

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en
Ingeniería Ambiental

**“Evaluación del producto Clear Chem como coadyuvante en el proceso de
coagulación-floculación del sulfato de aluminio en la Planta Potabilizadora AyA
Guadalupe, Goicoechea”**

Valeria Castro Ramírez

Cartago, octubre, 2023

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

ingeniería
ambiental



Evaluación del producto Clear Chem como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación del sulfato de aluminio en la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe, Goicoechea © 2023 por Valeria Castro Ramírez está bajo una licencia Attribution-NonCommercial-ShareAlike

4.0 International

“Evaluación del producto Clear Chem como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación del sulfato de aluminio en la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe, Goicoechea”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

Miembros del tribunal

M.Sc. Ana Lorena Arias Zúñiga
Directora

Ing. Henry Méndez Rojas
Lector 1

Ing. Macario Pino Gómez
Lector 2

Dra. Mary Luz Barrios Hernández
Coordinadora COTRAFIG

Dr. Guillermo Calvo Brenes
Director Escuela de Química

M.Sc. Diana Zambrano Piamba
Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

A Dios, quien me ha dado la salud y la sabiduría para alcanzar esta meta.

A mi madre, Teresita Ramírez Villalobos, quien me impulsa siempre a ser mejor, me apoya y
acompaña incondicionalmente en todos mis éxitos.

Les dedico todo el esfuerzo y dedicación que me hizo posible llegar hasta aquí.

AGRADECIMIENTOS

A mi padrastro y hermana, José y Leslie Ruiz, por su apoyo, amor y motivación incondicional.

A mi pareja, Mario González, por ser un pilar fundamental durante mi formación profesional, por impulsarme a ser mejor, por sus consejos y palabras de aliento, por su compañía en las horas de estudio y especialmente por su apoyo y amor absoluto.

A todos los colaboradores del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) que formaron parte de este proyecto, en especial a Henry Méndez, Manuel Quesada y Andrés Lazo, por su disposición y colaboración en el desarrollo de esta investigación.

A la profesora Ana Lorena Arias, por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias, por su compromiso y disposición en la realización de este proyecto.

A mis amigos y compañeros, por su apoyo y compañía en una de las etapas más lindas de mi vida.

A la carrera de Ingeniería Ambiental, a la Escuela de Química y al Tecnológico de Costa Rica, por ser parte de mi formación personal y profesional.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. <i>Objetivos</i>	3
1.1.1. Objetivo General.....	3
1.1.2. Objetivos Específicos.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. <i>Sistema de tratamiento de agua potable</i>	4
2.1.1. Consideraciones y principios generales del agua potable.....	4
2.1.2. Generalidades del proceso de potabilización.....	5
2.1.3. Proceso de coagulación y floculación en el tratamiento de agua potable.....	7
2.1.4. Teoría de la coagulación	8
2.1.5. Análisis del proceso de coagulación mediante ensayos de prueba de jarras	10
2.1.6. Problemática del aluminio residual.....	12
2.2. <i>Descripción de las pruebas de tratabilidad del agua</i>	13
2.3. <i>Proceso de potabilización del agua en Costa Rica</i>	15
2.3.1. Reglamento para la Calidad del Agua Potable en Costa Rica	16
2.3.2. Generalidades del proceso de potabilización del AyA.....	16
2.3.3. Planta Potabilizadora AyA Guadalupe	19
2.3.4. Problemática del AyA	28
2.4. <i>Descripción de las características y aplicaciones de Clear Chem</i>	29
3. MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.1. <i>Fuente de datos</i>	30
3.2. <i>Recolección de la muestra y métodos de análisis</i>	31
3.3. <i>Equipo para prueba de jarras</i>	32
3.4. <i>Ensayos de prueba de jarras cuadradas aplicando dosis óptima de sulfato de aluminio y Clear Chem en el proceso de coagulación</i>	34
3.4.1. Evaluación de la dosis óptima de sulfato de aluminio en jarras cuadradas	34
3.4.2. Evaluación de la dosis óptima de Clear Chem.....	34
3.5. <i>Ensayos de prueba de jarras cuadradas y redondas aplicando dosis óptima de sulfato de aluminio y Clear Chem en el proceso de coagulación</i>	35
3.5.1. Evaluación de la dosis óptima de sulfato de aluminio	35

3.5.2.	Verificación de la dosis óptima de sulfato de aluminio con jarras redondas	35
3.5.3.	Evaluación de la dosis óptima de Clear Chem.....	36
3.6.	<i>Ensayos de prueba de jarras redondas con la condición menos favorable de sulfato de aluminio y aplicación de Clear Chem en el proceso de coagulación.....</i>	36
3.6.1.	Evaluación de la condición menos favorable de aluminio residual.....	36
3.6.2.	Evaluación de la dosis óptima de Clear Chem.....	37
3.7.	<i>Ensayos de prueba de jarras redondas con la condición menos favorable de sulfato de aluminio y aplicación de Clear Chem en el agua filtrada.....</i>	37
3.8.	<i>Análisis de datos</i>	38
3.9.	<i>Curva de corrección.....</i>	38
3.10.	<i>Guía Metodológica.....</i>	38
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1.	<i>Efectividad del producto Clear Chem como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación.....</i>	39
4.1.1.	Curva de corrección	39
4.1.2.	Ensayos de prueba de jarras cuadradas aplicando dosis óptima de sulfato de aluminio y Clear Chem en el proceso de coagulación.....	40
4.1.3.	Ensayos de prueba de jarras cuadradas y redondas aplicando dosis óptima de sulfato de aluminio y Clear Chem en el proceso de coagulación	44
4.1.4.	Ensayos de prueba de jarras redondas con la condición menos favorable de sulfato de aluminio y aplicación de Clear Chem en el proceso de coagulación.....	54
4.1.5.	Ensayos de prueba de jarras redondas con la condición menos favorable de sulfato de aluminio y aplicación de Clear Chem en el agua filtrada	64
4.2.	<i>Viabilidad de la aplicación del producto Clear Chem en la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.....</i>	67
4.3.	<i>Guía metodológica</i>	69
5.	CONCLUSIONES	70
6.	RECOMENDACIONES	72
7.	REFERENCIAS.....	73
8.	ANEXOS.....	75
	<i>Anexo 1. Guía metodológica para analizar productos químicos que reduzcan el aluminio residual en la PTAP AyA Guadalupe.</i>	75

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1. Diagrama de flujo típico del proceso de tratamiento de agua que emplea coagulación (mezcla química) con tratamiento convencional [10].....	6
Fig. 2.2. Estructura de la doble capa eléctrica [10].....	9
Fig. 2.3. Diagrama de solubilidad para Al(III) a 25°C [10].....	10
Fig. 2.4. Turbidez residual simulada que permanece después de las pruebas de jarras en función de la concentración de partículas y de coagulante para sales de Al(III) a pH constante [10].	11
Fig. 2.5. Componentes y área de cobertura de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe [27].	20
Fig. 2.6. Planta Potabilizadora AyA Guadalupe, Goicoechea, San José.	21
Fig. 2.7. Caudal promedio del agua cruda de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	22
Fig. 2.8. Turbiedad promedio del agua cruda de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	23
Fig. 2.9. Sistema de filtración de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	24
Fig. 2.10. Caudal promedio del agua potable de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	26
Fig. 2.11. Turbiedad promedio del agua potable de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe. ...	27
Fig. 2.12. Aluminio residual promedio del agua potable de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	28
Fig. 3.1. Ubicación de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe, Ipís de Goicoechea, San José.	30
Fig. 3.2. Equipos para la medición de aluminio residual. a) Comparador visual Lovibond. b) Colorímetro DR300 HACH.	32
Fig. 3.3. Máquina PB900 Phipps & Bird con jarras cuadradas B-KER2®.	33
Fig. 3.4. Máquina PB900 Phipps & Bird con jarras redondas.	33
Fig. 4.1. Curva de corrección para contrastar datos obtenidos mediante el equipo Lovibond y el Laboratorio Nacional de Aguas.	39
Fig. 4.2. Dosis óptima de Clear Chem al 0,001% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	42
Fig. 4.3. Dosis óptima de Clear Chem al 0,001% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	43
Fig. 4.4. Dosis óptima de Clear Chem al 0,02% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	47

Fig. 4.5. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	48
Fig. 4.6. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	49
Fig. 4.7. Dosis óptima de Clear Chem al 0,02% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	50
Fig. 4.8. Dosis óptima de Clear Chem al 0,02% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	51
Fig. 4.9. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	52
Fig. 4.10. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	53
Fig. 4.11. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	56
Fig. 4.12. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	57
Fig. 4.13. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	58
Fig. 4.14. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	59
Fig. 4.15. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	60
Fig. 4.16. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	61
Fig. 4.17. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	62
Fig. 4.18. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	63
Fig. 4.19. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	65
Fig. 4.20. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.	67

LISTA DE TABLAS

TABLA I. Parámetros de calidad del agua y nivel primero (N1)	16
TABLA II. Análisis de parámetros en muestra de agua cruda	31
TABLA III. Parámetros fisicoquímicos del agua cruda.....	40
TABLA IV. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de sulfato de aluminio.....	41
TABLA V. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,001%....	42
TABLA VI. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,001%..	43
TABLA VII. Parámetros fisicoquímicos del agua cruda	44
TABLA VIII. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima	45
TABLA IX. Parámetros fisicoquímicos de la verificación con jarras redondas	46
TABLA X. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,02%.....	47
TABLA XI. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,2%.....	48
TABLA XII. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,2%	49
TABLA XIII. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,02%. 50	
TABLA XIV. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,02% . 51	
TABLA XV. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,2%.....	52
TABLA XVI. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,2%... 53	
TABLA XVII. Parámetros fisicoquímicos del agua cruda	54
TABLA XVIII. Parámetros fisicoquímicos del ensayo con la condición menos favorable de sulfato de aluminio.....	55
TABLA XIX. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,2%... 56	
TABLA XX. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,2.....	57
TABLA XXI. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,2%... 58	
TABLA XXII. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,2% . 59	
TABLA XXIII. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,2% 60	
TABLA XXIV. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,2% 61	

TABLA XXV. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,2%..	62
TABLA XXVI. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,2%.	63
TABLA XXVII. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,2%.	65
TABLA XXVIII. Parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de Clear Chem al 0,2%.	66

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
CEPIS	Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GAM	Gran Área Metropolitana
ICP-MS	Espectrómetro de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente
JECFA	Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios
LNA	Laboratorio Nacional de Aguas
MINSA	Ministerio de Salud
N1	Nivel Primero
N2	Nivel Segundo
NSF/ANSI	National Sanitation Foundation/American National Standards Institute
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPS	Organización Panamericana de la Salud
pH	Potencial de iones hidrógeno
PTAP	Planta de Tratamiento de Agua Potable
SMEWW	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
VA	Valor Alerta
VMA	Valor Máximo Admisible

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Viscosidad dinámica del agua
Al^{+3}	Aluminio
$Al_2(SO_4)_3$	Sulfato de aluminio
g	Gramos
\bar{G}	Gradiente de velocidad
l	Litros
l/s	Litros por segundo
m^3	Metros cúbicos
m^3/mes	Metros cúbicos por mes
m/v	Masa/volumen
mg/l	Miligramos por litro
mg/l ($CaCO_3$)	Miligramos de carbonato cálcico por litro de agua
ml	Mililitros
P	Potencia de entrada de la mezcla al tanque de floculación
R^2	Coefficiente de determinación
UNT	Unidades Nefelométricas de Turbidez
U-Pt-Co	Unidades Platino Cobalto
V	Volumen del tanque de floculación

RESUMEN

El acceso al agua potable es uno de los derechos humanos básicos, por tal razón, la meta 6.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) exige un acceso universal al agua potable salubre y asequible. Con el objetivo de garantizar un abastecimiento salubre, las sales de aluminio comúnmente se utilizan en el tratamiento del agua, específicamente en el proceso de coagulación. No obstante, este uso puede representar un riesgo potencial para la salud humana. La problemática de ciertas plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), como es el caso de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe, radica en que a pesar de sus esfuerzos por aplicar dosis óptimas de sulfato de aluminio, se obtienen valores de aluminio residual superiores a 0,2 mg/l en el agua tratada, siendo éste el valor máximo admisible según el Reglamento para la Calidad del Agua Potable en Costa Rica. En esta investigación se presenta el análisis de la factibilidad del producto Clear Chem como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación del sulfato de aluminio en los procesos unitarios del sistema de tratamiento de agua potable de la PTAP de Guadalupe. Para ello, se analizó mediante ensayos de prueba de jarras la dosis óptima de sulfato de aluminio y de Clear Chem a utilizar en el proceso de coagulación, además, se evaluó los parámetros fisicoquímicos del nivel primero (N1) y el aluminio residual, perteneciente al nivel segundo (N2). Se identificó que el producto Clear Chem no resulta viable como coadyuvante de coagulación en la reducción de turbiedad y aluminio residual en la PTAP de Guadalupe. Se desarrolló una guía metodológica con el objetivo de que el AyA evalúe productos químicos que pueda utilizar en la reducción del aluminio residual en la PTAP de Guadalupe.

Palabras clave: sistema de tratamiento de agua potable, sulfato de aluminio, Clear Chem, coagulación, floculación, Planta Potabilizadora Guadalupe.

ABSTRACT

Access to safe drinking water is one of the basic human rights, which is why target 6.1 of the Sustainable Development Goals (SDGs) calls for universal access to safe and affordable drinking water. In order to ensure a safe supply, aluminum salts are commonly used in water treatment, specifically in the coagulation process. However, this use can pose a potential risk to human health. The problem of certain drinking water treatment plants (DWTP) of the Costa Rican Institute of Aqueducts and Sewerage (AyA), as is the case of the AyA Guadalupe Water Treatment Plant, is that despite its efforts to apply optimal doses of aluminum sulfate, residual aluminum values higher than 0.2 mg/l are obtained in the treated water, which is the maximum admissible value according to the Regulation for Drinking Water Quality in Costa Rica. This research presents the analysis of the feasibility of the product Clear Chem as a coadjuvant in the coagulation-flocculation process of aluminum sulfate in the unitary processes of the drinking water treatment system of the Guadalupe DWTP. For this purpose, the optimum dosage of aluminum sulfate and Clear Chem to be used in the coagulation process was analyzed by means of jar test trials. In addition, the physicochemical parameters of the first level (N1) and the residual aluminum, belonging to the second level (N2), were evaluated. It was identified that the Clear Chem product is not viable as a coagulation coadjuvant in the reduction of turbidity and residual aluminum in the Guadalupe WTP. A methodological guide was developed for the AyA to evaluate chemical products that can be used in the reduction of residual aluminum in the Guadalupe WTP.

Keywords: drinking water treatment system, aluminum sulfate, Clear Chem, coagulation, flocculation, Guadalupe Water Treatment Plant.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es fundamental para la salud de los seres humanos y el acceso al agua potable es uno de los derechos humanos básicos y un componente imprescindible en las políticas eficaces de protección de la salud. Todas las personas deben disponer de un abastecimiento satisfactorio, es decir, suficiente, seguro y accesible [1]. Por tal razón, la meta 6.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) exige un acceso universal y equitativo al agua potable salubre y asequible [2].

Con el objetivo de garantizar un abastecimiento salubre, en el proceso de potabilización del agua, propiamente en la coagulación, las sales de aluminio comúnmente se utilizan para reducir el color, turbiedad, contenido de materia orgánica y el nivel de microorganismos presentes en el agua. No obstante, este uso puede incrementar la concentración de aluminio residual en el agua tratada; una concentración residual alta puede conferir, entre sus muchos efectos adversos, color y turbiedad no deseables en el agua, la cual posteriormente, se podría utilizar para consumo humano [1].

El uso de sales de aluminio como coagulantes ha sido criticado durante mucho tiempo, dado que las concentraciones elevadas de aluminio residual en el agua potable pueden representar un riesgo potencial para la salud humana. Entre las repercusiones del aluminio sobre la salud, se asocian las enfermedades de: Alzheimer, encefalopatía, anemia y enfermedad ósea en pacientes dializados, además, puede acumularse en los huesos, provocando su excesiva fragilidad y ablandamiento, lo que resulta en osteomalacia [3].

