un análisis estadístico:

Hipótesis nula (H_0)

No existe diferencias significativas entre el tratamiento de agua mediante coagulación-floculación y el tratamiento mediante nanofiltración respecto a los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de metales pesados utilizados en la formulación de una bebida carbonatada.

Hipótesis alternativa (H_1)

Existen diferencias significativas entre el tratamiento de agua mediante coagulación-floculación y el tratamiento mediante nanofiltración respecto a los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de metales pesados utilizados para la formulación de una bebida carbonatada.

4.7.3. Evaluación de Resultados

Finalmente, se evaluó y seleccionó el tipo de agua más adecuado para la formulación de la bebida carbonatada Kola Shaler. En esta etapa se determinó, mediante análisis comparativos, qué tratamiento de agua optimiza las características fisicoquímicas, microbiológicas y organolépticas requeridas para el

producto final.

La comparación entre los dos sistemas de tratamiento, coagulación-floculación y nanofiltración, se realizó con base a los resultados obtenidos de cada agua de proceso, evaluando sus parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de metales pesados mediante un análisis de varianza (ANOVA) de un factor y posteriormente una prueba de Tukey. A partir de estos resultados se logró identificar cuál de los dos tratamientos es más eficiente en la remoción de contaminantes y cuál cumplió mejor con los parámetros establecidos por las normas de agua potable (CAPRE), las NTON de bebidas carbonatadas y con los estándares internos de Kola Shaler Industrial S.A.

Para facilitar la interpretación de los resultados, se elaboraron figuras comparativas y diagramas de dispersión que permitieron identificar las diferencias significativas en la calidad del agua entre los dos tratamientos, evaluando así su desempeño y adecuación para la formulación de la bebida. Identificando las diferencias, se comparó con las normativas de calidad de agua y con normativas de bebidas carbonatadas los resultados obtenidos y se seleccionó el tratamiento que presentó mejor desempeño en la remoción de contaminantes.

V. Análisis y Presentación de Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica, microbiológica y de metales pesados del agua cruda y del agua tratada mediante los sistemas de coagulación-floculación y nanofiltración en la planta Kola Shaler Industrial S.A.

Para cada punto de muestreo se realizaron 4 repeticiones para la realización de un análisis estadístico mediante una tabla ANOVA. En caso que se obtuvieran diferencias significativas en los resultados, se realizó la prueba de TUKEY, para determinar entre qué puntos de muestreo se encontraron las diferencias significativas. Esto mediante Microsoft Excel LTSC Professional Plus 2021.

Los resultados obtenidos fueron analizados y comparados con los valores establecidos en las normas CAPRE, la NTON 03004 y la NTON 03-030-00 para determinar el cumplimiento de los estándares de calidad del agua utilizada en la formulación de bebidas carbonatadas.

5.1 Resultados de la Caracterización de la Fuente y de ambos Sistemas

En las siguientes tablas, *Tabla 12* y *Tabla 13* se presenta un resumen de los promedios y desviaciones estándar de los parámetros fisicoquímicos y de metales pesados obtenidos en los puntos de muestreo (PM1, PM2 Y PM3), mediante la aplicación del análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de comparaciones múltiples de Tukey con un nivel de confianza del 95% cuando fue necesario, con el objetivo de identificar diferencias significativas entre los puntos de muestreo.

Tabla 12

Caracterización fisicoquímica obtenida para cada punto de muestreo

Parámetro	Unidad	PM1	PM2	PM3	Valor p	Norma CAPRE
pH	pH	8.18 ± 0.02 ^a	7.49 ± 0.03 ^b	7.16 ± 0.13 ^c	< 0.001	6.5 - 8.5
SDT	mg/L	3114.036 ± 2073.8 ^a	647.5 ± 25.00 ^b	196.6 ± 142.8 ^c	0.015	1000
ST	mg/L	4236.25 ± 34 ^a	661.25 ± 24.96 ^b	207.5 ± 145.29 ^c	< 0.0001	1000
Turbidez	UNT	1.17 ± 0.06 ^a	1.10 ± 0.11 ^a	0.25 ± 0.08 ^b	< 0.001	5
Nitratos	mg/L	12.03 ± 6.96 ^a	14.45 ± 2.08 ^a	4.9 ± 7.98 ^a	0.133	25 - 50
Sulfatos	mg/L	18.75 ± 14.77 ^a	8.5 ± 15.07 ^a	37.49 ± 56.01 ^a	0.511	25 - 250
Calcio	mg/L	0.38 ± 0.17 ^a	4.73 ± 8.85 ^a	5.19 ± 4.06 ^a	0.443	100
Carbonatos	Meq/L	0	0	0	N.A.	3

Conduc. Elect.	μS/cm	0.02 ± 0.00 ^a	0.07 ± 0.01 ^b	0.004 ± 0.00 ^a	< 0.001	400
Alcalinidad	mg/L	238.8 ± 2.98 ^a	241.25 ± 2.5 ^a	19.22 ± 29.06 ^b	< 0.001	615
Dureza Total	mg/L	48 ± 2.16 ^a	48.5 ± 21.39 ^a	16.75 ± 12.77 ^b	0.019	400
Nitritos	mg/L	0.005 ± 0.0008	< 0.003	< 0.003	N.A.	1
Color Real	Factor dilución	12.5 ± 1.3	4.0 ± 0.8	< 1	N.A.	15
Cloro Residual	mg/L	1.36 ± 0.27 ^a	0.04 ± 0.03 ^b	0.019 ± 0.012 ^b	< 0.001	0.5 - 1
Temperatura	°C	26.8 ± 1.28 ^a	26.9 ± 1.24 ^a	27.18 ± 1.24 ^a	1.915	18 a 30
Cloruros	mg/L	1905.66 ± 1253.7 ^a	34 ± 0.82 ^b	10.625 ± 8.38 ^b	0.007	25 - 250
Magnesio	mg/L	11.425 ± 0.43 ^a	8.875 ± 0.85 ^b	0.94 ± 0.68 ^c	< 0.001	30 - 50

Nota. Elaboración propia

Tabla 13

Caracterización de metales pesados obtenida para cada punto de muestreo

Parámetro	Unidad	PM1	PM2	PM3	Valor p	Norma CAPRE
Hierro	mg/L	0	0.11 ± 0.13	< 0.006	N.A.	0.3
Manganeso	mg/L	12.75 ± 1.61 ^a	0.03 ± 0.01 ^b	0.03 ± 0.01 ^b	< 0.001	0.5
Aluminio	mg/L	0.02 ± 0.002 ^a	0.07 ± 0.013 ^a	0.004 ± 0.001 ^b	< 0.001	0.2
Zinc	mg/L	0.5 ± 0 ^a	0.53 ± 0.04 ^a	0.54 ± 0.03 ^a	0.22	3
Cobre	mg/L	0.011 ± 0.001 ^a	0.008 ± 0.001 ^b	0.002 ± 0.000 ^c	< 0.001	1.0 - 2
Plomo	mg/L	0.015 ± 0.003	0.008 ± 0.001	< 0.001	N.A.	0.01
Mercurio	mg/L	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	N.A.	0.001
Arsénico	mg/L	0.012 ± 0.001	0.005 ± 0.001	< 0.01	N.A.	0.01
Cadmio	mg/L	0.0005 ± 0.0001	0.0002 ± 0.0001	< 0.0001	N.A.	0.05

Nota. Elaboración propia

En la *Tabla 12* y *Tabla 13*, muestran de manera resumida las diferencias significativas basadas en los valores de probabilidad ($p < 0.05$) y las letras de Tukey obtenidos entre el PM1 (agua de pozo) y PM2 y PM3 (sistemas de tratamientos evaluados).

Las letras de Tukey que fueron asignada (minúsculas en superíndices) y que se observan en las tablas, se interpretan de la siguiente manera:

- Letras iguales: Indican que no existe diferencia significativa entre los puntos de muestreo para ese parámetro en específico.
- Letras diferentes: Indican que el tratamiento en ese parámetro específico tuvo un efecto significativo, permitiendo identificar qué sistema de tratamiento es diferentes y cual fue más efectivo en la remoción.
- N.A. (no aplicable): Se utiliza para indicar aquellos parámetros donde los datos obtenidos no presentan una variabilidad numérica suficiente para poder realizarles un análisis estadístico comparativo.

5.2 Análisis de Parámetros Fisicoquímicos y Metales Pesados obtenidos

Analizando los parámetros de mayor relevancia obtenidos (**Tabla 12** y **Tabla 13**) y comparando el desempeño del tratamiento convencional y la nanofiltración, se describe lo siguiente:

1. SDT, ST y Cloruros:

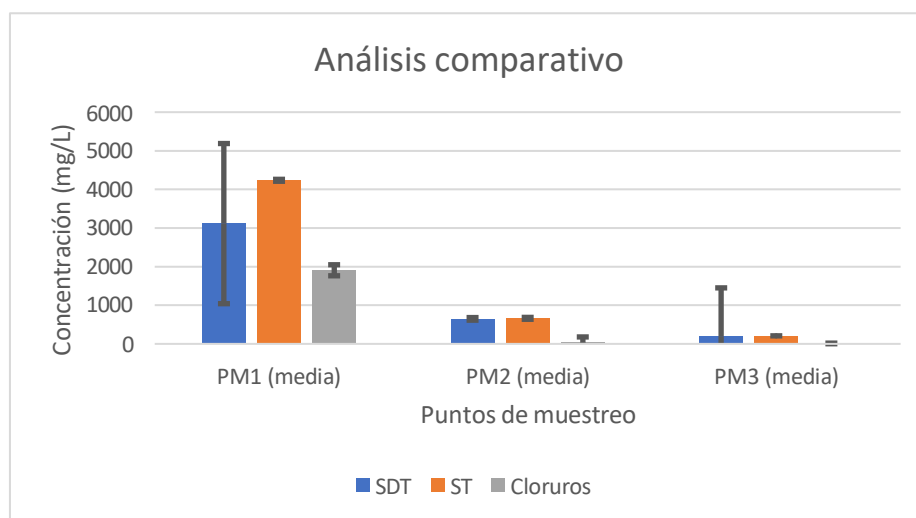


Figura 3. Comparación de la concentración de SDT, ST y cloruros en los diferentes puntos de muestreo.

Las barras de error que se muestran en el Gráfico 1, representan la desviación estándar ($n = 4$). El agua de la fuente (PM1) presentó para SDT (3114.03 mg/L), ST (4236.25) y Cloruros (1905.66 mg/L) una carga mineral elevada que superan los límites permitidos de la normativa CAPRE.

Mientras que el PM2 (sistema convencional) logró una remoción parcial en estos mismos tres. Sin embargo, la nanofiltración (PM3) redujo estos mismos tres parámetros a valores más inferiores, SDT (196.6 mg/L), ST (207.5 mg/L) y Cloruros

(10.625 mg/L).

