



FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
APLICACIÓN DE CLORURO FÉRRICO CON SUAVIZANTES QUÍMICOS PARA
LA REMOCIÓN DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y DUREZA TOTAL EN
AGUAS DEL CANAL SURCO, 2024

Línea de investigación:
Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor

Perez Gonzales, Jean's Christian

Asesor

Sernaque Auccahuasi, Fernando Antonio

ORCID: 0000-0003-1485-5854

Jurado

Naupay Vega, Marlitt Florinda

Mendoza García, José Tomas

Aparicio Ilazaca, Roxana Clara Yaqueli

Lima - Perú

2026

APLICACIÓN DE CLORURO FERRICO CON SUAVIZANTES QUIMICOS PARA LA REMOCIÓN DE SOLIDOS TOTALES DISUELTOS Y DUREZA TOTAL EN AGUAS DEL CANAL SURCO, 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

25%
INDICE DE SIMILITUD

24%
FUENTES DE INTERNET

5%
PUBLICACIONES

7%
TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1 repositorio.unfv.edu.pe 7%
Fuente de Internet

2 hdl.handle.net 3%
Fuente de Internet

3 repositorio.continental.edu.pe 2%
Fuente de Internet

4 eprints.uanl.mx 1%
Fuente de Internet

5 repositorio.unfv.edu.pe:8080 1%
Fuente de Internet

6 Submitted to UNIV DE LAS AMERICAS 1%
Trabajo del estudiante

7 repositorio.umsa.bo 1%
Fuente de Internet

8 repositorio.espam.edu.ec 1%
Fuente de Internet



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

APLICACIÓN DE CLORURO FÉRRICO CON SUAVIZANTES QUÍMICOS PARA LA
REMOCIÓN DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y DUREZA TOTAL EN AGUAS
DEL CANAL SURCO, 2024

Línea de investigación:

Tecnologías para residuos y pasivos ambientales. Biorremediación

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor:

Perez Gonzales, Jean's Christian

Asesor:

Sernaque Auccahuasi, Fernando Antonio

ORCID: 0000-0003-1485-5854

Jurado:

Naupay Vega, Marlitt Florinda

Mendoza García, José Tomas

Aparicio Ilazaca, Roxana Clara Yaqueli

Lima – Perú

2026

ÍNDICE

Resumen.....	7
Abstract.....	8
I. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Descripción y formulación del problema	10
1.1.1 Descripción del problema	10
1.1.2 Formulación del problema	12
1.2 Antecedentes.....	12
1.2.1 Antecedentes internacionales.....	12
1.2.2 Antecedentes nacionales	16
1.3 Objetivos	21
1.3.1 Objetivo general.....	21
1.3.2 Objetivos específicos.....	21
1.4 Justificación.....	21
1.5 Hipótesis.....	23
1.5.1 Hipótesis general	23
1.5.2 Hipótesis específicas	23
II. MARCO TEÓRICO	25
2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación	25
2.1.1 El agua	25
2.1.2 Características químicas del agua.....	25
2.1.3 Características físicas del agua	26
2.1.4 Indicadores de contaminación del agua	26
2.1.5 Sólidos totales	27
2.1.6 Tratamientos de agua	28
2.1.7 Coagulación.....	30
2.1.8 Floculación	30
2.1.9 Mecanismos de coagulación - floculación de contaminantes del agua.....	30
2.1.10 Ensayo de coagulación - floculación	31
2.1.11 Floculantes.....	31
2.1.12 Cloruro férrico.....	32
2.1.13 Dureza del agua	33
2.1.14 Grado de dureza	34
2.1.15 Procesos de ablandamiento de aguas	35
2.1.16 Ablandamiento del agua por precipitación química	35
2.1.17 Dosis requerida para el ablandamiento del agua	36

2.1.18	<i>Ablandadores químicos</i>	37
2.1.19	<i>Precipitación con carbonato de sodio – cal</i>	38
2.1.20	<i>Precipitación con hidróxido de calcio</i>	39
2.1.21	<i>Prueba de jarras</i>	40
2.1.22	<i>Canal Surco</i>	41
2.1.23	<i>Agua de riego</i>	43
2.1.24	<i>Estándares de calidad ambiental para agua</i>	43
2.2	Marco conceptual.....	43
2.3	Marco legal.....	44
2.3.1	<i>Constitución Política del Perú</i>	44
2.3.2	<i>Ley N.º 26842, Ley General de Salud</i>	45
2.3.3	<i>Ley N.º 28611, Ley General del Ambiente</i>	45
2.3.4	<i>Decreto Legislativo N.º 1083</i>	45
2.3.5	<i>Ley N.º 29338, Ley de Recursos Hídricos</i>	45
2.3.6	<i>Decreto Supremo N.º 001-2010-AG, Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos</i> 46	
2.3.7	<i>Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM</i>	46
III.	MÉTODO	47
3.1	Tipo de investigación	47
3.2	Ámbito temporal y espacial.....	47
3.2.1	<i>Ámbito temporal</i>	47
3.2.2	<i>Ámbito espacial</i>	47
3.3	Variables.....	48
3.3.1	<i>Variable independiente</i>	48
3.3.2	<i>Variable dependiente</i>	48
3.4	Población y muestra.....	50
3.4.1	<i>Población</i>	50
3.4.2	<i>Muestra</i>	50
3.5	Instrumentos	50
3.5.1	<i>Técnicas</i>	50
3.5.2	<i>Instrumentos</i>	50
3.5.3	<i>Validación y confiabilidad del instrumento</i>	51
3.5.4	<i>Equipos y materiales</i>	51
3.6	Procedimientos	52
3.6.1	<i>Monitoreo de campo</i>	52
3.6.2	<i>Análisis de laboratorio</i>	53
3.6.3	<i>Ensayos de jar test</i>	54

3.6.4	<i>Análisis final</i>	56
3.7	Análisis de datos	57
3.8	Consideraciones éticas	58
IV.	RESULTADOS.....	59
4.1	Caracterización de la calidad del agua del canal Surco	59
4.2	Estimación de la dosis óptima tratado con cloruro férrico.....	60
4.3	Estimación de la dosis óptima tratado con suavizantes químicos	67
4.4	Determinación de las eficiencias tratadas con cloruro férrico y suavizantes	73
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	79
VI.	CONCLUSIONES.....	82
VII.	RECOMENDACIONES.....	83
VIII.	REFERENCIAS.....	84
IX.	ANEXOS	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Limitaciones de la investigación	23
Tabla 2. Clasificación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales	29
Tabla 3. Clasificación del grado de dureza del agua	34
Tabla 4. Clasificación del grado de dureza del agua	34
Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas de los reactivos suavizantes	37
Tabla 6. Operacionalización de variables de investigación	49
Tabla 7. Caracterización fisicoquímica de agua del canal Surco.....	59
Tabla 8. Dosis óptima y concentraciones residuales de TDS tratadas con FeCl_3 al 0.5%.....	60
Tabla 9. Dosis óptima y concentraciones residuales de TDS tratadas con FeCl_3 al 1.0%.....	61
Tabla 10. Dosis óptima y concentraciones residuales de TDS tratadas con FeCl_3 al 1.5%.....	62
Tabla 11. Dosis óptima y concentraciones residuales de dureza total tratadas con FeCl_3 al 0.5%.....	63
Tabla 12. Dosis óptima y concentraciones residuales de dureza total tratadas con FeCl_3 al 1.0%.....	65
Tabla 13. Dosis óptima y concentraciones residuales de dureza total tratadas con FeCl_3 al 1.5%.....	66
Tabla 14. Dosis óptima y concentraciones residuales de TDS tratadas con $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 %.....	68
Tabla 15. Dosis óptima y concentración residual de dureza total tratadas con $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 %.....	69

Tabla 16. Dosis óptima y concentración residual de TDS tratadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5.0 %.....	71
Tabla 17. Dosis óptima y concentración residual de dureza total tratadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5.0 %.....	72
Tabla 18. Eficiencias obtenidas en la remoción de TDS tratadas con FeCl_3 al 0.5%.....	73
Tabla 19. Eficiencias obtenidas en la remoción de TDS tratadas con FeCl_3 al 1.0%.....	74
Tabla 20. Eficiencias obtenidas en la remoción de TDS tratadas con FeCl_3 al 1.5%.....	74
Tabla 21. Eficiencias obtenidas en la remoción de dureza total tratadas con FeCl_3 al 0.5%.....	75
Tabla 22. Eficiencias obtenidas en la remoción de dureza total tratadas con FeCl_3 al 1.0%.....	75
Tabla 23. Eficiencias obtenidas en la remoción de dureza total tratadas con FeCl_3 al 1.5%.....	76
Tabla 24. Eficiencias obtenidas en la remoción de TDS tratadas con $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 %.....	76
Tabla 25. Eficiencias obtenidas en la remoción de dureza total tratadas con $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 %.....	77
Tabla 26. Eficiencias obtenidas en la remoción de TDS tratadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5.0 %.....	77
Tabla 27. Eficiencias obtenidas en la remoción de dureza total tratadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5.0 %.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del recorrido del Río Surco desde su captación hasta su desembocadura.....	42
Figura 2. Diagrama de flujo de procedimiento de investigación.....	57
Figura 3. Comportamiento de TDS tratada con la dosis de FeCl_3 al 0.5%.....	61
Figura 4. Comportamiento de TDS tratada con la dosis de FeCl_3 al 1.0%.....	62
Figura 5. Comportamiento de TDS tratada con la dosis de FeCl_3 al 1.5%.....	63
Figura 6. Comportamiento de dureza total tratada con la dosis de FeCl_3 al 0.5%.....	64
Figura 7. Comportamiento de dureza total tratada con la dosis de FeCl_3 al 1.0%.....	65
Figura 8. Comportamiento de dureza total tratada con la dosis de FeCl_3 al 1.5%.....	67
Figura 9. Comportamiento de TDS tratada con la dosis de $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 %.....	68
Figura 10. Comportamiento de dureza total tratada con la dosis de $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 %.....	70
Figura 11. Comportamiento de TDS tratada con la dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5.0 %.....	71
Figura 12. Comportamiento de dureza total tratada con la dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5.0 %.....	72

Resumen

Las aguas naturales presentan por lo general ciertas sustancias que le dan características indeseables para algunos procesos generalmente de índole industrial, entre ellas tenemos por ejemplo algunos iones como el Calcio, Magnesio, Hierro, Aluminio, Manganese, Estroncio entre otros como los principales causantes de la dureza de las aguas naturales, es por ello que en la presente investigación se realizó una investigación con el objetivo: Evaluar la aplicación del Cloruro Férrico con suavizantes químicos para la remoción de Sólidos Totales Disueltos (TDS) y Dureza Total en aguas del canal Surco, Lima. El procedimiento aplicado consistió en el uso de la prueba de jarras donde se utilizó el Cloruro Férrico como coagulante en concentraciones de 0.5, 1.0 y 1.5% y como suavizantes el Carbonato de Sodio e Hidróxido de Calcio en concentraciones de 5% en ambos componentes, las dosis aplicadas fueron para todos los casos de 2, 4, 6, 8 y 10 ml. De los resultados obtenidos se concluyó que el Cloruro Férrico al 1.5% y dosis de 6 ml usado como agente floculante previo a los suavizantes, alcanzó una máxima eficiencia de remoción inicial para los TDS y Dureza Total de 45.3 y 25.6% respectivamente, mientras que los agentes suavizantes de Na_2CO_3 e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ambos al 5%, trabajados en forma consecutiva obtuvieron para los TDS y Dureza Total una eficiencia de remoción del 74.3 y 76.5% para el primer suavizante y final de 78.9 y 82.6 % para el segundo suavizante, respectivamente.

Palabras clave: suavizantes químicos, coagulante, sólidos totales disueltos, dureza total.

Abstract

Natural waters usually present certain substances that give it undesirable characteristics for some processes generally of an industrial nature, among them we have for example some ions such as Calcium, Magnesium, Iron, Aluminum, Manganese, Strontium among others as the main causes of the hardness of natural waters, that is why in the present investigation an investigation was carried out with the objective: To evaluate the application of Ferric Chloride with chemical softeners for the removal of Total Dissolved Solids (TDS) and Total Hardness in waters of the Surco canal, Lima. The procedure applied consisted of the use of the jar test where Ferric Chloride was used as a coagulant in concentrations of 0.5, 1.0 and 1.5% and as softeners Sodium Carbonate and Calcium Hydroxide in concentrations of 5% in both components, the doses applied were for all cases of 2, 4, 6, 8 and 10 ml. From the results obtained it was concluded that the 1.5% Ferric Chloride and 6 ml dose used as a flocculating agent prior to the softeners, reached a maximum initial removal efficiency for TDS and Total Hardness of 45.3 and 25.6% respectively, while the softening agents of Na_2CO_3 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ both at 5%, worked consecutively obtained for TDS and Total Hardness a removal efficiency of 74.3 and 76.5% for the first softener and final of 78.9 and 82.6 % for the second softener, respectively.

Keywords: chemical softeners, coagulant, total dissolved solids, total hardness.

I. INTRODUCCIÓN

La dureza del agua es una cualidad indeseable del agua en muchas regiones del mundo. La dureza se puede eliminar mediante diferentes métodos, como el método de intercambio iónico, la ósmosis inversa, la destilación, el proceso de cal y soda, etc. Pero debido al aumento de los costos, la energía y los procesos frenéticos en estos métodos, es esencial encontrar un método alternativo para ablandar el agua (Bindhu et al., 2021).

La dureza del agua es generalmente alta en las aguas subterráneas; esto provoca acciones de incrustaciones en los vasos y problemas relacionados con la salud, como enfermedades cardiovasculares y problemas relacionados con los riñones (Madhusudhan et al., 2023).

A nivel nacional esta situación se refleja al indagar el estado del río Rímac, considerado como el cuerpo de agua que abastece todo Lima Metropolitana, en el cual se han encontrado en estos niveles nocivos de plomo, cobre y arsénico (Gonzales, 2024), así como niveles importantes de Calcio y Magnesio. Ahora, el canal Surco es uno de los canales derivados de este río que en la actualidad no solo ha enfrentado el problema de la contaminación de efluentes sino también la falta de un sistema de mantenimiento adecuado, por lo cual, resulta importante indagar la situación en la cual se encuentra y cómo ciertos elementos podrían reducir concentraciones perjudiciales de químicos (Panamericana, 2024).

Siguiendo esta línea, resulta importante mencionar que en la temática de tratamiento de aguas que elementos tales como el cloruro férrico; reconocido por su versatilidad y los óptimos resultados en el tratamiento de aguas (residuales, industriales y potables), así como los suavizantes químicos; especialmente útiles cuando se pretende reducir las concentraciones de calcio y magnesio en el agua, se han posicionado como componentes que, en esta problemática,

han demostrado por medio de gran cantidad de estudios previos su eficacia (Duque, 2012; Sodimate México, s.f.).

1.1 Descripción y formulación del problema

1.1.1 Descripción del problema

Una de las características indeseables de algunas fuentes de agua superficial y natural es la dureza, la cual puede conllevar a muchos problemas en todo el mundo, incluyendo un aumento de la formación de sarro en las tuberías de agua, calderas, eccema atópico y agua potable de sabor extraño. La dureza en agua natural es causada por minerales o sales disueltas, principalmente compuestos de iones calcio y magnesio. De acuerdo a la Asociación de Calidad del Agua (WQA) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), el agua dura se clasifica en función a la concentración de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} en las aguas, de la siguiente forma: 0–60 ppm como suave; 61–120 ppm como moderadamente duro; 121–180 ppm como duro y más de 180 ppm como muy duro agua. La mayoría de los servicios públicos de agua consideran un nivel de dureza entre 50 y 150 ppm de CaCO_3 como públicamente aceptable (Ahn et al., 2018).

El agua dura es principalmente causada por cationes de calcio y magnesio y en menor proporción de aluminio, hierro y otros cationes. El calcio y el magnesio son los dos cationes principales responsables de la dureza en el agua natural (Agostinho et al., 2012).

La purificación de varios contaminantes en el agua del grifo, del suelo y de los ríos es necesaria para su consumo y para fines industriales. Entre los contaminantes, los minerales del agua dura, como los iones de calcio, magnesio, hierro y manganeso, pueden reaccionar con los aniones del jabón, lo que reduce la eficacia de la limpieza (Park et al., 2007). Los minerales también provocan problemas de incrustaciones y averías graves en las tuberías de las calderas,

los intercambiadores de calor y los aparatos eléctricos, como las lavadoras, los lavavajillas y las planchas de vapor (Gabrielli et al., 2006).

Conocer la dureza del agua es importante al evaluar su uso como doméstico o suministro de agua industrial. El agua dura interfiere con el lavado, limpieza, baño y aseo personal (Padmapriya et al., 2015).

Varios estudios han indicado un vínculo entre las concentraciones de dureza (particularmente el Calcio y Magnesio) y enfermedades cardiovasculares, enfermedad de Alzheimer y eccema atópico (Neri y Johansen, 1978; Sengupta, 2013), sin embargo, el enlace es aún débil, y muchas variables de confusión existen en los estudios (Comstock, 1979).

El ablandamiento con cal y soda para el tratamiento de aguas muy duras se aplica generalmente para uso municipal, como un proceso de tratamiento de agua convencional. Sin embargo, para uso industrial, este tratamiento no se aplica porque, primero requiere de una larga detención tiempo de precipitación de magnesio y calcio (aproximadamente de 4 a 5 horas); segundo, una sobresaturación asociada con un hexahidrato- CaCO_3 . Se puede lograr la formación, lo que lleva a una incrustación severa de los conductos; y tercero una estabilización posterior de los conductos finales (Agostinho et al., 2012).

En este sentido, es importante dar a conocer algunas formas de tratamiento que ayuden a remover los Sólidos Totales Disueltos (TDS) y Dureza Total del agua, a fin de poder utilizarla en diferentes actividades domésticas y/o procesos industriales que requieren de una calidad de agua exenta de iones que causan corrosión u otros problemas asociado a la salud, entre los cuales el Cloruro Férrico como coagulante y los suavizantes como el Hidróxido de Calcio y Carbonato de Sodio pueden asegurarnos una agua de mejor calidad.

1.1.2 Formulación del problema

Problema general.

- ¿Cómo es la aplicación del Cloruro Férrico con suavizantes químicos para la remoción de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco, 2024?

Problemas específicos.

- ¿Cuáles son los niveles de los parámetros fisicoquímicos antes de la remoción de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco?
- ¿Cuál es la dosis óptima de Cloruro Férrico para la remoción inicial de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco?
- ¿Cuáles son las dosis de los suavizantes químicos para la remoción final de los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco?
- ¿Cuál es la eficiencia del Cloruro Férrico y los suavizantes químicos para la remoción final de los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco?

1.2 Antecedentes

1.2.1 Antecedentes internacionales

Fayyaz Shahandashty et al. (2024), en su artículo científico; mencionan que la coagulación química es uno de los métodos más eficaces para el tratamiento de aguas residuales; es así que en su estudio emplearon la coagulación química con coagulantes a base de hierro y aluminio, junto con floculantes de poliacrilamida con cargas positivas, negativas y neutras. Después de aplicar el método de detección de Plackett-Burman, se descubrió que el coagulante de cloruro férrico, el floculante neutro y la duración lenta de la mezcla presentan la mayor eficiencia. El proceso de coagulación química se modeló y optimizó examinando estos factores como parámetros de entrada y la velocidad de sedimentación como resultado. En

condiciones óptimas, se determinó que los valores de coagulante de cloruro férrico, floculante neutro, tiempo de mezcla en modo lento y velocidad de sedimentación fueron 106,3 mg/L, 3,98 mg/L, 29,6 min y 1,10 cm/min, respectivamente. Obteniéndose como resultado los porcentajes de eliminación de contaminantes, incluidos SST, turbidez, TDS, DQO y DBO, los cuales fueron 100%, 100%, 87%, 93% y 81%, respectivamente. Todos los resultados se calcularon con un nivel de confianza superior al 98%, lo que indica un tratamiento eficiente para los parámetros analizados.

Jaramillo (2024), en su investigación planteó evaluar la capacidad de ESPAM MFL para eliminar los sólidos suspendidos del agua residual del hato porcino. Un diseño completamente al azar (DCA) con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones se utilizó las dosis de FeCl_3 y Poliacrilamida (PAM) para el DCA bifactorial y las dosis de hipoclorito de sodio para el DCA unifactorial fueron los factores examinados. Es así como, uno de los hallazgos más importantes hallados en este estudio, fue el hecho de que los tratamientos llevados a cabo con cloruro férrico y PAM cumplieron con las normas ambientales en la etapa de coagulación-floculación con valores de pH de 6 a 9. El tratamiento T3, que contenía 1000 ppm de cloruro férrico y 5 ppm de PAM, fue el más efectivo en reducir la turbidez del 99,5%, el color del 77,2% y el sólido suspendido del 63,7%. Además, al incluir 1 ppm de hipoclorito de sodio durante la etapa de oxidación se logró una reducción en tanto a la turbidez en un 48,5%, los sólidos suspendidos en un 78,8% y el color en un 34,2%, a pesar de que el pH aumentó a niveles alcalinos cercanos a 12.