La problemática del sistema de tratamiento de agua potable del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) radica en que, a pesar de sus esfuerzos por aplicar dosis óptimas de sulfato de aluminio y controlar los procesos fisicoquímicos, en ciertas plantas, como es el caso de la Planta Potabilizadora Guadalupe, ocasionalmente se obtienen valores de aluminio residual superiores a 0,2 mg/l en el agua tratada, siendo este el valor máximo admisible según el Reglamento para la Calidad del Agua Potable en Costa Rica [4].

Con el fin de minimizar la presencia de trazas de aluminio en el agua tratada, el AyA ha desarrollado cuatro alternativas. En primer lugar, ha realizado pruebas utilizando polímeros orgánicos e inorgánicos a manera de sustituir el sulfato de aluminio. Adicionalmente, han intentado ajustar la alcalinidad con cal y reducir por intermitencia la dosis de sulfato de aluminio en época seca, donde los parámetros fisicoquímicos del agua son de calidad más

favorable para esta práctica. Por último, ha realizado refuerzos en capacitaciones enfocadas a mejorar las técnicas y análisis de laboratorio.

Los intentos del AyA por disminuir el aluminio residual no han sido exitosos [5], por lo que surge la necesidad de investigar alternativas de un producto o mecanismo que logre mantener los valores de aluminio residual inferiores a 0,2 mg/l.

Con este proyecto se pretende elaborar una guía metodológica a implementar por el AyA, a partir de la evaluación de la factibilidad del producto Clear Chem como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación del sulfato de aluminio en el sistema de tratamiento de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe, Goicoechea, San José.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Analizar la factibilidad de Clear Chem como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación del sulfato de aluminio en el sistema de tratamiento de agua potable de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

1.1.2. Objetivos Específicos

- I. Evaluar a escala de laboratorio la efectividad del producto Clear Chem como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.
- II. Determinar la viabilidad de aplicar el producto Clear Chem en la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.
- III. Desarrollar una metodología que le permita al AyA utilizar productos químicos que reduzcan el aluminio residual en la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Sistema de tratamiento de agua potable

2.1.1. Consideraciones y principios generales del agua potable

El agua potable hace referencia al agua proveniente de una fuente de abastecimiento, ya sea subterránea o superficial, la cual ha sido modificada por medio de procesos de tratamiento fisicoquímicos. Para satisfacer un abastecimiento salubre a la población, dicha agua debe cumplir con las disposiciones de valores máximos admisibles estéticos, organolépticos, físicos, químicos, biológicos, microbiológicos y radiológicos, establecidos en el reglamento vigente del país en cuestión y que al ser consumida por la población no cause daño en la salud [4].

A su vez, el agua subterránea se refiere al agua que se origina de la infiltración a través de formaciones de capas subterráneas de rocas o de otros estratos geológicos, donde permanece almacenada, como lo son los manantiales, nacientes y pozos. Sin embargo, si ocurre un afloramiento de éstas y discurren superficialmente, forman los ríos, lagos y quebradas, es decir, las comúnmente denominadas aguas superficiales. Asimismo, éstas últimas pueden originarse a partir de precipitaciones atmosféricas [4].

En Costa Rica, existen 5 674 fuentes de abastecimiento, de las cuales el 7,2% son aguas superficiales y el 92,8% corresponde a nacientes y pozos, es decir provienen de fuentes subterráneas, lo cual hace especialmente importante la conservación de este recurso [6]. La mayor parte del agua subterránea se filtra naturalmente a medida que pasa a través de las capas de la tierra hacia los depósitos subterráneos, por lo que generalmente contiene menos material orgánico que el agua superficial, ya que esta última recoge una amplia variedad de contaminantes del drenaje de las cuencas hidrográficas, las prácticas agrícolas y las fuentes urbanas [7]. Asimismo, ambos tipos de fuentes de abastecimiento pueden contener una variedad de impurezas, tales como las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general [8].

Con base en lo anterior, el aprovechamiento del agua subterránea conlleva el beneficio de requerir menos tratamiento con procesos unitarios (coagulación, floculación, sedimentación y filtración) lo cual genera sistemas menos onerosos en su operación. Por el contrario, las fuentes superficiales sí requieren de tratamientos fisicoquímicos [9].

No obstante, una deficiente gestión del recurso hídrico asociada a la contaminación causada por las actividades antropogénicas en la cuenca de captación, influirían en la calidad aguas abajo del recurso hídrico y de las fuentes de abastecimiento. A su vez, influirían en los procesos de tratamiento requeridos para garantizar un suministro seguro del agua potable, por lo cual se hace imprescindible adoptar medidas en pro de la preservación del recurso hídrico [1].

2.1.2. Generalidades del proceso de potabilización

Para cumplir con los valores máximos admisibles establecidos en el reglamento sobre la calidad del agua potable del país en cuestión y a su vez, garantizar un abastecimiento seguro, es necesario tratar el agua superficial o subterránea mediante procesos unitarios, como los que se detallan a continuación.

No obstante, los procesos unitarios utilizados dependen en gran medida de la configuración de la planta. Existen plantas de tratamiento de filtración rápida y lenta.

Con respecto a las plantas de filtración rápida, se presentan diferentes soluciones dependiendo de la calidad del agua cruda, la preferencia y los recursos de la empresa operadora. Dentro de este tipo de plantas, se encuentran: filtración convencional, filtración directa, filtración de contacto y filtración en dos etapas [10].

La filtración convencional es la más común y está integrada por los procesos de coagulación, floculación, sedimentación y filtración respectivamente. Asimismo, se utiliza con cualquier agua superficial, incluso con turbiedad muy alta o variable. Mientras que, las plantas de filtración directa se utilizan para aguas superficiales sin turbiedad alta o variable e incluye los procesos de coagulación, floculación y filtración [10].

Por otro lado, la planta de filtración lenta, dependiendo de la calidad del agua en la entrada, puede estar constituida sólo por filtros lentos o puede comprender también los procesos de desarenación, presedimentación, sedimentación, filtración gruesa o en grava y filtración lenta [8].

Con respecto a la sedimentación, este proceso requiere introducir el agua en un tanque inactivo durante un período de tiempo lo suficientemente largo como para que la mayoría de las partículas presentes en el agua se remuevan por el efecto gravitacional. A diferencia de la filtración, cuyo mecanismo consiste en la eliminación de partículas sólidas de una suspensión acuosa mediante el paso a través de un medio poroso [10].

Los procesos anteriores pueden considerarse como complementarios, dado que la remoción de las partículas en suspensión en el agua puede conseguirse por medio de ambos procesos. Sin embargo, depende del peso específico de las partículas, ya que la sedimentación decanta las partículas más densas que el fluido y la filtración remueve aquellas partículas que poseen una densidad cercana a la del agua o aquellas que no pudieron ser removidas en el proceso anterior y han sido resuspendidas [8].

El proceso de desinfección, a su vez, es el último proceso unitario de tratamiento del agua y es un proceso común en las plantas de tratamiento de filtración rápida y lenta. Su objetivo es la destrucción e inactivación parcial de los organismos que causan enfermedades mediante la exposición a agentes químicos, como es el caso del cloro [10].

En la Fig. 2.1., se muestran los respectivos tratamientos unitarios aplicados a un afluente que ingresa a una planta de tratamiento de filtración convencional. De la misma manera, se muestra cómo se podrían aplicar la filtración directa y de contacto si se sustraen los procesos de sedimentación y floculación. Por último, al afluente se le podría aplicar el proceso de desinfección tanto a la entrada como a la salida y el efluente estaría listo para enviarse al sistema de distribución.

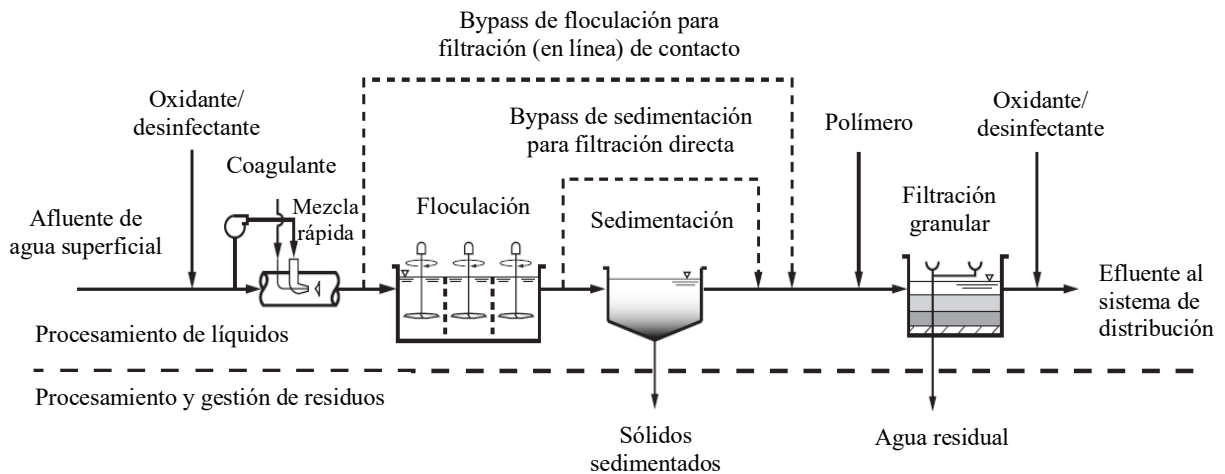


Fig. 2.1. Diagrama de flujo típico del proceso de tratamiento de agua que emplea coagulación (mezcla química) con tratamiento convencional [10].

Cabe destacar que los acueductos en Costa Rica que utilizan tratamiento por métodos convencionales y que incluyen además la desinfección, tal y como se muestra en la Fig. 2.1.,

se abastecen mayoritariamente de fuentes superficiales. Sin embargo, existen aquellos acueductos en los que solamente se practica la desinfección como único tratamiento, puesto que se abastecen de fuentes subterráneas generalmente de muy buena calidad [11].

No obstante, es relevante conocer el tipo de tratamiento que se realiza en una PTAP y los productos químicos de tratamiento utilizados, puesto que, los contaminantes removidos y la composición química del tratamiento impactan el contenido y la cantidad de residuos generados [7].

2.1.3. Proceso de coagulación y floculación en el tratamiento de agua potable

Los afluentes provenientes de fuentes de abastecimiento, ya sea de agua subterránea o superficial, usualmente contienen impurezas coloidales. Las cuales presentan una carga superficial negativa que impide que las partículas se aproximen unas a otras y las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad. Tales impurezas pueden ser removidas a través de los procesos de coagulación y floculación [8].

La coagulación, por su parte, puede considerarse un proceso fisicoquímico, el cual ocurre con la adición de una sustancia química al agua, denominada coagulante, normalmente sales de hierro y aluminio. Lo anterior con el fin de desestabilizar las partículas, es decir, neutralizar las cargas negativas superficiales de éstas para que las partículas pequeñas se acerquen entre sí, superen la repulsión electrostática y se agreguen o formen un precipitado que barrerá las partículas de la solución o adsorberá los componentes disueltos [7], [10].

Por otro lado, al dispersarse el coagulante en la masa de agua y desestabilizarse las partículas, se precisa de la floculación para que dichas partículas empiecen a aglutinarse para formar aglomeraciones de mayor peso y tamaño que sedimenten con mayor eficiencia [8].

En el diseño de instalaciones para el proceso de floculación, el gradiente de velocidad es un parámetro que se ha utilizado ampliamente para evaluar el aporte de energía en el proceso de mezcla. El gradiente de velocidad \bar{G} , es una medida de la entrada de energía por unidad de volumen y se define por la ecuación [10]:

$$\bar{G} = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde \bar{G} = gradiente de velocidad (tasa de entrada de energía), s^{-1}

P = potencia de entrada de la mezcla al tanque de floculación, W ($1W = 1\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$)

V = volumen del tanque de floculación, m^3

μ = viscosidad dinámica del agua, $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$

No obstante, a fin de mejorar los procesos de coagulación y floculación, además de lograr una mayor calidad del efluente y una rápida sedimentación, se emplea una serie de productos llamados coadyuvantes. Estos productos pueden actuar sobre los elementos que producen interferencias en la coagulación o pueden favorecer la formación de flóculos de mayor tamaño y densidad, aumentando, por tanto, la velocidad de sedimentación [12].

Similarmente, la dosis óptima de coagulante y el valor de pH son otros dos parámetros imprescindibles en un correcto y eficaz funcionamiento del proceso de coagulación. Dichos parámetros se pueden determinar utilizando las denominadas “pruebas de jarras”. En donde, se aplican dosis crecientes de coagulante a las muestras de agua cruda y se selecciona como dosis óptima aquella que logre una eliminación adecuada del color y la turbiedad. Lo mismo ocurre con el parámetro de pH [1].

Por lo tanto, cuando se trata del diseño práctico de instalaciones de coagulación y floculación, los diseñadores deben considerar cuatro aspectos del proceso: el tipo y la concentración de coagulantes y coadyuvantes de coagulación-floculación, la intensidad de mezcla y el método utilizado para dispersar los productos químicos en el agua para la desestabilización, la intensidad y el tiempo de mezcla para la floculación, y la selección del proceso de separación líquido-sólido [10].

2.1.4. Teoría de la coagulación

Con el objetivo de comprender el papel de los coagulantes químicos y los coadyuvantes de coagulación-floculación, es importante entender las interacciones de las partículas con los disolventes y las propiedades eléctricas de las partículas coloidales que se encuentran en el agua. La principal propiedad eléctrica de las partículas suspendidas en el agua es la carga superficial, la cual contribuye a la estabilidad relativa, haciendo que las partículas permanezcan en suspensión sin aglutinarse durante largos periodos de tiempo [10].

Crittenden et al. [10] establecen que, con la finalidad de satisfacer la electroneutralidad en una suspensión coloidal, las partículas cargadas negativamente acumulan contraiones positivos en y cerca de la superficie de la partícula. Tal y como se puede observar en la Fig. 2.2., una capa de cationes se unirá fuertemente a la superficie de una partícula cargada

negativamente para formar una capa de adsorción fija. Esta capa adsorbida de cationes, unida a la superficie de la partícula por fuerzas electrostáticas y de adsorción se conoce como capa de Helmholtz (también conocida como capa de Stern). Más allá de la capa de Helmholtz, hay una carga negativa neta y un campo eléctrico que atrae un exceso de cationes y repele los aniones. El exceso de concentración de cationes se extiende hacia la solución hasta que se elimina toda la carga superficial y el potencial eléctrico, con la finalidad de satisfacer la electroneutralidad. En conjunto, la capa adsorbida (Helmholtz) y la capa de iones difusos se conocen como doble capa eléctrica.

Análogamente, debe tenerse en cuenta que cuando una partícula se mueve en un campo eléctrico, alguna porción del agua cercana a la superficie de la partícula se mueve con ella, lo que da lugar al plano de corte como se muestra en la Fig. 2.2. No obstante, el potencial zeta se refiere a la medida de la carga en el plano de corte de las partículas, utilizada como medida relativa de la carga superficial de las partículas [10].