2. Manganese:

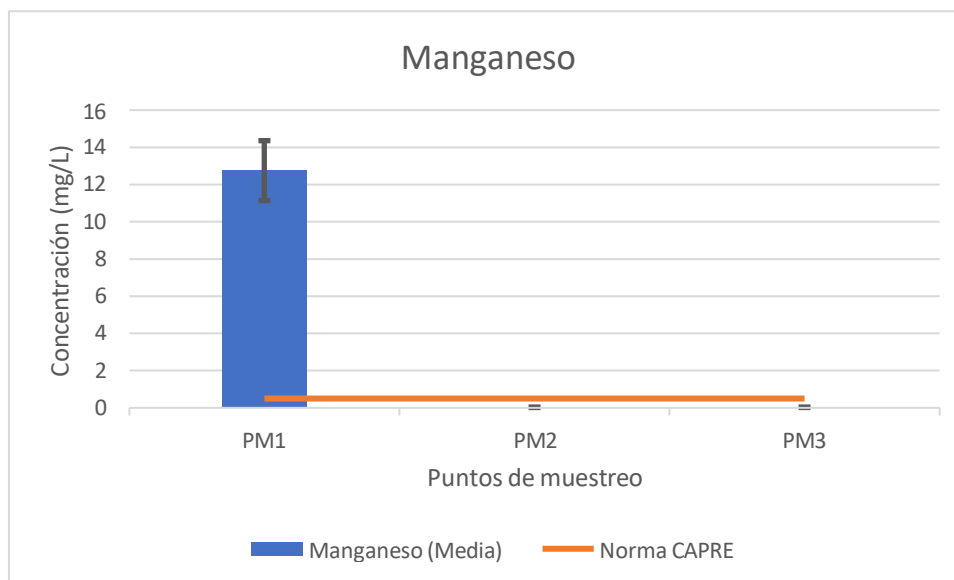


Figura 4. Comparación de la concentración de Manganeso en los diferentes puntos de muestreo.

Fue el metal con mayor presencia en el PM1 (12.03 mg/L), como se puede observar en el Gráfico 2, la línea anaranjada representa el límite máximo permitido por la normativa CAPRE (0.5 mg/L) el cual el PM1 supera considerablemente este rango.

Tanto el sistema de tratamiento convencional y la nanofiltración lograron disminuir en igual cantidad este parámetro hasta 0.03 mg/L. Ambos, son altamente efectivos para este metal en específico.

3. Dureza Total:

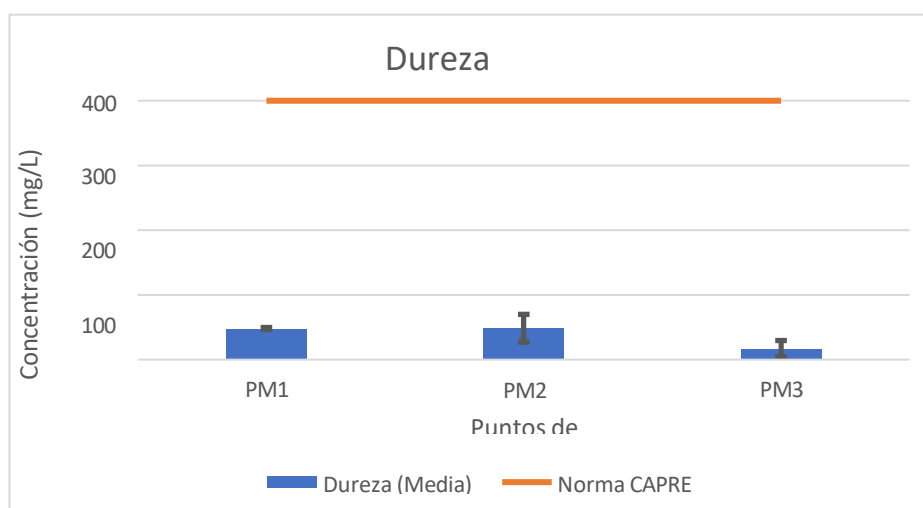


Figura 5.. Comparación de la concentración de dureza total en los diferentes puntos de muestreo.

Las barras de error que se muestran en el Gráfico 3, representan la desviación estándar ($n = 4$). La fuente (PM1) presentó una dureza igual a la que PM2 obtuvo. Para el sistema de tratamiento convencional (PM2) esto pudo estar asociado a los coagulantes utilizados. Sin embargo, la nanofiltración (PM3) demostró ser más eficiente, logrando que la dureza descendiera a 16.75 mg/L.

Estadísticamente, el análisis Tukey agrupa a PM1 y PM2 en el mismo grupo (a), como se observa en la **Tabla 12**, mientras que PM3 (nanofiltración) presenta una letra b, confirmando la diferencia significativa entre los puntos de muestreo.

4. Alcalinidad

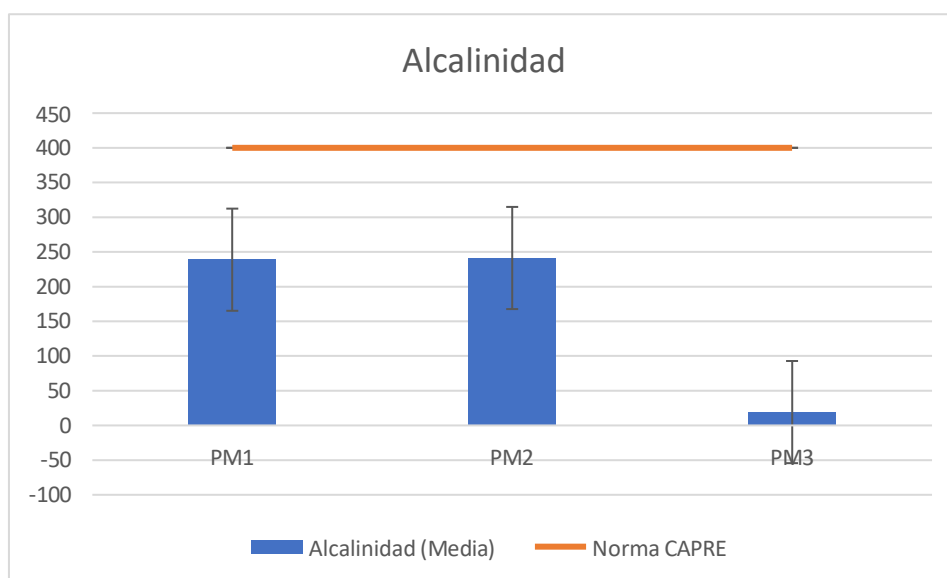


Figura 6. Comparación de los resultados de alcalinidad entre los 3 puntos de muestreo

El Gráfico 4. Comparación de los resultados de alcalinidad entre los 3 puntos de muestreo, indica que los valores promedio de 238.8 ± 2.98 mg/L en el agua de entrada (PM1) y 241.25 ± 2.5 mg/L después del tratamiento de coagulación-floculación (PM2). De acuerdo con el análisis estadístico, no se observaron diferencias significativas entre estos puntos de muestreo ($p < 0.05$), lo que indica que este proceso no generó cambios importantes en la alcalinidad del agua.

Por el contrario, el agua tratada mediante nanofiltración (PM3) presentó una disminución notable de la alcalinidad, con un valor promedio de 19.22 ± 29.06 mg/L, evidenciándose diferencias significativas con respecto a PM1 y PM2 ($p < 0.001$). Esta reducción puede atribuirse a la capacidad de las membranas de nanofiltración para retener iones disueltos, como bicarbonatos y carbonatos, que son los principales responsables de la alcalinidad del agua.

A pesar de estas variaciones, todos los valores registrados se mantienen dentro del límite máximo permisible establecido por la normativa CAPRE.

5. Turbidez:

Los tres puntos de muestreo se presentaron dentro del rango permitido por la normativa CAPRE. No obstante, se puede observar en la **Tabla 12**, como la nanofiltración logró una clarificación superior, bajando de 1.17 UNT a 0.25 UNT, muy por debajo del límite.

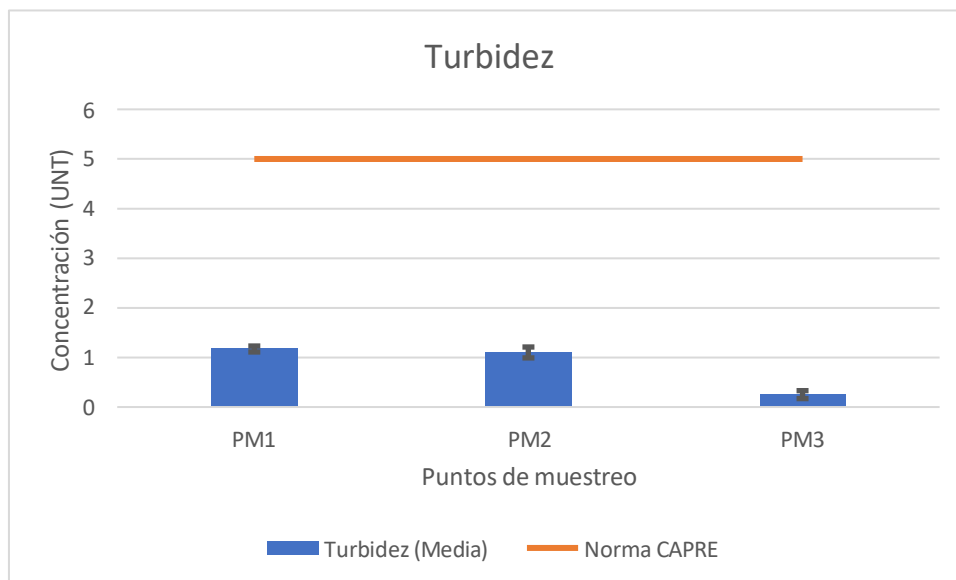


Figura 7. Comparación de la concentración de Turbidez (UNT) en los diferentes puntos de muestreo.

Esto demuestra que la tecnología por membrana es superior y de mayor calidad tanto estéticamente como físicamente, eliminando cualquier rastro de material suspendido o coloidal que el proceso convencional por coagulación-floculación podría dejar pasar.

6. Hierro

En el caso del hierro, no fue posible realizar un análisis estadístico ni representar los resultados mediante gráficos, debido a que en PM1 no se detectó la presencia de este. Además, se observa que el sistema de nanofiltración presentó concentraciones inferiores al límite de detección (<0.006 mg/L).