Mungondori et al. (2021), en su estudio que desarrollaron; compararon la eficiencia de diferentes coagulantes en el tratamiento del agua cruda que alimenta una planta de tratamiento de agua potable; para lo cual utilizaron equipos de prueba de jarras y una serie de parámetros fisicoquímicos, se realizó la investigación para establecer las condiciones óptimas para el cloruro de aluminio (A), el cloruro férrico (B) y el quitosano (C), y su desempeño en

comparación con el sulfato de aluminio (D), que es el coagulante utilizado en la PTAR. Las eficiencias de eliminación de turbidez para los coagulantes individuales estaban en el orden: B (95,7%) > A (94,7%) > C (94,4%), en dosis óptimas de coagulante de 60, 50 y 0,6 mg/L, respectivamente. Los coagulantes lograron altas eficiencias de eliminación de turbidez, sólidos disueltos totales (TDS), absorbancia ultravioleta a 254 nm (UV254) y conductividad en condiciones ácidas. Para los coagulantes duales, hubo un aumento gradual en las eficiencias de eliminación de los parámetros probados al incrementar el pH. Los coagulantes combinados fueron más eficientes en comparación con los coagulantes individuales, y la combinación A/C presentó las mayores eficiencias de eliminación. En general, los coagulantes demostraron ser alternativas adecuadas en función al sulfato de aluminio.

Yadai y Suzuki (2023) mencionan en su estudio que para una desalinización eficiente mediante una membrana de ósmosis inversa (RO) requiere una eliminación previa de las sustancias que causan el bloqueo del agua de mar cruda; es así que realizaron un proceso de pretratamiento para la desalinización, combinando el ablandamiento tradicional con floculación con balasto (SBF) para la eliminación de Ca^{2+} y Mg^{2+} . Una mezcla alcalina de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y Na_2CO_3 fue el agente suavizante más eficiente para la eliminación de Ca^{2+} y Mg^{2+} con una cantidad reducida de lodo generado. Este tratamiento de ablandamiento eliminó simultáneamente los sólidos suspendidos y las bacterias del agua de mar real. La velocidad de sedimentación de los sólidos en suspensión generados mediante el ablandamiento del agua de mar era extremadamente baja. En las condiciones óptimas para desalinizar agua de mar real utilizando un floculante de polímero aniónico y microarena, la velocidad de sedimentación superó los 3,5 cm/s, 833 veces mayor que la del ablandamiento sin floculación con lastre. La cantidad de lodo después de reposar durante 3 minutos fue un 76,5% menor en SBF que en el ablandamiento convencional. El índice de densidad del limo del agua de mar tratada cumplió con el estándar de suministro de agua de las membranas de ósmosis inversa (es decir, <3,0).

Además, el lodo generado por SBF exhibió una propiedad de deshidratación considerablemente mejorada que el lodo obtenido mediante ablandamiento convencional. SBF puede eliminar de manera eficiente y rápida las sustancias causantes de la contaminación y proporciona un nuevo proceso de pretratamiento para la desalinización.

Kausley et al. (2022) mencionan que el ablandamiento con cal, el proceso de carbonato de sodio y la electrocoagulación (EC) se comparan para eliminar la dureza y las sales disueltas (medidas como conductividad) del agua subterránea en este estudio. El proceso de ablandamiento con cal, el proceso de carbonato de sodio y sus combinaciones tienen eficiencias de eliminación de dureza de 70.7, 33.3 y 86.7%, respectivamente, con energía eléctrica requerida por unidad de masa (EEM) de dureza de 0.23, 3.08 y 0.78 kilovatios por kilogramo. Aunque el ablandamiento con cal requiere un EEM bajo, la eliminación de dureza ideal es del 70.7%, por lo que debe combinarse con carbonato de sodio para obtener una eliminación más efectiva. El proceso de carbonato de sodio aumenta la conductividad, mientras que el ablandamiento con cal la reduce en un 40.3%. Se ha descubierto que la EC reduce tanto la dureza como la conductividad (TDS) del agua subterránea; sin embargo, para eliminar la dureza, se requiere un alto valor EEM de 258 kWh/kg. Además, funciona mejor en ambientes alcalinos. Durante el tratamiento EC, el uso de NaOH y Ca(OH)_2 para ajustar el pH ayuda a reducir el valor EEM a 141 y 198 kWh/kg, respectivamente. Aunque el uso de Ca(OH)_2 reduce la EEM en comparación con NaOH, también ayuda a reducir la conductividad en lugar de aumentarla, como sucede con el proceso de tratamiento.

Liu et al. (2020), en su artículo científico plantea como objetivo proporcionar un método con un suavizante químico adecuado para prevenir incrustaciones minerales en desalinización por ósmosis inversa, durante el tratamiento de agua de retorno de gas de esquisto antes de la descarga, especialmente con altas cantidades de Ca, Mg, Ba y Sr. En este estudio, se evaluó el comportamiento de precipitación de Ca^{+2} , Mg^{+2} , Ba^{+2} y Sr^{+2} durante el

ablandamiento químico tradicional para lograr una dosis química óptima. Tanto las pruebas de jarra como la simulación del analizador de corriente OLI revelaron que los principales precipitados fueron CaCO_3 , SrCO_3 y BaSO_4 durante la adición de Na_2CO_3 , sin embargo, el Na_2CO_3 no podía eliminar el Ba^{+2} de manera eficiente a menos que se aplicara una dosis alta, ya que el Ba^{+2} reaccionaría después de la precipitación de Ca^{+2} y Sr^{+2} . La simulación del análisis del sistema indicó que el Ba^{+2} era una preocupación porque formaría una tenaz incrustación de BaSO_4 en las membranas de ósmosis inversa. Finalmente, se propuso el proceso Na_2SO_4 - NaOH - Na_2CO_3 para el ablandamiento químico ya que tiene una alta eficiencia de remoción y un bajo costo químico. Concluyéndose que este estudio presenta un método de ablandamiento químico eficaz que podría servir como una herramienta confiable para el cálculo, lo que finalmente mejoraría el diseño y la operación del tratamiento de agua.

1.2.2 Antecedentes nacionales

Cahuana y Meza (2024) llevaron a cabo una investigación enfocada en el análisis que podrían tener los coagulantes de sulfato de aluminio y cloruro férrico en la erradicación en el parámetro de turbidez en las aguas del río Shullcas, ubicado en Huancayo. Es en ese sentido que los investigadores determinaron que dentro del procedimiento se tendría que considerar la observación experimental; ya que, esta permitió observar el procedimiento de coagulación de coloides y sólidos en suspensión pertenecientes a las muestras recolectadas de este punto específico, cabe resaltar que se empleó cada coagulante de forma independiente. La concentración de coagulante y el tiempo de sedimentación fueron las variables que se modificaron en el plan de experimentos, que se basó en el diseño factorial 2^2 . El sulfato de aluminio tenía concentraciones de 143.29 ppm y 286 ppm. Y el cloruro férrico tiene 166.67 ppm y 333.33 ppm, respectivamente. En ambos casos, la sedimentación tardó entre 10 y 30 minutos. La fracción de remoción del cloruro férrico fue de 0,669 a 0,686 y la del sulfato de aluminio fue de 0,673 a 0,738. De igual manera, otro de los hallazgos obtenidos fue que ambos

coagulantes logran obtener efectos considerables en relación a elementos tales como la concentración y el tiempo de sedimentación, a esto se le añade que se logró observar que el incremento de los coagulantes consigue un aumento significativo de la erradicación del parámetro de turbidez. El último resultado señalado en este estudio fue que al amplificar el tiempo de sedimentación con el coagulante de sulfato de aluminio la fracción correspondiente a remoción decrece mientras que con el otro coagulante esta incrementa. Después de la evaluación de los efectos de ambos coagulantes, se llegó a la conclusión de que los factores de concentración y tiempo de sedimentación tienen un impacto significativo. Además, una mayor concentración de coagulantes amplifica la fracción de erradicación de turbidez. Finalmente, la fracción de remoción del sulfato de aluminio disminuye con el tiempo de sedimentación, mientras que el cloruro férrico aumenta.

Rashuaman (2024) en su estudio planteó como objetivo principal de investigación el realizar una comparación en relación a la eficiencia de tratamiento de erradicación de materia orgánica con coagulantes de *Opuntia ficus-indica* y cloruro férrico en muestras de agua extraídas del río Mantaro. Dentro del procedimiento de este estudio se consideró la toma tres muestras llevadas a cabo en distintos momentos durante el día en esta ubicación, cabe resaltar que estos muestreos se extrajeron de aguas abajo del afluente del río Shulcas hacia el río Mantaro (distancia aproximada de 200 metros). Siguiendo esta línea, otro paso importante dentro de la metodología fue el ensayo de coagulación – floculación a nivel de laboratorio, en el cual se realizaron mediciones pre y post tratamiento de diversos parámetros tales como la temperatura, la conductividad eléctrica, el pH, la turbidez y la calidad de vida. Además, se llevaron a cabo pruebas con coagulantes químicos y naturales en dosis de 10; 20; 30 y 40 (ml/L). Los resultados mostraron un aumento del parámetro conductividad eléctrica de 12.95% para el coagulante cloruro férrico con una dosis de 40 ml/L, que aumentó la conductividad eléctrica inicial de 770 uS/cm a 836 uS/cm, por su parte el coagulante *Opuntia ficusindica*

experimentó una reducción ligera de 2,44% con una dosis de 20 ml/L, que resultó en una conductividad eléctrica final de 684 uS/cm. Además, se registró una proporción de disminución del pH del 43.1% para el coagulante cloruro férrico con una dosis de 40 ml/L, lo que llevó a una disminución del pH inicial de 8 a 4.4. Por otro lado, para el coagulante *Opuntia ficus-indica*, se registró una ligera reducción del 4,6% con una dosis de 20 ml/L, lo que llevó a un pH final de 7.5, que sigue siendo alcalino. La turbidez se redujo mínimamente con la dosis de 20 ml/L del coagulante cloruro férrico, lo que llevó a una disminución de 48.24 NTU a 5.72 NTU. En contraste, con una dosis de 10 ml/L del coagulante *Opuntia ficus-indica*, se logró una reducción de 16.48 NTU. Finalmente, el coagulante cloruro férrico disminuyó la DQO5 desde 95.5 hasta 84.9 mg/L en dosis de 10 a 40 ml/L, por su parte el coagulante *Opuntia ficus-indica* logró un incremento la DQO5 entre 104.2 y 173.5 mg/L en dosis de 10 a 40 ml/L.

García y Zevallos (2021), su investigación que ejecutaron se enfocó en establecer cuáles deberían de ser las condiciones de operación ideales para reducir elementos de contaminación tales como el porcentaje de demanda química de oxígeno (DQO), el porcentaje de turbidez (NTU) y el porcentaje de fósforo total (PT mg/L). Es así que, para poder cumplir con el objetivo de la investigación, estos autores determinaron el emplear una metodología de superficie de respuesta (RSM), que optimizó el procedimiento de coagulación-floculación utilizando cloruro férrico como coagulante y fosfato diácido de potasio como floculante. Se utilizaron experimentos con jarras para estudiar los efectos de cuatro variables independientes: la dosis de cloruro férrico (500-700 mg/L), la dosis de fosfato (700-900 mg/L), la velocidad de agitación rápida (250-320 rpm) y la velocidad de agitación lenta (90-100 rpm); los efectos se expresaron en modelos estadísticos donde se obtuvieron valores R^2 de 0,61, 0,66 y 0,67 para el porcentaje de calidad de vida (DQO), la turbidez y el fósforo total, respectivamente. Siguiendo esta línea, se logró un hallazgo relevante en el cual, gracias al procedimiento de optimización se lograron establecer las condiciones que lograrían ser las mejores en tanto a

erradicación de contaminantes, en este caso fueron las siguientes: 700 mg/L de cloruro férrico, 900 mg/L de fosfato y 320 rpm de velocidad rápida y 100 rpm, lo que resultó en una disminución del 50.75% de DQO, 83.47% de turbidez y 44.08% de fósforo total presentando una deseabilidad de 0.7.

Huamanta y Sánchez (2021) en su investigación plantearon el llevar a cabo una evaluación sobre la eficiencia del Tripolifosfato de Sodio en la disminución del elemento de dureza correspondiente al agua potable de la localidad de Quiden. Siguiendo esta línea, la metodología se encasilló en la tipología experimental cuantitativa, en la cual la población fue el agua potable de esta comunidad y se destacó por dos muestreos, la primera se llevó a cabo con el fin de establecer las condiciones naturales mientras que la segunda fue para poder aplicar el compuesto inorgánico para conocer la eficiencia que este podría tener en la disminución de la dureza. Además, los instrumentos que se emplearon en este estudio fueron las fichas de registro, estas sirvieron para poder recolectar la información de campo y otros datos que podrían ser obtenidos mediante la ejecución. El análisis inicial reveló un pH de 7.27, una turbidez de 0.95 NTU y un total de sólidos suspendidos de 291.5 mg/L, la dureza obtenida fue de 507.2 mg/L, pero con una dosis de 20 gramos de tripolifosfato de sodio se redujo hasta 398.20 mg/L, con una dosis de 25 gramos disminuyó hasta 365.83 mg/L y con una dosis de 30 gramos disminuyó hasta 326.20 mg/L de CaCO_3 . La conclusión a la cual estos autores llegaron fue que el tratamiento empleado en este estudio fue efectivo para optimizar los valores de dureza y poder establecerlos dentro de los límites adecuados para que fuera adecuado para el consumo humano.

Solis (2022), decidió llevar a cabo un estudio para reducir la dureza en términos de carbonato de calcio por medio de un filtro ablandador multimedia, la metodología que el autor decidió aplicar se encontró dentro de la tipología aplicada, de nivel explicativo y con un diseño experimental. Dentro del procedimiento empleado se llevaron a cabo varios ensayos con el

objetivo de así poder regular el flujo de agua y el espesor de las capas de material filtrante constituido por materiales tales como resinas catiónicas, carbón activado, zeolita, arena fina y gruesa. Los hallazgos primordiales que pudieron ser encontrados por medio de este estudio fueron los siguientes: la dureza del agua logró una disminución entre 647 mg/L hasta 127 mg/L, y, las concentraciones de las sales de cobre, hierro y manganeso, los sulfatos y cloruros atravesaron una reducción significativa. El filtro utilizado también redujo la cantidad de microbios en el agua al eliminar completamente los coliformes y los coliformes.

Huallpa (2017), en su investigación planteó como objetivo disminuir la dureza de las aguas subterráneas de la localidad Urb. Huerta de Nievería en Chosica, al emplear tratamientos químicos para lograr que estas puedan ser consumidas por el ser humano. Es por eso que este autor decidió analizar las propiedades fisicoquímicas (alcalinidad-bicarbonato, alcalinidad carbonato, conductividad, dureza cálcica, dureza magnésica, DBO, DQO y nitratos) y microbiológicas (*escherichia coli* y total coliformes) con el objetivo de establecer en un primer momento la calidad del efluente con el cual se pretendía trabajar. Posteriormente el resultado de este análisis permitió establecer una elevada dureza cálcica de 665,8mg/L, motivo por el cual se decidió utilizar componentes químicos que fueron cal, tripolifosfato de sodio, soda cáustica y cal sodada para su erradicación. El tratamiento de erradicación de este compuesto se llevó a cabo en el equipo jar test, es importante señalar que previo a esto se decidió considerar los siguientes parámetros: velocidad de 80 rpm, tiempo de mezcla de 20 minutos. De igual manera, se simularon las mezclas con las dosificaciones de 0,11g, 0,22g y 0,33g de los compuestos químicos, seguidamente, se permitió sedimentar las muestras por 40 minutos. Luego de realizar las pruebas experimentales en el laboratorio se pudo comparar los resultados de los cuatro tratamientos, donde se resaltó que el compuesto tripolifosfato de sodio logró mayor reducción de dureza y su comportamiento promedio fue de la siguiente manera: en la dosificación de 0,11g el pH manifestó neutralidad por su valor de 7 y dureza obtenida de

494.6ppm; para la dosificación de 0,22g el pH fue de 6.91 y la dureza obtenida de 482ppm y por último en la dosificación de 0,33g se obtuvo 6.83 de pH y dureza obtenida 387.3ppm. La conclusión principal del estudio fue que tratamiento óptimo fue con el tripolifosfato de sodio con una dosificación optima de 0,22g, puesto que logró una erradicación amplia de dureza por $CaCO_3$ y logro mantener óptimas condiciones de pH en el agua tratada.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Evaluar la aplicación del Cloruro Férrico con suavizantes químicos para la remoción de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco, Lima 2024.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Determinar los niveles de los parámetros fisicoquímicos antes de la remoción de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco.
- Estimar la dosis óptima de Cloruro Férrico para la remoción inicial de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco.
- Estimar las dosis óptimas de los suavizantes químicos para la remoción final de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco.
- Determinar la eficiencia del Cloruro Férrico y los suavizantes químicos para la remoción final de los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco

1.4 Justificación

Desde el enfoque **Teórico**, la presente investigación se encuentra justificada por medio del aporte de nuevos conocimientos basados en el uso de un coagulante y suavizantes químicos como Cloruro Férrico, Hidróxido de Calcio y Carbonato de Sodio, quienes en concentraciones óptimas pueden ser utilizados para remover elementos causantes de la Dureza del agua como los iones Calcio y Magnesio principalmente. En la precipitación química, los iones que causan

la dureza, pasan o se convierten a formas insolubles, es así como el Calcio y el Magnesio se vuelven menos solubles a medida que el pH se va incrementando.

Desde el enfoque **práctico**, la presente investigación se encuentra justificada en la necesidad de contar con sustancias que remuevan los iones causantes de incrustaciones los cuales ocasionan problemas de corrosión en las tuberías, en depósitos metálicos, calderos, etc., en este sentido se podrá obtener una calidad de agua cuyas características finales hagan posible su uso en determinadas aplicaciones y actividades donde la calidad del agua esté libre de la presencia de sustancias corrosivas.

Desde el enfoque **Metodológico**, la presente investigación se encuentra justificada en la aplicación de la prueba de prueba de jarras (Jar Test), el cual permitirá obtener resultados creíbles sustentado en métodos estandarizados cuya aplicación se basa en ensayos variados y repetitivos a fin de asegurar su confiabilidad. Su simplicidad y aplicación permite usar diferentes concentraciones y dosis de reactivos en muestras contenidas en jarras lo cual permite trabajarlas en serie y obtener resultados óptimos de acuerdo al tipo de sustancia utilizada.

Finalmente, desde el enfoque **social**, la presente investigación se encuentra justificada en la necesidad de contar con una calidad de agua óptima para el uso de diferentes actividades donde la presencia de elementos iónicos en altas concentraciones es removida adecuadamente. Los conocimientos generados en la presente investigación son de importancia por la disminución de elementos causantes de enfermedades en el hombre como cálculos renales o vesiculares en caso se requiera potabilizarlo para el consumo humano. Un agua libre de Dureza será importante para diferentes usos, el cual incluye la potabilización o aplicaciones en actividades de tipo industrial.

Tabla 1*Limitaciones de la investigación*

Ítem	Limitaciones
1	La toma de muestra de las aguas del canal Surco se realizó en una zona poco accesible, mostrándose complicaciones para su recolección.
2	Debido a que tramos clave del Canal Surco se ubican en áreas privadas o de acceso restringido, el procedimiento de muestreo requirió la gestión obligatoria de autorizaciones formales y permisos administrativos ante la municipalidad correspondiente. Esta dependencia institucional externa limitó la inmediatez de la recolección de las muestras hídricas, condicionando los tiempos estipulados en el cronograma de la investigación.
3	Las muestras de aguas presentan cierto grado de turbiedad, complicando el tratamiento aplicado, por lo que se tuvo que dejar un tiempo prudente de sedimentación.
4	El agua del canal Surco presenta niveles medios de materia orgánica por lo que se tiene que trabajar inmediatamente para evitar su descomposición que puedan causar interferencias en el tratamiento.

1.5 Hipótesis**1.5.1 Hipótesis general**

La aplicación de Cloruro Férrico con suavizantes químicos remueve los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco, Lima 2024.

1.5.2 Hipótesis específicas

- Los niveles de los parámetros fisicoquímicas se encuentran de fuera de los Estándares de Calidad Ambiental en las aguas del canal Surco.
- El Cloruro Férrico presenta una dosis óptima capaz de remover los Sólidos Totales Disueltos y la Dureza Total en aguas del canal Surco.

- Los suavizantes químicos presentan una dosis óptima capaz de remover los Sólidos Totales Disueltos y la Dureza Total en aguas del canal Surco.
- El Cloruro Férrico y los suavizantes químicos son eficientes para remover los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación

2.1.1 *El agua*

Como ya se es conocido, este es el cuerpo que, por su composición química, se encuentra estructurado por la combinación de un volumen de oxígeno y dos de hidrógeno, dentro de sus características básicas se encuentran el hecho de ser líquido inodoro e insípido, disuelve diversas sustancias, logra solidificarse al estar expuesta al frío, logra evaporarse al estar expuesta al calor y, algunas de las formas en las cuales puede ser hallada es en la lluvia, las fuentes, los ríos y los mares. El agua existente se presenta en estado sólido, líquido y gaseoso, mientras que la nomenclatura en esos estados para este elemento es hielo, agua y vapor respectivamente.

Así mismo, este elemento en su forma natural es una solución que presenta diferentes compuestos que se van añadiendo al agua conforme atraviesa los procesos del ciclo hidrológico, cabe resaltar que cada uno de estos les brindan cualidades diferentes a las aguas naturales que dependerán de variables tales como la composición de los suelos, a su ubicación y a los procesos físicos y químicos que se realizan durante su paso. El agua presenta características variables que la hacen diferentes de acuerdo con el sitio y al proceso de donde provenga: dentro de estas tenemos las Características Físicas, Características Químicas y características Biológicas (Riccio, 2015, p. 28).