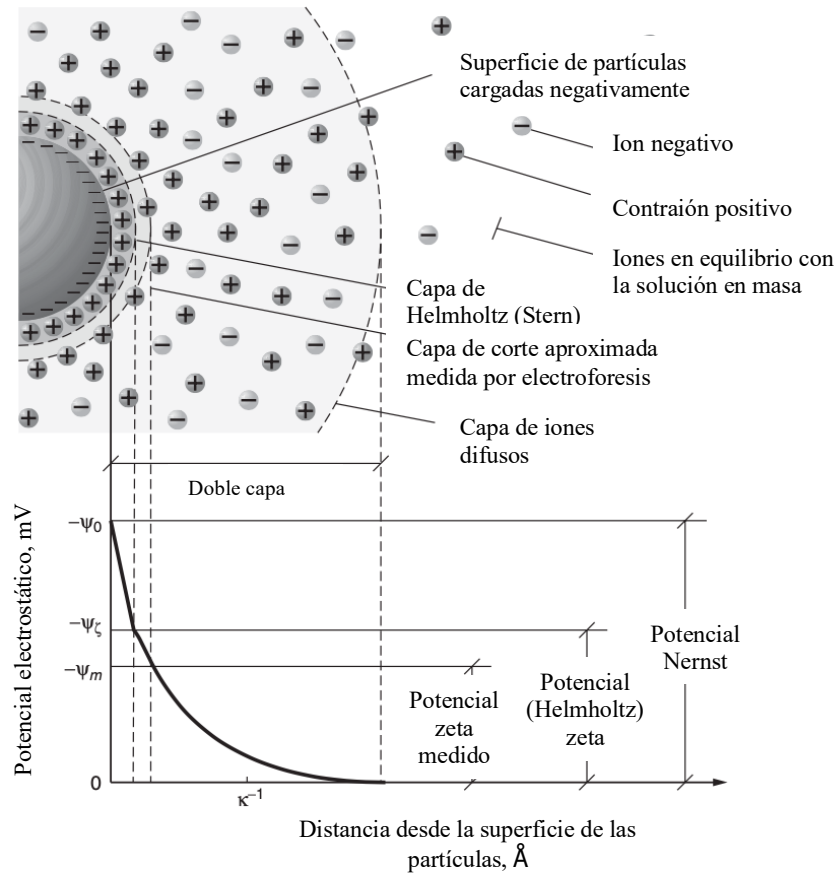


Fig. 2.2. Estructura de la doble capa eléctrica [10].

De la misma manera, es importante conocer la solubilidad del aluminio. En la Fig. 2.3. se muestra la solubilidad de las distintas especies de aluminio [Al(III)], en la que las concentraciones logarítmicas molares se han representado en función del pH. La concentración total aproximada de aluminio soluble residual en solución después de la precipitación se identifica por la línea sólida. Por otro lado, el hidróxido de aluminio se precipita dentro de las áreas sombreadas. Asimismo, la región operativa para la precipitación de hidróxido de aluminio se encuentra en un rango de pH de 5,5 a 7,7, siendo un pH de 6,2 a 25°C la solubilidad mínima. Como se muestra en la Fig. 2.3., el punto de solubilidad mínima para el aluminio cambia con la temperatura, lo que tiene un impacto significativo en la operación de las plantas de tratamiento de agua donde el aluminio se utiliza como coagulante [10].

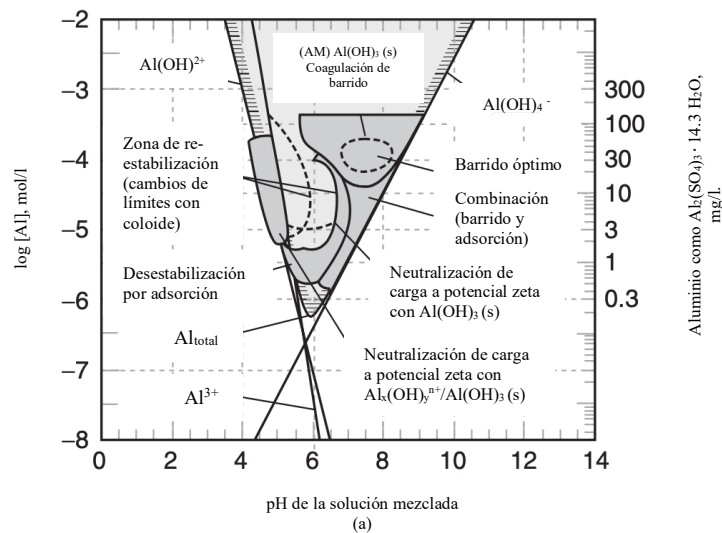


Fig. 2.3. Diagrama de solubilidad para Al(III) a 25°C [10].

2.1.5. Análisis del proceso de coagulación mediante ensayos de prueba de jarras

En la Fig. 2.4. se ilustra un diagrama conceptual en el que se representa la turbidez residual a partir de ensayos de prueba de jarras realizados para diferentes concentraciones de partículas en el agua. El diagrama se aplica a un intervalo de pH de 5,5 para el aluminio [10].

Para la concentración de partículas más baja, S1, las partículas se eliminan por floculación de barrido (precipitación), ya que la concentración es demasiado baja como para que flocculen y sedimenten [10].

Análogamente, con una concentración de partículas mayor, S2, a la que se presentó para el caso anterior, se produce cierta floculación y sedimentación en la zona 2, en la que además se produce adsorción y neutralización de la carga. Sin embargo, dado que la concentración de partículas todavía es baja, no es posible una floculación eficaz y un alto grado de remoción en cuanto al parámetro de turbidez. No obstante, en la zona 3 se puede observar como si se añade más coagulante, las partículas se estabilizan con una carga positiva y la turbidez aumenta [10].

Por otro lado, a mayor concentración de partículas, S3, pueden encontrarse claramente las cuatro zonas. La eliminación casi completa por neutralización de la carga se produce en la zona 2 y las partículas se estabilizan con dosis más altas de coagulante. La floculación por barrido se produce en la zona 4 [10].

Por último, para la mayor concentración de partículas, S4, las regiones de barrido de flóculos y neutralización de cargas se fusionan porque la concentración de coagulante necesaria para neutralizar las cargas de las partículas coincide con el inicio de la precipitación. Otro efecto destacable es que la zona 2 comienza con dosis de coagulante sucesivamente más altas a medida que aumenta la concentración de partículas [10].

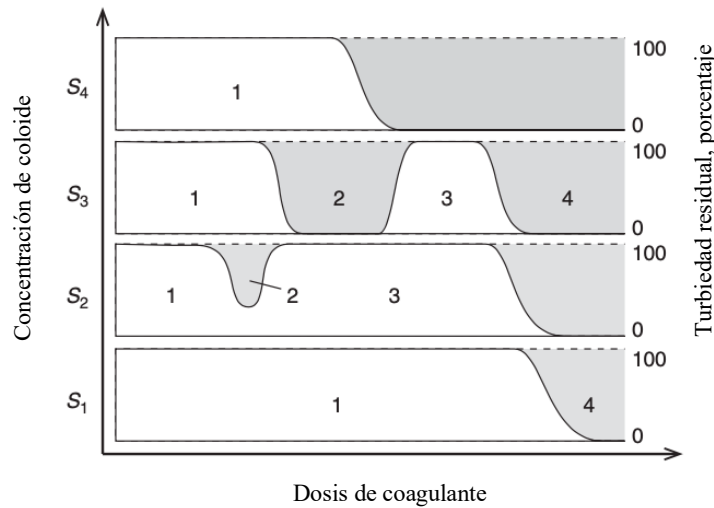


Fig. 2.4. Turbidez residual simulada que permanece después de las pruebas de jarras en función de la concentración de partículas y de coagulante para sales de Al(III) a pH constante [10].

2.1.6. Problemática del aluminio residual

El aluminio es de los elementos metálicos más abundantes en la corteza terrestre. A su vez, su abundancia, junto con el uso generalizado por parte de los seres humanos, hace que su toxicidad sea relevante para la salud humana [3].

Debido su abundancia y uso generalizado, el aluminio se ha utilizado ampliamente en la industria y actualmente tiene múltiples aplicaciones modernas. Por ejemplo, las sales de aluminio se utilizan ampliamente en el tratamiento del agua como coagulantes para reducir la materia orgánica, el color, la turbiedad y los niveles de microorganismos [13]. Otras de sus aplicaciones son en alimentos procesados, fórmulas infantiles, cosméticos, pasta de dientes, antitranspirantes y diversas preparaciones médicas y medicamentos. Estos usos generalizados hacen que la exposición humana al aluminio sea prácticamente inevitable [3].

Es importante asegurarse que la cantidad de aluminio remanente en el agua tratada mediante procesos unitarios específicos sea la menor posible, dado que concentraciones elevadas de aluminio en el agua destinada al consumo humano pueden representar un riesgo potencial para la salud humana [14]. Entre las repercusiones del aluminio sobre la salud, se asocian las siguientes enfermedades: Alzheimer, encefalopatía, anemia y enfermedad ósea en pacientes dializados, además, puede acumularse en los huesos, provocando su excesiva fragilidad y ablandamiento, lo que resulta en osteomalacia [3].

Cabe destacar que un valor de aluminio basado en la salud y derivado de la ingesta semanal tolerable provisional (ISTP) del Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA) es de 0,9 mg/l considerando una asignación del 20% de la ISTP al agua de consumo humano y suponiendo que un adulto de 60 kilos bebe dos litros de agua por día [13].

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) [13], el uso de sales de aluminio como coagulantes en el tratamiento del agua puede conducir a mayores concentraciones de aluminio en el agua tratada. A su vez, cuando las concentraciones residuales son altas, el aluminio puede depositarse en el sistema de distribución. Además, puede conferir al agua color y turbiedad no deseados. No obstante, las concentraciones de aluminio a las que pueden ocurrir tales problemas dependen en gran medida de una serie de parámetros de calidad del agua y factores operativos en la planta de tratamiento de agua, como el pH de coagulación y la dosis de coagulante.

Como se muestra en OMS [1], existen varios enfoques disponibles para minimizar las concentraciones de aluminio residual en el agua tratada. Estos incluyen el uso de un pH óptimo en el proceso de coagulación, evitar una dosificación excesiva de aluminio, realizar una buena mezcla en el punto de aplicación del coagulante, optimizar las velocidades de las paletas de floculación y la filtración eficiente del flóculo de aluminio.

2.2. Descripción de las pruebas de tratabilidad del agua

Una de las pruebas de tratabilidad del agua más comúnmente usada en los procesos de tratamiento del agua es la prueba de jarras. A pesar de su amplio uso para encontrar la dosis óptima de coagulante, otros de sus usos incluyen: determinar la fuerza de los flóculos, predecir la calidad del agua filtrada, determinar el pH óptimo del coagulante, determinar la intensidad de mezcla óptima, evaluar las dosis óptimas de coadyuvante de coagulación, evaluar la secuencia de las dosificaciones de coagulante y coadyuvante de coagulación, establecer cuál coagulante es el más adecuado, entre otros [15].

Con el objetivo de realizar un análisis a escala de laboratorio, pero siempre teniendo en cuenta las condiciones reales de la planta, es importante aplicar los tiempos de mezcla rápida y mezcla de floculación lenta que correspondan a la situación real. Si no se conocen los valores reales de las intensidades de los gradientes de velocidad que se utilizan en la instalación, es necesario medirlos. Sin embargo, si se cuenta con los valores de los gradientes de velocidad reales, es preciso transformar estos valores a los agitadores utilizados en la prueba de jarras [16].

Pivokonský et al. [16] establecen que, al simular las condiciones reales de una planta de tratamiento de agua en particular, las pruebas de jarras deben realizarse utilizando reactivos idénticos aplicados en las mismas formas, en los mismos órdenes y en los mismos intervalos de tiempo que en la planta de tratamiento. Además, es necesario asegurarse que las pruebas de jarras se realicen a la temperatura del agua cruda que ingresa a la planta de tratamiento, ya que una temperatura diferente podría afectar significativamente el curso de la prueba de jarras.

Análogamente, al realizar un ensayo de prueba de jarras, se precisa de una serie de ecuaciones para el cálculo de soluciones derivadas, así como para calcular el porcentaje de una disolución masa/volumen (m/v) y los mililitros (ml) de jeringa a preparar en función del porcentaje de solución de trabajo y la dosis a aplicar en mg/l. Para el caso específico de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe, el laboratorio ubicado en las instalaciones de la Planta

dispone de una bitácora, la cual contiene un anexo con las ecuaciones estándar recomendadas a utilizar en los análisis de laboratorio.

Con el fin de preparar una disolución acuosa al porcentaje masa/volumen (m/v) más conveniente, la PTAP de Guadalupe utiliza la Ecuación 2.

$$\% \text{ m/v} = \frac{\text{masa (g)}}{\text{solución total (ml)}} \times 100 \quad \text{Ecuación 2.}$$

No obstante, se requiere una ecuación para el cálculo de los ml de jeringa a preparar en función del porcentaje de la solución de trabajo (dado por la ecuación anterior) y la dosis a aplicar en mg/l, para ello, la PTAP de Guadalupe propone la Ecuación 3.

$$\text{ml de jeringa} = \frac{[\text{volumen de la jarra (ml)} \times \text{dosis (mg/l)}]}{[\text{solución preparada (\%)} \times 10000 \text{ (mg/l)}]} \times 100 \quad \text{Ecuación 3.}$$

Asimismo, en caso de requerir analizar cómo se comporta un producto en dosis bajas, se puede preparar soluciones derivadas a partir de la solución madre mediante la Ecuación 4.

$$\begin{aligned} \text{ml solución de trabajo} &= & \text{Ecuación 4.} \\ &= \frac{1000}{\text{solución de trabajo (\%)}} \times \text{solución final (\%)} \times \frac{\text{volumen de solución final (ml)}}{1000} \end{aligned}$$

Existen cuatro niveles de control de calidad del agua, así como los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obligatorios que deben ser analizados con el objetivo de garantizar un abastecimiento de agua potable salubre. Entre ellos, el nivel primero, correspondiente al programa de control básico, el cual consiste en la inspección sanitaria para evaluar la operación y mantenimiento en la fuente, el almacenamiento, la distribución del agua potable y la determinación de los siguientes parámetros: turbiedad, color aparente, olor, temperatura, pH, entre otros. Los valores de alerta y máximos admisibles se indican en la Tabla I [4].

Según el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (SMEWW) [17], la turbiedad en el agua es causada por materia suspendida y coloidal como arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros organismos

microscópicos. Asimismo, establece que la turbiedad es una expresión de la propiedad óptica que hace que la luz se disperse y absorba en lugar de transmitirse sin cambios en la dirección o el nivel de flujo a través de la muestra.

El color en el agua hace referencia a la presencia de iones metálicos naturales (hierro y manganeso), ácidos húmicos y fúlvicos, plancton, malezas y desechos industriales. De esta manera, el color verdadero se refiere al color del agua de la cual se ha eliminado la turbiedad. Mientras que el término “color aparente” incluye no solo el color debido a las sustancias en solución, sino también el correspondiente a la materia en suspensión y se determina en la muestra original sin filtración ni centrifugación [17].

Con respecto al olor, en términos prácticos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) y la Organización Mundial de la Salud recomiendan como criterio que, por razones organolépticas, las fuentes de abastecimiento deben estar razonablemente exentas de olor, ya que, en ciertos casos, puede ser un indicio indirecto de ausencia de contaminantes; es decir, es importante que, en términos generales, se encuentre en un nivel aceptable [8].

Tal y como establece la OMS [18], el pH del agua es una medida del equilibrio ácido-base. Además, el pH del agua potable se encuentra dentro del rango de 6,5 a 8,5. Sin embargo, las aguas naturales pueden tener un pH más bajo debido a la lluvia ácida o un pH más alto en áreas calizas.

La alcalinidad, es otro parámetro ampliamente utilizado en el análisis de la calidad del agua, esto debido a que, como se detalla en el SMEWW [17], se refiere a la capacidad de neutralizar los ácidos presentes en el agua y representa la suma de todas las bases titulables.

2.3. Proceso de potabilización del agua en Costa Rica

Costa Rica, con una población de 5 059 730 habitantes, se mantiene a la vanguardia a nivel mundial en el abastecimiento de agua para uso y consumo humano, con 97,8% de población cubierta con agua intradomiciliaria y un 93,0% con agua gestionada de forma segura; no obstante, el 1,8% de la población recibe el servicio con tubería en el patio, y aún persiste un 0,4% que no cuenta con el servicio y se abastece directamente de pozos y nacientes. Es por esta razón que surge la necesidad de un abastecimiento universal, salubre y asequible de agua potable [11].

2.3.1. Reglamento para la Calidad del Agua Potable en Costa Rica

Con el fin de abastecer y gestionar agua para uso y consumo humano de forma segura, el Reglamento para la Calidad del Agua Potable en Costa Rica tiene como objetivo establecer los límites máximos permisibles de parámetros físicos, químicos y microbiológicos para el agua potable, a fin de garantizar su inocuidad y la salud de la población [4].

En dicho reglamento se establece que el valor máximo admisible de aluminio (Al^{+3}) en agua potable es de 0,2 mg/l [4].