Sin embargo, cabe mencionar que el tratamiento de coagulación-floculación registró una concentración promedio de 0.11 ± 0.13 mg/L, manteniéndose en todos los casos por debajo del límite máximo permisible establecido por la normativa CAPRE (0.3 mg/L). No obstante, la presencia de hierro en el sistema podría atribuirse al estado de los tanques utilizados en el proceso de coagulación-floculación, los cuales presentan antigüedad y no son de acero inoxidable, lo que puede favorecer procesos de corrosión y la liberación de hierro al agua durante el tratamiento.

7. Metales Pesados (Plomo, Arsénico y Mercurio)

Para los metales pesados como plomo, arsénico, mercurio y cadmio se obtuvieron resultados por debajo de los límites de detección.

En ese sentido, no se logró aplicar análisis de Tukey (N.A.). Sin embargo, tanto PM2 y PM3 cumplían con los rangos permitidos de la normativa CAPRE.

5.3 Resultados de la Caracterización Microbiológica

En la Tabla 14 se presentan los resultados obtenidos del análisis microbiológico para los tres puntos de muestreo (PM1, PM2 y PM3). Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de comparaciones múltiples de Tukey para poder determinar si existían diferencias significativas entre los sistemas tratamientos con respecto al agua de la fuente.

Tabla 14

Caracterización microbiológica obtenida para cada punto de muestreo

Parámetro	Unidad	PM1	PM2	PM3	Valor p	Norma CAPRE	NTON 0303000	NTON 03004
Recuentos	UFC/100 mL	0.5 ± 1 ^a	27 ± 24.9 ^a	15 ± 19.15 ^a	0.154	-	50	-
E. coli	UFC/100 mL	0	0	0	0	0	0	0
Coliformes T.	UFC/100 mL	0 ^a	1.5 ± 1.9 ^b	0 ^a	1.141	4	2	0
Mohos	UFC/100 mL	0 ^a	3.75 ± 0.95 ^b	0 ^a	< 0.001	-	-	-
Levaduras	UFC/100 mL	0 ^a	5.5 ± 1.91 ^b	0.5 ± 1 ^a	< 0.001	-	--	-

Nota. Elaboración propia

Se puede observar que tanto mohos y levaduras se obtuvo un p inferior a 0.001 (p < 0.05) esto significa que hay una diferencia significativa entre los tratamientos y que influye directamente en la calidad microbiológica.

5.4 Análisis de Parámetros Microbiológicos Obtenidos

1. Recuentos Totales Aerobios (UFC/100 mL)

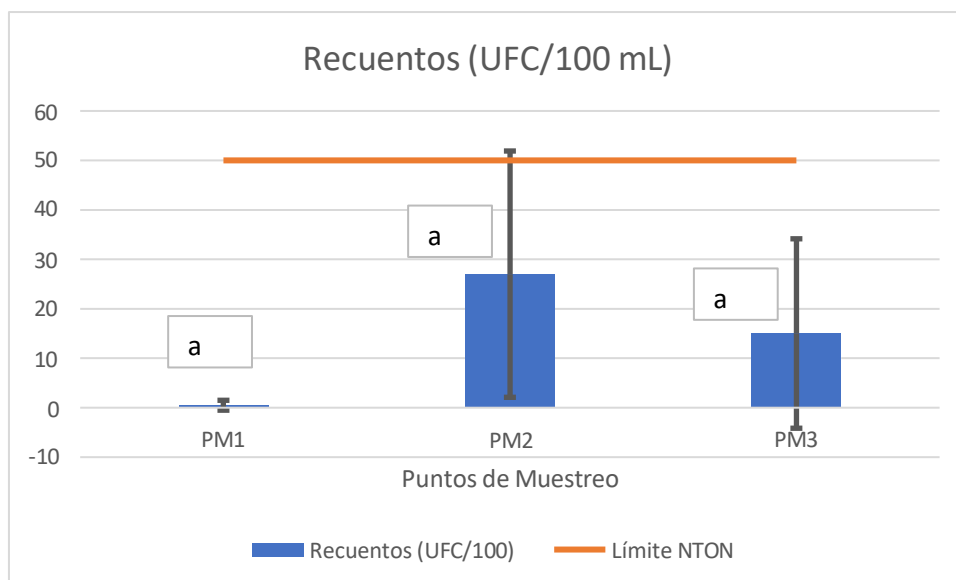


Figura 8. Comparativa de la concentración de recuentos totales aerobios entre los puntos de muestreo.

Para recuentos totales aerobios se evidencia que tanto el tratamiento convencional como la nanofiltración, cumplen satisfactoriamente con el límite máximo permisible establecido por la norma NTON 0303000 (50 UFC/100 mL).

Además, con la prueba de Tukey realizada se encontró que los 3 puntos de muestreo no muestren diferencias entre ellos, es decir ($p > 0.05$) por eso tienen la letra superíndice (a) a los tres. Las barras de error representan la desviación estándar ($n = 4$).

No obstante, el sistema de nanofiltración presentó menores recuentos microbianos en comparación con el tratamiento convencional, lo que sugiere una mayor eficiencia en la reducción de microorganismos.

No se calculó porcentaje de remoción debido a que el agua potable utilizada como afluente ya contiene una concentración residual de cloro entre 1 y 2 ppm, lo que reduce significativamente la presencia de microorganismos antes del ingreso a los sistemas de tratamiento.

Asimismo, debe considerarse que el objetivo principal de estos procesos es remover el cloro del agua para la elaboración de bebidas carbonatadas, por lo que pueden presentarse crecimientos microbianos posteriores dependiendo de la eficiencia del sistema de tratamiento y de las condiciones operativas del mismo.

2. E. coli (UFC/100 mL)

Para E. coli, no se presenta un gráfico para mayor apreciación e interpretación visual, debido a que en la **Tabla 14** donde se muestran los resultados obtenidos se observa una ausencia total entre cada punto de muestreo. Cumpliendo así con la norma CAPRE y las NTON.

3. Coliformes Totales (UFC/100 mL)

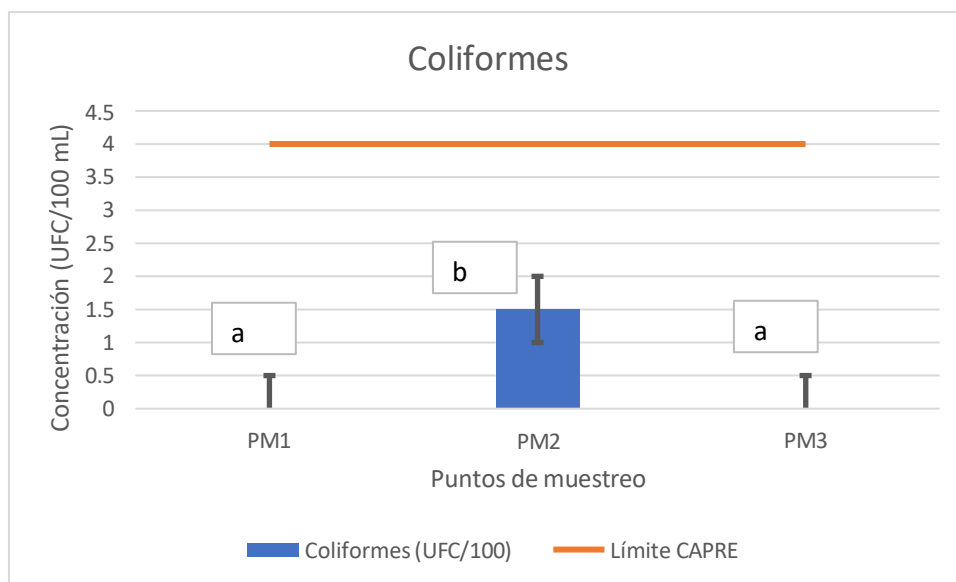


Figura 9. Comparativa de la concentración de Coliformes totales.

En el gráfico se puede observar que tanto la fuente (PM1) y el sistema por nanofiltración (PM3) tienen un valor 0 absoluto. Sin embargo, el proceso coagulación-floculación (PM2) presentó una ligera presencia de 1.5 UFC/100 mL, aun así, los 3 puntos de muestreo se encuentran dentro del valor permitido por la normativa CAPRE.

4. Mohos y Levaduras (UFC/100 mL)

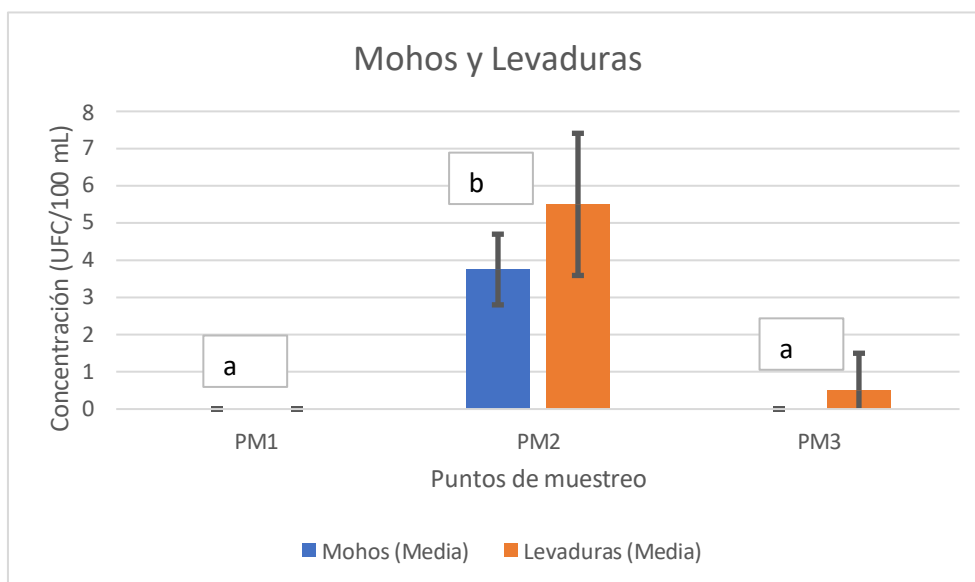


Figura 10. Comparativa de la concentración de Mohos y Levaduras.

El PM2 (sistema convencional), a como se observa en el gráfico contiene la letra superíndice b de Tukey que confirma que fue el menos eficiente de los 3 puntos de muestreos. Reportando una media de 3.75 ± 0.95 UFC/100 mL para Mohos. En este mismo sentido, para Levadura se observa un comportamiento similar.

Sin embargo, el PM3 (nanofiltración) tanto para Mohos y Levaduras redujo la carga a niveles casi indetectables (0.5 ± 1 UFC/100 mL), superando significativamente al tratamiento por coagulación-floculación.

Aunque los mohos y levaduras no se encuentran contemplados dentro de los parámetros microbiológicos establecidos por la norma para agua potable o bebidas carbonatadas, su determinación se incluyó como un indicador complementario de calidad microbiológica, debido a que estos microorganismos pueden desarrollarse en sistemas acuosos y afectar la estabilidad y calidad del producto.