2.1.2 *Características químicas del agua*

Las características químicas de las aguas involucran la materia orgánica, la medición del contenido orgánico, la materia inorgánica, y los gases presentes en el agua. El hecho de que la medición del contenido en materia orgánica se realice por separado viene justificado por su importancia en la gestión de la calidad del agua y en el diseño de las instalaciones de tratamiento de aguas (Poma y Quispe, 2016, p. 15).

- ❖ **Materia orgánica:** casi el 75% de los sólidos en suspensión y el 40% de los sólidos filtrables de un agua de concentración media son de naturaleza orgánica. Son sólidos que provienen de los reinos animal y vegetal, así como de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos.
- ❖ Los compuestos orgánicos están formados normalmente por combinaciones de C, H y O, con la presencia en ocasiones de N. También puede encontrarse S, P o Fe. Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua son las proteínas (40% - 60%), hidratos de carbono (25%-50%), y grasas y aceites (10%).
- ❖ **Materia inorgánica:** Son diversos los componentes inorgánicos de las aguas importantes para determinar la calidad del agua. La concentración de esta incrementa, por un lado, por medio del contacto en el cual se someten estas aguas con formaciones geológicas como por ejemplo las aguas residuales, y, por otro lado, debido a que al someterse al procedimiento natural de evaporación se elimina parte del agua superficial y deja las sustancias inorgánicas en el agua (Poma y Quispe, 2016).

2.1.3 Características físicas del agua

Las características físicas más relevantes son el contenido total de sólidos, término que abarca la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características físicas importantes son: el olor, la temperatura, la densidad, el color, la turbiedad, dureza (Poma y Quispe, 2016, p. 16).

2.1.4 Indicadores de contaminación del agua

La calidad del agua está en función al uso o actividad a que se le quiere asignar, por lo cual no es posible poder establecer que esta puede estar categorizada como “buena” o “mala”, ello se debe a que acorde a la actividad se establecerán distintos parámetros y/o características que esta debe obtener para poder ser considerada como adecuada; es así como, es importante mencionar que para llevar a cabo esta evaluación se debe considerar la aplicación del agua en

base a su calidad por medio de parámetros físicos, químicos o biológicos (Poma y Quispe, 2016).

A estos parámetros se les denomina indicadores de calidad del agua, y son considerados los siguientes:

- ❖ pH
- ❖ Temperatura
- ❖ Conductividad
- ❖ DBO
- ❖ Contenido de Sólidos
- ❖ Turbiedad
- ❖ Alcalinidad
- ❖ Dureza
- ❖ Cloruro
- ❖ Nitritos
- ❖ Metales Pesados
- ❖ Organismos Patógenos

2.1.5 Sólidos totales

Estos son los residuos que quedan después de someter al procedimiento de evaporación a una muestra de agua a 103°C - 105°C, usualmente cuando estos se encuentran en concentraciones altas provocan lo denominado turbiedad en los efluentes. Además, este término engloba los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos totales, los sólidos disueltos totales y los coloidales, cuya diferencia principal se encuentra en el tamaño de la partícula siendo así los primeros los de mayor diámetro ($>10\ \mu\text{m}$) y los segundos los de menor diámetro ($<0.001\ \mu\text{m}$) (Jaramillo, 2024).

2.1.6 Tratamientos de agua

El tratamiento de aguas es la forma más antigua que el ser humano realiza para la eliminación de los residuos y de este modo mejorar la calidad de esta en función al olor, color, sabor y apariencia. Antiguamente el agua se trataba con métodos muy sencillos como hirviéndola, exponiéndola al sol, sedimentándola o filtrándola a través de arena o grava para purificarla; sin embargo, actualmente las técnicas para el tratamiento de aguas residuales y de abastecimiento para consumo humano o riego se dan mediante una serie de procesos físicos, químicos o biológicos.

- ❖ Tratamientos Físicos: son los tratamientos que no dan lugar a sustancias nuevas, sino que concentran los contaminantes al evaporar el agua o filtran los sólidos de tamaño considerable. Así tenemos los siguientes tratamientos:

- Filtración
- Adsorción
- Aireación
- Floculación
- Clarificación o sedimentación

- ❖ Tratamientos químicos: con este tratamiento se originan como resultado nuevas sustancias, dentro de ellos tenemos:

- Coagulación
- Desinfección
- Ablandamiento
- Oxidación

- ❖ Tratamientos biológicos: en este tratamiento se emplean organismos vivos para ocasionar cambios químicos:

- Digestión aerobia

- Digestión anaerobia

Estos tratamientos se desarrollan en lo que se conoce como planta de tratamiento, cuyo objetivo es acondicionar el agua para un determinado fin y sea de consumo humano, bebida de animales o riego (Chávez, 2021).

Por otro lado Abad (2023) menciona que las plantas de tratamiento de agua son necesarias para eliminar, reducir o concentrar los contaminantes existentes en el agua residual, con el objetivo de hacer cumplir la normativa actual de descarga y poder reutilizar el agua tratada, manteniendo la estabilidad del medio ambiente y evitando futuros problemas sanitarios. Siguiendo esta línea, este autor señala que, al someter a los efluentes a este procedimiento se logra una transformación que permitirá que las aguas estén en condiciones óptimas para poder ser utilizadas, aunque el tratamiento a utilizar emplear deberá ser determinado en base a características tales como el origen del agua y la fuente, el flujo, las características (físicas, químicas y biológicas) y el destino o fin de las aguas.

Tabla 2

Clasificación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales

Operaciones Físicas	Operaciones Químicas	Operaciones Biológicas
Desbaste	Coagulación	Lodos Activados
Tamizado	Precipitación Química	Filtros Percoladores
Desarenado	Desinfección	Biodiscos
Dilaceración	Neutralización	Lagunas Aireadas
Desengrasado	Intercambio Iónico	Lagunas de estabilización
Flotación	Adsorción	Reactores Anaerobios
Filtración	Procesos de membranas	
Homogenización		
Floculación		

Nota. Adaptado de Evaluación microbiológica del canal Huatica y propuesta de tratamiento con fines de riego en áreas recreativas del distrito de Magdalena del Mar, 2021, por Y. Abad, 2023, Repositorio Institucional UNFV.

2.1.7 Coagulación

La coagulación es un proceso de inestabilización e interacciones químicas a nivel de partículas en suspensión coloidal concurrentes en el agua. Estas interacciones alteran la carga eléctrica de las partículas suspendidas y las hacen aglutinarse, lo que requiere más sustancias coagulantes y más energía. Además, la coagulación es el método más efectivo, pero requiere más tiempo y, por lo tanto, puede resultar más costosa si no se realiza en condiciones adecuadas. Debido a que elimina una mayor proporción de elementos naturales y de masa de materia, esto es similar a la técnica general. A diferencia de los demás métodos, los que se anulan a un bajo costo (Rashuaman, 2024, p. 36).

2.1.8 Floculación

La floculación es la agregación de partículas inestables en la que las partículas se agrupan por su carga en los flóculos más grandes. Después de ser desestabilizadas, estas partículas alcanzan su peso ideal para sedimentar rápidamente bajo la influencia de la gravedad. Los polímeros lineales sintéticos de alta masa molecular, hidrosolubles y eficaces en concentraciones bajas, establecen enlaces o conexiones entre flóculos, son los floculantes más utilizados en la actualidad (Rashuaman, 2024, p. 37).

2.1.9 Mecanismos de coagulación - floculación de contaminantes del agua

El procedimiento de coagulación-floculación incluye las siguientes etapas para el tratamiento de agua:

- ❖ Desestabilización de partículas contaminantes mediante la actividad de los reactivos químicos.
- ❖ Conglomeración de las partículas previamente desestabilizadas en el proceso anterior.
- ❖ Sedimentación de los flóculos formados por acción de la gravedad.

Cabe resaltar lo siguiente de cada etapa de este procedimiento: la desestabilización de las partículas contaminantes se obtiene como resultado de la erradicación de las fuerzas de repulsión, la conglomeración se lleva a cabo en condiciones determinadas por las fuerzas de atracción derivadas de la acción del floculante y la sedimentación se realiza cuando las partículas toman un tamaño adecuado que puede ser separado por acción de la gravedad (Jaramillo, 2024).

2.1.10 Ensayo de coagulación - floculación

El ensayo de coagulación-floculación a nivel de laboratorio es una técnica destinada a simular el proceso de tratamiento de agua realizado en una instalación. Permite una evaluación rápida y a gran escala de los efectos de varios agentes de floculación. Además, la velocidad y el tiempo de mezclado influyen en el proceso de clarificación. Además, se utilizan para establecer la cantidad ideal de coagulante porque facilita el correcto desarrollo del proceso de coagulación durante el tratamiento del agua. Después de aplicar los coagulantes, se determina la proporción porcentual de eliminación de la materia orgánica, lo que facilita medir el rendimiento del proceso de coagulación al eliminar la materia orgánica en comparación con los datos iniciales (Rashuaman, 2024, p. 38).

2.1.11 Floculantes

Los floculantes son compuestos químicos que provocan la floculación, que es la desestabilización de partículas suspendidas en agua cuya carga iónica generalmente es negativa. Los floculantes permiten la unión de partículas sólidas suspendidas en agua cruda o

residual al neutralizar las cargas electrostáticas de los compuestos en disolución. Esto reduce las fuerzas de repulsión entre ellos y crea flóculos más grandes que se pueden eliminar fácilmente, lo que reduce la turbidez y el color. Este proceso elimina elementos como sólidos suspendidos, partículas coloidales y sustancias disueltas (Rojas, 2022).

2.1.12 Cloruro férrico

Se emplea en los tratamientos de agua, gracias a su idoneidad de reaccionar en el agua a una solución corrosiva y ácida. Su gran poder de floculación le permite consolidarse como un coagulante muy eficiente en el tratamiento del agua potable y de efluentes sanitarios e industriales, y su facilidad para coagular en un amplio rango de pH lo convierte en un insumo muy útil a diferencia de otros productos químicos empleados para los mismos fines (Jaramillo, 2024, p. 14).

El cloruro férrico se utiliza como coagulantes que producto de la hidrólisis, forma un hidróxido de hierro ligeramente soluble, las formaciones de este hidróxido son captadas por impurezas inorgánicas y orgánicas para formar copos sueltos (Cahuana y Meza, 2024).

Por otro lado, Rashuaman (2024), menciona que el cloruro férrico es una sustancia química que se utiliza comercialmente para identificar compuestos de metales y halógenos cuyo compuesto se expresa mediante FeCl_3 . Se encuentra en algunas aberturas de gases volcánicos, la molisita es un mineral inusual en su estado original. La solución al 40 % de cloruro férrico es un agente coagulante utilizado para purificar las aguas residuales y normalmente se vende en granel. La solución alcohólica se conoce como solución férrica porque, debido a su naturaleza covalente, se disuelve en diluyentes orgánicos. El cloruro férrico se descompone por agua y libera calor al disolverse en el agua. Los resultados incluyen un pH de 4.42, humectación de 90%, porcentaje de calcio de 0,27, porcentaje de hierro de 32.55, flavonoides de 10,16 mg/g y saponinas de 0,7 mg/g. Se produce un líquido ácido y corrosiva

de color marrón, que se usa como floculante en el tratamiento de líquidos críticos y en el sector electrónico para grabar químicamente placas de circuito impreso.

2.1.13 Dureza del agua

La dureza del agua es producida por la presencia de iones metálicos divalentes que pueden ser calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), estroncio (Sr^{2+}), hierro (Fe^{2+}) y aniones como bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos y silicatos. La dureza se expresa como una cantidad de CaCO_3 debido a la variedad de compuestos involucrados.

La dureza puede ser temporal (carbonatada) o permanente (no carbonatada). En el primer ejemplo, el agua puede contener bicarbonato de calcio y magnesio, hierro o magnesio. La dureza temporal se caracteriza porque precipita a altas temperaturas, lo que equivale a la alcalinidad, y su eliminación se logra mediante la ebullición, que consiste en que el bicarbonato se precipita desprendiendo dióxido de carbono y disminuyendo el valor del pH por las formaciones de ácido carbónico, como se muestra en las siguientes expresiones (Luján, 2015, p. 10).



Las aguas que se caracterizan por presentar la mayor cantidad de bicarbonato de calcio y magnesio son las más duras y desafiantes para la operación de equipos. Este bicarbonato es como la principal forma de alcalinidad y, en casos específicos, es equivalente a la dureza carbonatada y puede producir incrustaciones (Luján, 2015).

En este mismo sentido Baldeón (2016) menciona que la dureza del agua se expresa normalmente como cantidad equivalente de carbonato de calcio (aunque propiamente esta sal no se encuentre en el agua) y se calcula, genéricamente, a partir de la suma de las concentraciones de calcio y magnesio existentes (miligramos) por cada litro de agua; que puede

expresarse en concentración de CaCO_3 . La dureza del agua mide la concentración de minerales disueltos, en particular sales de calcio y de magnesio (aunque otros como el hierro, el estroncio y el manganeso también influyen en su endurecimiento, en menor medida (p. 26).

Tabla 3

Clasificación del grado de dureza del agua

Característica	Concentración (mg/l)
Blanda	0 – 60
Moderadamente dura	61 – 120
Dura	121 – 180
Muy Dura	>180

Nota. Adaptado de Tratamiento de la dureza de las aguas utilizando un filtro con espesor variable de zeolita-2019 (p. 13), por J. Chávez, 2021, Repositorio UNC.

Tabla 4

Clasificación del grado de dureza del agua

Característica	Concentración (mg/l)
Blanda	0 – 75
Moderadamente dura	75 – 150
Dura	150 – 300
Muy Dura	>300

Nota. Adaptado de Tratamiento de la dureza de las aguas utilizando un filtro con espesor variable de zeolita-2019 (p. 12), por J. Chávez, 2021, Repositorio UNC.

2.1.14 Grado de dureza

Pratap (2022) menciona que la unidad en la que se suele expresar la dureza se conoce como grado de dureza. El equivalente de carbonato de calcio (CaCO_3) se utiliza para expresar el grado de dureza porque el CaCO_3 tiene un peso molecular de 100 y precipita fácilmente (p. 4).

El grado de dureza se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Equivalente de CaCO}_3 = \frac{[\text{Fuerza de la sustancia que produce Dureza (mg/L)}] \times 100}{[\text{Equivalente químico de la sustancia productora de dureza}] \times 2}$$

2.1.15 Procesos de ablandamiento de aguas

El tratamiento para la erradicación de la dureza del agua necesita una serie de métodos avanzados en los cuales se emplean diversos procesos dentro de los cuales se tienen: los procesos de floculación, prefiltración, ozonación avanzada, filtración fina con arena, filtración con carbón activado granular y desinfección secundaria con Cl₂ (Bibiano, 2009, p. 40).

Para realizar el ablandamiento del agua existe una serie de actividades que pueden seleccionarse según sea el objetivo al cual se destinará el efluente a tratar. Estos objetivos conllevan a usar diversos tratamientos especializados que pueden incluir a las metodologías físicas, como, por ejemplo, mediante procesos de adsorción y membranas; metodologías químicas, como, por ejemplo, la precipitación, metodologías fisicoquímicas, como la aireación y el intercambio iónico (Bibiano, 2009).

En este mismo sentido Cifuentes (2007) menciona que los procesos donde se necesita el ablandamiento de agua se pueden emplea cualquiera de estas 5 técnicas donde se disminuye la concentración de los minerales, estas técnicas son:

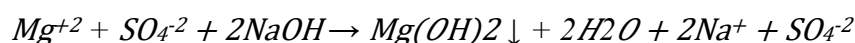
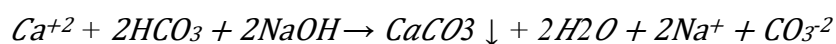
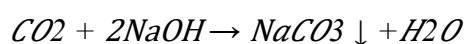
- ❖ Evaporación
- ❖ Diálisis
- ❖ Precipitación
- ❖ Intercambio iónico y
- ❖ Secuestación de iones

2.1.16 Ablandamiento del agua por precipitación química

Este procedimiento tiene como objetivo principal la reducción los niveles de calcio y magnesio por medio de la realización de reacciones que lograrán establecer la formación de

compuestos no solubles de los iones que son principalmente responsables de la dureza. Es importante señalar que esto se puede lograr agregando uno de los siguientes reactivos: hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de calcio (CaOH)₂ y/o carbonato de sodio (Na₂CO₃).

Este proceso, cuando es realizado con hidróxido de sodio, se caracteriza por ser rápido y la cantidad de lodo producido es proporcional al contenido de dureza del agua. Además, la precipitación química de calcio y magnesio con NaOH suele llevarse a cabo en las reacciones químicas que se ilustran a continuación (Luján, 2015).



El proceso incluye el mezclado rápido, la coagulación floculación, la sedimentación, la recarbonatación, la segunda sedimentación y la filtración. En este proceso, si se cambia el valor de pH con ácido mineral en lugar de dióxido de carbono, se pueden evitar realizar los procedimientos de recarbonatación y sedimentación secundaria.

Los iones de calcio pueden ser erradicados óptimamente a un pH de 10.3, mientras que los iones de magnesio deben precipitarse a un pH de 12. La precipitación química con este reactivo se selecciona porque estas dos condiciones se obtienen fácilmente agregando hidróxido de sodio (Luján, 2015, p. 13).

2.1.17 Dosis requerida para el ablandamiento del agua

Para calcular las dosis del reactivo necesario para el proceso de suavización, primero se debe determinar la dureza total del agua, la dureza de calcio y la alcalinidad total. De esta manera, se podrán determinar las diferentes especies iónicas presentes en el agua. El cálculo

estequiométrico para cada una de las reacciones mencionadas anteriormente se realiza en función de esto; sin embargo, es conveniente realizar pruebas de jarras en el laboratorio para especificar las dosis más adecuadas, ya que en ocasiones existen otras especies iónicas o en suspensión que interfieren durante la precipitación (Martínez, 2003).

2.1.18 *Ablandadores químicos*

El ablandamiento químico consiste en agregar sustancias al agua que reaccionan con los iones calcio y magnesio, transformándolos en compuestos insolubles, que son separados del agua por procedimientos físicos convencionales (decantación y filtración).

Existen varios procedimientos para realizar el ablandamiento del agua:

- ❖ Con cal.
- ❖ Con carbonato sódico y cal.
- ❖ Con sosa cáustica (hidróxido sódico) (Moreira-Romero, 2016)

Tabla 5

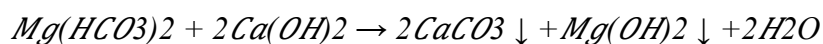
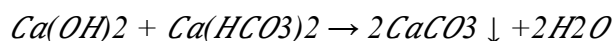
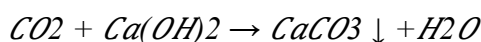
Propiedades fisicoquímicas de los reactivos suavizantes

Propiedad		Reactivos suavizantes	
Nomenclatura	Cloruro Férrico	Carbonato de Sodio	Hidróxido de Calcio
Estado Físico	Cristales Higroscópicos	Sólido cristalino en forma de polvo	Sólido en forma de polvo blanco
Formula Química	FeCl ₃	Na ₂ (CO ₃)	Ca(OH) ₂
Peso Molecular	162.2 g/mol	106.0 g/mol	74.1 g/mol
Punto de Fusión	37°C (Anidro)	851°C	580°C (Descompos.)
Densidad	2.9 g/cm ³	2.5 g/cm ³	2.21 g/cm ³
Solubilidad	92 g/100 ml a 20°C	22 a 30 g/100 ml a 20°C	1.7 g/1000 ml a 20°C
Naturaleza Acida	Muy fuerte ácido de Lewis	Reacción violenta con ácidos.	Genera soluciones fuertes alcalinas.
Higroscopicidad	Delicuescente	Altamente higroscopico	Baja higroscopicidad

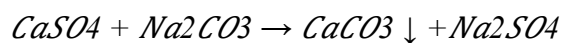
Hidrólisis	Hidrolisis parcial	Hidrolisis completa	No experimenta hidrólisis
Reactividad	Incompatible y corrosivo con metales alcalinos	Compuesto químicamente estable.	Compuesto versátil y reactivo.

2.1.19 Precipitación con carbonato de sodio – cal

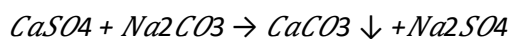
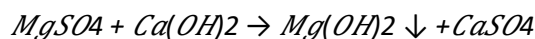
La cal es un compuesto que puede disminuir la dureza carbonatada del agua; sin embargo, no logra tener este efecto en cuanto a la dureza no carbonatada. Para llevar a cabo la remoción de esta última es necesario agregar carbonato de sodio, esto último se refleja en las siguientes reacciones que explican los pasos en el ablandamiento con carbonato de sodio - cal, los carbonatos que causan la dureza pueden ser precipitados como carbonatos de calcio o hidróxido de magnesio con la adición de hidróxido de calcio.



La dureza por no carbonatos de calcio puede precipitarse con la adición de carbonato de sodio:



Los no carbonatos de magnesio se precipitan como hidróxido de magnesio con la adición de hidróxido de calcio, Produciendo sulfato de calcio, así mismo este reacciona con carbonato de sodio y se obtiene como precipitado carbonato de calcio (Quintana, 2019, p. 14).