Los valores de alerta y máximos admisibles de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que deben ser analizados en el nivel 1, se indican en la Tabla I.

TABLA I
PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA
NIVEL PRIMERO (N1)

Parámetros de aceptabilidad	Unidad	Valor Alerta (VA)	Valor Máximo Admisible (VMA)
Turbiedad	UNT	1	5
Olor	-	Debe ser aceptable	Debe ser aceptable
pH	Valor pH	6,0	8,0
Color aparente	U-Pt-Co	< 5	15 o No detectable

Nota. Parámetros establecidos en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable en Costa Rica [4].

2.3.2. Generalidades del proceso de potabilización del AyA

En Costa Rica, el ente encargado de la prestación de los servicios de agua potable y alcantarillado sanitario a la población le corresponde al Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) [11]. Por lo que el AyA dispone de 45 plantas potabilizadoras a nivel nacional, y más de 200 estaciones de desinfección. Además, cuenta con más de 600 fuentes que se distribuyen en: 262 fuentes provenientes de superficie de manantial; 281 fuentes subterráneas y 62 fuentes superficiales [19].

La Organización Panamericana de la Salud (OPS) [11], establece que el servicio de agua potable suministrado por el AyA, en general, se puede considerar de buen nivel, ya que

el índice de la cobertura urbana alcanza valores cercanos al 98%. Asimismo, la infraestructura y las tecnologías de los acueductos se pueden considerar adecuados, siendo más destacables en los sistemas de captación y producción. Además, menciona que el AyA realiza los esfuerzos necesarios para controlar la calidad del agua potable en todo su proceso, mediante el Laboratorio Nacional de Aguas (LNA).

De esta manera, el LNA en conjunto con el Ministerio de Salud (MINSA) de Costa Rica, tienen como objetivo la vigilancia de la calidad del agua en sus diferentes usos, así como contribuir con el mejoramiento de la salud y la calidad de vida de los costarricenses [20].

El LNA cuenta con el Espectrómetro de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), el cual, entre sus muchas funciones, detecta con confianza ultra trazas de metales en reactivos de alta pureza [21]. Análogamente, para analizar el aluminio presente en muestras de agua, el LNA toma como referencia el método 3125B descrito en el SMEWW [17].

En general, el proceso de potabilización del AyA inicia con la captación del agua; en el caso de las fuentes superficiales, se coloca en el río o embalse una rejilla, que permite retener los sólidos de mayor tamaño como hojas, palos y piedras para que no ingresen a la tubería. Mientras que, en el caso de las fuentes subterráneas, generalmente su mantenimiento operativo se basa en la remoción de raíces que obstruyen las tuberías y la limpieza de las rejillas de los pozos [19].

Después de la captación, el agua es transportada por tuberías hasta llegar a la cámara de entrada de la planta de tratamiento respectiva, esta es la primera estructura del proceso de la planta potabilizadora y cumple las funciones de dissipador de energía, medición de caudal y mezcla de insumos químicos [19].

No obstante, la desarenación es una etapa previa del proceso de potabilización, la cual permite remover los sólidos de mayor densidad, como las arenas que están presentes en el agua captada. Estos sólidos se deben eliminar para evitar daños en las tuberías y estructuras de tratamiento [19].

Para la medición de caudal, el AyA cuenta con equipos y estructuras hidráulicas de diferentes formas según el caudal a tratar, tales como: vertederos triangulares o rectangulares, rampas o canaletas Parshall [19].

En el proceso de la coagulación, el AyA utiliza principalmente sulfato de aluminio y polímeros. La aplicación y dosificación de estos productos químicos permite la eliminación de

las partículas coloidales, como la suciedad y microorganismos que se encuentran presentes en el agua captada. Una vez que se ha adicionado los productos químicos al agua cruda, inicia el proceso de floculación [19].

Seguidamente, se da paso al proceso de sedimentación. En la parte superior de los sedimentadores, existen unos tubos recolectores que permiten llevar estas aguas a los filtros. Se busca que esta agua clarificada tenga una turbiedad menor a las 2 UNT, lo que representa una eficiencia de remoción de turbiedad superior al 90% en esta etapa del proceso de tratamiento [19].

Por otro lado, pese a que se puede observar a simple vista, sin impurezas el agua que proviene de la sedimentación, siempre persisten “flocs” de menor tamaño y densidad, así como microorganismos que deben ser removidos mediante el proceso de filtración [19].

Por último, el proceso de potabilización del AyA finaliza con la desinfección y para ello, utiliza gas cloro o alguno de sus derivados, ya que es sumamente efectivo y mantiene un efecto residual, el cual funciona de garantía para la salud pública [19].

Es importante recalcar que el proceso de potabilización del AyA varía según sea las condiciones de cada planta.

Cabe mencionar que el AyA mediante el estándar NSF/ANSI CAN 60 garantiza que los productos químicos a utilizar en el tratamiento del agua de sus plantas potabilizadoras cumplen con los estándares globales de salud pública aceptados.

NSF/ANSI CAN 60 se refiere a una norma nacional estadounidense y canadiense que establece los requisitos mínimos sobre los efectos en la salud de los productos químicos, contaminantes químicos e impurezas que agregan directamente al agua potable a partir de los productos químicos para el tratamiento del agua potable [22].

La certificación o cumplimiento es exigida por 49 estados de EE.UU. y nueve provincias/territorios canadienses, así como en otros países clave de todo el mundo, desde el nivel local al nacional [23].

Entre los productos químicos que entran en el ámbito de aplicación de esta norma, se encuentran: inhibidores de corrosión e incrustación, coagulantes y floculantes, productos químicos de ajuste del pH, ablandamiento y precipitación, productos químicos de desinfección y oxidación, entre otros productos químicos utilizados en el tratamiento del agua potable [22].

2.3.3. Planta Potabilizadora AyA Guadalupe

La Planta Potabilizadora AyA Guadalupe se ubica en la provincia de San José, específicamente en el distrito Ipís del cantón de Goicoechea y cuenta con una población abastecida de 69 748 habitantes de los cantones de Goicoechea, Montes de Oca, Moravia y Tibás [24]. Para el primer semestre del año 2022, la planta contaba con 19 920 usuarios atendidos, un almacenamiento de 11 830 m³ y un consumo por usuario domiciliario de 15,05 m³/mes [25].

Actualmente, la planta cuenta con cuatro fuentes de abastecimiento de tipo superficial, específicamente las quebradas de: Honda I, ubicada en las coordenadas 9°59'30.80"N 83°59'27.16"W; Honda II, localizada en las coordenadas 9°59'29.54"N 83°59'26.55"W; La Lupe, con las coordenadas de 9°58'34.55"N 83°59'28.83"W y El Durazno, situada en 9°58'24.26"N 83°59'42.33"W; todas provenientes del cantón de Vásquez de Coronado. Según la ubicación y la topografía del terreno, se consideran dos tipos de sistemas, los de gravedad para el caso de las Hondas y La Lupe y sistema de bombeo para la quebrada El Durazno [24].

La Lupe y el Durazno cuentan con captaciones de fondo, para ello disponen de rejillas de cribado en una sección del cauce del río, lo que permite retener sólidos de mayor tamaño. Mientras que la Honda I cuenta con captación de fondo, la Honda II dispone de captación lateral, lo que quiere decir que las rejillas están colocadas a un costado del margen del río. Asimismo, las cuatro fuentes de abastecimiento se mezclan homogéneamente aproximadamente 3,8 kilómetros arriba de la PTAP de Guadalupe (9°58'50.61"N 84°0'25.49"W), en donde se encuentra el desarenador, el cual permite remover arena y limo fácilmente sedimentables [26].

Además, la planta cuenta con dos tanques de almacenamiento, San Blas I y San Blas II, ubicados en las coordenadas de 9°57'51.5"N 84°02'13.3"W. Cada uno de los tanques dispone de un volumen de 2500 m³ y el agua que ingresa a los tanques proviene tanto de la planta de Guadalupe como de la planta de Los Sitios.

En la Fig. 2.2. se puede observar la ubicación de las cuatro fuentes de abastecimiento, el desarenador, los dos tanques de almacenamiento, la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe y su área de cobertura.

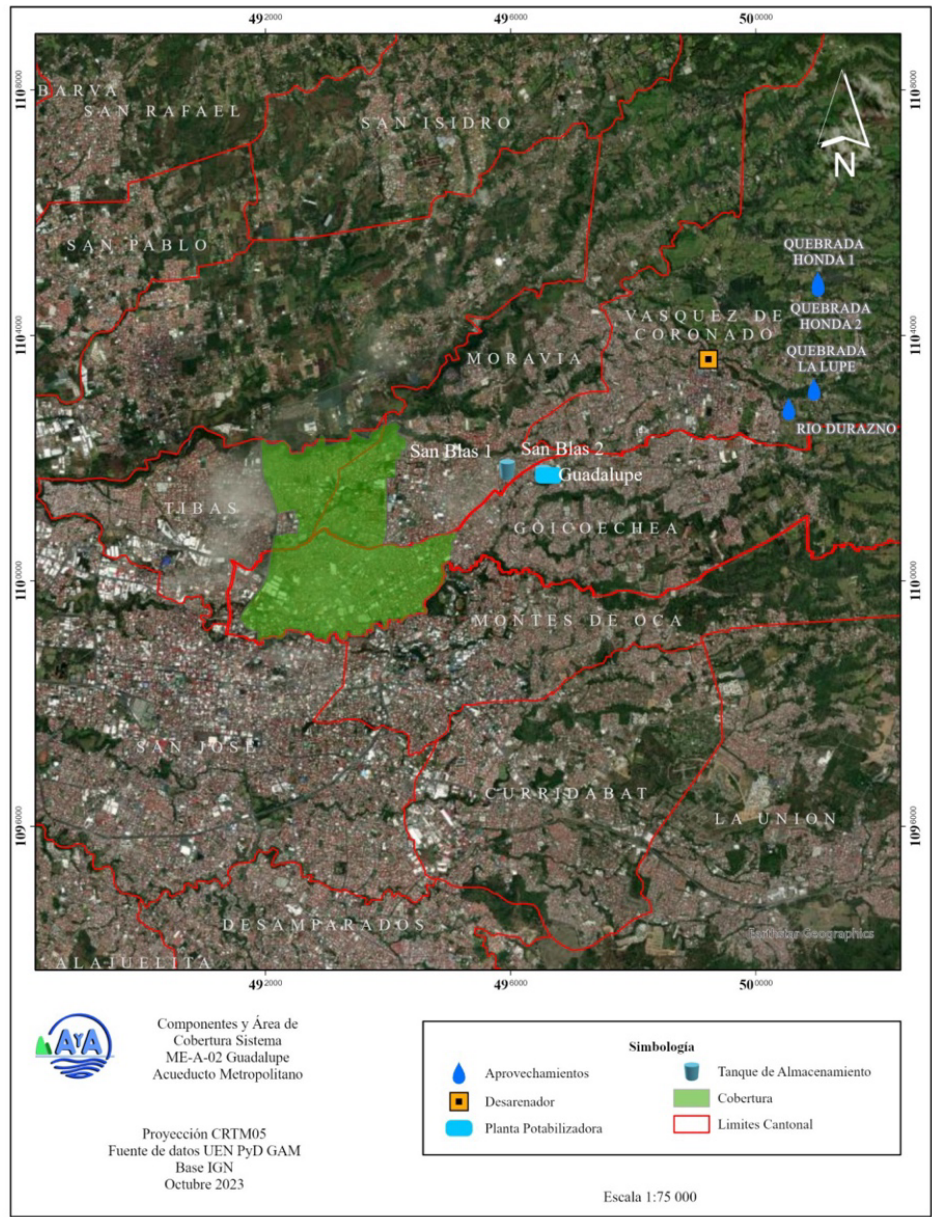


Fig. 2.5. Componentes y área de cobertura de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe [27].

El agua proveniente de las fuentes de abastecimiento mencionadas anteriormente, se trata mediante los procesos unitarios de: coagulación, floculación, presedimentación, sedimentación, filtración y desinfección, tal y como se puede observar en la Fig. 2.3. Asimismo, en la figura se puede apreciar las instalaciones de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.



Fig. 2.6. Planta Potabilizadora AyA Guadalupe, Goicoechea, San José.

Las cuatro fuentes de abastecimiento llegan directamente a una canaleta Parshall de un pie de garganta, ubicada a la entrada de la planta, cuyo objetivo es la medición del caudal y dosificación de insumos químicos. En la canaleta se toma una muestra de agua con el fin de medir los parámetros del nivel primero (N1), incluida la turbiedad, color, pH y alcalinidad respectivamente. Dichas mediciones se realizan por hora diariamente. En la Fig. 2.4. se puede observar las mediciones realizadas en promedio por día, desde el 01 de junio del 2022 hasta el 31 de junio del 2023, del caudal de agua cruda que ingresa a la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

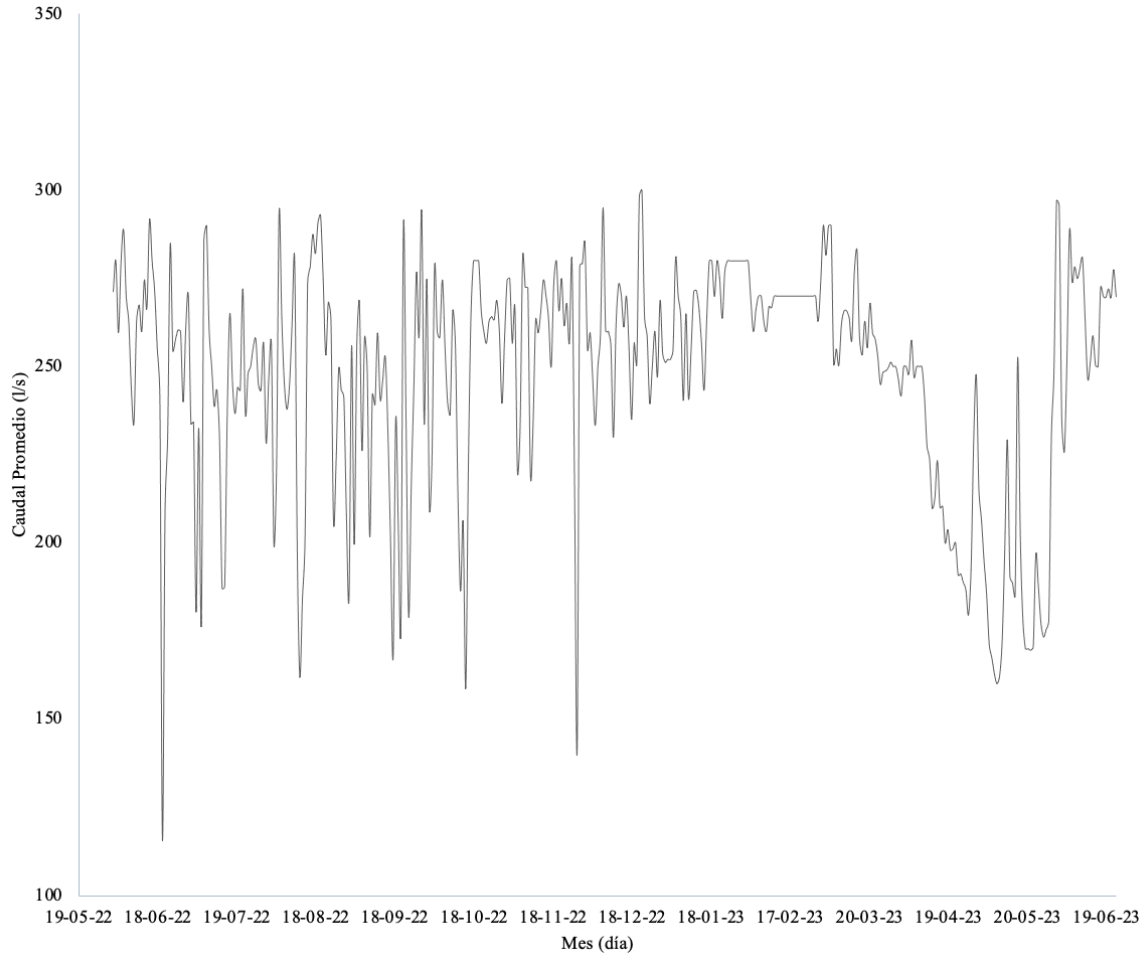


Fig. 2.7. Caudal promedio del agua cruda de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

Tal y como se puede observar en la Fig. 2.4., las mediciones del caudal promedio del agua cruda que ingresa en la planta se encuentran en un intervalo entre 100 l/s a 300 l/s, siendo 115,83 l/s el caudal mínimo para el día 20 de junio del 2022 y para el 22 de diciembre del mismo año, se identificó la mayor medición del caudal con un valor de 300 l/s.