5.5 Porcentaje de Remoción de cada sistema

Tabla 15

Comparación de porcentaje de remoción entre cada sistema de tratamiento

Parámetro	Remoción Coagulación-Floculación (%)	Remoción Nanofiltración (%)
Sólidos disueltos totales	84.39	95.29
Sólidos totales	84.39	95.08
Turbidez	6.31	78.89
Nitratos	N/C	61.56
Hierro	N/C	100
Manganeso	99.76	99.79
Sulfatos	39.81	39.97
Aluminio	N/C	77.31
Conductividad eléctrica	43.99	69.3
Alcalinidad	1.06	92.13
Dureza total	1.36	65.04
Nitritos	38.75	38.75
Color verdadero	68.23	100
Cloro residual	97.33	98.64
Cloruros	72.95	95.81
Magnesio	22.95	91.81
Cobre	24.96	85.87
Plomo	45.3	100
Arsénico	59.36	100
Cadmio	55	100

Nota: Los valores de porcentaje de remoción indicados como N/C indican que no son calculables, es decir que el parámetro aumento al momento de entrar al sistema de tratamiento.

La Tabla 15 presenta el porcentaje promedio de remoción de los parámetros fisicoquímicos y metales pesados evaluados para los sistemas de coagulación-floculación y nanofiltración. Los resultados muestran que el proceso de nanofiltración presentó mayores eficiencias de remoción en comparación con la coagulación-floculación. Se observaron remociones superiores al 90 % en parámetros como manganeso, alcalinidad, cloruros, plomo, arsénico y cadmio. En contraste, el proceso de coagulación-floculación presentó menores eficiencias e incluso incrementos en algunos parámetros como nitratos y aluminio.

La mayor eficiencia observada en el sistema de nanofiltración se debe a su capacidad para remover sales disueltas y diversos compuestos iónicos mediante un proceso de separación por membrana impulsado por diferencia de presión y tamaño molecular. Este mecanismo permite reducir significativamente la concentración de minerales y otros solutos presentes en el agua, obteniéndose un agua de mayor

pureza, adecuada para su utilización en procesos industriales como el embotellado de bebidas carbonatadas.

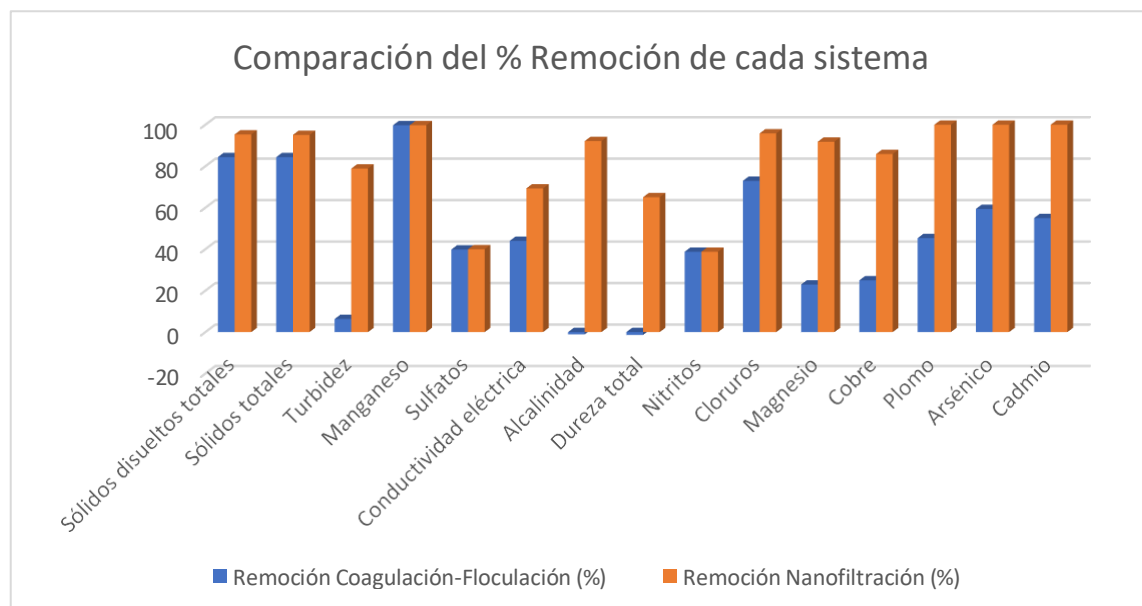


Figura 11. Comparación del % de remoción del sistema convencional vs nanofiltración.

El gráfico muestra la comparación del porcentaje de remoción de los diferentes parámetros evaluados para los sistemas de coagulación-floculación y nanofiltración. Se observa que el proceso de nanofiltración presenta mayores eficiencias de remoción, especialmente en parámetros asociados a sales disueltas y minerales, como cloruros, magnesio y metales pesados, lo que evidencia su mayor capacidad para la reducción de compuestos iónicos en el agua tratada.

VI. Conclusiones

La comparación entre ambos sistemas de tratamiento permitió determinar que la nanofiltración presenta un mejor desempeño en la remoción de contaminantes, alcanzando rangos de remoción entre 38.75% y 100%, en comparación con el tratamiento de coagulación-floculación, que presentó rangos entre 1.06% y 99.76%, evidenciando una mayor eficiencia en la reducción de compuestos asociados a la mineralización del agua, destacándose en parámetros como sólidos disueltos totales (95.29%), conductividad eléctrica (69.3%), alcalinidad (92.13%) y dureza (65.04%), en comparación con el tratamiento convencional. Asimismo, presentó una mayor remoción de turbidez (78.89% frente a 6.31%).

La caracterización del agua cruda evidenció altas concentraciones de sales disueltas, reflejadas en parámetros como sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica, alcalinidad, dureza y cloruros, indicando la presencia significativa de sales disueltas en la fuente de abastecimiento, además de altas concentraciones de cloruros.

La determinación de los parámetros fisicoquímicos, microbiológicos y de metales pesados en ambos sistemas permitió evidenciar que ambos sistemas de tratamiento contribuyen a mejorar la calidad del agua, cumpliendo con las normativas nacionales e internacionales tanto de agua potable como de bebidas carbonatadas (CAPRE, NTON 03 030 00, 03 00-40).

El análisis estadístico mediante ANOVA y la prueba de Tukey evidenció diferencias significativas entre los sistemas, destacándose la mayor capacidad de la nanofiltración para la remoción de iones disueltos y sales presentes en el agua. Lo demuestran la alta capacidad de las membranas de nanofiltración para remover iones disueltos y sales presentes en el agua. En el caso de los metales pesados, el sistema de nanofiltración mostró una alta eficiencia en la remoción de elementos como manganeso, plomo, arsénico y cadmio con un porcentaje de remoción de hasta 100 % en comparación con el sistema de coagulación-floculación. En cuanto a los aspectos microbiológicos, los resultados obtenidos indicaron que las muestras de ambos sistemas analizadas cumplen con los límites establecidos por las normativas. No obstante, el sistema de nanofiltración mostró una menor presencia de microorganismos en comparación con el tratamiento convencional, lo que evidencia su capacidad reductora frente a contaminantes microbiológicos.

Por ello, la evaluación comparativa permitió identificar que el sistema de nanofiltración es el más adecuado para la formulación de la bebida, debido a su mayor eficiencia en la remoción de contaminantes y mejor desempeño en parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, presentando diferencias significativas con los resultados de los parámetros obtenidos en el sistema convencional, por lo que su elevado grado de remoción de sales podría generar modificaciones sensoriales significativas, provocando un cambio drástico en el perfil de sabor de la bebida carbonatada.

VII. Recomendaciones

Evaluar la posible implementación del sistema de nanofiltración como tratamiento complementario o alternativo al proceso convencional de coagulación-floculación, debido a su alta eficiencia en la remoción de sales disueltas, compuestos iónicos y metales pesados y por el desgaste presentado por el actual sistema utilizado en el proceso de producción de la bebida Kola Shaler. No obstante, su aplicación debe analizarse considerando el grado de desmineralización alcanzado, ya que una reducción excesiva de minerales podría modificar las características sensoriales del agua utilizada en la elaboración de bebidas carbonatadas.

Por ello, se podría considerar una etapa posterior de remineralización del agua tratada, estableciendo un control del perfil mineral del agua tratada mediante una etapa de ajuste o remineralización. Esto permitirá regular parámetros como alcalinidad, dureza y concentración de sales disueltas, los cuales influyen directamente en las características organolépticas y en la estabilidad de la carbonatación de las bebidas. De esta manera, se garantiza que el agua utilizada en la producción mantenga un perfil mineral adecuado que no altere el sabor ni la calidad final del producto.

Realizar un análisis técnico-económico con el fin de determinar la viabilidad de realizar ajustes en la formulación, particularmente en la concentración de ácido cítrico, para garantizar que el producto final conserve sus características fisicoquímicas, sensoriales y la aceptación del consumidor.

Alternativamente, considerando que ambos sistemas de tratamiento se encuentran disponibles, podría evaluarse la mezcla de agua nanofiltrada con agua tratada mediante coagulación-floculación, por ejemplo, en una proporción aproximada de 80:20. Esta estrategia permitiría ajustar el contenido de minerales del agua tratada y mantener los parámetros fisicoquímicos y organolépticos requeridos para la elaboración de la bebida o producto final.

Evaluar alternativas para el aprovechamiento del agua de rechazo generada por el sistema de nanofiltración, mediante su reutilización en actividades que no requieran agua potable, como limpieza de áreas, lavado de equipos externos o riego de áreas verdes, previa caracterización de su calidad, con el fin de promover un uso más eficiente del recurso hídrico.

VIII. Nomenclatura

CAPRE: Comité coordinador regional de instituciones de agua potable y saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana.

NTON: Normas técnicas obligatorias nicaragüenses.

MC: Microfiltración.

UF: Ultrafiltración.

OI: Ósmosis inversa.

NF: Nanofiltración.

OD: Oxígeno disuelto.

DBO5: Demanda bioquímica de oxígeno.

pH: Potencial de hidrógeno.

CaCO₃: Carbonato de calcio.

SDT: Sólidos disueltos totales.

ST: Sólidos totales.

mg/L: Miligramos sobre litros.

UNT: Unidad de turbidez nefelométrica.

Meq/L: Miliequivalentes por litro.

μS/cm: Microsiemens por centímetro.

°C: Grados Celsius.

UFC/mL: Unidades formadoras de colonias por mililitro.

ppm: Partes por millón.

PTAP: Planta de tratamiento de agua potable.

PIENSA: Programa de investigación, estudios nacionales y servicios del ambiente.

PM1: Punto de muestreo 1 (pozo).

PM2: Punto de muestreo 2 (sistema convencional).

PM3: Punto de muestreo 3 (nanofiltración).