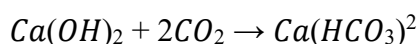
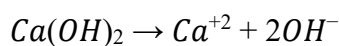


2.1.20 *Precipitación con hidróxido de calcio*

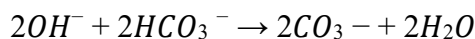
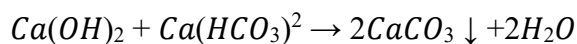
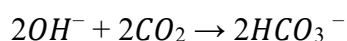
El ablandamiento con Hidróxido de Calcio es el proceso de precipitación más usado, consistiendo en la disminución de la dureza del calcio por la adición de cal hidratada al agua para poder así precipitar el CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ o ambas. A continuación, se evidencian las reacciones químicas de este procedimiento.

El radical hidroxilo es el componente reactivo de la cal que convierte CO_2 y HCO_3

- en CO_3^{-2} , precipitándose CaCO_3 , como se muestra en la siguiente reacción:

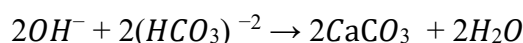
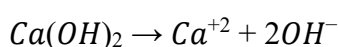


O, en forma iónica:



La mayor parte de las reacciones derivadas de este procedimiento se llevan con un valor de pH de 10 para el cual el CaCO_3 presenta una carga negativa, y, al no pasar por la neutralización el coloide puede resistirse al proceso de floculación e ir directamente al efluente. Es por el motivo anteriormente expuesto que se requiere el uso de coagulantes catiónicos, usualmente se utiliza el compuesto de aluminato de sodio como coagulante aniónico cuando se requieren residuos con poco magnesio. En una etapa continua el pH es neutralizado a valores de 8.5 y 9.5, ello con el motivo de transformar el carbonato remanente a bicarbonato y estabilizar el agua (Quintana, 2019).

Por otro lado, B. García (2024, p. 23) menciona que el Ca(OH)_2 es empleado por sus costos bajos, por su gran eficiencia para remover metales y eliminación de dureza de los carbonatos, lo que puede ser obtenido cuando se incrementa el pH de modo que los compuestos disminuyen su solubilidad hasta su precipitación de manera natural. Es así como el proceso consiste en añadir Ca(OH)_2 , lo cual conllevará a que el pH incremente en la solución en un rango de precipitación de 9,5 a 10,5. Es así como el Hidróxido de Calcio reacciona con el bicarbonato de calcio minorándolo a carbonato de calcio, el cual es poco soluble en agua.



Reacción de Bicarbonato de Calcio con Hidróxido de Calcio

Añadir Hidróxido de calcio en exceso, favorece la reacción ocasionando con ello mejor precipitación de Carbonato de Calcio. Agregar hidróxido de Calcio ablanda parcialmente el agua, ya que se está añadiendo más iones calcio los que producen más compuestos con los carbonatos y algunos de ellos pueden estar en disolución (B. García, 2024, p. 23).

2.1.21 Prueba de jarras

Es un procedimiento de laboratorio que se enfoca en llevar a cabo una simulación de procesos de coagulación-floculación, ello con la finalidad de observar el fenómeno y poder así determinar químicos en dosis adecuadas para poder obtener un tipo de calidad de agua específico. Para que este procedimiento se considerado exitoso deben considerarse variables tales como el tipo de coagulante utilizado, la dosis del coagulante, el pH final, la concentración de alimentación del coagulante, el tipo y la dosificación de aditivos químicos diferentes a los coagulantes primarios, la secuencia de adición de productos, los tiempos de retraso entre puntos de dosificación, la intensidad y la duración de la mezcla, entre otros (Cahuana y Meza, 2024).

Siguiendo esta línea, los criterios que se necesitan llenar para poder evaluar el tipo de coagulante, la dosis y el pH son los siguientes:

- ❖ Sedimentación y evaluación de la calidad del sobrenadante después del proceso.
- ❖ Filtración a través de un pequeño filtro de lecho granular y evaluación de la calidad del filtrado.
- ❖ Determinación del tiempo transcurrido desde la adición de coagulante hasta la primera aparición de un flóculo visible.
- ❖ Registro visual o comparación de los flóculos a medida que se forman
- ❖ Determinación del Volumen de flóculos sedimentados
- ❖ Concentración residual de coagulante
- ❖ Índice de sedimentación (Cahuana y Meza, 2024, p. 55)

2.1.22 Canal Surco

En el Valle del Rímac, lugar donde se desprenden canales; es allí donde se da origen a los sistemas más relevantes para abastecer a la ciudad, dichos canales son: Ate, Surco, Huatica y La Magdalena-La Legua-Maranga Callao. Es así como en los años 300 – 650 d. C. nace una red de intercambio en diversos valles, lo cual significaría la representación del primer Estado en ese valle, el inicio de la cultura Lima, situada en la parte baja de los valles Rímac y Chillón, con su base en Maranga (Abad, 2023).

El canal Surco, también llamado río Surco está ubicado en la cuenca río Rímac, presenta un caudal promedio de $5 \text{ m}^3 / \text{s}$ intermitente, y un caudal máximo de $10 \text{ m}^3 / \text{s}$ el cual es influenciado por las aguas del río Rímac. El agua ingresa a través de una bocatoma en el distrito de Ate Vitarte, y se ha determinado que su función sea de irrigación y mantenimiento de las áreas verdes de 17 distritos de Lima. Desde el periodo 2016 son más de 50 usuarios registrados y autorizados para el uso de las aguas de este canal, las cuales se emplean para el riego de más de 600 parques en Lima.

La Comisión de Regantes de Surco (CMS), son aquellos que en la actualidad se encuentran encargados de la administración y gestión del canal. En el distrito de San Borja, distrito por el cual el canal atraviesa, emplean las aguas del río para el mantenimiento y riego de sus áreas verdes y zonas de recreación como la laguna artificial del parque de la Felicidad. Es importante señalar que, para que estas aguas puedan ser usadas, pasan por un tratamiento previo debido a que se ha encontrado en ellas altas cargas de contaminantes, basura y maleza (Velásquez, 2022).

Figura 1

Mapa del recorrido del Río Surco desde su captación hasta su desembocadura



Nota. Adaptado de Evaluación de la eficiencia de la electrocoagulación... (p. 27), por A. Velásquez, 2022, Repositorio UCSUR.

El río Surco es uno de los ríos que se encuentra dentro de la lista de los recursos hídricos contaminado principalmente por vertimiento de AR y residuos sólidos, que son dispuestos por los vecinos de los distritos colindantes. En la cuenca alta del río es donde se deposita frecuentemente y en grandes cantidades estos residuos. Por lo cual, las aguas contaminadas de dicho río reflejan una problemática de contaminación de suelos y áreas verdes, ello debido a que, como se ha mencionado en párrafos anteriores, sus aguas contienen microorganismos

patógenos, metales pesados, sales y otros contaminantes, que constituyen que, al presentarse en concentraciones tan altas, se constituyen como un riesgo latente al medio ambiente y a la salud humana (Velásquez, 2022).

2.1.23 Agua de riego

Es aquella que se emplea para regar las plantas, los vegetales, cultivos, entre otros, los cuales a futuro serán transformados y comercializados como productos agrícolas. No obstante, el uso y tipología de este de esta dependerá de acuerdo al tipo de vegetal que se desee plantar. Cabe resaltar que las plantas requieren al agua para funciones tales como su crecimiento, procesos fisiológicos, y, recolección de nutrientes (Abad, 2023).

2.1.24 Estándares de calidad ambiental para agua

La Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2016) define los ECA como los niveles de concentración máxima de ciertos parámetros físicos, químicos y biológicos que se encuentran presentes en cuerpos de agua o recursos hídricos superficiales para que estos no muestran riesgo significativo para la salud de la población ni la contaminación del medio ambiente, es importante señalar que estos estándares deben ser aplicados a todos los cuerpos de agua que se encuentren dentro del territorio nacional.

2.2 Marco conceptual

- ❖ **Ablandamiento:** Se basa en la adición de compuestos al agua, que luego reaccionan con los iones de magnesio y calcio y los convierten en sustancias insolubles, que luego son expulsadas del agua mediante procedimientos físicos convencionales.
- ❖ **Agua:** Es un solvente universal líquido sin color, sabor o olor que es esencial para la vida vegetal y animal.
- ❖ **Agua dura:** Es el que tiene la mayor cantidad de minerales, con las sales de magnesio y calcio como los principales. Cuando consta de niveles superiores a 120 mg CaCO₃/L, se

considera que el agua es dura. La cantidad de carbonato de calcio se puede expresar como la cantidad total de carbonato de calcio y su cálculo se basa en la suma de todas las concentraciones de los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} por cada litro de agua. Se expresa en la presencia de las concentraciones de CaCO_3 .

- ❖ **Contaminación del agua:** Se origina cuando se altera las características físicas, químicas o biológicas propias del agua, y resulta de la incorporación intencional o accidental de sustancias nocivas que perturben los usos del agua.
- ❖ **Carbonato de calcio:** Es un compuesto ternario con fórmula CaCO_3 ; tiene un cono oxosal que lo ingresa. El carbonato de calcio es abundante en el medio ambiente porque se utiliza principalmente para formar rocas. Además, se indica que es el principal responsable de la presencia de agua dura.
- ❖ **pH:** es la expresión usada para manifestar la magnitud de las propiedades ácidas o básicas del agua.
- ❖ **Remoción:** contiene eliminar, reducir o eliminar algo de su sitio; la remoción de metales en agua implica sacar los contaminantes de la fase acuosa utilizando adsorbentes.

2.3 Marco legal

2.3.1 Constitución Política del Perú

La Constitución Política del Perú, en su artículo 2, inciso 22, reconoce que toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida. Asimismo, en el Título III, Capítulo II, "Del Ambiente y los Recursos Naturales", establece que los recursos naturales, renovables y no renovables, son patrimonio de la Nación (art. 66), y que el Estado determina la política nacional del ambiente y promueve el uso sostenible de dichos recursos (art. 67) (Constitución Política del Perú, 1993).

2.3.2 Ley N.º 26842, Ley General de Salud

La Ley General de Salud, en su artículo 103, establece que la protección del ambiente es responsabilidad tanto del Estado como de las personas naturales y jurídicas, quienes están obligados a mantenerlo dentro de los estándares que la Autoridad de Salud competente determine para preservar la salud de las personas (Ley N.º 26842, 1997).

2.3.3 Ley N.º 28611, Ley General del Ambiente

La Ley General del Ambiente, en el artículo I de su Título Preliminar, establece que toda persona tiene el derecho irrenunciable a vivir en un ambiente saludable, equilibrado y adecuado para el pleno desarrollo de la vida, así como el deber de contribuir a una efectiva gestión ambiental y de proteger el ambiente y sus componentes, asegurando en particular la salud de las personas y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales (Ley N.º 28611, 2005).

2.3.4 Decreto Legislativo N.º 1083

El Decreto Legislativo N.º 1083, que promueve el aprovechamiento eficiente y la conservación de los recursos hídricos, faculta a la Autoridad Nacional del Agua (ANA) a fijar parámetros de eficiencia para el aprovechamiento del agua, entendidos como requisitos máximos y mínimos aplicables a cada tipo y forma de uso. Para ello, la ANA otorga Certificados de Eficiencia, que acreditan el uso eficiente del recurso, y Certificados de Creatividad, Innovación e Implementación para la Eficiencia del Uso del Agua (Decreto Legislativo N.º 1083, 2008).

2.3.5 Ley N.º 29338, Ley de Recursos Hídricos

La Ley de Recursos Hídricos tiene por finalidad regular el uso y la gestión integrada del agua, así como la actuación del Estado y de los particulares en dicha gestión. Entre sus principios se encuentran la valoración del agua, la prioridad en el acceso al recurso, la

participación de la población y la cultura del agua. Asimismo, crea el Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos, cuyo ente rector y máxima autoridad técnico-normativa es la ANA (Ley N.º 29338, 2009).

2.3.6 *Decreto Supremo N.º 001-2010-AG, Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos*

El Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, en su artículo 103, señala que la protección del agua tiene por finalidad prevenir el deterioro de su calidad, proteger y mejorar el estado de sus fuentes naturales y de los ecosistemas acuáticos, y establecer medidas específicas para eliminar o reducir progresivamente los factores que generan su contaminación y degradación (Decreto Supremo N.º 001-2010-AG, 2010).

2.3.7 *Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM*

El Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y los clasifica en las siguientes categorías (Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, 2017):

- ✓ Categoría 1: Poblacional y recreacional.
- ✓ Categoría 2: Extracción, cultivo y otras actividades marino-costeras y continentales.
- ✓ Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales.
- ✓ Categoría 4: Conservación del ambiente acuático.

En la presente investigación, esta norma constituye el referente para comparar los valores de sólidos totales disueltos y dureza total obtenidos en las aguas del canal Surco.

III. MÉTODO

3.1 Tipo de investigación

De acuerdo con la investigación es de tipo aplicativa, por motivo que se van a considerar estudios de otros autores para tomarlas como base referencial, y a partir de las mismas generar nuevos conocimientos de acuerdo a los resultados y conclusiones finales obtenidas.

En cuanto al diseño de investigación es experimental, debido a la manipulación de la variable independiente (aplicación de Cloruro Férrico y suavizantes químicos) para observar los resultados y el comportamiento sobre la variable dependiente (remoción de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total), en base a ello se busca conocer las reacciones de causa-efecto entre dichas variables.

3.2 Ámbito temporal y espacial

3.2.1 *Ámbito temporal*

En cuanto al ámbito temporal el presente trabajo de investigación fue desarrollado a partir del mes de agosto del 2024 hasta el mes de enero del 2025; en cuanto a la información bibliográfica utilizada para los antecedentes fue comprendida entre los 5 últimos años siendo estas del 2019 al 2024. Así mismo, los ensayos a nivel experimental fueron desarrollados entre los meses de noviembre y diciembre, la búsqueda de información se inició en el mes de agosto hasta octubre del 2024, y para la redacción final con los resultados y conclusiones fueron entregados a fines del mes de enero del 2025.

3.2.2 *Ámbito espacial*

La toma de muestra del agua del canal Surco se realizó a la entrada de la Planta de Tratamiento “Alejandro Vinces Araoz” en el distrito de Surco y los análisis de los parámetros fisicoquímicos se realizaron en el laboratorio de Geografía y Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo de la UNFV.

3.3 Variables

3.3.1 *Variable independiente*

Aplicación de Cloruro Férrico con suavizantes químicos.

3.3.2 *Variable dependiente*

Remoción de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total.

Tabla 6*Operacionalización de variables de investigación*

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidades
Variable independiente	El ablandamiento químico consiste en aplicar sustancias químicas u orgánicas al agua que reaccionan con los iones calcio y magnesio, transformándolos en compuestos insolubles, que son separados del agua por procedimientos físicos convencionales (decantación y filtración) (Moreira-Romero, 2016).	A fin de evaluar los factores que intervienen y permiten desarrollar este proceso, se tomarán en cuenta los precipitantes químicos y parámetros operativos que influyen directamente en los resultados finales de remoción a través del Jar Test, estos parámetros incluyen la concentración, dosis, tiempo, velocidad de agitación, volumen y otros.	PRECIPITANTES QUÍMICOS	Concentración	mg/L
				Dosis	ml
Aplicación de cloruro férrico y suavizantes químicos				Tiempo	minutos
				Velocidad de agitación	RPM
				Volumen	ml
Variable Dependiente	La remoción o desestabilización de las partículas contaminantes es el resultado de la eliminación de las fuerzas de repulsión. La aglomeración se produce bajo las fuerzas de atracción entre las partículas las cuales se dan por la acción del floculante. Y la sedimentación se da cuando las partículas toman un tamaño adecuado que puede ser separado por acción de la gravedad (Jaramillo, 2024, p. 13)	Para evaluar la remoción de los TDS y Dureza Total se tomarán en cuenta las concentraciones iniciales de trabajo considerado por el investigador, para luego ser sometido a un proceso de tratamiento con precipitantes químicos para observar sus nuevos niveles alcanzados, tomaremos en cuenta las concentraciones finales obtenidos en cada caso.	PARÁMETROS INORGÁNICOS	Concentración TDS	mg/L
Remoción de TDS y Dureza Total				Concentración de Dureza Total	mg/L

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

En cuanto a la población del trabajo de investigación está conformada por el caudal de ingreso del canal surco hasta la Planta de Tratamiento “Alejandro Vences Araoz” correspondiente a 400 l/s.

3.4.2 Muestra

Con relación a la muestra trabajada corresponde a un volumen total requerido para los tres tratamientos de aproximadamente a 75 litros de agua del canal Surco. En el primer tratamiento se proyectó utilizar aproximadamente 45 litros, con dos repeticiones por corrida experimental, mientras que en el segundo y tercer tratamiento se consideró el uso de 30 litros haciendo un total de 75 litros.

3.5 Instrumentos

3.5.1 Técnicas

- Jar Test-prueba de jarras.
- Manual de bioseguridad de LAGEMA-UNFV.
- Métodos Estandarizados para análisis de aguas.
- Protocolo de monitoreo de calidad del agua.

3.5.2 Instrumentos

- Fichas de recolección de datos.
- Hojas de bioseguridad en laboratorios.
- Técnica procedimental.
- Cadena de custodia para toma de muestras.

3.5.3 *Validación y confiabilidad del instrumento*

Validación. La validez del instrumento está dada por el juicio de experto y se corrobora con las fichas de recolección de datos que presentará resultados en el juicio de experto. En la validación del instrumento se utilizó el cuadro correspondiente a la ficha pertinente que fueron validadas por el experto (ver anexo B y C).

Confiabilidad. La confiabilidad está dada a través de medidas sucesivas tomadas previamente a la toma de datos y trabajos respectivos. Dichas pruebas se realizaron en un número de 3 veces previas a cada uno de los tratamientos, la confiabilidad final se dio mediante las medidas estadísticas de tendencia central y de dispersión. Se pretende que la tendencia central sean las mismas o cercanas; y las medidas estadísticas de dispersión sean mínimas. Los equipos de laboratorio cuentan con certificación de calidad y calibración establecidos por las entidades autorizadas para tales casos, calibrados para brindar datos precisos.

3.5.4 *Equipos y materiales*

En cuanto a los equipos y materiales que se utilizaron en el trabajo de investigación fueron los siguientes:

a) Reactivos Químicos

- Cloruro Férrico
- Suavizantes: Hidróxido de Calcio y Carbonato de Sodio
- Etilendiaminotetraacético-EDTA
- Alcohol Etílico
- Cloruro de Amonio
- Negro de eriocromo

b) Material de campo

- Recipientes para toma de muestras

- Cámara fotográfica
- c) Material de laboratorio
 - Fiolas de 1L y de 100 ml
 - Envase de 3L
 - Espátula
 - Luna de reloj
 - Vaso precipitado
 - Probeta
 - Matraces de Erlenmeyer
 - Desecador
 - Papel filtro
 - Termómetro
- d) Equipos de laboratorio:
 - Balanza analítica, marca SARTORIUS
 - Estufa, marca OVENS
 - Multiparámetro, marca HACH
 - Floculador programable, marca PHIPPS & BIRDTM
 - Plancha de Calentamiento, marca THERMO SCIENTIFIC.

3.6 Procedimientos

El procedimiento para el desarrollo de la investigación tomó en cuenta las siguientes etapas: i) Monitoreo de campo ii) Análisis de laboratorio, iii) Pruebas de Jar Test y; iv) Análisis final.

3.6.1 Monitoreo de campo

- ✓ La investigación se inició con la toma de muestras de agua del canal Surco que se realizó entre los meses de setiembre y octubre del 2024.

- ✓ La muestra de agua para la caracterización inicial fue acondicionada en envases plásticos de 20 litros, y transportado en un cooler para su preservación siguiendo el Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (ANA, 2016).
- ✓ En una jarra plástica se tomó la muestra para la medición de los parámetros de campo. En primer lugar, se midió la temperatura de la muestra de agua del canal Surco, acto seguido se midió el pH con un equipo multiparámetro marca HANNA, quien fue previamente calibrado con amortiguadores o Buffer de 4, 7 y 10.
- ✓ Seguidamente, se midió utilizando el mismo equipo la conductividad eléctrica y Sólidos Totales Disueltos, quien fuera calibrado de igual manera con las soluciones salinas de KCl (Cloruro de Potasio) a 0.01 y 0.1 N.
- ✓ Una vez concluidas las mediciones en campo, se continuó con el llenado de las muestras de agua del canal Surco con aproximadamente 75 litros para los tratamientos con Cloruro Férrico y los suavizantes químicos (Hidróxido de Calcio y Carbonato de Sodio).

3.6.2 *Análisis de laboratorio*

- ✓ En el laboratorio de Geografía y Medio Ambiente de la FIGAE, fue preparado en primer lugar una solución de Cloruro Férrico a concentraciones del 0.5, 1.0 y 1.5%, en segundo lugar, fueron preparados los suavizantes de Hidróxido de Calcio y Carbonato de Sodio a una concentración del 5%.
- ✓ Para la preparación de Cloruro Férrico (floculante) al 0.5%, se pesó 0.5 g del soluto en la balanza analítica y se diluyó en un vaso de precipitado con agua destilada, posteriormente se llevó a una fiola de 100 ml hasta su nivel de aforo. De igual forma se prepararon las concentraciones de 1.0 y 1.5%

- ✓ Para la preparación del Hidróxido de Calcio (suavizante) al 5%, se pesó 5 g del soluto en la balanza analítica y se diluyó en un vaso de precipitado con agua destilada, posteriormente se llevó a una fiola de 100 ml hasta su nivel de aforo.
- ✓ Para la preparación del Carbonato de Sodio (suavizante) se pesó 5 g del soluto en la balanza analítica y se diluyó en un vaso de precipitado con agua destilada, posteriormente se llevó a una fiola de 100 ml hasta su nivel de aforo.
- ✓ Terminado el proceso anterior se procedió a determinar la Dureza Total de la muestra de agua, para lo cual se tuvo que preparar una solución de Etilendiaminotetraacético-EDTA, pesando 3.723 g, disolviendo con agua destilada hasta 1 litro.
- ✓ Seguidamente se preparó una solución Tampón de Dureza Total para lo cual se pesó 16.9 g de Cloruro de Amonio y se mezcló con 143 ml de Hidróxido de Amonio concentrado, aforando finalmente a 250 ml.
- ✓ La preparación del indicador Negro de Eriocromo T fue al 0.5% en Etanol.
- ✓ Habiendo terminado la preparación de los reactivos se procedió a determinar la Dureza Total, para lo cual la muestra fue calentada previamente a una temperatura de 60 °C.
- ✓ A continuación, se añadió 5 ml de solución Tampón, y se agitó previamente para homogenizarlo.
- ✓ Seguidamente se añadió 15 gotas de indicador Negro de Eriocromo, hasta observar una coloración rojo violeta.
- ✓ Finalmente se Tituló con la solución EDTA, hasta alcanzar el viraje a coloración final Azul-verde, terminando con ello el procedimiento y anotando el gasto final para los cálculos correspondientes.