Cabe mencionar que el caudal para la época lluviosa, comprendida desde mayo 2022 hasta octubre del mismo año es en promedio de 249,70 l/s mientras que, para el periodo de diciembre 2022 a marzo 2023, correspondiente a la época seca, el caudal que recibió la planta es en promedio de 264,33 l/s. Lo anterior puede ser causa del fenómeno ENOS en fase La Niña que inició en el 2023. No obstante, según el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica

(IMN), los meses de abril y noviembre son de transición, por lo que no se tomaron en cuenta para el cálculo de los caudales promedio según la estación del año [28].

Por otro lado, en la Fig. 2.5. se presentan las mediciones realizadas desde el 01 de junio del 2022 hasta el 31 de junio del 2023 de la turbiedad promedio del agua cruda que ingresa a la planta. Para el 29 de enero del 2023 la planta recibió la turbiedad más baja con un valor de 1,96 UNT, mientras que para el 11 de junio del mismo año se obtuvo la mayor turbiedad con un valor de 154,27 UNT. Tomando en consideración las estaciones del año, para la época seca el valor promedio de turbiedad fue de 4,83 UNT, mientras que, para la época lluviosa, la turbiedad promedio correspondió a 28,65 UNT.

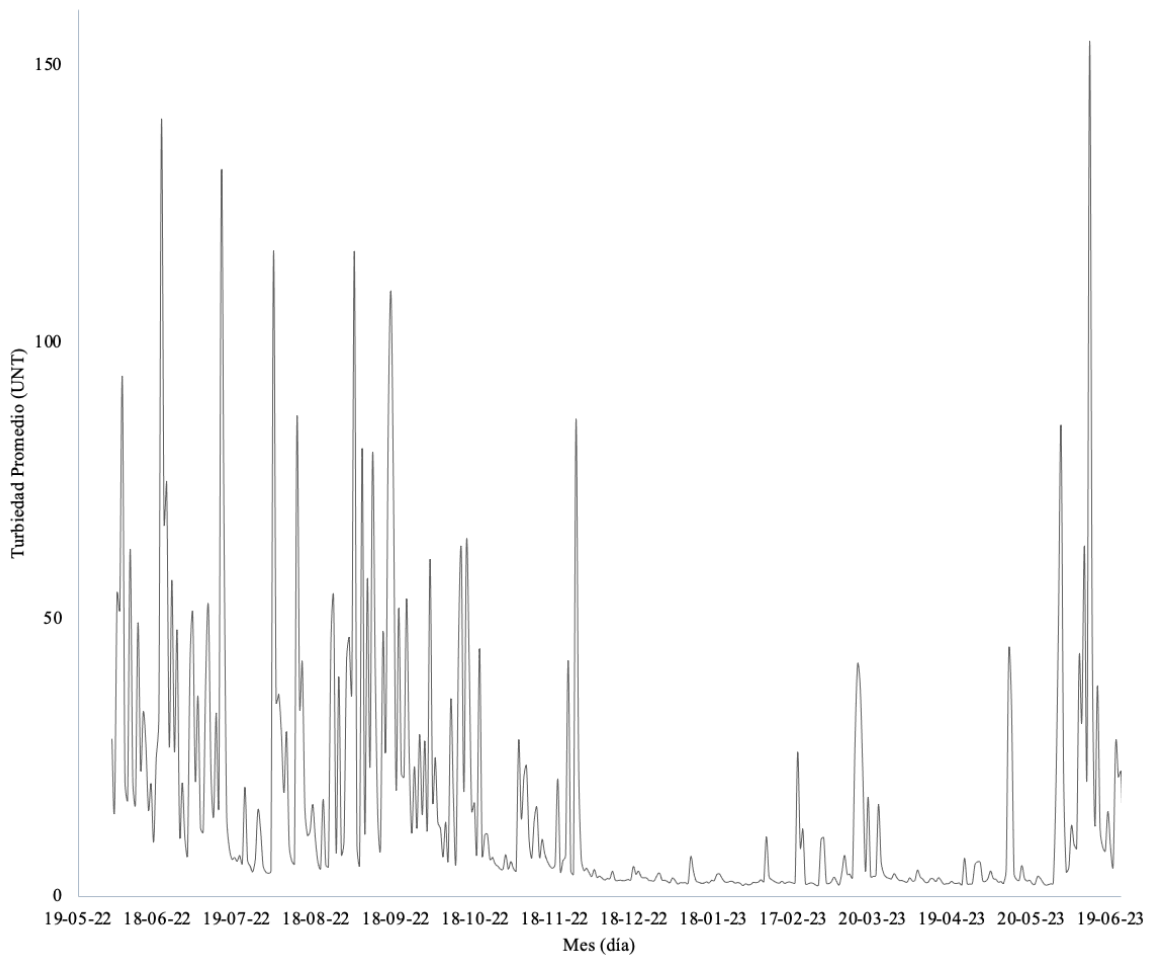


Fig. 2.8. Turbiedad promedio del agua cruda de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

Seguidamente, se dosifica con insumos químicos al agua cruda con el fin de provocar el proceso de coagulación y para ello, se utiliza como coagulante sulfato de aluminio tipo A al 2% m/v [24]. Por otro lado, cuando las condiciones lo permiten, generalmente cuando las

unidades de color se encuentran por debajo de 50 U-Pt-Co, se realiza una predesinfección y para ello se aplica cloro en un rango de dosis que oscila entre 2 a 3 mg/l. Análogamente, según las condiciones de la planta, se procede a aplicar el polímero tipo poliamida LT7990 o en ocasiones Polydadmac LT7995 con una concentración al 1% m/v [26].

Posteriormente, el caudal pasa al presedimentador, para ello, la planta dispone de tres unidades en paralelo, cuyas funciones son realizar una primera etapa de floculación y sedimentación y a la vez, servir de barrera física, tal y como se puede observar en la Fig. 2.3. [24].

Por su parte, la floculación es de tipo pericinética, es decir, no hay ninguna acción que permita la agitación de las partículas del fluido. En las unidades de tratamiento de la planta, existen unos cambios de dirección que ayudan al proceso de floculación, por ejemplo, cuando el flujo sale por los canales del presedimentador así como cuando ingresa por las compuertas del sedimentador [26].

Para la sedimentación, la planta dispone de dos sedimentadores convencionales, ubicados en paralelo. Por otro lado, para la filtración, la planta cuenta con un sistema de 8 filtros rápidos de medio único y tasa constante, los cuales cuentan con un sistema automatizado de retrolavado con aire y agua, tal y como se puede observar en la Fig. 2.6. Además, el área de la batería de los filtros corresponde a 144 m² [26].



Fig. 2.9. Sistema de filtración de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

Por último, se realiza la etapa de desinfección, la cual tiene la función de eliminar o inactivar los microorganismos patógenos que superan la etapa de filtración. De esta manera, en la planta, el agua tratada se mantiene durante cierto período en un tanque de almacenamiento, esto con el objetivo de otorgar un tiempo de contacto para la desinfección con cloro [24].

Cabe destacar que después del tiempo de contacto para la desinfección del agua tratada, también se realiza la medición de los parámetros del nivel primero (N1) y el aluminio residual, perteneciente al nivel segundo (N2) al agua potable, la cual estaría lista para enviarse a la red de distribución.

En la Fig. 2.7. se presentan las mediciones diarias del caudal promedio, realizadas por el laboratorio de la planta desde el 01 de junio del 2022 hasta el 31 de junio del 2023, del efluente de agua potable de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe. Como se puede observar, el 31 de mayo del 2023 en el efluente de la planta, se obtuvo un caudal máximo de 297,08 l/s; mientras que para el 20 de junio del 2022, el efluente correspondió a 103,68 l/s, siendo este el caudal mínimo. Análogamente, para el periodo de época seca (diciembre 2022-marzo 2023), el caudal promedio fue de 258,35 l/s y para el periodo de época lluviosa (mayo 2022-octubre 2022), se identificó un caudal promedio de 226,57 l/s.

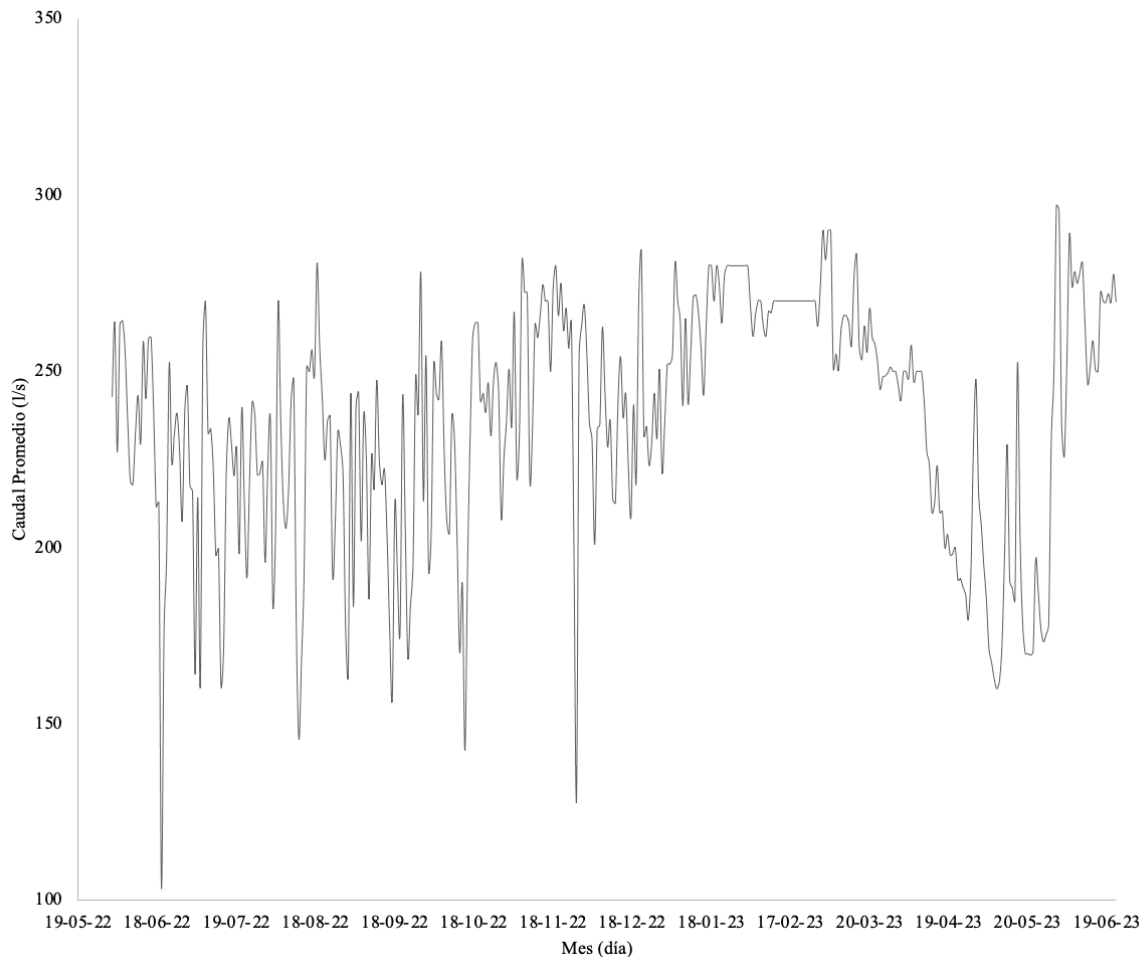


Fig. 2.10. Caudal promedio del agua potable de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

En la Fig. 2.8. se puede observar cómo varía la turbiedad promedio del agua potable que se obtiene en la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe. Se identificó que para el día 04 de junio del 2022, se obtuvo el valor máximo de turbiedad, con un valor de 4,26 UNT. Asimismo, para el 29 de octubre del 2022 se obtuvo en promedio 0,12 UNT, siendo este el valor mínimo de turbiedad para el periodo del 01 de junio del 2022 al 31 de junio del 2023.

De la misma manera, para la época seca, la turbiedad promedio fue de 0,47 UNT en comparación a la turbiedad que se obtuvo para la época lluviosa, ya que se identificó un valor promedio de 0,55 UNT.

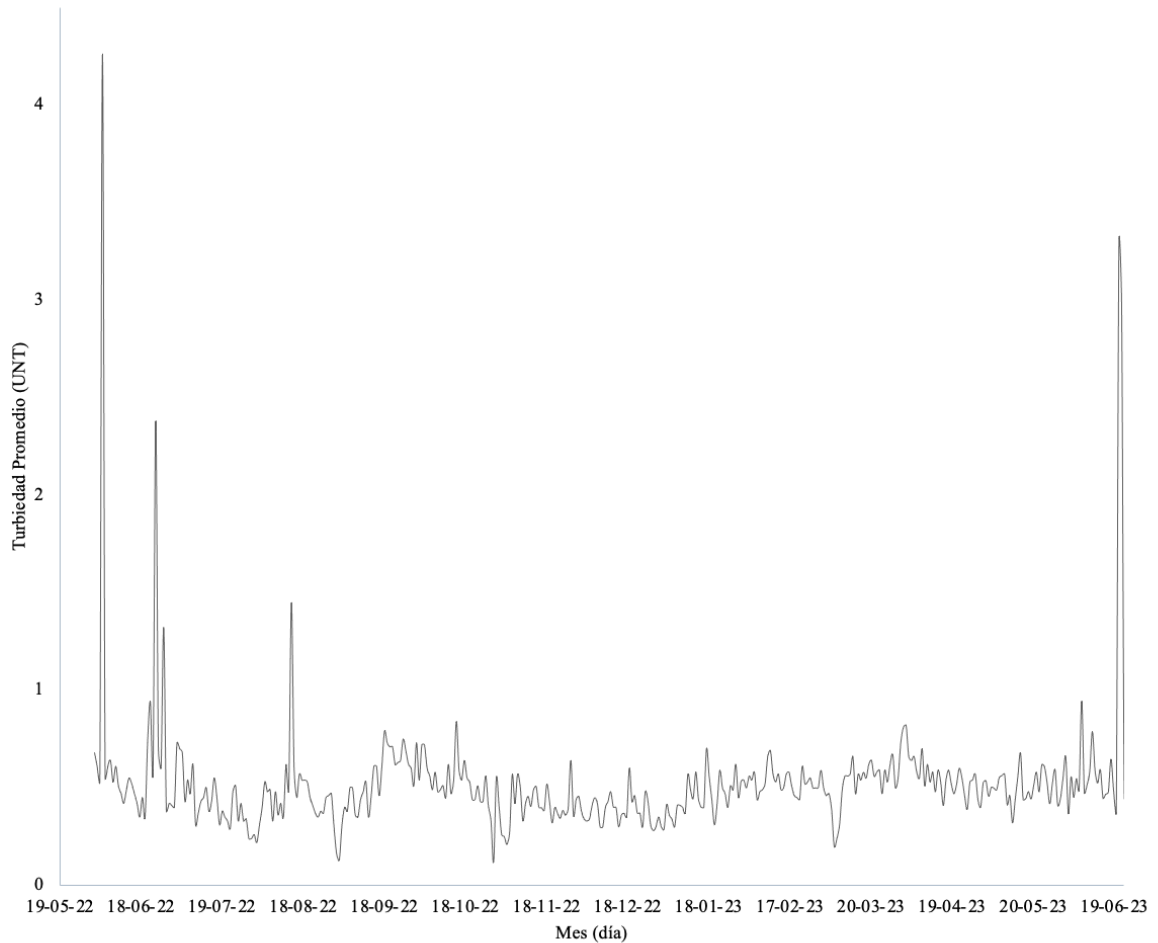


Fig. 2.11. Turbiedad promedio del agua potable de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

Con respecto a las mediciones de aluminio residual en el agua potable de la planta, en la Fig. 2.9. se presentan las mediciones promedio diarias que realizó el laboratorio de la planta. El 04 de junio del 2022 se obtuvo 0,01 mg/l de aluminio residual en el agua potable, siendo este el valor mínimo, mientras que para el 21 de marzo del 2023, se obtuvo la mayor medición de aluminio residual con un valor de 0,08 mg/l. Asimismo, tomando en consideración las épocas del año, para la época seca, se identificó en promedio 0,03 mg/l de aluminio residual y 0,04 mg/l para la época lluviosa.