ANOVA: Análisis de varianza.

TUKEY: Prueba de Tukey, Método estadístico de comparación múltiple.

p: Probabilidad.

IX. Bibliografía

- Aquae Fundación. (2022). *Las principales características del agua*. FundacionAquae.org. <https://www.fundacionaquae.org/wiki/caracteristicas-agua/#:~:text=Es%20un%20l%C3%ADquido%20inodoro%3A%20no,estado%20puro%2C%20es%20completamente%20transparente.>
- Asamblea Nacional de Nicaragua. (2000). *Norma Técnica Obligatoria Nicaragüense Norma para la Clasificación de los Recursos Hídricos* (NTON 05 007-98). La Gaceta Diario Oficial. <http://legislacion.asamblea.gob.ni/Normaweb.nsf/b92aaea87dac762406257265005d21f7/1a3a99b77290b980062573df00594022?OpenDocument>
- Blandón, E., & Martínez, M. (2016). *Evaluación del sistema de tratamiento de agua de proceso en la empresa Kola Shaler Industrial S.A., durante el periodo marzo - septiembre 2015*. Managua: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Bravo Vidaurre, F. (s.f.). *Determinación de manganeso por el método de persulfato*. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/429816772/Determinacion-de-Manganeso-Par-El-Metodo-de-Persulfato>
- CAPRE. (1994). *Normas de Calidad del agua para consumo humano*. <https://www.ipsa.gob.ni/Portals/0/1%20Inocuidad%20Alimentaria/Normativas%20Generales/ACTUALIZACION%20051217/Normas oficiales para la calidad del agua nicaragua.pdf>
- Camacho, B., López, J., & Martines, N. *Calidad bacteriológica del agua potable del municipio el crucero departamento de managua en el periodo de julio – diciembre 2014*. Managua: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
- Dirección General de Normas. (1981). *NMX-AA-064-1981: Análisis de agua – Determinación de mercurio – Método colorimétrico de la ditizona*. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa064.pdf>
- Fundación Aquae. (2024). *Las aguas subterráneas*. Fundación Aquae. Recuperado de <https://www.fundacionaquae.org/wiki/las-aguas-subterraneas/>
- García, M. (2014). *Estudio en planta piloto de la sostenibilidad y mejora integral de la calidad del agua potable mediante nanofiltración accionada por energías renovables*. España: Universidad de Cádiz. <https://produccioncientifica.uca.es/documentos/5ea21b892999521f7d51bce4>
- Gualdrón, L. (2016). *Evaluación de la calidad de agua de ríos de Colombia usando parámetros fisicoquímicos y biológicos*. Socorro, Colombia.

<https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/20335/CD%20EGA%202016%200006%20%20Trabajo%20de%20grado.pdf?sequence=1>

Guevara Pérez, A., & Cancino Chávez, K. (2015). *Bebidas carbonatadas*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Industrias Alimentarias. Recuperado de <http://lamolina.edu.pe/postgrado/pmdas/cursos/dpacti/lecturas/SeparataBebidas%20carbonatadas.pdf>

Higueros, J. (2006). *Desarrollo de un sistema de tratamiento de agua, para la elaboración de una bebida gaseosa con acidez y sabor aceptables por el consumidor, en una embotelladora de aguas carbonatadas en Guatemala*. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala. <https://repositorio.uvq.edu.gt/xmlui/bitstream/handle/123456789/1380/Tesis%20Visto%20bueno.pdf?sequence=1>

Lorenzo-Acosta, Y., (2006). *Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación*. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, XL (2), 10-17. <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120664002.pdf>

Martínez, K., & Solís, C. (2014). *Análisis comparativo de coagulantes, floculantes y decantación lastrada aplicados en el proceso de eliminación de agentes contaminantes en un sistema de afluentes*. Perú: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/5f875466-eda1-4444-b9f4-9e699d1fbde8/content>

Medrano, J. (2017). *Influencia del tipo de coagulante, dosis de coagulante y floculante en la remoción de sólidos suspendidos, color y turbidez en los efluentes de pelambre en curtiembres*. Perú: Universidad Alas Peruanas. https://repositorio.uap.edu.pe/jspui/bitstream/20.500.12990/1720/1/Tesis_Coagulante_Turbidez.pdf

MIFIC. (2000). *Norma Técnica de Bebidas Carbonatadas*. NTON 03-030-00 <http://legislacion.asamblea.gob.ni/normaweb.nsf/b92aaea87dac762406257265005d21f7/3098b5c5a7be1dda0625735d007a87c4>

Muñoz, A., Cárdenas Inga, J., Olivares Requis, J., & Toribio Chávez, D. (2021). *Determinación de arsénico en aguas* [Informe académico]. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Scribd. <https://es.scribd.com/document/522656586/Determinacion-de-Arsenico-en-Aguas>

National Geographic Society. (2025). *Aguas superficiales*. National Geographic Education. Recuperado de <https://education.nationalgeographic.org/resource/surface-water/>

- Ribeter.org. (s. f.). *¿Cómo es el proceso de fabricación de la cerveza?* Ribeter.org. Recuperado el 6 de septiembre de 2025, de <https://ribeter.org/como-es-el-proceso-de-fabricacion-de-la-cerveza/>
- Rodríguez, J. (2009). *Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto, (ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela, noviembre del 2008. Revista Pensamiento Actual, Universidad de Costa Rica. 9 (12-13), 125-134.*
- Ramírez, W. (2006). *Consideraciones básicas y viabilidad de procesos de membranas de ósmosis inversa y nanofiltración como alternativa para el tratamiento de agua en Colombia.* Colombia: Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3422>
- Romero, M. (2008). *Tratamientos utilizados en potabilización de agua.* Guatemala: Universidad Rafael Landívar. https://fgsalazar.net/LANDIVAR/ING-PRIMERO/boletin08/URL_08_ING02.pdf
- Swistock, B. (2023). *Bacterias Coliformes.* PennState Extension. <https://extension.psu.edu/bacterias-coliformes#:~:text=Las%20bacterias%20coliformes%20a%20menudo,el%20agua%20cause%20una%20enfermedad.>
- Universidad Pablo de Olavide. (2005). *Determinación de calcio y magnesio en aguas por complexometría.* Departamento de Química Física y Analítica. https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/TAQ/TAQP2_0506.pdf

X. Anexos

10.1. Anexos de Figuras

10.1.1. Equipos y sistemas de procesos de tratamiento de agua

10.1.1.1. Sistema de entrada (PM1)



Figura 12. Sistema de clorinación a la salida del pozo.



Figura 13. Tanque cisterna de almacenamiento de agua potable



Figura 14. Sistema de dosificación de desinfectante, coagulante y floculante



Figura 15. Tratamiento de agua mediante coagulación-floculación, finalizando en filtración



Figura 16. Sistema de tratamiento de agua mediante nanofiltración

10.1.2. Instrumentos y equipos utilizados en los análisis

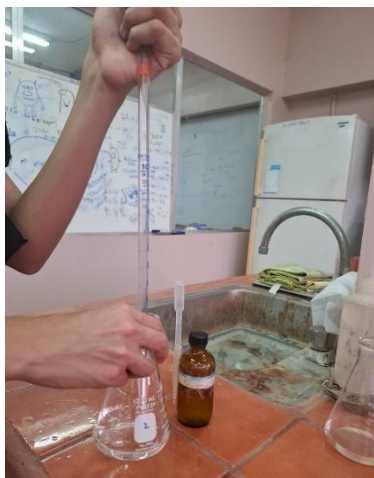


Figura 17. Titulación para determinación de carbonatos



Figura 18. Uso y siembra en placas Petri Film para resultados de E. Coli y coliformes totales.

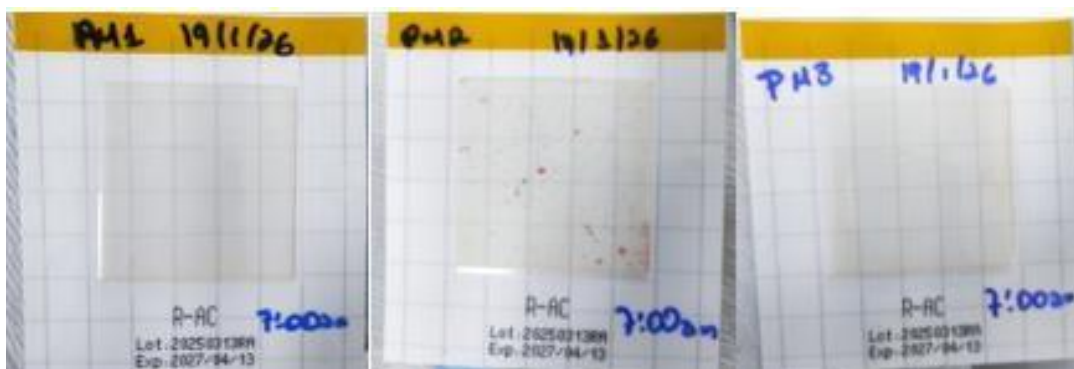


Figura 19. Uso y siembra en placas Petri Film para resultados de recuentos totales.

10.1.3. Proceso de recolección de muestras



Figura 20. Toma de muestra en PM1 (Entrada a los sistemas)



Figura 21. Toma de muestra en PM3 (Salida del sistema de Nanofiltración).



Figura 22. Toma de muestras en salida de PM2(Salida del sistema de coagulación-Floculación)

10.2. Métodos

10.2.1 pH y temperatura

Para la medición de pH se realizó a través de cintas de pH, y tres equipos de pH-metros para obtener una mejor precisión en la medición. Se utilizó un pH-metro de mesa marca OHAUS ST2100-F, un pH metro portable marca OHAUS ST-300, y un pH metro portátil Milwaukee pH55. Los tres pH-metros tienen un indicador de temperatura, no obstante, también se midió a través de un termómetro analítico marca FLuke.

Tabla 16

Resultados obtenidos de pH en las 4 repeticiones

Tiempos de muestra	pH			Norma CAPRE
	PM1	PM2	PM3	
1	8.2	7.45	7.34	6.5 - 8.5
2	8.2	7.52	7.15	6.5 - 8.5
3	8.15	7.48	7.12	6.5 - 8.5
4	8.18	7.5	7.03	6.5 - 8.5

Tabla 17

Resultados obtenidos de temperatura en las 4 repeticiones

Tiempos de muestra	Temperatura			Norma CAPRE	Unidad de medida
	PM1	PM2	PM3		
1	25.4	25.6	25.8	18 - 30	°C
2	26.1	26.3	26.5	18 - 30	°C
3	27.5	27.7	27.9	18 - 30	°C
4	28.2	28.3	28.5	18 - 30	°C

10.2.2. Determinación de cloro residual

Para la medición del cloro residual se utilizó el reactivo de test de cloro libre "Chlorine Test, colorimetric, 0.1-2.0 mg/L (Cl₂)". La concentración de cloro se midió semicuantitativamente por comparación visual del color de la solución de medición con los campos de color del disco de color. Así para las 3 muestras a analizar con 4 repeticiones cada una.