3.6.3 Ensayos de jar test

- ✓ Las pruebas experimentales del tratamiento fisicoquímico fueron realizadas mediante el Jar Test, para lo cual se acondicionó 5 jarras conteniendo las muestras con agua del canal

Surco y un volumen para todos los casos de 1 Litro cada uno

- ✓ Las corridas experimentales fueron en dos velocidades, la primera a una lenta con 50 RPM por 2 minutos y una segunda a 250 RPM por 30 minutos a temperatura ambiental y considerando un pH inicial y final para observar su comportamiento.
- ✓ Para la primera corrida del primer tratamiento, se adicionó cantidades variables de la solución de Cloruro Férrico (0.5%) a cada una de las jarras en razón de 2, 4, 6, 8 y 10 ml a un tiempo de contacto constante de 30 minutos. De la misma forma se trabajó con las concentraciones de 1.0 y 1.5%, considerando para todos casos dos repeticiones adicionales a la primera corrida.
- ✓ A continuación, se tomaron 100 ml de muestra de cada jarra tratada con sus dos repeticiones, y se procedió a la medición del pH final, y su concentración de TDS y Dureza Total en cada caso.
- ✓ Posteriormente, ya conocida la muestra con la dosis óptima con Cloruro Férrico, se procedió a la segunda etapa del tratamiento con Carbonato de Sodio al 5% con dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml, y siguiendo con el tratamiento a 250 rpm, temperatura constante y tiempo de 30 minutos de contacto.
- ✓ Seguidamente, se tomaron 100 ml de muestra de cada jarra tratada con sus dos repeticiones, y se procedió a la medición del pH final, y su concentración de TDS y Dureza Total en cada caso.
- ✓ De igual manera, ya conocida la muestra con dosis óptima de Carbonato de Sodio se procedió a continuar con la tercera etapa del tratamiento con Hidróxido de Calcio (5%) trabajando con dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml, y siguiendo con el tratamiento a 250 rpm, temperatura constante y tiempo de 30 minutos de contacto.

- ✓ Finalmente, se tomaron 100 ml de muestra de cada jarra tratada con sus dos repeticiones, y se procedió a la medición del pH final, y su concentración de TDS y Dureza Total en cada caso
- ✓ Terminado los tratamientos anteriores se procedió a tomar una cantidad de 200 ml de muestra sobrenadante de las 5 jarras y se realizó una filtración en envases plásticos de primer uso, los cuales deberán estar correctamente rotulados con su codificación respectiva para cuantificar los TDS y Dureza Total finalmente.
- ✓ Para la determinación de los TDS se realizó con el medidor de Conductividad y la Dureza Total se realizará siguiendo los pasos antes indicados en ítem: análisis de laboratorio.

3.6.4 *Análisis final*

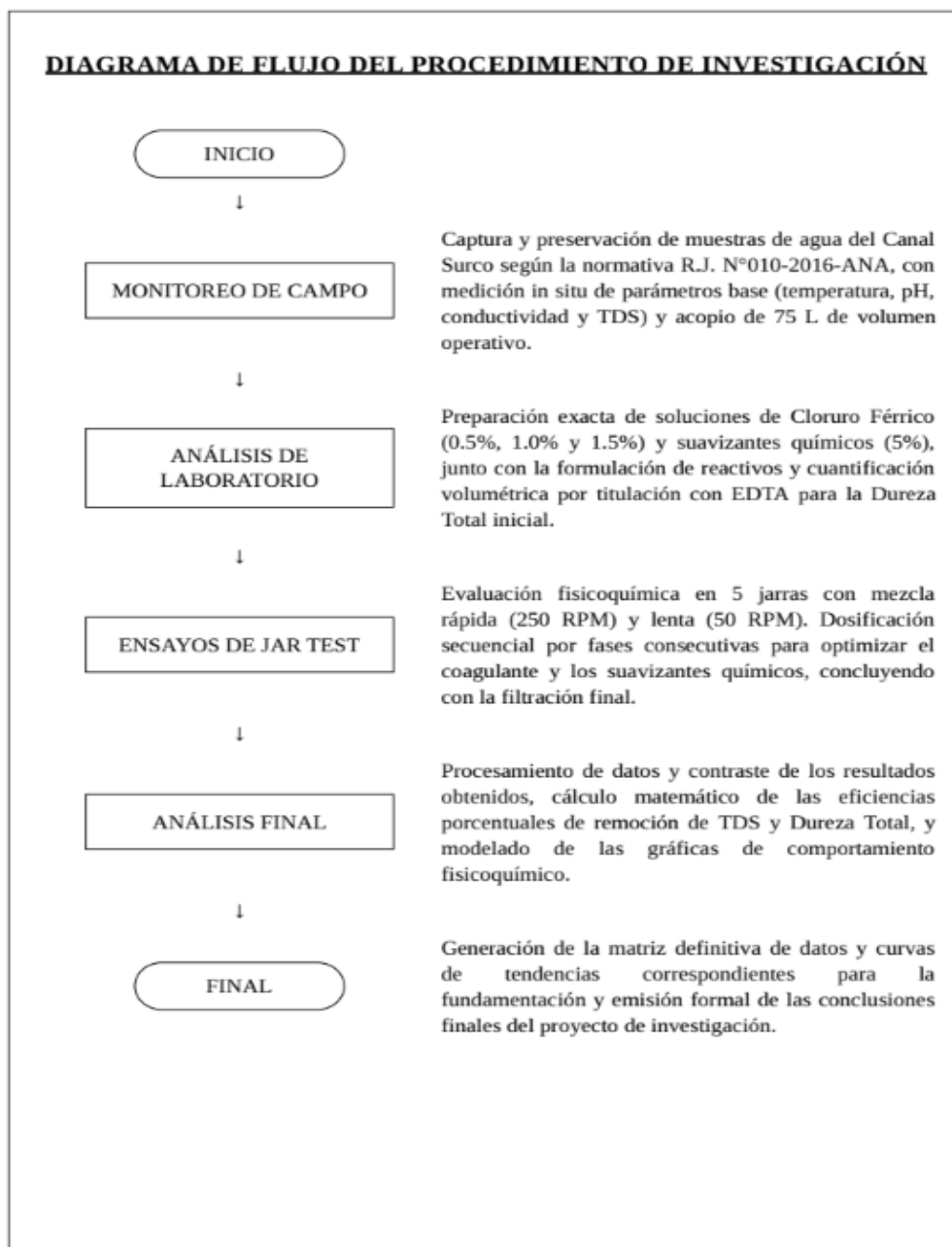
Luego de concluir con la determinación de TDS y Dureza Total por las metodologías directa y volumétrica, se procedió a evaluar los resultados finales obtenidos luego del tratamiento en el Jar Test y se llevó a cabo el análisis de cuáles fueron las dosis óptimas en cada uno de los tratamientos, en función a las concentraciones iniciales y finales obtenidas durante el procedimiento.

Por último, se procedió a evaluar las eficiencias obtenidas de acuerdo con las dosis del coagulante (Cloruro Férrico) y suavizantes (Carbonato de Sodio e Hidróxido de Calcio) aplicado en cada una de las muestras, y con ello elaborar las tablas y graficas respectivas con la finalidad de apreciar el comportamiento de cada dosis óptima utilizada.

En este sentido, con los resultados finales obtenidos y analizados se obtuvieron las conclusiones definitivas de nuestra investigación.

Figura 2

Diagrama de flujo de procedimiento de investigación



3.7 Análisis de datos

Para el análisis de datos se consideró los niveles de medición de las variables y se aplicó la estadística que permitió describir las características principales de las variables dependientes e independientes, tomadas individualmente. En este sentido, se llevó a cabo un análisis de cada

una de las variables para lo cual se utilizó el programa Microsoft Excel (Microsoft Corporation, 2010); para presentar la estadística descriptiva se usaron tablas y gráficas de datos y para graficar la distribución de datos se emplearon graficas lineales, ello con el propósito de conocer cuáles serán las mejores dosis y determinar las eficiencias en el tratamiento con Cloruro férrico y los suavizantes: Carbonato de Sodio e Hidróxido de Calcio mediante la contrastación de las hipótesis.

3.8 Consideraciones éticas

El autor del presente estudio, respetó la propiedad intelectual de aquellos autores que se hicieron mención en la investigación, citándolos y referenciándolos adecuadamente, presentando así mismo datos auténticos y confiables. Para la toma de muestra en el canal Surco se realizaron las coordinaciones respectivas con las autoridades pertinentes a fin de solicitar los permisos que consideraron para el desarrollo de la investigación, dando fe que se respetó la propiedad privada y se aplicó un protocolo de monitoreo para el caso de toma de muestras. Para la determinación de los análisis se solicitaron los permisos respectivos al Departamento Académico (DAGMA-FIGAE), a fin de que se facilite el uso del laboratorio de Geografía y Medio Ambiente, respetando los manuales y protocolos estipulados para tal fin.

IV. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la investigación, los cuales fueron desarrollados con relación a los objetivos propuestos al inicio del estudio, dentro de ellos tenemos la caracterización de la calidad del agua del canal Surco, determinación de la dosis óptima con cloruro férrico, determinación de la dosis óptima con suavizantes químicos y determinación de las eficiencias con cloruro férrico y suavizantes químicos.

4.1 Caracterización de la calidad del agua del canal Surco

Para dar cumplimiento al primer objetivo, se determinaron los parámetros fisicoquímicos de Temperatura, pH, Dureza Total, Conductividad Eléctrica, Sólidos Totales Disueltos y Salinidad, los cuales se muestran en la tabla siguientes:

Tabla 7

Caracterización fisicoquímica de agua del canal Surco

MUESTRA	T (°C)	pH	DUREZA	CE	TDS	Salinidad
			(mg CaCO ₃ /l)	(uS/cm)	(mg/l)	(‰)
A-1	19.4	7.53	357.4	956.4	465.8	0.5
ECA	Δ3	6.5-8.5	<120	2500	-	-

Nota. Los resultados obtenidos fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental, Categoría III, del Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM (2017), y para el caso de Dureza Total se comparó con la norma de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

De la Tabla 7, se puede apreciar que los valores de Temperatura, pH, y Conductividad Eléctrica, se encuentran dentro de los Estándares de Calidad Ambiental, la Dureza Total excede el Estándar de Calidad, y para el caso de Sólidos Totales Disueltos y Salinidad estos no cuentan con un Estándar de Calidad con fines de comparación.

4.2 Estimación de la dosis óptima tratado con cloruro férrico

Para la obtención de las dosis óptimas con cloruro férrico se trabajó con concentraciones de 0.5%, 1.0% y 1.5% y dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml para cada concentración, de tal manera que se pueda alcanzar con alguna de ellas la máxima remoción de Sólidos Totales Disueltos (TDS) y Dureza Total. Los resultados para todos los casos partieron de una concentración inicial de 465.8 mg/l para el caso de los TDS y 357.4 mg/l para el caso de Dureza Total. Así mismo, los resultados finales para cada caso se calcularon en relación a al promedio de la primera corrida y sus dos repeticiones.

Tabla 8

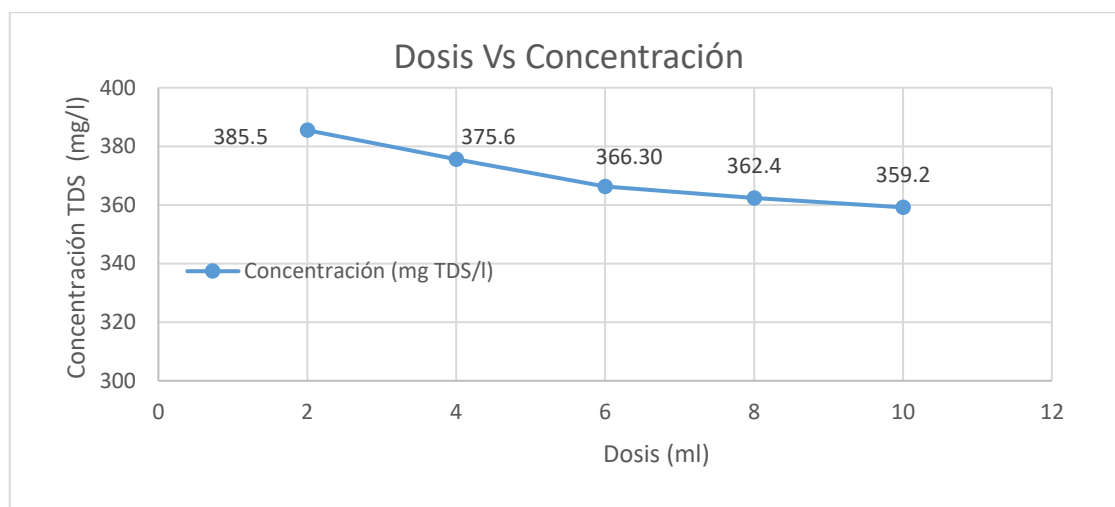
Dosis óptima y concentraciones residuales de TDS tratadas con FeCl₃ al 0.5%

MUESTRA	FeCl₃ (0.5%)				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	7.42	7.35	7.27	7.16	7.22
[TDS] inicial	465.8 mg/l				
REPETICIONES	Concentración de TDS (mg/l)				
1	385.5	378.1	371.4	368.7	369.1
2	381.2	372.6	366.4	360.2	356.2
3	389.7	376.1	361.2	358.3	352.4
[TDS] Promedio	385.5	375.6	366.3	362.4	359.2

De la Tabla 8, se puede apreciar que los niveles de pH bajan ligeramente mientras se van añadiendo las dosis de cloruro férrico, así se observa que de acuerdo a la caracterización inicial se obtuvo 7.53 pasando por valores de 7.42, 7.35, 7.27, 7.16 y 7.22. Asimismo, los TDS van bajando desde un valor inicial de 465.8 mg/l hasta un valor final de 359.2 mg/l.

Figura 3

Comportamiento de TDS tratada con la dosis de FeCl_3 al 0.5%



En cuanto al comportamiento de los Sólidos Totales Disueltos (0.5%), se puede apreciar que van disminuyendo de acuerdo a las dosis de FeCl_3 añadidas, así se aprecia que, para la dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml se obtuvo concentraciones finales de 385.5, 375.6, 366.3, 362.4 y 359.2 mg/l respectivamente, siendo para este caso la dosis de 10 ml la óptima.

Tabla 9

Dosis óptima y concentraciones residuales de TDS tratadas con FeCl_3 al 1.0%

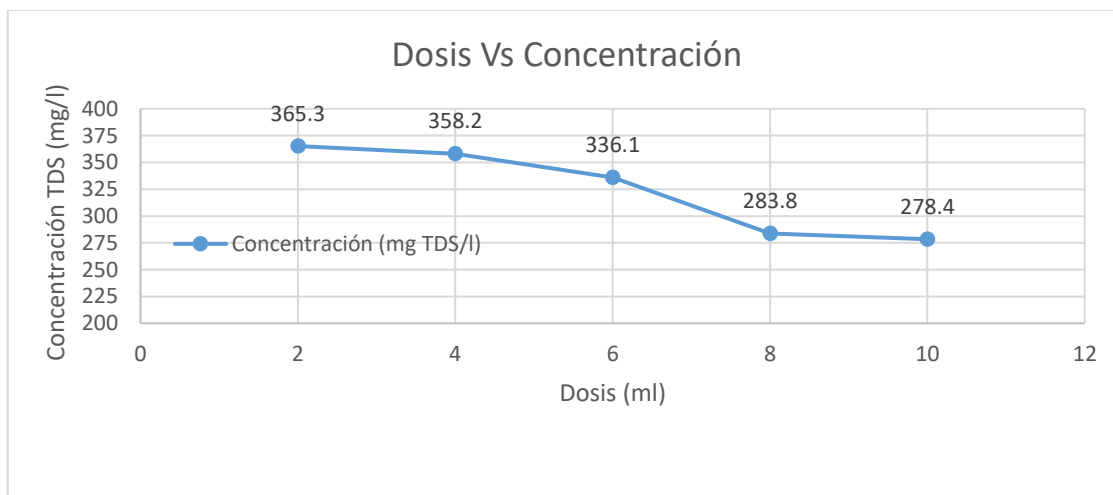
MUESTRA	FeCl ₃ (1.0%)				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	7.02	6.88	6.64	6.41	6.25
[TDS] inicial	465.8 mg/l				
REPETICIONES	Concentración de TDS (mg/l)				
1	365.3	355.3	331.4	262.4	273.4
2	369.4	358.8	345.4	303.7	268.4
3	361.1	360.4	331.4	285.4	293.5
[TDS] Promedio	365.3	358.2	336.1	283.8	278.4

De la Tabla 9, se puede apreciar que los niveles de pH bajan ligeramente mientras se van añadiendo las dosis de cloruro férrico, así se observa que de acuerdo a la caracterización

inicial se obtuvo 7.53 pasando por valores de 7.02, 6.88, 6.64, 6.41 y 6.25. Asimismo, los TDS van bajando desde un valor inicial de 465.8 mg/l hasta un valor final de 278.4 mg/l.

Figura 4

Comportamiento de TDS tratada con la dosis de FeCl_3 al 1.0%



En cuanto al comportamiento de los Sólidos Totales Disueltos (TDS), se puede apreciar que van disminuyendo de acuerdo a las dosis de FeCl_3 añadidas, las cuales en esta oportunidad fueron trabajadas con una concentración superior a la primera (0.5%), siendo ahora del 1%. Así se aprecia que, para la dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml se obtuvo concentraciones finales de 365.3, 358.2, 336.1, 283.8 y 278.4 mg/l respectivamente, siendo para este caso la dosis de 10 ml la óptima.

Tabla 10

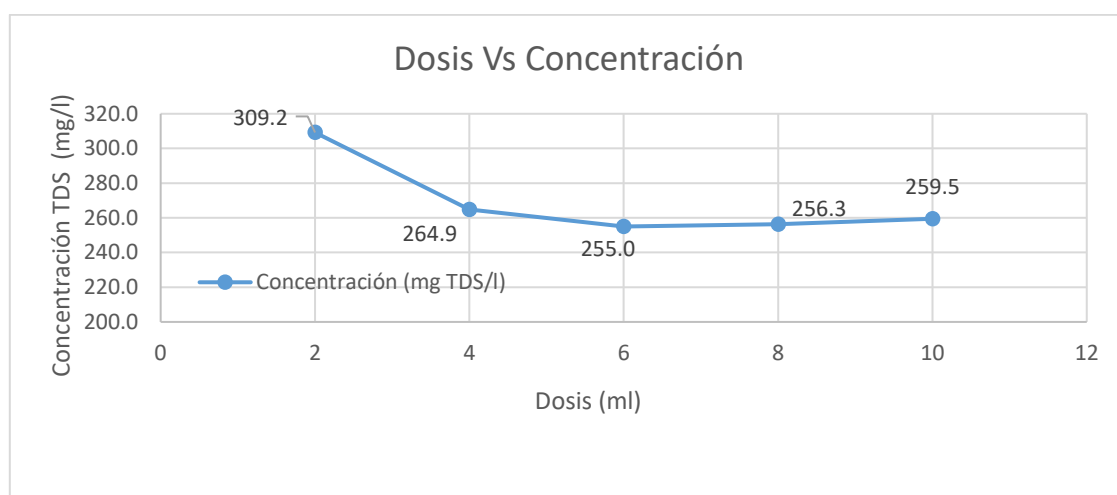
Dosis óptima y concentraciones residuales de TDS tratadas con FeCl_3 al 1.5%

MUESTRA	FeCl_3 (1.5%)				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	6.38	6.35	6.27	6.16	6.02
[TDS] inicial	465.8 mg/l				
REPETICIONES	Concentración de TDS (mg/l)				
1	337.3	265.3	259.5	259.5	261.2
2	331.8	260.7	251.6	259.7	259.7
3	258.4	268.6	253.9	249.6	257.5
[TDS] Promedio	309.2	264.9	255.0	256.3	259.5

De la Tabla 10, se puede apreciar que los niveles de pH bajan ligeramente mientras se van añadiendo las dosis de cloruro férrico, así se observa que de acuerdo a la caracterización inicial se obtuvo 7.53 pasando por valores de 6.38, 6.35, 6.27, 6.16 y 6.02. Asimismo, los TDS van bajando desde un valor inicial de 465.8 mg/l hasta un valor final de 259.5 mg/l.