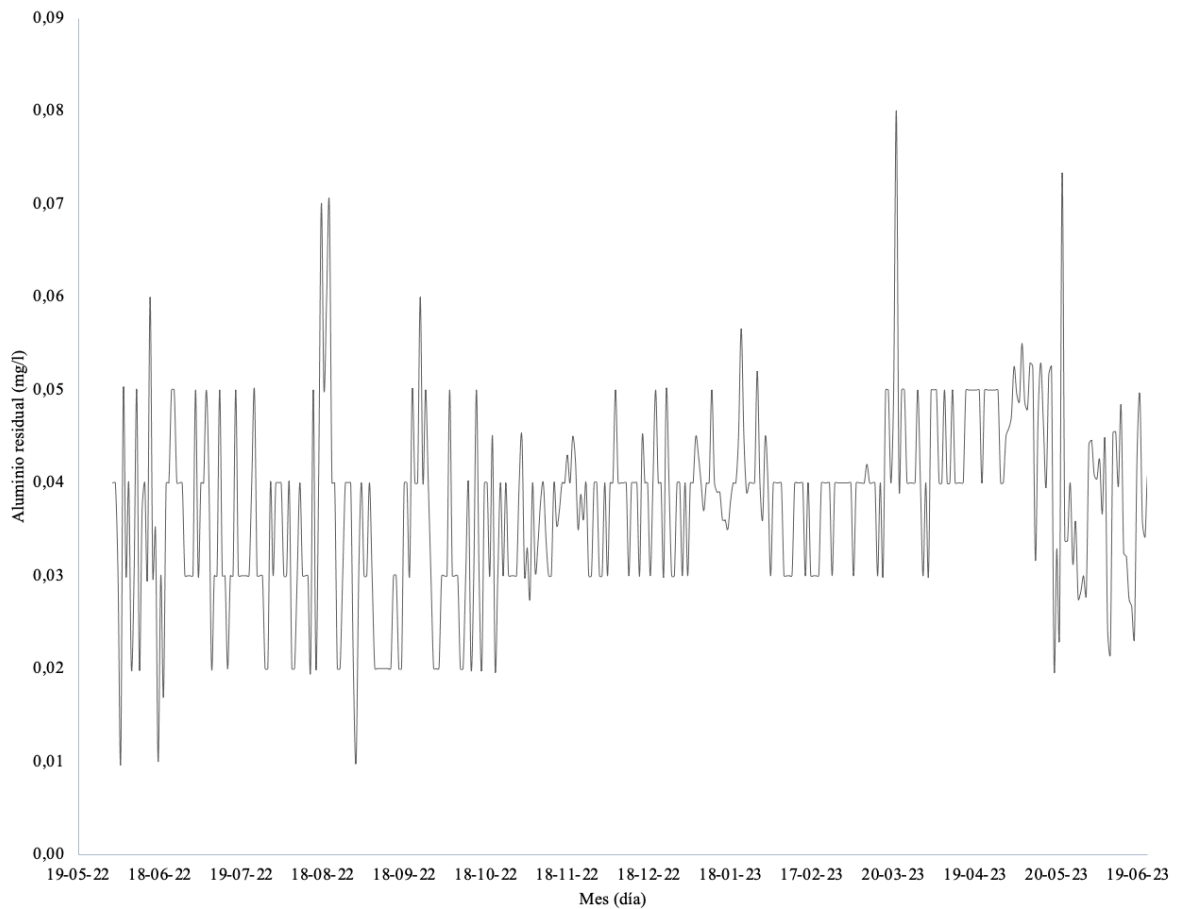


Fig. 2.12. Aluminio residual promedio del agua potable de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

En general, el agua tratada de la planta cumple con los parámetros de calidad de agua potable para ser consumida por la población. Sin embargo, aún persiste la problemática del aluminio residual, puesto que ocasionalmente se obtienen valores superiores a 0,2 mg/l [24].

2.3.4. Problemática del AyA

Con el fin de reducir el aluminio residual en el agua tratada, el AyA ha realizado pruebas utilizando polímeros orgánicos e inorgánicos a manera de sustituir el sulfato de aluminio. Adicionalmente, aprovechando el tipo de comportamiento del flujo del presedimentador y de los sedimentadores, han intentado reducir por intermitencia la dosis de sulfato de aluminio en época seca, donde los parámetros fisicoquímicos del agua son de calidad más favorable para esta práctica [5].

Por otro lado, en la subgerencia del AyA, la cual maneja la operación de la Gran Área Metropolitana (GAM), existe una “escuela de potabilización”, en donde se capacita a los operadores con el material elaborado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), con el fin de mejorar la práctica en los procedimientos y análisis como los ensayos de prueba de jarras [5].

El AyA ha ajustado la alcalinidad con cal, pero los operadores reportan que complica mucho la operación y preparación periódica de la mezcla, el manejo de la materia prima y la gestión de lodos, ya que las PTAP del AyA no están diseñadas para el acondicionamiento de pH. Este representa un punto de mejora para las PTAP del AyA con el fin de lograr cumplir con calidad potable de forma sostenida [5].

2.4. Descripción de las características y aplicaciones de Clear Chem

Clear Chem es un producto biodegradable, líquido, transparente y altamente concentrado; según el fabricante es ideal para la reducción o eliminación de productos químicos, específicamente los residuos del sulfato de aluminio, el cual se utiliza ampliamente en los procesos de tratamiento de agua potable. Asimismo, actúa como coadyuvante en el proceso de coagulación y floculación [29].

El mecanismo de acción de Clear Chem se basa en hacer más solubles las trazas de aluminio, logrando mejorar la acción de coagulación y floculación. El proceso inicia con la encapsulación, dilución y neutralización del aluminio residual, alcanzando a depurar el agua en proceso sin adicionar ningún elemento químico y generando una descomposición fisico-química total [29].

Análogamente, Clear Chem no inhibe la actividad química de otros productos en el proceso de potabilización, no deja residuos propios y no genera cambios en el color, olor ni sabor en el agua de tratamiento [29].

En Costa Rica, Clear Chem ingresó como muestra a finales del 2021, con el fin de que se realizaran las pruebas y análisis respectivos para conocer su factibilidad como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación del sulfato de aluminio en el sistema de tratamiento de agua potable de las plantas potabilizadoras del AyA. Por otro lado, el fabricante menciona que el producto se ha utilizado en varios países de América Latina, sin embargo, por motivos confidenciales, la información no fue compartida para la realización de esta investigación [30].

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se exponen los materiales y métodos clasificados según la condición analizada en los ensayos de prueba de jarras.

3.1. Fuente de datos

Se realizaron ocho visitas de campo a la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe, ubicada en el distrito Ipís del cantón de Goicoechea, San José, tal y como se puede observar en la Fig. 3.1.

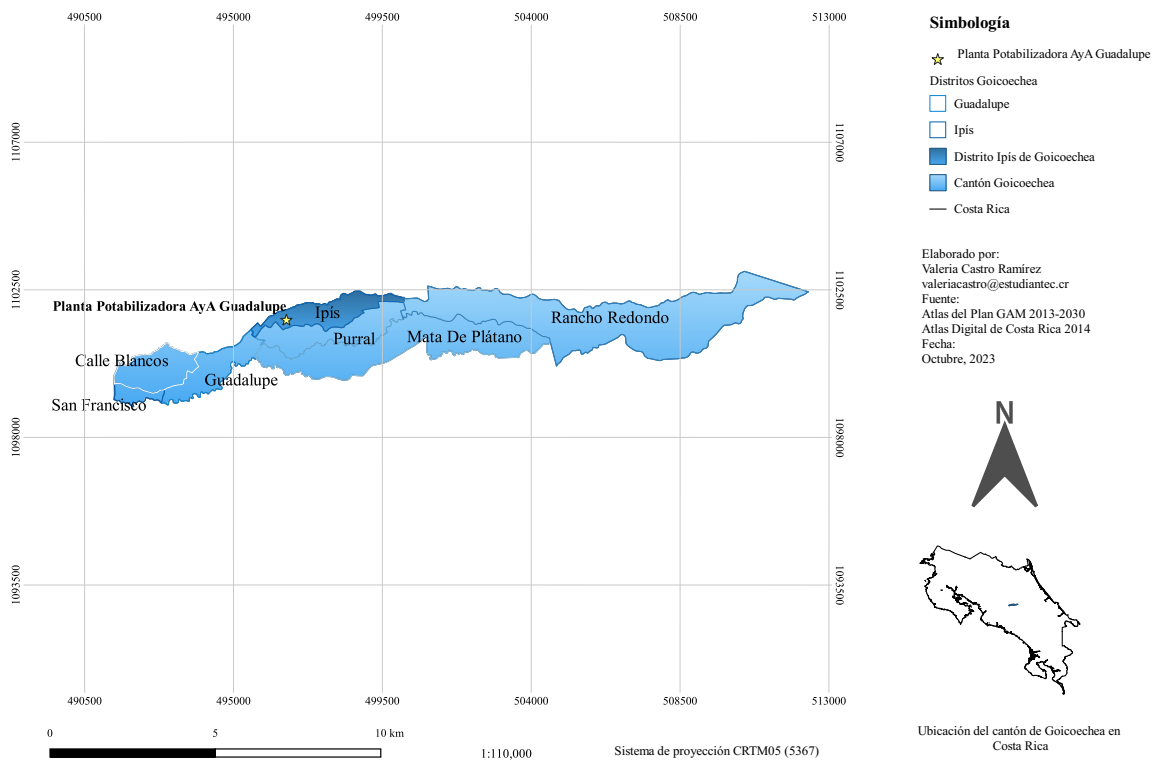


Fig. 3.1. Ubicación de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe, Ipís de Goicoechea, San José.

Las visitas se realizaron entre el 11 de mayo del 2023 hasta el 29 de junio del mismo año; dos de éstas se realizaron con el objetivo de conocer la planta, sus instalaciones, el laboratorio, los equipos e instrumentos, el personal y el sistema de tratamiento de agua potable; en otras tres visitas se realizaron los análisis en el laboratorio ubicado dentro de la planta y las últimas tres visitas se realizaron con el fin de determinar el aluminio residual después de 12, 24, 48 o 72 horas respectivamente, en los ensayos realizados.

3.2. Recolección de la muestra y métodos de análisis

Las muestras de agua cruda utilizadas para las pruebas de laboratorio fueron tomadas específicamente en la canaleta Parshall, ubicada en la entrada de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

Cabe destacar que se analizaron los parámetros de turbiedad, color, pH, alcalinidad y olor al agua cruda. En el Tabla II se detallan los parámetros analizados con el respectivo método y equipo para su análisis.

TABLA II
ANÁLISIS DE PARÁMETROS EN MUESTRA
DE AGUA CRUDA

Parámetro	Método	Equipo
Turbiedad	2130 B Mod	TL2300 HACH
Color aparente	2120 B	Comparador Orbeco Hellige
pH	4500-H+ B	Sension+ HACH
Alcalinidad	2310 B	Bureta, Erlenmeyer
Olor	Olfato	No aplica

Nota. Parámetros analizados en muestras de agua cruda.

Para los distintos ensayos de prueba de jarras, se evaluó el parámetro de aluminio residual mediante un comparador visual de la marca Lovibond (Fig. 3.2.a) para medir Al^{+3} , específicamente con el método M2501. Además, en ciertos ensayos también se evaluó este parámetro mediante el colorímetro DR300 de la marca HACH (Fig. 3.2.b), con el método M8012.

Es importante mencionar que se aplicó agua destilada a toda la cristalería utilizada antes de realizar cualquier ensayo con la finalidad de remover cualquier contaminación externa a las pruebas.

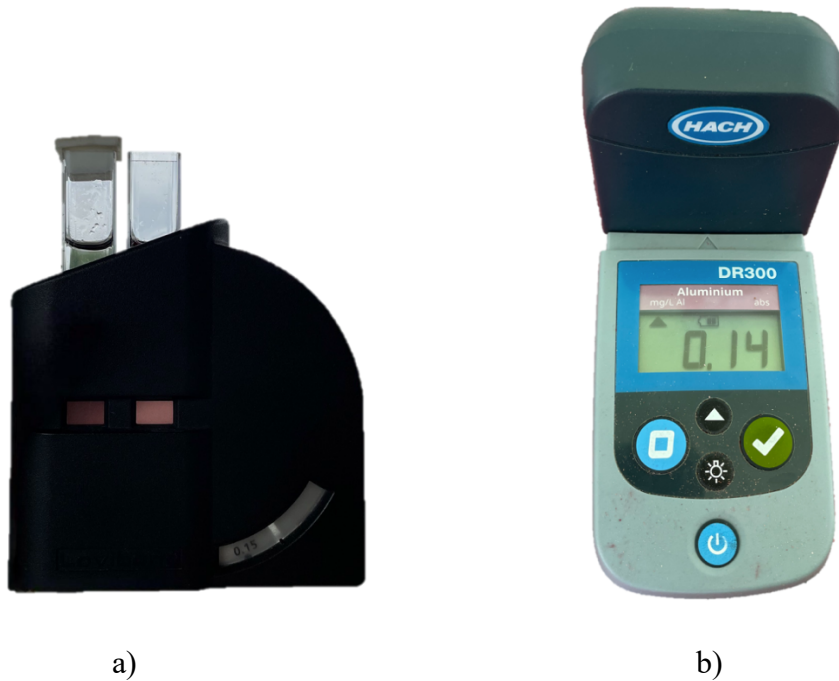


Fig. 3.2. Equipos para la medición de aluminio residual. a) Comparador visual Lovibond. b) Colorímetro DR300 HACH.

3.3. Equipo para prueba de jarras

Con respecto a los ensayos de prueba de jarras, se utilizó una máquina de jarras PB900 de la marca Phipps & Bird, la cual cuenta con un “display” de cuatro funciones, entre ellas, programación de cuatro memorias. La memoria uno se utiliza con arranque suave para proteger los engranajes y se revoluciona a 100 RPM durante 5 a 10 segundos mientras que la memoria dos es la correspondiente a mezcla rápida y se utiliza durante 1 minuto a 300 RPM. Asimismo, la memoria tres corresponde a la etapa de floculación, en este caso de 15 minutos a 85 RPM. Por último, la memoria cuatro, la cual realiza la función de sedimentación, se utiliza a 0 RPM durante 10 minutos.

Para los ensayos con jarras cuadradas, se utilizaron jarras de dos litros B-KER2®, las cuales incluyen válvulas de muestreo que se encuentran ubicadas a 10 cm de profundidad, tal y como se observa en la Fig. 3.3. Mientras que, para el caso de los ensayos de prueba de jarras redondas, se utilizaron seis jarras redondas de dos litros cada una (Fig. 3.4.), las cuales cuentan con flotadores que permiten tomar las muestras a los 6 cm de profundidad. Además, en tales circunstancias, la memoria tres o la etapa de floculación se realizó por 15 minutos, a 85 RPM.



Fig. 3.3. Máquina PB900 Phipps & Bird con jarras cuadradas B-KER2®.



Fig. 3.4. Máquina PB900 Phipps & Bird con jarras redondas.

3.4. *Ensayos de prueba de jarras cuadradas aplicando dosis óptima de sulfato de aluminio y Clear Chem en el proceso de coagulación*

3.4.1. Evaluación de la dosis óptima de sulfato de aluminio en jarras cuadradas

El martes 20 de junio del 2023 se preparó una disolución acuosa de sulfato de aluminio al 0,4% m/v, para ello, se pesó 4 g de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) tipo A al 17% de la marca Ferralca y se disolvió en 1000 ml de agua destilada.