Tabla 18

Resultados obtenidos de cloro residual en las 4 repeticiones

Tiempos de muestra	Cloro residual			Norma CAPRE	Unidad de medida
	DM1	DM2	DM3		
1	1.5	0.05	0.006	0.5 - 1.0	mg/L
2	1.5	0.06	0.03	0.5 - 1.0	mg/L
3	1.5	0.05	0.03	0.5 - 1.0	mg/L
4	0.95	0	0.01	0.5 - 1.0	mg/L

10.2.3. Determinación de alcalinidad

La determinación de alcalinidad se realizó a través de titulación potenciométrica mediante el método de titulación ácido-base:

Preparación de la muestra:

- Se midieron 100 mL de la muestra de agua y se transfirió a un Erlenmeyer.

Titulación para alcalinidad parcial (P):

- Se adicionaron 3-4 gotas de fenolftaleína a la muestra y si no se presentó el viraje de color, a la alcalinidad P = 0, se procedió a llenar la bureta con la solución de H_2SO_4 0.02 N.
- Se tituló la muestra con H_2SO_4 , agitando constantemente, hasta el viraje de color rosa a incoloro.
- El volumen de H_2SO_4 gastado fue el Volumen V_1 .

Titulación para alcalinidad total (M):

- Se Adicionaron 3-4 gotas de naranja de metilo a la misma muestra. Y se continuó la titulación con H_2SO_4 hasta el viraje de amarillo a rosado salmón. Finalmente, se anotó el volumen total de H_2SO_4 consumido (V_2).

La alcalinidad total se determinó a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Alcalinidad total} = \frac{A \times N \times 50\,000}{mL \text{ muestra}}$$

Dónde:

A: mL de ácido normalizado gastado

N: normalidad del ácido normalizado (0.02 N)

Así para las 3 muestras a analizar con 4 repeticiones cada una.

Tabla 19*Resultados obtenidos de alcalinidad en las 4 repeticiones*

Alcalinidad					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	NTON 03004	Unidad de medida
1	235	240	4.00	615	mg/L
2	242	240	4.56	615	mg/L
3	238	245	62.80	615	mg/L
4	240	240	5.50	615	mg/L

10.2.4. Determinación de la dureza

Se realizó la determinación de dureza por el método Tritimétrico, utilizando un kit rápido de dureza.

- Primeramente, se tomaron 5 ml de agua a analizar y se agregaron 3 gotas del reactivo H-1 (Reactivo acondicionador o buffer compuesto de hidróxido de sodio y sales amortiguadoras como buffer alcalino y agentes enmascarante como fosfatos o complejantes débiles) al agua, hasta que se observó cambio de color a rosado fucsia.
- Posteriormente se procedió a titular con el reactivo H-2 (Reactivo indicador titulante a base de EDTA) hasta obtener el cambio de color a verde esmeralda. La cantidad gastada se refiere a los mg/l CaCO_3 .

Tabla 20*Resultados obtenidos de dureza total en las 4 repeticiones*

Dureza Total					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	Norma CAPRE	Unidad de medida
1	51	43	9.00	400	mg/L
2	46	33	7	400	mg/L
3	48	38	35.00	400	mg/L
4	47	80	16.00	400	mg/L

10.2.5. Determinación de sulfato

- Con ayuda de un kit de filtración, se filtraron 50 mL de la muestra a analizar seguidamente los 50 mL de muestra filtrada se colocaron en un Erlenmeyer con un magneto.
- Se adicionaron 10 mL de búfer A, luego se procedió a colocar en un agitador magnético donde se le añadió 0.25 g de cloruro de bario, se agitó por 1

minuto y luego se dejó reposar por 5 minutos.

- Por último, se procedió a leer en el equipo con ayuda de una celda. Así para las 3 muestras a analizar con 4 repeticiones cada una.

Tabla 21

Resultados obtenidos de sulfatos en las 4 repeticiones

Sulfatos					
Tiempos de muestra	DM1	DM2	DM3	Norma CAPRE	Unidad de medida
1	0	0	9.05	25 - 250	mg/L
2	36	3	8.91	25 - 250	mg/L
3	21	0	12.4	25 - 250	mg/L
4	18	31	10.5	25 - 250	mg/L

10.2.6. Determinación de ST

- En una capsula de porcelana (Peso 1), se adicionaron 20 mL de la muestra.
- Se procedió a digestar en un baño maría utilizando agua destilada, hasta que los 20 mL de muestra se evaporaron por completo.
- Luego, se colocó la capsula en un horno por 1 hora.
- Pasada la hora, se colocó la capsula en un disecador por unos 20 minutos aproximadamente y finalmente se procedió a pesar nuevamente (Peso 2).

Fórmula para encontrar los g/mL de sólidos totales:

$$\text{Sólidos Totales [g/mL]} = \frac{(\text{Peso 2} - \text{Peso 1}) \times 1000}{\text{Volumen de muestra mL}}$$

Tabla 22

Resultados obtenidos de sólidos totales en las 4 repeticiones

Solidos Totales					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	Norma CAPRE	Unidad de medida
1	4250	660	220	1000	mg/L
2	4190	695	385	1000	mg/L
3	4270	635	30	1000	mg/L
4	4235	655	195	1000	mg/L

10.2.7. Determinación de SDT

- Con ayuda de un kit de filtración, se filtraron 50 mL de muestra a analizar.
- Luego, se pesaron las capsulas de porcelana (Peso 1) y se adicionó los 50 mL de muestra filtrada.
- Se llevaron a un baño maría hasta que se secaron por completo y luego colocaron cada cápsula en un horno a 180 °C por 2 horas.
- Una vez pasadas las 2 horas, se sacaron la muestra y se colocaron en un disecador por unos 20 minutos y finalmente se procedió a pesar nuevamente la cápsula (Peso 2).

$$\text{Sólidos Disueltos Totales [g/mL]} = \frac{(\text{Peso 2} - \text{Peso 1}) \times 1000}{\text{Volumen de muestra mL}}$$

Tabla 23

Resultados obtenidos de SDT en las 4 repeticiones.

Solidos Disueltos Totales					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	Norma CAPRE	Unidad de medida
1	4144	650	215.0	1000	mg/L
2	4086	680	22.0	1000	mg/L
3	4210	620	370.0	1000	mg/L
4	4156	640	180.0	1000	mg/L

10.2.8. Determinación de manganeso

Se realizó mediante la metodología descrita por (Bravo, s.f.), la cual consiste en oxidar el manganeso presente en la muestra mediante persulfato, permitiendo su cuantificación mediante análisis químico.

Para este procedimiento se requirió la preparación de un reactivo especial cuya función es que el Mn esté totalmente soluble, los cloruros no interfieran, que la oxidación a permanganato ocurra de forma rápida y completa, y que el color resultante sea estable para su medición. También se usó persulfato de amonio con el objetivo de oxidar el manganeso presente en la muestra desde su estado +2 (Mn^{2+}) hasta el estado +7 (MnO_4^-), formando permanganato de color violeta. Ese color se mide espectrofotométricamente, y su intensidad es proporcional a la concentración de manganeso. Se preparó también una solución estándar de manganeso como patrón de referencia para calibrar el equipo de medición.

- Para la preparación del reactivo especial, primeramente, se disolvieron 75 g de HgSO_4 en 400 mL de HNO_3 concentrado y 200 mL de agua destilada. Se agregaron 200 mL de ácido fosfórico al 85% (H_3PO_4) y 35 mg de nitrato de plata (AgNO_3). Se diluyó la solución enfriada a 1 L.
- Tratamiento de la muestra: tomando un volumen entre 0.05 y 2.0 mg de Mn, se colocó en un matraz cónico de 250 mL y se ajustó a 90 mL con agua

destilada.

- Comparación del tubo de Nessler: Usando estándares preparados de manganeso y que contenían de 5 a 100 µg de Mn/100 mL de volumen final, se compararon las muestras y estándares visualmente.
- Determinación fotométrica: Utilizando una serie de estándares de 0 a 1500 µg de volumen final de Mn/100 mL. Se realizaron mediciones fotométricas contra un blanco de agua destilada. La siguiente tabla muestra la longitud de la trayectoria de luz apropiada para varias cantidades de manganeso en un volumen final de 100 mL:

Rango de Mn (µg)	Camino de luz (cm)
5 - 200	15
20 - 400	5
50 - 4000	2
100 - 1500	1

- Se preparó la curva de calibración relacionando concentraciones conocidas de manganeso con su absorbancia medida. Se midió la absorbancia inicial de la muestra en el fotómetro. Se esperó a que el color violeta del permanganato desapareciera completamente. Se midió nuevamente la absorbancia.
- Finalmente, se restó la absorbancia de la muestra blanqueada de la absorbancia inicial; el resultado corresponde a la absorbancia real debida al manganeso.

Cálculos:

Cuando toda la muestra original se toma para el análisis:

$$mg \frac{Mn}{L} = \frac{\mu g Mn/100ml}{ml muestra} * \frac{100}{ml porción}$$

Tabla 24

Resultados obtenidos de manganeso en las 4 repeticiones

Manganeso					Unidad de medida
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	Norma CAPRE	
1	13	0.041	0.046	0.5	mg/L
2	14.7	0.035	0.025	0.5	mg/L
3	10.8	0.02	0.018	0.5	mg/L
4	12.5	0.03	0.02	0.5	mg/L

10.2.9. Determinación de aluminio

Preparación de la muestra:

- Con ayuda de un tubo mezclador graduado, se midió 50 mL de muestra a analizar y se añadió el contenido de un sobre de ácido ascórbico en polvo. Se tapó y agitó despacio varias veces para disolver el polvo.
- Luego, se procedió a adicionar el contenido de un sobre de reactivo de aluminio AluVer3 en polvo y se tapó.
- Se encendió el equipo y se colocó el programa de Aluminio. Se seleccionaron en la pantalla el símbolo de temporizador 1:00 minuto y OK.
- Se Invertió el tubo rápidamente durante 1:00 minuto para disolver el polvo.

Preparación del blanco:

- De la muestra preparada anteriormente, se vertió 10 mL en una celda y se añadió el contenido de un sobre de reactivo Bleaching3 en polvo.
- Se seleccionó en la pantalla el símbolo de temporizador de 30 segundos y OK.
- Se agitó con rotación energética durante 30 segundos el blanco. Esta solución adquirió un color anaranjado de claro a medio.