Figura 5

Comportamiento de TDS tratada con la dosis de FeCl_3 al 1.5%



En cuanto al comportamiento de los Sólidos Totales Disueltos TDS, se puede apreciar que van disminuyendo de acuerdo a las dosis de FeCl_3 añadidas, las cuales en esta oportunidad fueron trabajadas con una concentración superior a la segunda (1.0%), siendo ahora del 1.5%. Así se aprecia que, para la dosis de 2, 4, 6 ml se obtuvo concentraciones finales de 309.2, 264.9 y 255.0 respectivamente, mientras que para las dosis de 8 y 10 ml se obtuvo 256.3 y 259.5 mg/l respectivamente las cuales subieron ligeramente, siendo para este caso la dosis de 6 ml la óptima.

Tabla 11

Dosis óptima y concentraciones residuales de dureza total tratadas con FeCl_3 al 0.5%

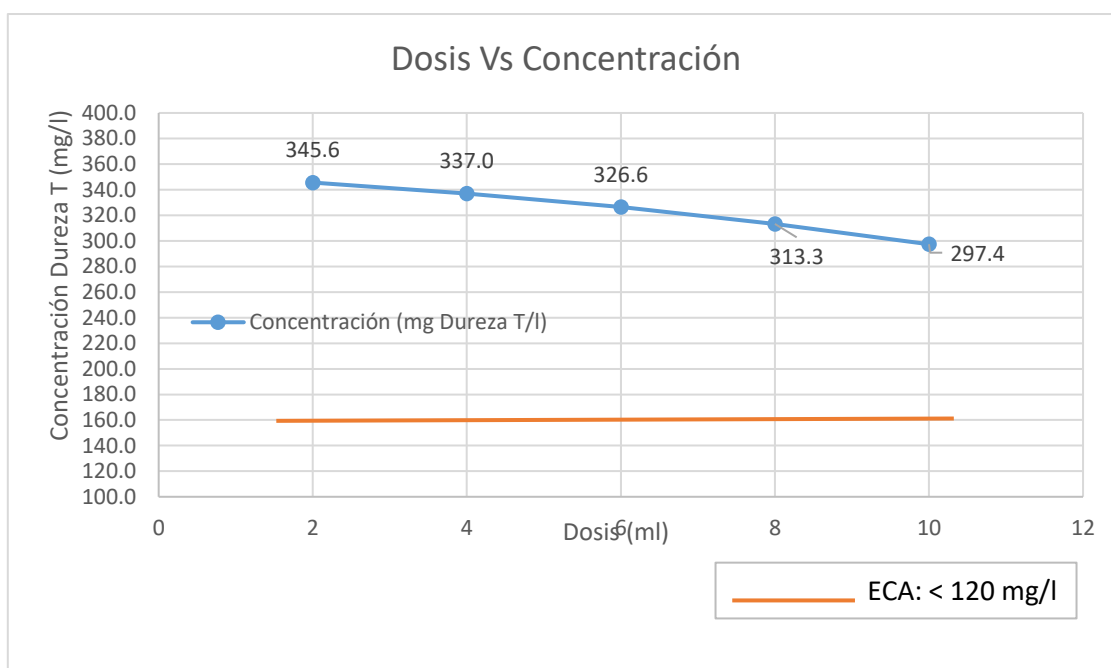
MUESTRA	FeCl_3 (0.5%)				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	7.42	7.35	7.27	7.16	7.22
[Dureza T] inicial	357.4 mg CaCO_3 /l				

REPETICIONES	Concentración de Dureza Total (mg/l)				
1	350.4	342.9	331.5	315.7	304.2
2	344.5	335.4	325.8	318.6	296.7
3	341.8	332.6	322.6	305.5	291.4
[Dureza T] Promedio	345.6	337.0	326.6	313.27	297.4

De la Tabla 11, se puede apreciar que los niveles de pH bajan ligeramente mientras se van añadiendo las dosis de cloruro férrico, así se observa que de acuerdo a la caracterización inicial se obtuvo 7.53 pasando por valores de 7.42, 7.35, 7.27, 7.16 y 7.22. Asimismo, las concentraciones de Dureza Total van bajando desde un valor inicial de 357.4 mg/l hasta un valor final de 297.4 mg/l.

Figura 6

Comportamiento de dureza total tratada con la dosis de FeCl_3 al 0.5%



En cuanto al comportamiento de la Dureza Total trabajada con una concentración de 0.5%, se aprecia que van disminuyendo de acuerdo a las dosis de FeCl_3 añadidas. Así tenemos que, para la dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml se obtuvo concentraciones finales de 345.6, 337.0, 326.6,

313.3 y 297.4 mg/l respectivamente, siendo para este caso la dosis de 10 ml la óptima. Sin embargo, con ninguna de las dosis se logra alcanzar el Estándar de Calidad Ambiental.

Tabla 12

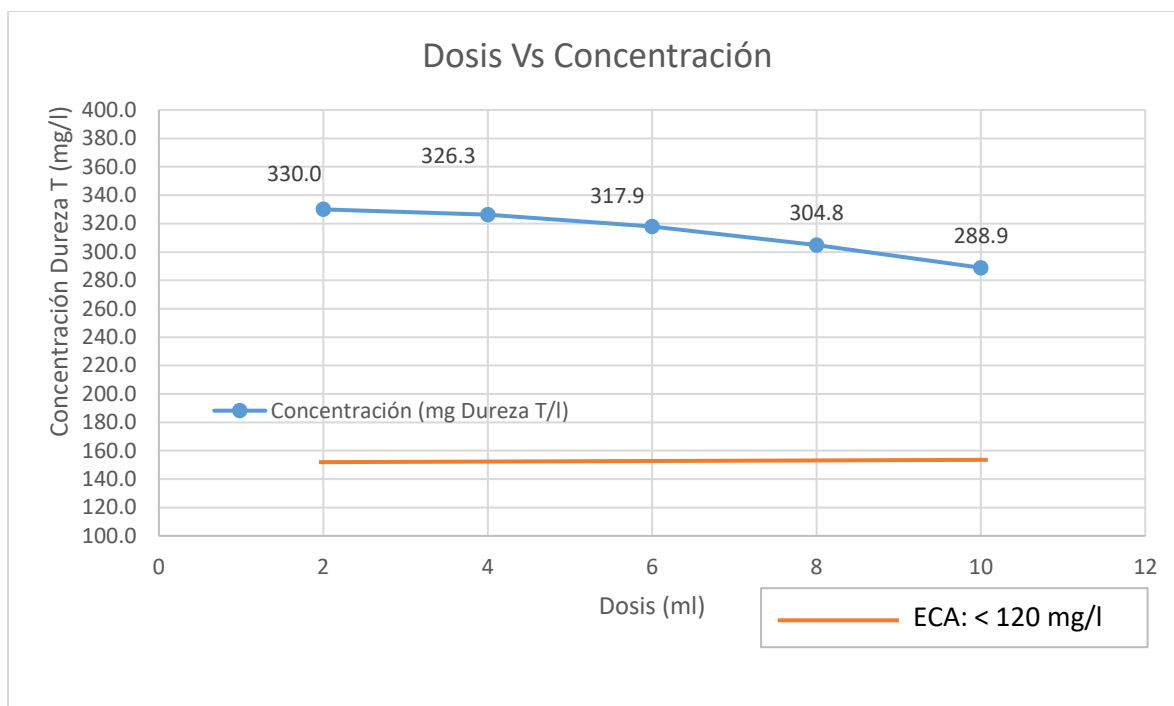
Dosis óptima y concentraciones residuales de dureza total tratadas con FeCl₃ al 1.0%

MUESTRA	FeCl₃ (1.0%)				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	7.02	6.88	6.64	6.41	6.25
[Dureza T] inicial	357.4 mg CaCO₃/l				
REPETICIONES	Concentración de Dureza Total (mg/l)				
1	330.4	325.6	322.5	302.5	295.4
2	332.7	331.5	318.4	298.4	288.6
3	326.8	321.8	312.7	313.5	282.6
[Dureza T] Promedio	330.0	326.3	317.9	304.8	288.9

De la Tabla 12, se puede apreciar que los niveles de pH bajan ligeramente mientras se van añadiendo las dosis de cloruro férrico, así se observa que de acuerdo a la caracterización inicial se obtuvo 7.53 pasando por valores de 7.02, 6.88, 6.64, 6.41 y 6.25. Asimismo, las concentraciones de Dureza Total van bajando desde un valor inicial de 357.4 mg/l hasta un valor final de 288.9 mg/l.

Figura 7

Comportamiento de dureza total tratada con la dosis de FeCl₃ al 1.0%



En cuanto al comportamiento de la Dureza Total trabajada con una concentración de 1.0%, se aprecia que van disminuyendo de acuerdo a las dosis de FeCl_3 añadidas. Así tenemos que, para la dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml se obtuvo concentraciones finales de 330.0, 326.3, 317.9, 304.8 y 288.9 mg/l respectivamente, siendo para este caso la dosis de 10 ml la óptima. Sin embargo, con ninguna de las dosis se logra alcanzar el Estándar de Calidad Ambiental.

Tabla 13

Dosis óptima y concentraciones residuales de dureza total tratadas con FeCl_3 al 1.5%

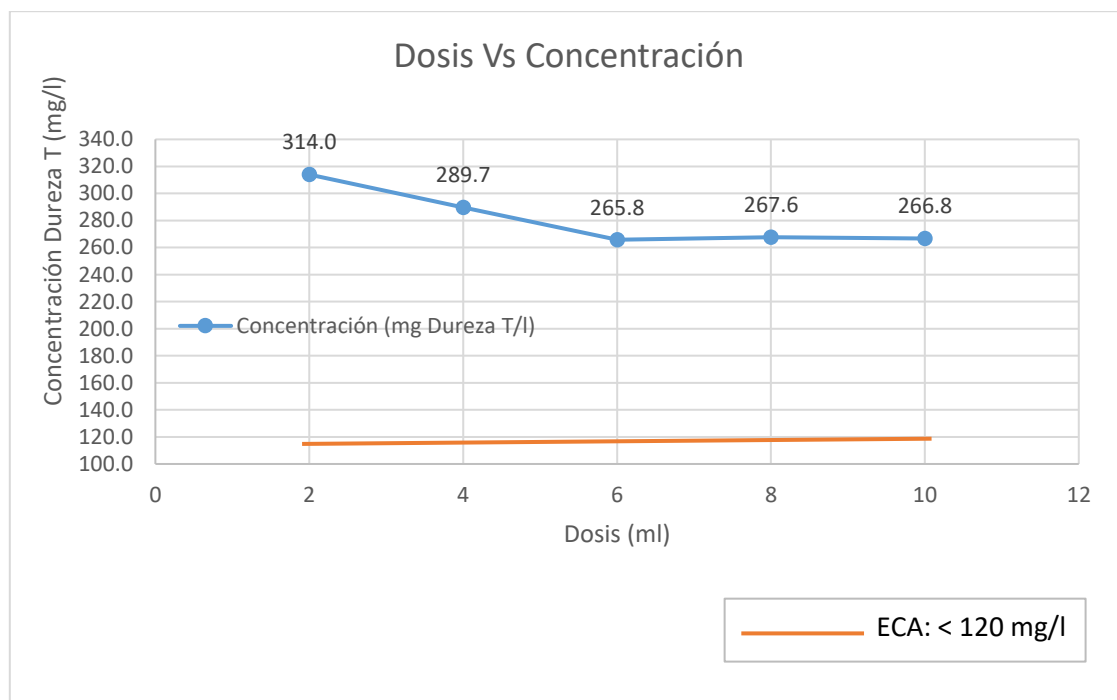
MUESTRA		FeCl ₃ (1.5%)				
Dosis (ml)		2	4	6	8	10
pH		6.38	6.35	6.27	6.16	6.02
[Dureza T] inicial		357.4 mg CaCO ₃ /l				
REPETICIONES		Dureza Total (mg CaCO ₃ /l)				
1		320.8	289.4	274.5	271.2	266.5
2		315.4	286.3	265.5	265.3	264.2
3		305.8	293.4	257.4	266.4	269.7
[Dureza T] Promedio		314.0	289.7	265.8	267.6	266.8

De la Tabla 13, se puede apreciar que los niveles de pH bajan ligeramente mientras se van añadiendo las dosis de cloruro férrico, así se observa que de acuerdo a la caracterización

inicial se obtuvo 7.53 pasando por valores de 6.38, 6.35, 6.27, 6.16 y 6.02. Asimismo, las concentraciones de Dureza Total van bajando desde un valor inicial de 357.4 mg/l hasta un valor final de 266.8 mg/l.

Figura 8

Comportamiento de dureza total tratada con la dosis de FeCl_3 al 1.5%



En cuanto al comportamiento de la Dureza Total trabajada con una concentración de 1.5%, se aprecia que van disminuyendo de acuerdo a las dosis de FeCl_3 añadidas. Así tenemos que, para la dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml se obtuvo concentraciones finales de 314.0, 289.7, 265.8, 267.6 y 266.8 mg/l respectivamente, siendo para este caso la dosis de 6 ml la óptima. Sin embargo, con ninguna de las dosis se logra alcanzar el Estándar de Calidad Ambiental.

4.3 Estimación de la dosis óptima tratado con suavizantes químicos

El inicio del segundo y tercer tratamiento se desarrolló con la mejor dosis obtenida en el primer tratamiento, para ello se trabajó con los suavizantes de Carbonato de Sodio e Hidróxido de Calcio respectivamente.

Segundo tratamiento con carbonato de sodio. Conocido el pH, concentración y dosis óptima del primer tratamiento de 6.27, 1.5% y 6 ml de Cloruro Férrico respectivamente y valores iniciales de 255.0 mg/l de TDS y 265.8 mg/l de Dureza Total, se dio inicio al segundo tratamiento con $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 % obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 14

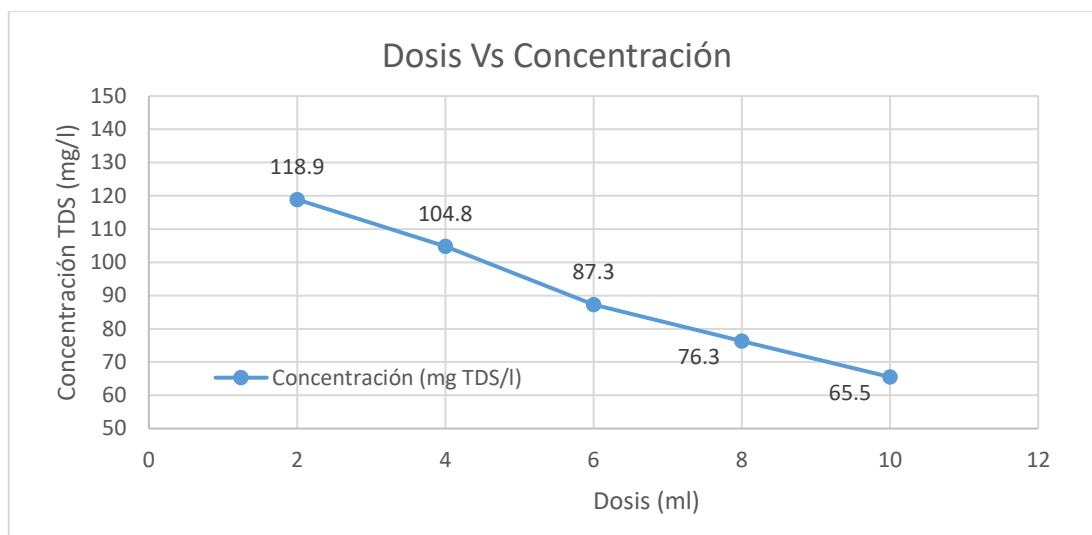
Dosis óptima y concentraciones residuales de TDS tratadas con $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 %

MUESTRA	$\text{Na}_2(\text{CO}_3)$: 5.0 %				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	6.35	6.73	7.22	7.56	7.94
[TDS] inicial	255.0 mg/l				
REPETICIONES	Concentración de TDS (mg/l)				
1	129.8	105.5	81.2	77.9	56.7
2	115.3	101.6	98.3	80.5	69.4
3	111.6	107.4	82.3	70.4	70.3
[TDS] Promedio	118.9	104.8	87.3	76.3	65.5

De la Tabla 14, se puede apreciar que los niveles de pH van incrementándose desde un valor inicial de 6.27 según se añaden las dosis de carbonato de sodio, así tenemos los valores de 6.35, 6.73, 7.22, 7.56 y 7.94. Asimismo, las concentraciones de TDS van bajando desde un valor inicial de 255.0 mg/l hasta un valor final de 65.5 mg/l.

Figura 9

Comportamiento de TDS tratada con la dosis de $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 %



En cuanto al comportamiento de los Sólidos Totales Disueltos (TDS) trabajada con una concentración de 5.0%, se aprecia que van disminuyendo de acuerdo a las dosis de carbonato de sodio añadidas. Así tenemos que, para la dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml se obtuvo concentraciones finales de 118.9, 104.8, 87.3, 76.3 y 65.5 mg/l respectivamente, siendo para este caso la mejor dosis o la óptima de 10 ml.

Tabla 15

Dosis óptima y concentración residual de dureza total tratadas con $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 %

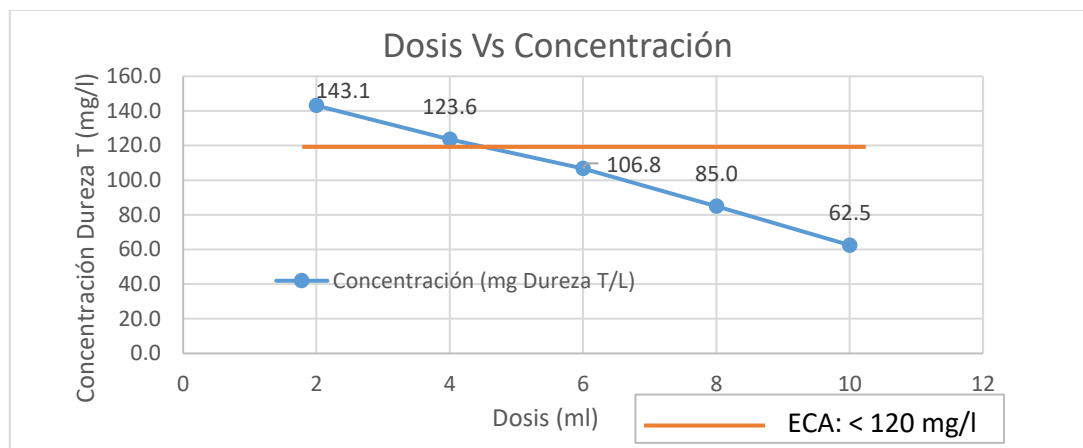
MUESTRA		$\text{Na}_2(\text{CO}_3)$: 5.0 %				
Dosis (ml)		2	4	6	8	10
pH		6.35	6.73	7.22	7.56	7.94
[Dureza T] inicial		265.8 mg/l				
REPETICIONES		Dureza Total (mg CaCO_3 /l)				
1		147.2	127.1	102.7	84.6	62.7
2		139.3	119.7	110.5	89.4	59.5
3		142.7	124.1	107.3	81.1	65.3
[Dureza T] Promedio		143.1	123.6	106.8	85.0	62.5

De la Tabla 15, se puede apreciar que los niveles de pH van incrementándose desde un valor inicial de 6.27 según se añaden las dosis de carbonato de sodio, así tenemos los valores

de 6.35, 6.73, 7.22, 7.56 y 7.94. Asimismo, las concentraciones de Dureza Total van bajando desde un valor inicial de 265.8 mg/l hasta un valor final de 62.5 mg/l.

Figura 10

Comportamiento de dureza total tratada con la dosis de $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 %



En cuanto al comportamiento de la Dureza Total trabajada con una concentración de 5.0%, se aprecia que van disminuyendo de acuerdo a las dosis de carbonato de sodio añadidas. Así tenemos que, para la dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml se obtuvo concentraciones finales de 143.1, 123.6, 106.8, 85.0 y 62.5 mg/l respectivamente, siendo para este caso las mejores dosis o las óptima de 6, 8 y 10 ml, ya que permite alcanzar el estándar de Calidad Ambiental.