De esta manera, se realizó un primer ensayo de prueba de jarras con el fin de analizar la dosis óptima de coagulante, por tal razón se utilizaron dosis de 38 mg/l, 40 mg/l, 42 mg/l, 44 mg/l, 46 mg/l y 48 mg/l correspondientes a sulfato de aluminio.

Una vez transcurrido el tiempo de sedimentación en la prueba de jarras, se descartó entre los primeros 10 a 20 ml y se extrajo la muestra utilizando el mecanismo de las jarras cuadradas ubicado a 10 cm de profundidad. Además, se procedió a recolectar la muestra de cada jarra en un erlenmeyer de un volumen aproximado de 150 a 200 ml.

A cada muestra se le midió la turbiedad y se procedió a filtrar con los respectivos embudos y papel de filtro de la marca CHMLAB Group. Posteriormente, al agua filtrada se le midió nuevamente la turbiedad y el aluminio residual, sólo a la prueba de la jarra que resultó con la dosis óptima de sulfato de aluminio, mediante el comparador visual de la marca Lovibond.

3.4.2. Evaluación de la dosis óptima de Clear Chem

Para una efectiva eliminación de los residuos de aluminio utilizando Clear Chem como coadyuvante, se siguió las especificaciones del fabricante [31], para lo cual se propone aplicar el producto en la etapa de coagulación referente a la memoria dos de la prueba de jarras.

Sin embargo, el fabricante recomienda una dosis de 5 a 15 ml de Clear Chem por m^3 de agua, no obstante, se procedió a calcular la dosis en mg/l, ya que es la medida que usualmente utiliza el AyA para todas sus pruebas de laboratorio. Por lo anterior, el martes 20 de junio del 2023 se procedió a preparar una disolución al 0,1% m/v, para ello, se pesó 1 g de Clear Chem y se disolvió en 1000 ml de agua destilada. Asimismo, a partir de ésta se preparó una disolución al 0,001% m/v para optimizar el proceso de medición de las dosis y obtener una dosis de Clear Chem de 0,01 mg/l, esto con el objetivo de analizar cómo se comporta el Clear Chem en dosis muy bajas.

Posteriormente, se realizó el ensayo de prueba de jarras, a las cuales se les agregó en la etapa de coagulación la dosis óptima de sulfato de aluminio encontrada anteriormente. Después de 15 segundos, se agregó las concentraciones de Clear Chem de 0,01 mg/l, 0,011 mg/l, 0,012 mg/l, 0,013 mg/l, 0,014 mg/l y 0,015 mg/l. Una vez finalizado el tiempo de sedimentación, se descartó los primeros ml de cada muestra en un recipiente y se procedió a depositar la muestra en un Erlenmeyer debidamente etiquetado.

Asimismo, se midió la turbiedad al agua sedimentada y se procedió a filtrar la muestra. La muestra filtrada se recolectó en un Erlenmeyer debidamente etiquetado y se midió nuevamente la turbiedad al agua filtrada y el aluminio residual mediante el comparador visual Lovibond.

Seguidamente, se repitió el ensayo de jarras para dosis de Clear Chem al 0,001% m/v de 0,1 mg/l, 0,15 mg/l, 0,2 mg/l, 0,25 mg/l, 0,3 mg/l y 0,35 mg/l y se realizaron las respectivas mediciones de turbiedad en el agua sedimentada y filtrada, así como el aluminio residual en el agua filtrada.

3.5. Ensayos de prueba de jarras cuadradas y redondas aplicando dosis óptima de sulfato de aluminio y Clear Chem en el proceso de coagulación

3.5.1. Evaluación de la dosis óptima de sulfato de aluminio

El miércoles 21 de junio del 2023 se determinó la dosis óptima de sulfato de aluminio inicialmente en jarras cuadradas tal y como se realizó para el martes 20 de junio; las concentraciones de coagulante al 0,4% m/v fueron de 38 mg/l, 40 mg/l, 42 mg/l, 44 mg/l, 46 mg/l y 48 mg/l.

De la misma manera, se evaluó para cada una de las pruebas la turbiedad al agua sedimentada, filtrada y el aluminio residual. Sin embargo, debido a que las mediciones del parámetro de turbiedad en agua sedimentada no resultaron idóneas, de manera que se pudiera tener una mayor claridad en la selección de la dosis óptima de sulfato de aluminio, se procedió a realizar un ensayo con jarras redondas.

3.5.2. Verificación de la dosis óptima de sulfato de aluminio con jarras redondas

Para la verificación de dosis óptima de sulfato de aluminio utilizando jarras redondas, se realizó un ensayo en cuatro pruebas de jarras con concentraciones de 42 y 44 mg/l. Para las primeras dos, se utilizó la disolución al 0,4% m/v del sulfato de aluminio preparada anteriormente en el laboratorio y para las otras dos pruebas, se utilizó como disolución de

trabajo la que utiliza el AyA directamente en la PTAP de Guadalupe, la cual está preparada al 15% m/v; por lo que para obtener una disolución al 0,4% m/v, se procedió a tomar 26,6 ml de ésta y se disolvió en 1 litro de agua destilada.

3.5.3. Evaluación de la dosis óptima de Clear Chem

Por otro lado, se preparó una disolución de Clear Chem al 0,2% m/v con la intención de obtener concentraciones del producto de 0,4 mg/l, 0,5 mg/l, 0,6 mg/l, 0,7 mg/l, 0,8 mg/l y 0,9 mg/l. Dichas concentraciones se agregaron a cada una de las jarras en la etapa de coagulación (memoria dos) después de 15 segundos de que se agregara la dosis óptima de sulfato de aluminio encontrada anteriormente. Una vez finalizado el tiempo de sedimentación, se descartó los primeros ml de muestra en un recipiente y se procedió a depositar la muestra de cada jarra en un Erlenmeyer etiquetado.

De esta manera y tal como se mencionó anteriormente, se midió la turbiedad al agua sedimentada y filtrada. Además, a cada muestra se le midió el aluminio residual mediante el comparador visual Lovibond.

Asimismo, se repitió el procedimiento anterior, pero con concentraciones de Clear Chem al 0,2% m/v de 13 mg/l, 14 mg/l, 15 mg/l, 16 mg/l, 17 mg/l y 18 mg/l. No obstante, para este ensayo, se midió el aluminio residual antes y después de 24 horas.

El procedimiento mencionado anteriormente se repitió, mediante dos ensayos de jarras sólo que esta vez para concentraciones de Clear Chem al 0,2% m/v de 1 mg/l, 2 mg/l, 3 mg/l, 4 mg/l, 5 mg/l, 6 mg/l y el segundo ensayo con 7 mg/l, 8 mg/l, 9 mg/l, 10 mg/l, 11 mg/l y 12 mg/l. Además, se midió el aluminio residual antes y después de 12 horas.

3.6. *Ensayos de prueba de jarras redondas con la condición menos favorable de sulfato de aluminio y aplicación de Clear Chem en el proceso de coagulación*

3.6.1. Evaluación de la condición menos favorable de aluminio residual

El lunes 26 de junio del 2023 se determinó un rango más amplio de dosificación del sulfato de aluminio, de manera que no se seleccionara la dosis óptima sino la dosis de sulfato de aluminio con la condición menos favorable de aluminio residual. Por tal razón, se realizó un primer ensayo de prueba de jarras con dosis de sulfato de aluminio al 0,4% m/v de 26 mg/l, 30 mg/l, 34 mg/l, 38 mg/l, 42 mg/l y 46 mg/l.

3.6.2. Evaluación de la dosis óptima de Clear Chem

Se evaluaron dosis de Clear Chem de 5 a 15 mg/l, por lo que se decidió trabajar con una disolución al 0,2% m/v del producto. A partir de dicha disolución, se realizaron dos ensayos de prueba de jarras, la primera con concentraciones de 5 mg/l, 6 mg/l, 7 mg/l, 8 mg/l, 9 mg/l y 10 mg/l y la segunda con concentraciones correspondientes a 11 mg/l, 12 mg/l, 13 mg/l, 14 mg/l y 15 mg/l. Para ambos ensayos, se aplicaron las concentraciones a los 15 segundos después de la aplicación de la dosis óptima de sulfato de aluminio encontrada anteriormente.

De la misma manera, se midió la turbiedad tanto en el agua sedimentada como en el agua filtrada, además para esta última se midió el aluminio residual. Asimismo, se guardó 120 ml de cada muestra con el objetivo de evaluar el aluminio residual a las 24, 48 y 72 horas posteriores mediante el comparador visual Lovibond. Análogamente, después de las 72 horas, se evaluó el parámetro de aluminio residual, mediante el colorímetro de la marca HACH, a la prueba con el menor resultado obtenido por el comparador visual Lovibond

3.7. *Ensayos de prueba de jarras redondas con la condición menos favorable de sulfato de aluminio y aplicación de Clear Chem en el agua filtrada*

El lunes 26 de junio del 2023 también se dio paso a analizar cómo actúa el Clear Chem cuando se aplica en el agua filtrada y no en el proceso de coagulación tal y como se realizó para cada uno de los ensayos anteriores. Por tal razón, tomando como base el ensayo de prueba de jarras que se realizó con dosis de sulfato de aluminio al 0,4% m/v de 26 mg/l, 30 mg/l, 34 mg/l, 38 mg/l, 42 mg/l y 46 mg/l, se procedió a realizar un ensayo con la dosis de sulfato de aluminio con el resultado menos favorable de aluminio residual. Una vez finalizado el proceso de sedimentación, se extrajo 400 ml de cada muestra para un total de 2,4 litros y se procedió a medir la turbiedad.

Asimismo, se filtró los 2,4 litros de agua sedimentada con el fin de medir su turbiedad. Posteriormente, se midió 200 ml de agua filtrada utilizando un matraz aforado y se trasvasó a un Erlenmeyer para aplicar las dosis de Clear Chem conforme a las concentraciones de 5 mg/l, 6 mg/l, 7 mg/l, 8 mg/l, 9 mg/l, 10 mg/l, 11 mg/l, 12 mg/l, 13 mg/l, 14 mg/l y 15 mg/l. Cada muestra se agitó manualmente durante 30 segundos y se procedió a almacenar en botellas plásticas de 120 ml con la finalidad de determinar el aluminio residual a las 24, 48 y 72 horas posteriores, mediante el comparador visual Lovibond. Aunado a esto, después de las 72 horas,

se evaluó el parámetro de aluminio residual a la prueba con el menor resultado obtenido por el equipo Lovibond, mediante el colorímetro de la marca HACH.

3.8. Análisis de datos

Una vez finalizado cada uno de los ensayos de prueba de jarras y la medición de los parámetros de turbiedad y aluminio residual, los resultados se trasladaron al programa Microsoft Excel® con el fin de ser analizados. Además, se calcularon promedios y porcentajes de eficiencia respecto al parámetro de aluminio residual. Asimismo, se realizaron gráficos de dispersión tomando como variable independiente las diferentes concentraciones de Clear Chem y como variables dependientes, la turbiedad, el aluminio residual antes y después de 24, 48 o 72 horas y el aluminio corregido en las mismas condiciones.

3.9. Curva de corrección

Cabe mencionar que los datos de las mediciones de aluminio residual tomados mediante el comparador visual de la marca Lovibond en el laboratorio de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe difieren de los datos que obtiene el Laboratorio Nacional de Aguas (LNA).

Por tal razón, se realizó un análisis de regresión mediante una curva de corrección; tomando como base los resultados obtenidos de otros ensayos de prueba de jarras realizados por el laboratorio de la planta, en donde se analizó la efectividad de un producto químico para reducir aluminio residual en el agua potable de la planta. En la investigación se contrasta el aluminio residual medido con el equipo Lovibond en comparación a los datos obtenidos por el ICP-MS del LNA.

Por lo anterior, la curva de corrección se realizó con el fin de analizar la relación entre las dos variables asociadas en una forma no determinística. Asimismo, con el R^2 obtenido mediante el análisis, se lograría interpretar la proporción de variación en y , la cual puede observarse y explicarse mediante la línea de regresión aproximada entre y y x [32].

3.10. Guía Metodológica

Por último, se desarrolló una guía metodológica que le permita al AyA utilizar productos químicos que reduzcan el aluminio residual en la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe. Por tal razón, la guía se realizó siguiendo la metodología estándar que se aplica en el laboratorio de la planta al analizar cualquier producto químico y con base en el Reglamento para la Calidad de Agua Potable en Costa Rica.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Efectividad del producto Clear Chem como coadyuvante en el proceso de coagulación-floculación

A continuación, se discute la curva de corrección realizada, los aspectos más relevantes en cuanto a la condición analizada en los ensayos de prueba de jarras y la guía metodológica.

4.1.1. Curva de corrección

En la Fig. 4.1. se detalla la curva de corrección realizada tomando como variable x los datos obtenidos en el laboratorio de mediciones de aluminio residual para otros ensayos de prueba de jarras y como y los resultados obtenidos mediante el IPC-MS del LNA para las mismas mediciones.

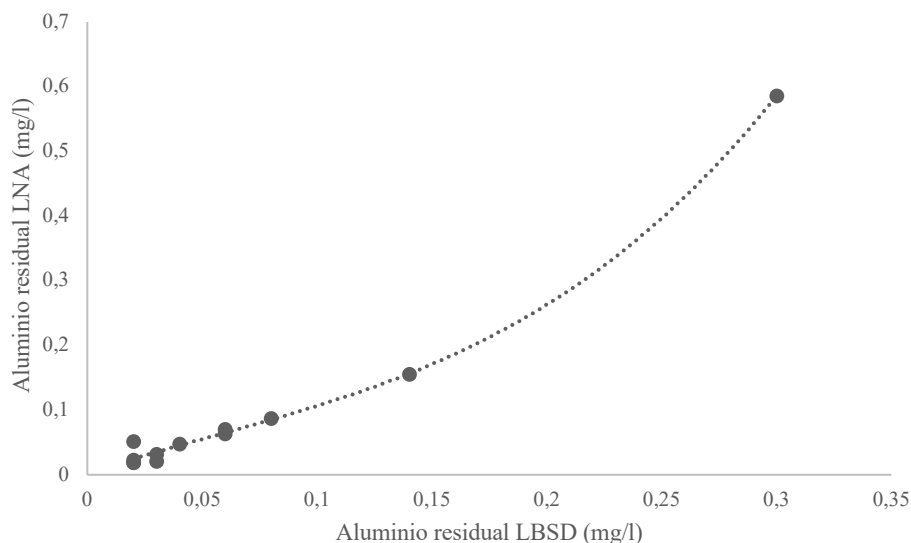


Fig. 4.1. Curva de corrección para contrastar datos obtenidos mediante el equipo Lovibond y el Laboratorio Nacional de Aguas.

Se seleccionó la línea de tendencia de tipo polinomial de orden 3, dado que es la línea que mejor se ajusta a los datos obtenidos. De esta manera, se alcanzó un R^2 de 0,9963 y la Ecuación 5, con la cual se corrigió los datos obtenidos de aluminio residual.

$$y = 18,777x^3 - 2,9734x^2 + 1,143x + 0,0031 \quad \text{Ecuación 5.}$$

Cabe destacar que el Laboratorio Nacional de Aguas mide aluminio total en las muestras de agua, mientras que el laboratorio de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe mediante procedimientos no acreditados realizan solamente la medición de Al^{+3} , es por esto

por lo que los resultados de análisis de aluminio para las mismas muestras de agua entre ambos laboratorios difieren entre sí.

4.1.2. Ensayos de prueba de jarras cuadradas aplicando dosis óptima de sulfato de aluminio y Clear Chem en el proceso de coagulación

En la Tabla III se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos del agua cruda del martes 20 de junio del 2023.

TABLA III
PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL
AGUA CRUDA

Parámetro	Dato
Caudal agua cruda (l/s)	270
Turbiedad (UNT)	4,7
Color aparente (U-Pt-Co)	20
pH	7,55
Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	78
Olor	0

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en la muestra de agua cruda del martes 20 de junio del 2023.