Continuando con la preparación de la muestra:

- Se seleccionó en la pantalla el símbolo de temporizador 15:00 minutos y OK.
- Se tomaron 10 mL de muestra preparada y se vertieron en una celda.
- Una vez terminados los 15 minutos, se procedió a secar muy bien la celda del blanco y colocarla en el equipo.
- Seguidamente, se procedió a leer la muestra limpiando muy bien la celda que la contenía. Se seleccionó en la pantalla LEER y el resultado apareció en mg/L Al^{3+} .

Así para las 3 muestras a analizar con 4 repeticiones cada una.

Tabla 25

Resultados obtenidos de aluminio en las 4 repeticiones

Aluminio					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	Norma CAPRE	Unidad de medida
1	0.02	0.082	0.005	0.2	mg/L
2	0.015	0.064	0.003	0.2	mg/L
3	0.018	0.05	0.004	0.2	mg/L
4	0.017	0.07	0.004	0.2	mg/L

10.2.10. Determinación de cadmio

Preparación de la muestra:

- En una probeta medió 250 mL de la muestra a la analizar y se vertió en un embudo de separación de 500 mL.
- Se agregaron 20 mL de hidróxido de sodio al 50% (pH: 2.5).
- El polvo tipo citrato se le adicionó, 0.1 gramos de cianuro de potasio y se agitó bien el embudo por 15 segundos y luego se dejó reposar por 1 minuto.
- En un balón de 50 mL se agregaron 30 mL de cloroformo y posteriormente 30 mL de la solución de Ditizona.
- Se vertió la mezcla de cloroformo y Ditizona en el embudo de separación donde estaba tu muestra. Con el embudo tapado, se agitó vigorosamente por 2 minutos para liberar presión y se dejó reposar por 1 minuto.
- Pasado el minuto, se colocó un pequeño trozo de algodón en la salida de la llave del embudo de separación y se colocó un embace de precipitado limpio debajo de la salida del embudo. Se abrió lentamente la llave del embudo y se dejó salir la capa de cloroformo cayendo directamente está en el vaso de precipitado. Se cerró la llave una vez toda la capa de cloroformo salió.
- Por último, se transfirió la muestra de cloroformo a una celda y se realizó la lectura.

Así para las 3 muestras a analizar con 4 repeticiones cada una.

Tabla 26

Resultados obtenidos de cadmio en las 4 repeticiones

Cadmio					
Tiempos de muestra	DM1	DM2	DM3	Norma CAPRE	Unidad de medida
1	0.0005	0.0002	<0.0001	0.05	mg/L
2	0.0004	0.0002	<0.0001	0.05	mg/L
3	0.0006	0.0003	<0.0001	0.05	mg/L
4	0.0005	0.0002	<0.0001	0.05	mg/L

10.2.11. Determinación de turbidez

- Se encendió el equipo y en la pantalla se seleccionó el programa de turbidez, se colocó en una celda 10 mL de agua destilada, este fue el blanco.
- Colocado el blanco en el equipo se presionó la tecla CERO.
- Por último, tomando 10 mL de muestra a analizar en otra celda y se procedió a leer. Así para las 3 muestras a analizar con 4 repeticiones cada una.

Tabla 27*Resultados obtenidos de turbidez en las 4 repeticiones*

Tiempos de muestra	Turbidez			NORMA CAPRE	Unidad de medida
	PM1	PM2	PM3		
1	1.18	1.15	0.230	5	UNT
2	1.099	0.98	0.160	5	UNT
3	1.24	1.22	0.360	5	UNT
4	1.17	1.05	0.250	5	UNT

10.2.12. Determinación de hierro total

- Se encendió el equipo y se seleccionó en la pantalla el programa de hierro, se colocó en una celda 10 mL de agua destilada y este fue el blanco.
- Colocado el blanco en el equipo se procedió a presionar la tecla CERO.
- Luego, se tomaron 10 mL de muestra a analizar en otra celda y se adicionó el sobre de reactivo en polvo FerroVer, se tapó y agitó para disolver.
- Por último, colocada la celda con la muestra en el equipo se procedió a presionar la tecla LEER. Así para las 3 muestras a analizar con 4 repeticiones cada una.

Tabla 28*Resultados obtenidos de hierro total en las 4 repeticiones*

Tiempos de muestra	Hierro			NORMA CAPRE	Unidad de medida
	PM1	PM2	PM3		
1	0	0.64	<0.006	0.3	mg/L
2	0	0.04	<0.006	0.3	mg/L
3	0	0	<0.006	0.3	mg/L
4	0	0.1	<0.006	0.3	mg/L

10.2.13. Determinación de conductividad eléctrica

- Primeramente, se calibró el equipo. Y se procedió a leer la muestra a analizar. Luego, se vertió en un Beaker una cierta cantidad de agua a analizar (50 – 100 mL aprox.).
- Por último, se introdujo el termómetro de referencia y la termocupla del equipo en la muestra de agua a temperatura ambiente y se mostró el resultado en $\mu\text{S/cm}$. Así para las 3 muestras a analizar con 4 repeticiones cada una.

Tabla 29*Resultados obtenidos de conductividad eléctrica en las 4 repeticiones*

Conductividad Eléctrica					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	NORMA CAPRE	Unidad de medida
1	626	607	362.00	400	μS/cm
2	627	601	31.5	400	μS/cm
3	626	98	30.1	400	μS/cm
4	626	110	30.0	400	μS/cm

10.2.14. Determinación de nitratos

- Una vez encendido el equipo, se seleccionó el programa de nitrato.
- En una celda vertieron 10 mL de muestra, se añadió el sobre de reactivo en polvo NitraVer 5, ya tapado se agitó durante 1 minuto y se dejó reposar por 5 minutos.
- En otra celda se adicionaron 10 mL de muestra (esta fue el blanco). Se procedió a leerlo.
- Pasados los 5 minutos de la muestra reaccionada, se leyó en el equipo. El resultado fue en mg/L. Así para las 3 muestras a analizar con 4 repeticiones cada una.

Tabla 30*Resultados obtenidos de nitratos en las 4 repeticiones*

Nitratos					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	NORMA CAPRE	Unidad de medida
1	1.6	12.3	0.55	25 - 50	mg/L
2	15	13.3	0.94	25 - 50	mg/L
3	16	15.2	16.86	25 - 50	mg/L
4	15.5	17	1.2	25 - 50	mg/L

10.2.15. Determinación de cloruros

- Primero, se midió el pH de la muestra a analizar. ($7 > \text{pH} < 10$).
- Se tomaron 10 mL de la muestra con ayuda de una probeta y se vertió en un matraz Erlenmeyer.
- Seguidamente, se adicionaron 50 mL de agua destilada al erlenmeyer con los 10 mL de muestra y se procedió a agitar suavemente.
- Se añadieron 5 gotas de indicador cromato potásico al 5% y se agitó suavemente.

- Finalmente, se procedió a titular gota a gota con nitrato de plata. Así para las 3 muestras a analizar con 4 repeticiones cada una.

Tabla 31

Resultados obtenidos de cloruros en las 4 repeticiones

Cloruros					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	NORMA CAPRE	Unidad de medida
1	32.64	34	5.00	25 - 250	mg/L
2	2410	33	6.00	25 - 250	mg/L
3	2680	35	23.00	25 - 250	mg/L
4	2500	34	8.50	25 - 250	mg/L

10.2.16. Determinación de carbonatos

- En un matraz Erlenmeyer, se adicionaron 5 mL de la muestra problema y 30 mL de agua destilada.
- Se añadieron 3 gotas de fenolftaleína.
- Comenzó la valoración con ácido clorhídrico 0.02 N y se agitó suavemente hasta que la muestra pasó de color rosa a incoloro.
- Se anotar los mL gastados (volumen 1). Así para las 3 muestras a analizar con 4 repeticiones cada una.

Para encontrar la concentración carbonato $[meq/L] = \frac{V_1(0.98)(40)}{\text{Volumen de muestra}}$

Tabla 32

Resultados obtenidos de carbonatos en las 4 repeticiones

Carbonatos					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	Norma CAPRE	Unidad de medida
1	0	0	0	3	mg/L
2	0	0	0	3	mg/L
3	0	0	0	3	mg/L
4	0	0	0	3	mg/L

10.2.17. Determinación de color real

- 25 mL de agua destilada (blanco), se colocaron en una celda.
- Se filtraron 10 mL de muestra a analizar. Y colocando los 10 mL de muestra filtrada en un balón de aforo de 100 mL se procedió a aforar con agua destilada. Se tapó y se agitó suavemente.
- Luego, se tomaron 25 mL de la muestra del balón de aforo y colocándola en

una celda. Se procedió a leer, primero el blanco y luego la muestra diluida. Así para las 3 muestras a analizar con 4 repeticiones cada una.

Tabla 33

Resultados obtenidos de color real en las 4 repeticiones

Color real/verdadero					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	NORMA CAPRE	Unidad de medida
1	12	4	<1	15	mg/L
2	14	5	<1	15	mg/L
3	11	3	<1	15	mg/L
4	13	4	<1	15	mg/L

10.2.18. Determinación de magnesio

- Se colocaron en un matraz erlenmeyer 5 mL de muestra a analizar y 30 mL de agua destilada.
- Se añadieron 10 gotas de solución tampón NaOH 1 N, pH 12 y 5 gotas de indicador negro de dicromo.
- Finalmente, se valoró con EDTA 0.01 N hasta que viró de rojo vino a color azul. Y se anotó la cantidad de volumen de EDTA gastado.

Concentración magnesio $[meq/l] = 4 \times (V2 - V1)$

Donde:

V2 = volumen de EDTA gastado en la valoración de la dureza.

V1 = volumen de EDTA gastado en la valoración del calcio.