Tercer tratamiento con hidróxido de calcio. Conocido el pH, concentración y dosis óptima del segundo tratamiento de 7.94, 5.0% y 10 ml de Cloruro Férrico respectivamente y valores iniciales de 65.5 mg/l de TDS y 62.5 mg/l de Dureza Total, se dio inicio al segundo tratamiento con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5.0 % obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 16

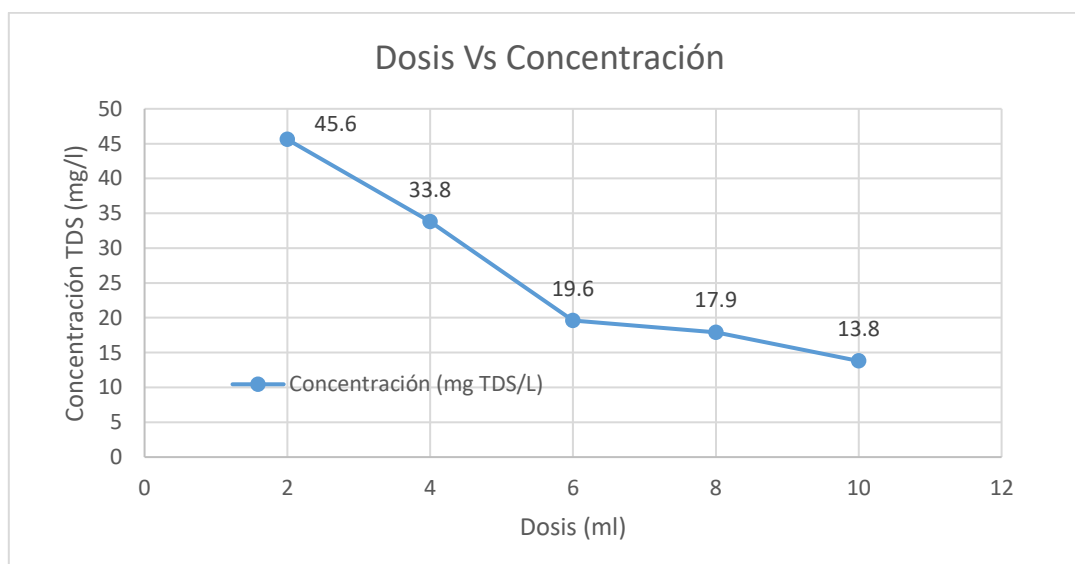
Dosis óptima y concentración residual de TDS tratadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5.0 %

MUESTRA	$\text{Ca}(\text{OH})_2$: 5.0 %				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	7.98	8.51	9.25	10.24	11.31
[TDS] inicial	65.5 mg/l				
REPETICIONES	Concentración de TDS (mg/l)				
1	49.8	33.5	21.2	17.9	13.7
2	45.3	36.6	19.3	18.5	13.4
3	41.6	31.4	18.3	17.4	14.3
[TDS] Promedio	45.6	33.8	19.6	17.9	13.8

De la Tabla 16, se puede apreciar que los niveles de pH van incrementándose desde un valor inicial de 7.94 según se añaden las dosis de hidróxido de calcio, así tenemos los valores de 7.98, 8.51, 9.25, 10.24 y 11.31. Asimismo, las concentraciones de Sólidos Totales Disueltos van bajando desde un valor inicial de 65.5 mg/l hasta un valor final de 13.8 mg/l.

Figura 11

Comportamiento de TDS tratada con la dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5.0 %



En cuanto al comportamiento de los Sólidos Totales Disueltos (TDS) trabajada con una concentración de 5.0%, se aprecia que van disminuyendo de acuerdo a las dosis de hidróxido

de calcio añadidas. Así tenemos que, para la dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml se obtuvo concentraciones finales de 45.5, 33.8, 19.6, 17.9 y 13.8 mg/l respectivamente, siendo para este caso la mejor dosis de 10 ml, ya que permite alcanzar la concentración más baja.

Tabla 17

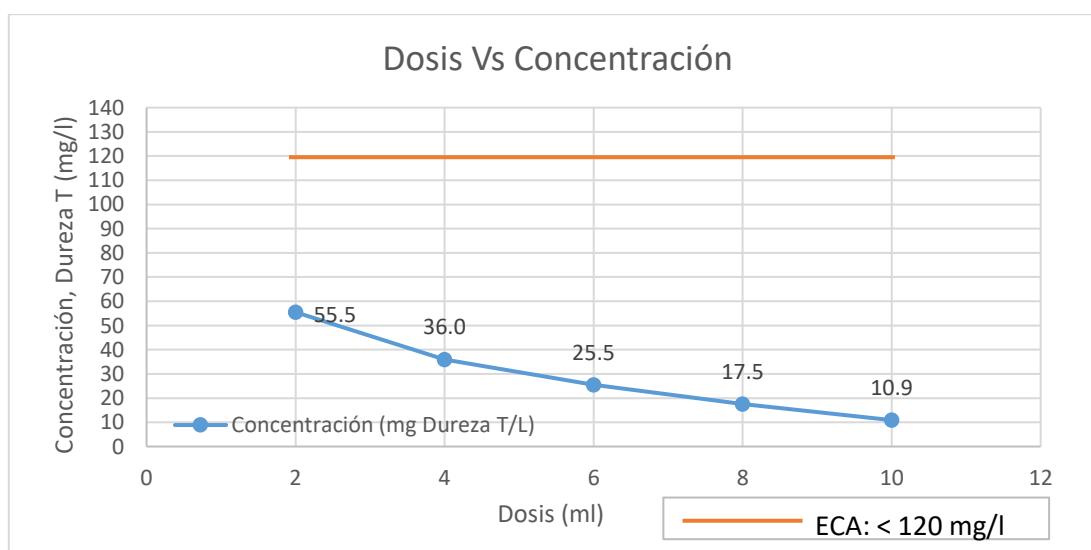
Dosis óptima y concentración residual de dureza total tratadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5.0 %

MUESTRA	Ca(OH) ₂ : 5.0 %				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	7.98	8.51	9.25	10.24	11.31
[Dureza] inicial	62.5 mg/l				
REPETICIONES	Dureza Total (mg CaCO ₃ /l)				
1	55.8	36.2	25.7	17.8	10.1
2	59.1	31.6	21.4	12.5	14.3
3	51.6	40.1	29.3	22.3	8.3
[Dureza] Promedio	55.5	36.0	25.5	17.5	10.9

De la Tabla 17, se puede apreciar que los niveles de pH van incrementándose desde un valor inicial de 7.94 según se añaden las dosis de hidróxido de calcio, así tenemos los valores de 7.98, 8.51, 9.25, 10.24 y 11.31. Asimismo, las concentraciones de Dureza Total van bajando desde un valor inicial de 62.5 mg/l hasta un valor final de 10.9 mg/l.

Figura 12

Comportamiento de dureza total tratada con la dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5.0 %



En cuanto al comportamiento de Dureza Total trabajada con una concentración de 5.0%, se aprecia que van disminuyendo de acuerdo a las dosis de hidróxido de calcio añadidas. Así tenemos que, para la dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml se obtuvo concentraciones finales de 55.5, 36.0, 25.5, 17.5 y 10.9 mg/l respectivamente, para este tratamiento todas las dosis cumplen con el estándar de Calidad Ambiental, y encontrándose en el nivel de aguas blandas.

4.4 Determinación de las eficiencias tratadas con cloruro férrico y suavizantes

A continuación, se muestran los resultados de las eficiencias registradas para cada uno de los tres tratamientos en la remoción de los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total, los cuales fueron trabajados con Cloruro Férrico y los suavizantes Carbonato de Sodio e Hidróxido de Calcio.

Tabla 18

Eficiencias obtenidas en la remoción de TDS tratadas con $FeCl_3$ al 0.5%

MUESTRA	$FeCl_3$: 0.5%				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	7.42	7.35	7.27	7.16	7.22
[] Inicial TDS (mg/l)	465.8	465.8	465.8	465.8	465.8
Final TDS (mg/l)	385.5	375.6	366.3	362.4	359.2
% Eficiencia	17.2	19.4	21.4	22.2	22.9

De la Tabla 18, se aprecia que las eficiencias trabajadas con $FeCl_3$ al 0.5% con las dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml alcanzan valores finales de 17.2, 19.4, 21.4, 22.2 y 22.9 % respectivamente, no llegando en ninguno de los casos a obtener valores altos de eficiencia para remover los Sólidos Totales Disueltos, siendo todos ellos inferiores al 23.0%.

Tabla 19

Eficiencias obtenidas en la remoción de TDS tratadas con FeCl₃ al 1.0%

MUESTRA	FeCl₃: 1.0%				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	7.02	6.88	6.64	6.41	6.25
[] inicial TDS (mg/l)	465.8	465.8	465.8	465.8	465.8
Final TDS (mg/l)	365.3	358.2	336.1	283.8	278.4
% Eficiencia	21.6	23.1	27.9	39.1	40.2

De la Tabla 19, se aprecia que las eficiencias trabajadas con FeCl₃ al 1.0 % con las dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml alcanzan valores finales de 21.6, 23.1, 27.9, 39.1 y 40.2 % respectivamente, no llegando en ninguno de los casos a obtener valores altos de eficiencia para remover los Sólidos Totales Disueltos, siendo todos ellos inferiores al 41.0%.

Tabla 20

Eficiencias obtenidas en la remoción de TDS tratadas con FeCl₃ al 1.5%

MUESTRA	FeCl₃: 1.5%				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	6.38	6.35	6.27	6.16	6.02
[] inicial TDS (mg/l)	465.8	465.8	465.8	465.8	465.8
[] Final TDS (mg/l)	309.2	264.9	255.0	256.3	259.5
% Eficiencia	33.6	43.1	45.3	45.0	44.3

De la Tabla 20, se aprecia que las eficiencias trabajadas con FeCl₃ al 1.5 % con las dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml alcanzan valores finales de 33.6, 43.1, 45.3, 45.0 y 44.3 % respectivamente, no llegando en ninguno de los casos a obtener valores altos de eficiencia para remover los Sólidos Totales Disueltos, siendo todos ellos inferiores al 45.0%.

Tabla 21

Eficiencias obtenidas en la remoción de dureza total tratadas con FeCl₃ al 0.5%

MUESTRA	FeCl₃: 0.5%				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	7.42	7.35	7.27	7.16	7.22
[] inicial Dureza T (mg/l)	357.4	357.4	357.4	357.4	357.4
[] Final Dureza T (mg/l)	345.6	337.0	326.6	313.3	297.4
% Eficiencia	3.3	5.7	8.6	12.3	16.8

De la Tabla 21, se aprecia que las eficiencias trabajadas con FeCl₃ al 0.5 % con las dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml alcanzan valores finales de 3.3, 5.7, 8.6, 12.3 y 16.8 % respectivamente, no llegando en ninguno de los casos a obtener valores altos de eficiencia para remover la Dureza Total, siendo todos ellos inferiores al 17.0%.

Tabla 22

Eficiencias obtenidas en la remoción de dureza total tratadas con FeCl₃ al 1.0%

MUESTRA	FeCl₃: 1.0%				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	7.02	6.88	6.64	6.41	6.25
[] inicial Dureza T (mg/l)	357.4	357.4	357.4	357.4	357.4
[] Final Dureza T (mg/l)	330.0	326.3	317.9	304.8	288.9
% Eficiencia	7.7	8.7	11.1	14.7	19.2

De la Tabla 22, se aprecia que las eficiencias trabajadas con FeCl₃ al 1.0 % con las dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml alcanzan valores finales de 7.7, 8.7, 11.1, 14.7 y 19.2 % respectivamente, no llegando en ninguno de los casos a obtener valores altos de eficiencia para remover la Dureza Total, siendo todos ellos inferiores al 20.0%.

Tabla 23

Eficiencias obtenidas en la remoción de dureza total tratadas con FeCl_3 al 1.5%

MUESTRA	FeCl_3: 1.5%				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	6.38	6.35	6.27	6.16	6.02
[] inicial Dureza T (mg/l)	357.4	357.4	357.4	357.4	357.4
[] Final Dureza T (mg/l)	314.0	289.7	265.8	267.6	266.8
% Eficiencia	12.1	18.9	25.6	25.1	25.3

De la Tabla 23, se aprecia que las eficiencias trabajadas con FeCl_3 al 1.5 % con las dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml alcanzan valores finales de 12.1, 18.9, 25.6, 25.1 y 25.3 % respectivamente, no llegando en ninguno de los casos a obtener valores altos de eficiencia para remover la Dureza Total, siendo todos ellos inferiores al 26.0%.

Tabla 24

Eficiencias obtenidas en la remoción de TDS tratadas con $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 %

MUESTRA	$\text{Na}_2(\text{CO}_3)$: 5.0 %				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	6.35	6.73	7.22	7.56	7.94
[] inicial TDS (mg/l)	255.0	255.0	255.0	255.0	255.0
[] Final TDS (mg/l)	118.9	104.8	87.3	76.3	65.5
% Eficiencia	53.4	58.9	65.8	70.1	74.3

De la Tabla 24, se aprecia que las eficiencias trabajadas con $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 % con las dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml alcanzan valores finales de 53.4, 58.9, 65.8, 70.1 y 74.3% respectivamente, llegando en todos los casos a obtener valores medios de eficiencia en la remoción de los TDS, encontrando todos ellos entre el 53.0 y 74% aproximadamente.

Tabla 25

Eficiencias obtenidas en la remoción de dureza total tratadas con $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 %

MUESTRA	$\text{Na}_2(\text{CO}_3)$: 5.0 %				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	6.35	6.73	7.22	7.56	7.94
[] inicial Dureza T (mg/l)	265.8	265.8	265.8	265.8	265.8
[] Final Dureza T (mg/l)	143.1	123.6	106.8	85.0	62.5
% Eficiencia	46.2	53.5	59.8	68.0	76.5

De la Tabla 25, se aprecia que las eficiencias trabajadas con $\text{Na}_2(\text{CO}_3)$ al 5.0 % con las dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml alcanzan valores finales de 46.2, 53.5, 59.8, 68.0 y 76.5% respectivamente, llegando en todos los casos a obtener valores medios de eficiencia en la remoción de los Dureza Total, encontrando todos ellos entre el 46.0 y 76.0% aproximadamente.

Tabla 26

Eficiencias obtenidas en la remoción de TDS tratadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5.0 %

MUESTRA	$\text{Ca}(\text{OH})_2$: 5.0 %				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	7.92	8.51	9.25	10.24	11.31
[] inicial TDS (mg/l)	65.5	65.5	65.5	65.5	65.5
[] Final TDS (mg/l)	45.6	33.8	19.6	17.9	13.8
% Eficiencia	30.4	48.3	70.1	72.6	78.9

De la Tabla 26, se aprecia que las eficiencias trabajadas con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5.0 % con las dosis de 2 y 4 ml alcanzan valores finales relativamente bajos de 30.4 y 48.3 respectivamente, mientras que con las dosis de 6, 8 y 10 ml se alcanzaron valores de 70.1, 72.6 y 78.9% respectivamente, llegando en los tres últimos casos a obtener valores relativamente altos de eficiencia en la remoción de los TDS, siendo superiores al 70.0%.

Tabla 27

Eficiencias obtenidas en la remoción de dureza total tratadas con Ca(OH)_2 al 5.0 %

MUESTRA	Ca(OH)_2: 5.0 %				
Dosis (ml)	2	4	6	8	10
pH	7.92	8.51	9.25	10.24	11.31
[] inicial Dureza T (mg/l)	62.5	62.5	62.5	62.5	62.5
[] Final Dureza T (mg/l)	55.5	36.0	25.5	17.5	10.9
% Eficiencia	11.2	42.5	60.1	71.9	82.6

De la Tabla 27, se aprecia que las eficiencias trabajadas con Ca(OH)_2 al 5.0 % con las dosis de 2 y 4 ml alcanzan valores finales relativamente bajos de 11.2 y 42.5 respectivamente, mientras que con las dosis de 6, 8 y 10 ml se alcanzaron valores de 60.1, 71.9 y 82.6% respectivamente, llegando en los tres últimos casos a obtener valores relativamente altos de eficiencia en la remoción de los Dureza Total, siendo superiores al 60.0%.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Yadai y Suzuki (2023) en su estudio sobre alcanzar una desalinización eficiente mediante una membrana de ósmosis inversa (RO) proponen una eliminación previa de sustancias que causan el bloqueo del agua de mar cruda; es así que realizaron un proceso de pretratamiento para la desalinización, combinando el ablandamiento tradicional con floculación con balasto (SBF) para la eliminación de Ca^{2+} y Mg^{2+} . Una mezcla alcalina de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y Na_2CO_3 fue el agente suavizante más eficiente para la eliminación de Ca^{2+} y Mg^{2+} con una cantidad reducida de lodo generado, alcanzando hasta el 100% de eliminación de estos cationes generadores principales de la dureza del agua. Este tratamiento de ablandamiento eliminó simultáneamente los sólidos suspendidos y las bacterias del agua de mar real. La velocidad de sedimentación de los sólidos en suspensión generados mediante el ablandamiento del agua de mar era extremadamente baja. En las condiciones óptimas para desalinizar agua de mar real utilizando un floculante de polímero aniónico y microarena, la velocidad de sedimentación superó los 3,5 cm/s, 833 veces mayor que la del ablandamiento sin floculación con lastre. En nuestra investigación, se utilizó el Cloruro Férrico (1.5%) como agente floculante previo a los suavizantes, alcanzando una eficiencia parcial del 25.6%, para nuestro caso no se mezclaron los agentes suavizantes de Na_2CO_3 al (5%) e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5%, ambos se trabajaron de forma consecutiva y se evaluó su eficiencia por separado, obteniéndose un resultado parcial de 76.5% para el primer suavizante y final de 82.6 % para el segundo suavizante.

Kausley et al. (2022) mencionan que el ablandamiento con cal, el proceso de carbonato de sodio y la electrocoagulación (EC) se comparan para eliminar la dureza y las sales disueltas (medidas como conductividad) del agua subterránea en este estudio. El proceso de ablandamiento con cal, el proceso de carbonato de sodio y sus combinaciones tienen eficiencias de eliminación de dureza de 70.7, 33.3 y 86.7%, respectivamente, con energía eléctrica

requerida por unidad de masa (EEM) de dureza de 0.23, 3.08 y 0.78 kilovatios por kilogramo. Aunque el ablandamiento con cal requiere un EEM bajo, la eliminación de dureza ideal es del 70.7%, por lo que debe combinarse con carbonato de sodio para obtener una eliminación más efectiva. El proceso de carbonato de sodio aumenta la conductividad, mientras que el ablandamiento con cal la reduce en un 40.3%. Se ha descubierto que la EC reduce tanto la dureza como la conductividad (TDS) del agua subterránea; sin embargo, para eliminar la dureza, se requiere un alto valor EEM de 258 kWh/kg. Además, funciona mejor en ambientes alcalinos. Durante el tratamiento EC, el uso de NaOH y $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para ajustar el pH ayuda a reducir el valor EEM a 141 y 198 kWh/kg, respectivamente. Aunque el uso de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reduce la EEM en comparación con NaOH, también ayuda a reducir la conductividad en lugar de aumentarla, como sucede con el proceso de tratamiento. Los resultados obtenidos en la presente investigación no incluyeron la electrocoagulación, se trabajó únicamente con coagulación previa de FeCl_3 al 0.5, 1.0 y 1.5%, de los cuales se pudo obtener que la concentración óptima fue de 1.5%, y suavizantes aplicados en serie (uno a continuación de otro) de Na_2CO_3 al 5% en primer lugar e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5% en segundo lugar, a fin de conocer la eficiencia final, los cuales arrojaron un resultado del 82.6%.

Liu et al. (2020), en su artículo científico plantea como objetivo proporcionar un método con un suavizante químico adecuado para prevenir incrustaciones minerales en desalinización por ósmosis inversa, durante el tratamiento de agua de retorno de gas de esquisto antes de la descarga, especialmente con altas cantidades de Ca, Mg, Ba y Sr. En este estudio, se evaluó el comportamiento de precipitación de Ca^{+2} , Mg^{+2} , Ba^{+2} y Sr^{+2} durante el ablandamiento químico tradicional para lograr una dosis química óptima. Las pruebas con Na_2CO_3 fueron con concentraciones de 1000, 2000, 3000, 4000 y 5000 mg/l alcanzando resultados el Calcio de 370.25 a 33.83 mg/l, Estroncio de 68.945 a 28.31 mg/l y el Bario de 141.9 a 8.47 mg/l, en cambio el Magnesio sólo se eliminó el 34.48% de 65.555 a 22.6 mg/l. Tanto las pruebas de

jarra como la simulación del analizador de corriente OLI revelaron que los principales precipitados fueron CaCO_3 , SrCO_3 y BaSO_4 durante la adición de Na_2CO_3 , sin embargo, el Na_2CO_3 no podía eliminar el Ba^{+2} de manera eficiente a menos que se aplicara una dosis alta, ya que el Ba^{+2} reaccionaría después de la precipitación de Ca^{+2} y Sr^{+2} . Finalmente, se propuso el proceso Na_2SO_4 - NaOH - Na_2CO_3 para el ablandamiento químico ya que tiene una alta eficiencia de remoción y un bajo costo químico. Con relación a nuestro trabajo de investigación se trabajó con una concentración de Na_2CO_3 al 5% y dosis de 2, 4, 6, 8 y 10 ml, reduciéndose la dureza total de 265.8 hasta 62.5 mg/l, sin embargo, para alcanzar una mayor remoción fue necesario trabajar con un suavizante adicional como $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5%, reduciéndose finalmente de 62.5 hasta 10.9 mg/l.

VI. CONCLUSIONES

- De acuerdo al primer objetivo específico la caracterización de las aguas del canal Surco mostraron que los parámetros de Temperatura (19.4°C), pH (7.53), y Conductividad Eléctrica (956.4 uS/cm) se encuentran dentro de los Estándares de Calidad Ambiental, la Dureza Total (357.4 mg/l) excede el Estándar de Calidad, y para el caso de Sólidos Totales Disueltos (465.8 mg/l) y Salinidad (0.5 ‰) no cuentan con un Estándar de Calidad con fines de comparación.
- De acuerdo al segundo objetivo específico se concluye que de las tres concentraciones de Cloruro Férrico utilizadas al 0.5, 1.0 y 1.5%, la concentración óptima fue de 1.5%, y dosis de 6 ml., llegando a reducir la concentración inicial de TDS (465.8 mg/l) hasta 255.0 mg/l y Dureza Total (357.4 mg/l) hasta 265.8 mg/l.
- De acuerdo al tercer objetivo específico se concluye que las concentraciones utilizadas de suavizantes químicos de Na_2CO_3 al 5% con dosis de 10 ml, la dureza total se redujo de 265.8 hasta 62.5 mg/l, sin embargo, para alcanzar una mayor remoción fue necesario trabajar con un suavizante adicional como $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5%, reduciéndose con la dosis de 10 ml de 62.5 hasta 10.9 mg/l, mientras que los TDS con las mismas concentraciones y dosis se redujeron de 465.8 mg/l iniciales hasta 13.8 mg/l finales.
- Se concluye que la eficiencia para Dureza Total con Cloruro Férrico al 1.5% fue del 25.6%, y para los suavizantes de Na_2CO_3 e $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 5%, las eficiencias dieron como resultado de 76.5% parcial para el primero y de 82.6% final para el segundo, mientras que los TDS con las mismas concentraciones y dosis alcanzaron eficiencias para el primer y segundo suavizante de 74.3 y 78.9 % respectivamente.