Tabla 34

Resultados obtenidos de magnesio en las 4 repeticiones

Magnesio					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	NORMA CAPRE	Unidad de medida
1	12	10	0.56	30 - 50	mg/L
2	11	8	0.46	30 - 50	mg/L
3	11.5	9	1.93	30 - 50	mg/L
4	11.2	8.5	0.80	30 - 50	mg/L

10.2.19. Determinación de cobre

- En un erlenmeyer de 250 mL vertieron 10 mL de la muestra a analizar y se diluyó con agua destilada hasta 50 mL.
- Se adicionó un ligero exceso de amonio diluido hasta que la solución se tornó de color azul intenso.
- Seguidamente, añadiendo unas gotas de ácido clorhídrico 3 N hasta la aparición de un color verdoso transparente.
- Luego, se adicionaron 20 mL de yoduro potásico al 10% y 5 mL de ácido acético diluido.
- Se comenzó la valoración con una solución de tiosulfato de sodio 0.1 N hasta que tomó un color amarillo claro.
- Se adicionó unas gotas de crudo de almidón y la solución tomó un color azul oscuro.
- Finalmente, se volvió a valorar hasta una coloración blanca lechosa.

$$\text{Concentracion cobre [g/L]} = \frac{(V \times N \times f) \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}{\text{Volumen muestra mL}} \times 1000$$

Donde:

$V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4}$ = volumen gastado de tiosulfato de sodio

$N_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4}$ = normalidad de la solución de tiosulfato de sodio

f = factor de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

Tabla 35

Resultados obtenidos de cobre en las 4 repeticiones

Arsénico					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	Norma CAPRE	Unidad de medida
1	0.012	0.005	<0.01	0.01	mg/L
2	0.011	0.004	<0.01	0.01	mg/L
3	0.014	0.006	<0.01	0.01	mg/L
4	0.012	0.005	0.00	0.01	mg/L

10.2.20. Determinación de zinc

- Se tomó un volumen adecuado de la muestra a analizar y se vertió en un matraz regular el pH en un rango de 5.28 a 5.32 con HCl o NaOH diluidos.
- Se añadieron 20 mL de la solución extractiva de zinc a la muestra y se hirvió durante 10 minutos y luego se dejó enfriar.
- Luego, se adicionaron 50 mL más de la solución extractiva de zinc y se volvió

- a hervir durante 5 minutos y luego se dejó enfriar.
- Se filtró la solución utilizando papel filtro y un embudo para eliminar cualquier sólido insoluble. Y se recogió el filtrado en un matraz limpio.
- Se añadió una pizca de tiourea y una pizca de ácido ascórbico a la solución filtrada. Luego, adicionando 3 gotas del indicador xilenol se procedió a titular gota a gota con la solución de EDTA hasta que la solución cambió de color a un amarillo.

Tabla 36

Resultados obtenidos de zinc en las 4 repeticiones

Tiempos de muestra	Zinc				Unidad de medida
	PM1	PM2	PM3	NORMA CAPRE	
1	0.5	0.54	0.57	3	mg/L
2	0.5	0.57	0.55	3	mg/L
3	0.5	0.47	0.51	3	mg/L
4	0.5	0.53	0.52	3	mg/L

10.2.21. Determinación de nitritos

- Se pesaron 20 g de gránulos de cadmio metalizado y se tamizaron en una malla de 40-60 μm . Luego, se pesaron 10 g de gránulos de Cadmio tamizado y se lavaron con HCl 1:1 hasta eliminar completamente el HCl con agua desionizada.
- Se añadió la solución cuperizante (EDTA o CuSO_4) en constante agitación suave hasta que el color azul de la disolución hubo desaparecido (indica que el Cu^{2+} ha sido reducido) y se desechó la disolución utilizada. Se repitió el proceso con nuevas porciones de disolución cuperizante (~20 mL cada vez) hasta completar 250 mL en total.
- Se realizó una curva de calibración, para ello se preparó una solución madre de nitrato (1000 $\mu\text{g/mL}$ como N-NO_3^-), y se diluyó para obtener estándares entre 0.1 y 10 $\mu\text{g/mL}$. Se prepararon 5 puntos de calibración.
- Luego, se tomaron 10 mL de muestra y se pasó la muestra por la columna de cadmio cuperizado (agitándola con cadmio activado) para reducir NO_3^- a NO_2^- .
- Se añadió 1 mL del reactivo de Griess, se mezcló y dejó reposar 10 minutos a temperatura ambiente. (Para la preparación del reactivo, se pesaron 1 g de sulfanilamida, 0.5 g de N-1-naftiletilendiamina y se disolvieron en 250 mL de ácido fosfórico al 10 %).
- Se midió la absorbancia a 540 nm.
- Finalmente, se interpoló en la curva de calibración para obtener la concentración de nitrato (como N-NO_3^-).

Tabla 37

Resultados obtenidos de nitritos en las 4 repeticiones

Tiempos de muestra	Nitritos			NORMA CAPRE	Unidad de medida
	PM1	PM2	PM3		
1	0.005	<0.003	<0.003	1	mg/L
2	0.004	<0.003	<0.003	1	mg/L
3	0.006	<0.003	<0.003	1	mg/L
4	0.005	<0.003	<0.003	1	mg/L

10.2.22. Determinación de calcio

Para ello se determinó la dureza magnésica para determinar la concentración de magnesio (Mg^{2+}) en la muestra, para luego calcular el calcio (Ca^{2+}) por diferencia con la dureza total ya obtenida en el procedimiento descrito en punto 10.2.4. Determinación de la Dureza.

- Se midió 100 mL de la muestra de agua en un matraz Erlenmeyer. Se añadieron unas gotas de rojo de metilo y se acidificó con HCl 1 M hasta que la solución viró a rojo.
- Se añadió con la punta de una espátula oxalato sódico para precipitar el calcio como oxalato cálcico. Y se calentó hasta se ebullición suavemente durante unos minutos, manteniendo el color rojo.
- Se dejó enfriar la disolución y se neutralizó con NH_3 1 M hasta que el indicador viró a amarillo. Se dejó reposar 10 minutos y luego se filtró para eliminar el precipitado de oxalato cálcico.
- Luego, se lavó el precipitado con pequeñas porciones de agua destilada y se le añadió el lavado al filtrado. Se añadieron 5 mL de tampón pH 10 y unas gotas de negro de eriocromo T al filtrado.
- Finalmente, se tituló con EDTA 0.01 M hasta el viraje de color (marrón a verde oscuro).

Cálculo del calcio:

$$Dureza\ calcica \left(\frac{mg}{L\ de\ CaCO_3} \right) = Dureza\ total - Dureza\ magnetica$$

Tabla 38*Resultados obtenidos de calcio en las 4 repeticiones*

Calcio					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	Norma CAPRE	Unidad de medida
1	0.6	0.6	2.81	100	mg/L
2	0.2	0	1.84	100	mg/L
3	0.3	0.3	10.90	100	mg/L
4	0.4	18	5.20	100	mg/L

10.2.23. Determinación de plomo

Preparación de la muestra:

- Primeramente, se ajustó el pH (8.5 – 9.5).
- Se tomó 100 mL de muestra a analizar y se le añadieron 10 mL de la solución de citrato-cianuro. Luego, se añadió 10 mL de la solución de ditizona en cloroformo, se agitó el embudo vigorosamente por un minuto aproximadamente, una vez formado el color rojo, se dejó reposar el embudo hasta que la capa de cloroformo (la inferior) se separó completamente de la capa de agua (superior).
- Finalmente, se procedió a leer la capa de cloroformo formada, utilizando una celda.

Importante: se creó primeramente la curva de calibración con una serie de 5 soluciones estándar con concentraciones de plomo (10, 20, 30, 40 y 50 µg/L).

Tabla 39*Resultados obtenidos de plomo en las 4 repeticiones*

Plomo					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	Norma CAPRE	Unidad de medida
1	0.015	0.008	<0.001	0.01	mg/L
2	0.012	0.007	<0.001	0.01	mg/L
3	0.018	0.009	<0.001	0.01	mg/L
4	0.014	0.008	<0.001	0.01	mg/L

10.2.24. Determinación de mercurio

Procedimiento de acuerdo con NORMA MEXICANA NMX-AA-64-198.

- Se tomaron 100 mL de muestra de agua en un matraz Erlenmeyer y se agregó 5 mL de solución de permanganato de potasio (5 g disueltos en 100 mL de agua) y 5 mL de ácido sulfúrico concentrado.

- Se dejó reposar para asegurar la oxidación del mercurio.
- Luego, se agregaron 5 mL de clorhidrato de hidroxilamina (50 g disueltos en 100 mL de agua) para eliminar el exceso de permanganato (el color violeta desapareció).
- Se añadieron 5 mL de solución de bromuro de potasio (40 g en 100 mL de agua) y luego, se incorporaron 10 mL de solución amortiguadora fosfato-carbonato (150 g de fosfato ácido disódico dodecahidratado y 38 g de carbonato de potasio en 1 L de agua).
- Se transfirió la mezcla a un embudo separador donde se agregaron 10 mL de solución de ditizona en cloroformo (6 mg de ditizona en 1 L de cloroformo) y se agitó vigorosamente durante 1 minuto para extraer el complejo ditizonato de mercurio.
- Luego, se separó la fase orgánica (cloroformo). Y se procedió a medir la absorbancia de esta a 490 nm en un espectrofotómetro.

Tabla 40

Resultados obtenidos de mercurio en las 4 repeticiones

Tiempos de muestra	Mercurio			Norma CAPRE	Unidad de medida
	PM1	PM2	PM3		
1	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.001	mg/L
2	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.001	mg/L
3	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.001	mg/L
4	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.001	mg/L

10.2.25. Determinación de arsénico

Para ello se utilizó el método de dietilditiocarbamato de plata descrito por (Muñoz B. et al., 2021) el cual, consiste en la reducción de arsénico orgánico a arsina, utilizando zinc en solución ácida como reductor, esta se absorbe por una solución de dietilditiocarbamato de plata en piridina, en la cual la sal de plata reacciona con la arsina produciendo un complejo rojo con absorción máxima de 535 nm, que puede ser empleada para la determinación espectrofotométrica de arsénico.

- Para ello, primeramente, se pesaron 0.005 g de Dietilditiocarbonato de plata para cada tubo Khan a utilizar, y se agregó 1 ml de piridina a cada tubo.
- Se homogenizó la solución pasando la probeta a un agitador vortex.
- Se añadieron 50 ml de agua destilada en una probeta y se vertieron en un matraz. Luego, se agregaron 5 ml de ácido clorhídrico al matraz y 2 ml de yoduro de potasio.
- Después, se agregaron al matraz 500 microlitros de cloruro estañoso y se mezcló todo el contenido.
- Posteriormente, se añadió 1 ml de la solución de Dietilditiocarbonato de plata a cada uno de los tubos Khan y se incorporó una alícuota del contenido del

matraz a cada tubo Khan.

- En cada tubo Khan, se agregó una cantidad específica de Dietilditiocarbonato de plata disuelto en piridina, y se tapó el tubo con un tapón conectado a un sistema de perfusión.
- Se dejó burbujear la mezcla durante aproximadamente 8 horas.
- Transcurrido el tiempo de reacción, se midió la absorbancia de cada tubo Khan utilizando un espectrofotómetro a 540 nm, calibrado con piridina.
- Las concentraciones de arsénico se calcularon a partir de las absorbancias obtenidas y la curva de calibración correspondiente.

Tabla 41

Resultados obtenidos de arsénico en las 4 repeticiones

Arsénico					
Tiempos de muestra	PM1	PM2	PM3	Norma CAPRE	Unidad de medida
1	0.012	0.005	<0.01	0.01	mg/L
2	0.011	0.004	<0.01	0.01	mg/L
3	0.014	0.006	<0.01	0.01	mg/L
4	0.012	0.005	0.00	0.01	mg/L