VII. RECOMENDACIONES

- A fin de evitar problemas de incrustaciones y corrosión en los sistemas de tuberías por el uso de aguas duras, se recomienda aplicar el método desarrollado con los suavizantes trabajados en la presente investigación, el cual ha demostrado alcanzar eficiencias importantes en la remoción de los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas naturales.
- A fin de conocer la posibilidad de alcanzar mayores eficiencias en la remoción de los Sólidos Totales Disueltos y la Dureza Total se recomienda utilizar otras concentraciones y/o dosis del coagulante y con suavizantes diferentes a las aplicadas en la presente investigación.
- Se recomienda utilizar otros coagulantes y/o suavizantes químicos de naturaleza orgánica o inorgánica con la finalidad de conocer la capacidad de los mismos en la remoción de Sólidos Totales Disueltos y la Dureza Total en aguas naturales con fines industriales.
- Se recomienda a las autoridades competentes elaborar un Estándar de Calidad Ambiental Nacional para los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total con fines de comparación, ya que en la actualidad para el caso de Dureza del agua se viene utilizando normativas internacionales de clasificación como las dictadas por la Organización Mundial de la Salud-OMS.

VIII. REFERENCIAS

- Abad, Y. (2023). *Evaluación microbiológica del canal Huatica y propuesta de tratamiento con fines de riego en áreas recreativas del distrito de Magdalena del Mar, 2021*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV.
https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/7919/UNFV_FIGAE_Abad_Velasquez_Yoselin_Titulo_profesional_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Agostinho, L. C. L., Nascimento, L. y Cavalcanti, B. F. (2012). Water hardness removal for industrial use: Application of the electrolysis process. *Open Access Scientific Reports*, 1, 460–465.
- Ahn, M. K., Chilakala, R., Han, C. y Thenepalli, T. (2018). Removal of hardness from water samples by a carbonation process with a closed pressure reactor. *Water*, 10(1), 54.
<https://doi.org/10.3390/w10010054>
- Resolución Jefatural N.º 010-2016-ANA. Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales. (11 de enero de 2016).
<https://sinia.minam.gob.pe/documentos/protocolo-nacional-monitoreo-calidad-recursos-hidricos-0>
- Baldeón, C. (2016). *Implementación de un sistema de tratamiento de agua, para la reducción de costos de mantenimiento correctivo en la empresa industria FIBRAFORTE S.A.* [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN.
https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/10820/T055_40485141_T.pdf?sequence=1
- Bibiano, L. (2009). *Inducción del ablandamiento en aguas carbonatadas mediante procesos fisicoquímicos de desgasificación del CO₂ y mecanismos de sorción*. [Tesis doctoral,

- Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio Institucional UAEMéx.
<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/94860/6.%20Bibiano%2c%20L.%202009.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bindhu, B. K., Shaji, H., Kuruvila, K. J., Nazerine, M. y Shaji, S. (2021). Removal of total hardness using low cost adsorbents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1114(1), Artículo 012089.
- Cahuana, Y. y Meza, C. (2024). *Análisis de la influencia de los coagulantes sulfato de aluminio y cloruro férrico en la remoción de turbidez de las aguas del río Shullcas, Huancayo, 2022*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental.
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/14500/12/IV_FIN_107_TE_Cahuana_Meza_2024.pdf
- Chávez, J. (2021). *Tratamiento de la dureza de las aguas utilizando un filtro con espesor variable de zeolita-2019*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio UNC.
<https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/4676/TESIS%20JOS%203%89%20CRISTIAN%20ADOLFO%20CH%c3%81VEZ%20MARRUFO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cifuentes, E. (2007). *Análisis y rehabilitación del ablandador de agua para el laboratorio de Ingeniería Química*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio USAC. <https://biblio.ingenieria.usac.edu.gt/tesis/T8126.pdf>
- Comstock, G. W. (1979). Water hardness and cardiovascular disease. *American Journal of Epidemiology*, 110, 375–400.
- Constitución Política del Perú [Const.] Arts. 2, 66–67, 29 de diciembre de 1993 (Perú).

Decreto Legislativo N.º 1083. Decreto Legislativo que promueve el aprovechamiento eficiente y la conservación de los recursos hídricos. (28 de junio de 2008).

<https://spij.minjus.gob.pe/spij-ext-web/#/detallenorma/H672859>

Decreto Supremo N.º 001-2010-AG. Aprueban Reglamento de la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos. (24 de marzo de 2010). <https://spij.minjus.gob.pe/spij-ext-web/#/detallenorma/H1005557>

Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. (7 de junio de 2017). <https://spij.minjus.gob.pe/spij-ext-web/#/detallenorma/H1182180>

Duque, P. (2012). *Estudio de la influencia de la adición de Cloruro Férrico en la sedimentabilidad de los fangos activados*. [Tesis de maestría, Universitat Politècnica de València]. Repositorio de la Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/17975>

Fayyaz Shahandashty, B., Fallah, N. y Nasernejad, B. (2024). Evaluation of enhanced chemical coagulation method for a case study on colloidal liquid particle in wastewater treatment: Statistical optimization analysis and implementation of machine learning. *Journal of Environmental Management*, 370, 122345. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122345>

Gabrielli, C., Maurin, G., Francy-Chausson, H., Thery, P., Tran, T. T. M. y Tlili, M. (2006). Electrochemical water softening: Principle and application. *Desalination*, 201, 150–163.

García, A. y Zevallos, K. (2021). *Optimización del proceso coagulación-floculación usando cloruro férrico y fosfato para la reducción de contaminantes del agua residual del camal CONCHUCOS S.A., Lima*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del

Callao]. Repositorio Institucional UNAC.

https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/6201/TESIS_PREGRA DO_GARCIA_ZEVALLOS_FIARN_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y

García, B. (2024). *Estudio de la sedimentación y proceso de precipitación para reducir la dureza en aguas de vertiente en el municipio Luribay*. [Tesis de pregrado, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio UMSA.

<https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/35051/PG-8792.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gonzales, M. A. (17 de julio de 2024). El agua del río que abastece todo Lima contiene niveles peligrosos de plomo, cobre y arsénico. *Infobae*.

<https://www.infobae.com/peru/2024/07/17/el-agua-del-rio-que-abastece-todo-lima-contiene-niveles-peligrosos-de-plomo-cobre-y-arsenico/>

Huallpa, H. (2017). *Tratamiento químico en la reducción de la dureza de las aguas subterráneas provenientes de la Urb. Huerta de Nievería – Chosica, 2017*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV.

https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/8957/Huallpa_THN.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Huamanta, E. y Sánchez, M. (2021). *Eficiencia del tripolifosfato de sodio para reducir la dureza del agua potable en la localidad de Quiden, distrito de Paccha, Chota*. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV.

https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/81325/Huamanta_BE-Sanchez_CNAE-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Jaramillo, R. (2024). *Tratamientos fisicoquímicos para la remoción de sólidos suspendidos en el agua residual del hato porcino de la ESPAM MFL*. [Tesis de pregrado, Escuela

- Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López]. Repositorio ESPAM MFL. http://190.15.143.100:8080/bitstream/42000/2431/1/TIC_IA93D.pdf
- Kausley, S., Desai, K. S., Patil, R., Malhotra, C. y Pandit, H. (2022). Comparative study of lime softening, soda ash process, and electrocoagulation for the removal of hardness from groundwater. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 88, 379–391. <https://doi.org/10.1007/s43538-022-00096-z>
- Ley N.º 26842. Ley General de Salud. (20 de julio de 1997). <https://spij.minjus.gob.pe/spij-ext-web/#/detallenorma/H775516>
- Ley N.º 28611. Ley General del Ambiente. (15 de octubre de 2005). <https://spij.minjus.gob.pe/spij-ext-web/#/detallenorma/H901891>
- Ley N.º 29338. Ley de Recursos Hídricos. (31 de marzo de 2009). <https://spij.minjus.gob.pe/spij-ext-web/#/detallenorma/H984116>
- Liu, W., Sun, L. y Tao, S. (2020). Removal of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} and Sr^{2+} from shale gas flowback water from the Sichuan Basin in China by chemical softening under the guidance of OLI Stream Analyzer: precipitation behaviors and optimization study. *Water Science and Technology*, 82(1), 194-206.
- Luján, A. (2015). *Ablandamiento de agua con adsorbentes modificados químicamente*. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio Institucional UANL. <http://eprints.uanl.mx/16482/1/1080289795.pdf>
- Madhusudhan, M. S., Surendra, H. J., Rajendra, H. J., Chinmay, V. y Udaygowda, U. S. (2023). Removal of hardness using natural and synthetic water treatment system for safe and sustainable water supply in the Indian context. *Sustainable Water Resources Management*, 9(6), Artículo 179.

- Martínez, F. (2003). *Estudio y optimización del proceso de suavización para aguas residuales tratadas biológicamente*. [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey]. Repositorio Tec.
https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/570509/DocsTec_1413.pdf?sequence=11&isAllowed=y
- Microsoft Corporation. (2010). Microsoft Excel (Versión 2010) [Software].
- Moreira-Romero, Á. F. (2016). Consideraciones actuales sobre ablandamiento del agua. *Dominio de las Ciencias*, 2(4), 334–345. <https://doi.org/10.23857/dc.v2i4.258>
- Mungondori, H. H., Muchingami, T. A., Taziwa, R. T. y Chaukura, N. (2021). Performance intensification of the coagulation process in drinking water treatment. *Water SA*, 47(2), 154–161. <https://doi.org/10.17159/wsa/2021.v47.i2.10911>
- Neri, L. C. y Johansen, H. L. (1978). Water hardness and cardiovascular mortality. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 304, 203–221.
- Padmapriya, R., Saranya, T. y Thirunalasundari, T. (2015). *Phyllanthus emblica*—A biopotential for hard water treatment. *International Journal of Pure and Applied Bioscience*, 3, 291–295.
- Panamericana. (11 de abril de 2024). *Parques en peligro por obstrucción en canal de regadío del río Surco*. <https://panamericana.pe/buenosdiasperu/locales/408830-parques-peligro-obstruccion-canal-regadio-rio-surco>
- Park, J.-S., Song, J.-H., Yeon, K.-H. y Moon, S.-H. (2007). Removal of hardness ions from tap water using electromembrane processes. *Desalination*, 202, 1–8.
- Poma, J. y Quispe, P. (2016). *Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas por el método de electrocoagulación* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro

del Perú]. Repositorio Institucional UNCP.

<https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3757/Poma%20Javier-Quispe%20Sanca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Pratap, R. (2022). Techniques used in water softening and purification. En B. Satyannarayana (Ed.), *Current research of nanotechnology in science and engineering* (Vol. 1, p. 4).

<https://www.researchgate.net/publication/371955668>

Quintana, A. (2019). *Desarrollo de un sistema de filtración para la remoción de dureza del agua en la empresa Cosmogreen S.A.S Cúcuta - Norte de Santander*. [Tesis de pregrado, Universidad de Pamplona]. Repositorio Institucional Unipamplona.
http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5124/1/Quintana_2019_TG.pdf

Rashuaman, K. (2024). *Comparación de la eficiencia de tratamiento en la remoción de materia orgánica entre Opuntia ficus-indica y cloruro férrico para las aguas del río Mantaro-2023*. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Continental.
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/15535/1/IV_FIN_107_TE_Rashuaman_Benito_2024.pdf

Riccio, L. (2015). *Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas del colector agua de las vírgenes por electrocoagulación, a nivel de laboratorio, utilizando como fuente energética un panel fotovoltaico*. [Tesis doctoral, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP.
<https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/4171/Riccio%20Yauri.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Rojas, M. (2022). Floculante natural a partir de pectina de cáscara de plátano para la extracción de metales pesados de aguas contaminadas. *Expo Ibero Otoño, 1*, 4–6.
https://repositorio.iberopuebla.mx/bitstream/handle/20.500.11777/5579/Floculante%20natural%20a%20partir%20de%20pectina%20de%20c%c3%a1scara%20de%20pl%c3%a1tano%20para%20la%20extracci%c3%b3n%20de%20metales%20pesados%20de%20aguas%20contaminadas_modalidad%20prototipo_art%c3%adculo_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sengupta, P. (2013). Potential health impacts of hard water. *International Journal of Preventive Medicine, 4*(8), 866–875.
- Sodimate México. (s.f.). *Uso de cal y carbonato de sodio (soda ash) en el tratamiento de agua. Ablandamiento / suavización de aguas duras.*
<https://sodimate.com.mx/suavizacion-cal-carbonato/>
- Solis, J. (2022). *Influencia del empleo de un filtro ablandador-multimedia en la reducción de la concentración de carbonatos presentes en el agua para consumo humano del Centro Poblado Casa Blanca del Distrito de Santiago - Ica – 2021.* [Tesis de maestría, Universidad Nacional San Luis Gonzaga]. Repositorio Institucional UNICA. <https://repositorio.unica.edu.pe/server/api/core/bitstreams/ad475fe5-2b44-4f11-a676-c6f2adcc7510/content>
- Velásquez, A. (2022). *Evaluación de la eficiencia de la electrocoagulación como tratamiento complementario para las aguas del río Surco en la planta de tratamiento de San Borja (PTSB), Lima, Perú, 2021.* [Tesis de pregrado, Universidad Científica del Sur]. Repositorio Institucional UCSUR.
<https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/2673/TL-Velasquez%20A-Ext.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Yadai, T. y Suzuki, Y. (2023). Development of softening and ballasted flocculation as a pretreatment process for seawater desalination through a reverse osmosis membrane. *npj Clean Water*, 6, Artículo 7. <https://doi.org/10.1038/s41545-023-00226-0>

IX. ANEXOS

Anexo A. Matriz de consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
Problema general ¿Cómo es la aplicación del Cloruro Férrico con suavizantes químicos para la remoción de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco, 2024?	Objetivo general Evaluar la aplicación del Cloruro Férrico con suavizantes químicos para la remoción de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco, Lima 2024.	Hipótesis general La aplicación de Cloruro Férrico con suavizantes químicos remueve los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco, Lima 2024.	Variable Independiente	El ablandamiento químico consiste en aplicar sustancias químicas u orgánicas al agua que reaccionan con los iones calcio y magnesio, transformándolos en compuestos insolubles, que son separados del agua por procedimientos físicos convencionales (decantación y filtración) (Moreira-Romero, 2016).	A fin de evaluar los factores que intervienen y permiten desarrollar este proceso, se tomarán en cuenta los precipitantes químicos y parámetros operativos que influyen directamente en los resultados finales de remoción a través del Jar Test, estos parámetros incluyen la concentración, dosis, tiempo, velocidad de agitación, volumen y otros	Precipitantes Químicos	Dosis	ml
Problemas Específicos 1. ¿Cuáles son los niveles de los parámetros fisicoquímicos antes de la remoción de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco?	Objetivos Específicos 1. Determinar los niveles de los parámetros fisicoquímicos antes de la remoción de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco.	Hipótesis Específicos 1. Los niveles de los parámetros fisicoquímicos se encuentran fuera de los Estándares de Calidad Ambiental en las aguas del canal Surco.					Aplicación de Cloruro Férrico con suavizantes químicos	Tiempo
			Velocidad de Agitación	rpm				
			Concentración	g/l				
2. ¿Cuál es la dosis óptima de Cloruro Férrico para la remoción inicial de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco?	2. Estimar la dosis óptima de Cloruro Férrico para la remoción inicial de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco.	2. El Cloruro Férrico presenta una dosis óptima capaz de remover los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco.	Variable Dependiente	La remoción o desestabilización de las partículas contaminantes es el resultado de la eliminación de las fuerzas de repulsión. La aglomeración se produce bajo las fuerzas de atracción entre las partículas las cuales se dan por la acción del floculante. Y la sedimentación se da cuando las partículas toman un tamaño adecuado que puede ser separado por acción de la gravedad (Jaramillo, 2024,	Para evaluar la remoción de los TDS y Dureza Total se tomarán en cuenta las concentraciones iniciales de trabajo considerado por el investigador, para luego ser sometido a un proceso de tratamiento con precipitantes químicos para observar sus nuevos niveles alcanzados, tomaremos en cuenta las concentraciones finales obtenidos en cada caso.	Parámetros Inorgánicos	Concentración TDS	(mg/l)
3. ¿Cuáles son las dosis de los suavizantes químicos para la remoción final de los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco?	3. Estimar las dosis óptimas de los suavizantes químicos para la remoción final de Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco.	3. Los suavizantes químicos presentan una dosis óptima capaz de remover los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco					Remoción de STD y Dureza Total	Concentración de Dureza Total
4. ¿Cuáles es la eficiencia del Cloruro Férrico y los suavizantes químicos para la remoción final de los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco?	4. Determinar la eficiencia del Cloruro Férrico y los suavizantes químicos para la remoción final de los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco.	4. El Cloruro Férrico y los suavizantes químicos son eficientes para remover los Sólidos Totales Disueltos y Dureza Total en aguas del canal Surco.						

Anexo B. Ficha técnica para la recopilación de los resultados de campo.

	“APLICACIÓN DE CLORURO FERRICO CON SUAVIZANTES QUIMICOS PARA LA REMOCIÓN DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y DUREZA TOTAL EN AGUAS DEL CANAL SURCO, 2024”				
	FORMATO FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE CAMPO				VERSIÓN: 01
					PÁGINAS: 1 DE 1
ESTACIÓN	EQUIPO				
	Multiparámetro	Potenciómetro	Conductímetro	Turbidímetro	
ANALISIS 2	PARAMETROS FISICOQUIMICOS				

MONITOREOS	pH	Temperatura	Conductividad	Sólidos Totales Disueltos	Salinidad	Dureza Total	Otro
	0 -14	°C	uS/cm	mg/L	%	mg/l	
Monitoreo 1							

Anexo C. Ficha de laboratorio del Jar Test

	“APLICACIÓN DE CLORURO FERRICO CON SUAVIZANTES QUIMICOS PARA LA REMOCIÓN DE SÓLIDOS TOTALES DISUELTOS Y DUREZA TOTAL EN AGUAS DEL CANAL SURCO, 2024”	
	FORMATO FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS DE LABORATORIO	VERSIÓN: 01

FECHA DE ANALISIS	METODO: JAR TEST			
	N° DE JARRAS	N° DE PRUEBAS	N° DE REPETICIONES	MUESTRAS TOTALES

	PRUEBA DE JARRAS (BIOADSORBENTE E HIDROXIDO DE CALCIO)						
	Concentración de Coagulante/Suavizantes	Dosis de Coagulante/Suavizante	Velocidad	Tiempo	Volumen	Modo Lento/Rápido	Tiempo de sedimentación
	%	ml	RMP	Minutos	Litros	RPM	Minutos/Horas
Jarra 1							
Jarra 2							
Jarra 3							
Jarra 4							
Jarra 5							

Anexo D. Etiqueta

 Universidad Nacional Federico Villarreal		PROTOCOLO PARA TOMA MUESTRAS			
		ETIQUETA PARA MUESTRAS DE CAMPO			
		CODIGO LAB:		VERSIÓN: 001 – 2024	
CODIGO CAMPO:		FECHA:		HORA:	
LUGAR:		PRESERVADA:	SI		
PARÁMETRO:			NO		
DEPARTAMENTO Y DISTRITO:					
MATRIZ:					
RESPONSABLE:					
SOLICITANTE:					
DIRECCION:					

Anexo E. Formato de ingreso de muestras al laboratorio.

 Universidad Nacional Federico Villarreal		PROTOCOLO PARA TOMA MUESTRAS		
		FORMATO DE INGRESO DE MUESTRAS AL LABORATORIO		
Código:		Versión: 001 - 2024		
Elaboración:		Revisión:		Aprobación:
Fecha		Fecha:		Fecha:
FECHA	HORA	CODIGO	RESPONSABLE	OBSERVACIÓN

Anexo F. Presupuesto de uso de reactivos en la investigación

Ítem	Reactivo / Solución Química	Función Metodológica	Costo Unitario
1	Cloruro Férrico (Pureza técnica)	Coagulante (Fase I Jar Test: 0.5%, 1.0%, 1.5%)	S/. 45.00
2	Carbonato de Sodio Na ₂ CO ₃	Primer Suavizante (Fase II Jar Test: Solución al 5%)	S/. 25.00
3	Hidróxido de Calcio Ca(OH) ₂	Segundo Suavizante (Fase III Jar Test: Solución al 5%)	S/. 35.00
4	Sal Sódica de EDTA	Solución Titulante Patrón Dureza Total (3.723 g/L)	S/. 90.00
5	Cloruro e Hidróxido de Amonio	Preparación de Solución Tampón de Dureza Total	S/. 160.00
6	Negro de Eriocromo T	Indicador visual de viraje volumétrico (al 0.5%)	S/. 110.00
7	Alcohol Etílico (Etanol 96%)	Disolvente del indicador Negro de Eriocromo T	S/. 25.00
8	Agua Destilada / Desionizada	Disolvente para aforos en fioles y lavado final	S/. 55.00
Total			S/. 545.00