Cabe destacar que el dato obtenido para la turbiedad (4,7 UNT) es menor al valor máximo admisible que se establece en el Reglamento para la Calidad de Agua Potable, el cual corresponde a 5 UNT, por lo que se podría justificar no aplicar coagulante al agua cruda y trasladar directamente el agua al proceso de filtración. Sin embargo, específicamente en la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe esto no es posible, ya que la planta dispone de un sistema de filtración que requiere de modificaciones en el pH del agua para activar los filtros, por lo que la planta no está configurada para el proceso de filtración directa.

Con base en el ensayo realizado para encontrar la dosis óptima de sulfato de aluminio a partir del agua cruda antes mencionada, se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en la Tabla IV. De esta manera, se puede evidenciar que la dosis óptima es de 44 mg/l ya que con esta dosificación se logró una eficiencia de remoción del 98% en cuanto a la

turbiedad, además, se obtuvo un valor de 0,04 mg/l de aluminio residual, el cual una vez modificado mediante la Ecuación 1. aumentó a 0,045 mg/l.

TABLA IV
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE SULFATO DE ALUMINIO

Jarra N°	Dosificación	Agua		Agua Filtrada	
		Sedimentada			
	Coagulante Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/l)	Turbiedad (UNT)	Turbiedad (UNT)	Al Residual (mg/l)	Al Residual Corregido (mg/l)
1	38	5,66	0,183		
2	40	6,27	0,144		
3	42	5,29	0,191		
4	44	5,58	0,111	0,04	0,045
5	46	5,38	0,149		
6	48	5,63	0,128		

Nota. Se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de sulfato de aluminio del martes 20 de junio del 2023.

En la Tabla V se presentan los resultados de turbiedad residual, aluminio residual y el aluminio residual corregido en función de las concentraciones entre 0,010 y 0,015 mg/l de Clear Chem. Además, como se puede observar gráficamente en la Fig. 4.2., después de realizar la corrección de los datos de aluminio residual, se logró determinar que el porcentaje de error corresponde en promedio a 11,8%, es decir, los datos de aluminio residual obtenidos difieren de los datos corregidos en tan sólo 11,8%.

Por otro lado, para el rango de dosis entre 0,010 y 0,015 mg/l de Clear Chem, la eficiencia de remoción tomando como referencia el análisis de dosis óptima de sulfato de aluminio, para el cual se obtuvo un valor de aluminio residual corregido de 0,045 mg/l, es de 0,05%, esto debido a que la mayoría de los valores permanecieron igual.

Además, en cuanto a la turbiedad, la eficiencia de remoción es en promedio de 97,9%. No obstante, el valor es menor en comparación al obtenido en el análisis de dosis óptima de

sulfato de aluminio antes mencionado, para el cual no se agregó Clear Chem como coadyuvante.

TABLA V
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,001%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual (mg/l)	Aluminio residual corregido (mg/l)
0,010	2,51	0,05	0,055
0,011	2,33	0,04	0,045
0,012	2,18	0,04	0,045
0,013	1,71	0,04	0,045
0,014	1,74	0,04	0,045
0,015	2,18	0,03	0,035

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,001%.

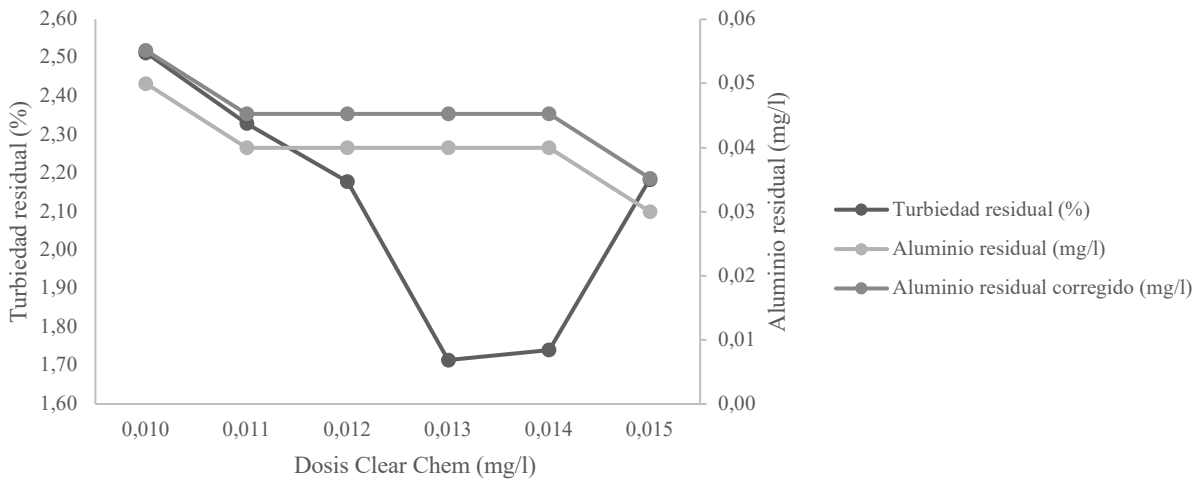


Fig. 4.2. Dosis óptima de Clear Chem al 0,001% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

En cuanto a dosis entre 0,10 y 0,35 mg/l de Clear Chem, tanto en la Tabla VI como en la Fig. 4.3. se observa cómo se comporta el producto bajo tales condiciones. En este caso, el porcentaje de error desciende a 8,3% respecto a los datos de aluminio residual obtenidos y los corregidos. Análogamente, la eficiencia de remoción es de -36,4%, esto debido a que en promedio los valores de aluminio residual corregidos aumentaron significativamente en

comparación al resultado de aluminio residual obtenido en el ensayo de dosis óptima de sulfato de aluminio, al cual hace referencia la Tabla IV. Además, en promedio, la eficiencia de remoción en cuanto a la turbiedad es de 96,4%, la cual disminuyó en 1,51% si la comparamos con el valor obtenido para dosis entre 0,010 y 0,015 mg/l de Clear Chem.

TABLA VI
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,001%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual (mg/l)	Aluminio residual corregido (mg/l)
0,10	3,18	0,05	0,055
0,15	3,90	0,05	0,055
0,20	4,60	0,06	0,065
0,25	5,17	0,06	0,065
0,30	3,05	0,06	0,065
0,35	1,83	0,06	0,065

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,001%.

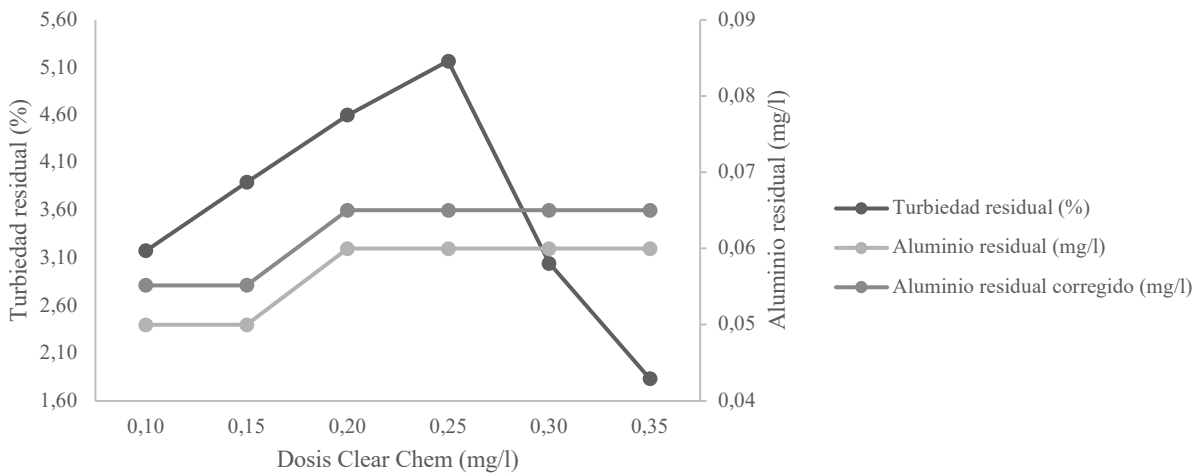


Fig. 4.3. Dosis óptima de Clear Chem al 0,001% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

4.1.3. Ensayos de prueba de jarras cuadradas y redondas aplicando dosis óptima de sulfato de aluminio y Clear Chem en el proceso de coagulación

En la Tabla VII se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos del agua cruda del miércoles 21 de junio del 2023.

TABLA VII
PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL
AGUA CRUDA

Parámetro	Dato
Caudal agua cruda (l/s)	280
Turbiedad (UNT)	4,45
Color aparente (U-Pt-Co)	20
pH	7,56

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en la muestra de agua cruda del miércoles 21 de junio del 2023.

Como se mencionó anteriormente, con respecto al ensayo realizado para el martes 20 de junio del 2023, aunque el valor de turbiedad para este ensayo (4,45 UNT) sea menor al VMA establecido en el Reglamento para la Calidad de Agua Potable en Costa Rica, no se puede evitar la aplicación de coagulante.

A partir del agua cruda antes mencionada y del ensayo de prueba de jarras cuadradas realizado para encontrar la dosis óptima de sulfato de aluminio, se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en la Tabla VIII.

TABLA VIII
PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE
DOSIS ÓPTIMA

Jarra N°	Dosificación	Agua Sedimentada		Agua Filtrada		
		Coagulante Al ₂ (SO ₄) ₃ (mg/l)	Turbiedad (UNT)	Turbiedad (UNT)	Al Residual (mg/l)	Al Residual Corregido (mg/l)
1	38		5,04	0,26	0,07	0,075
2	40		5,38	0,25	0,08	0,085
3	42		5,19	0,16	0,07	0,075
4	44		5,88	0,15	0,07	0,075
5	46		5,50	0,11	0,05	0,055
6	48		5,72	0,22	0,06	0,065

Nota. Se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de sulfato de aluminio del miércoles 21 de junio del 2023.

No obstante, debido a que las turbiedades en el agua sedimentada resultaron en valores mayores a 5 UNT, se procedió a realizar una verificación con jarras redondas, ya que a nivel de planta las turbiedades sedimentadas no superaban las 2 UNT y en todas las pruebas previas realizadas en el laboratorio, en donde se utilizó jarras cuadradas, se superó dicho valor. De esta manera, la verificación permitiría conocer si las turbiedades sedimentadas altas con jarras cuadradas eran por defecto de éstas o si existe alguna relación o influencia entre la concentración o dosis real de trabajo de la planta en comparación a la dosis preparada en el laboratorio. En la Tabla IX se presentan los resultados de la verificación con jarras redondas.

TABLA IX
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DE LA VERIFICACIÓN
CON JARRAS REDONDAS

Jarra N°	Dosificación	Agua Sedimentada		Agua Filtrada		
		Turbiedad (UNT)	Color (U-Pt-Co)	Turbiedad (UNT)	Al Residual (mg/l)	Al Residual Corregido (mg/l)
1 ^a	42	2,64	5,0	0,135	0,05	0,055
2 ^a	44	2,07	5,0	0,108	0,06	0,065
3 ^b	42	1,95	5,0	0,130	0,06	0,065
4 ^b	44	3,38	7,5	0,112	0,06	0,065

Nota. Se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos de la verificación con jarras redondas. ^a
Solución preparada en laboratorio, ^b Solución tomada de la tolva de la planta.

En la Tabla IX se puede observar que, los valores obtenidos de turbiedad tanto en el agua sedimentada como en la filtrada disminuyeron considerablemente en comparación a las turbiedades obtenidas en los ensayos realizados utilizando jarras cuadradas. Además, los valores de aluminio residual se comportaron de manera similar para todos los casos, es decir, sin importar si la solución fue preparada en el laboratorio o si fue tomada de la tolva de la planta. Por lo tanto, debido a que para esta investigación se requieren datos más asertivos y similares a los sucedidos en la planta, se decidió continuar trabajando los ensayos con jarras redondas.

Por otro lado, se eligió 42 mg/l de sulfato de aluminio como la dosis óptima de coagulante, en vista de que con esta concentración se obtuvo un resultado de aluminio residual corregido de 0,055 mg/l y se logró una eficiencia de remoción de 94,9% en cuanto a la turbiedad.

En la Tabla X se presentan los parámetros analizados en función de la concentración de Clear Chem. Para este caso, se utilizó concentraciones entre 0,40 y 0,90 mg/l de Clear Chem.

TABLA X

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,02%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual (mg/l)	Aluminio residual corregido (mg/l)
0,40	4,48	0,07	0,075
0,50	5,63	0,07	0,075
0,60	5,43	0,07	0,075
0,70	10,43	0,06	0,065
0,80	7,65	0,06	0,065
0,90	5,28	0,06	0,065

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,02%.

En la Fig. 4.4. se presenta gráficamente cómo varían los parámetros analizados en función de las concentraciones entre 0,40 y 0,90 mg/l de Clear Chem. Cabe destacar que el porcentaje de error entre los resultados de aluminio residual y los obtenidos una vez se realizó la respectiva corrección es de 7,2%.

No obstante, la eficiencia de remoción es en promedio de -26,9%, ya que los valores de aluminio residual para todos los casos aumentaron en comparación al resultado obtenido en el ensayo de jarras cuando solamente se aplicó sulfato de aluminio como coagulante (0,055 mg/l). Además, en términos de turbiedad, la eficiencia de remoción es de 93,5%, la cual es menor si se compara con las eficiencias de dosis entre 0,010 a 0,015 mg/l y 0,10 a 0,35 mg/l de Clear Chem.

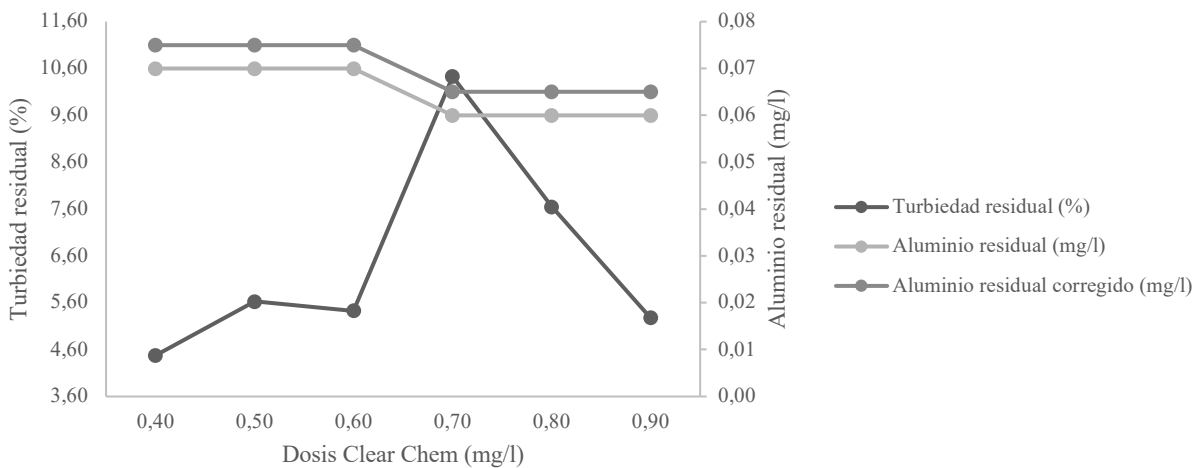


Fig. 4.4. Dosis óptima de Clear Chem al 0,02% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

En la Tabla XI y Fig. 4.5. se detallan los resultados de los parámetros de turbiedad residual, aluminio residual y aluminio residual corregido para dosis de Clear Chem entre 13 y 18 mg/l. En promedio, el porcentaje de error entre los valores obtenidos de aluminio residual y los que se obtuvo una vez se realizó la corrección es de 7,2%. Asimismo, en promedio la eficiencia de remoción en cuanto al aluminio residual corregido es de -26,9% similarmente a lo sucedido para concentraciones entre 0,4 y 0,9 mg/l de Clear Chem. No obstante, para el caso de la turbiedad residual, la eficiencia de remoción es de 92,4%, la cual es menor en comparación a la obtenida para las concentraciones antes mencionadas.

TABLA XI
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,2%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual (mg/l)	Aluminio residual corregido (mg/l)
13,00	7,71	0,07	0,075
14,00	16,23	0,07	0,075
15,00	4,65	0,06	0,065
16,00	6,31	0,07	0,075
17,00	4,80	0,06	0,065
18,00	5,73	0,06	0,065

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,2%.

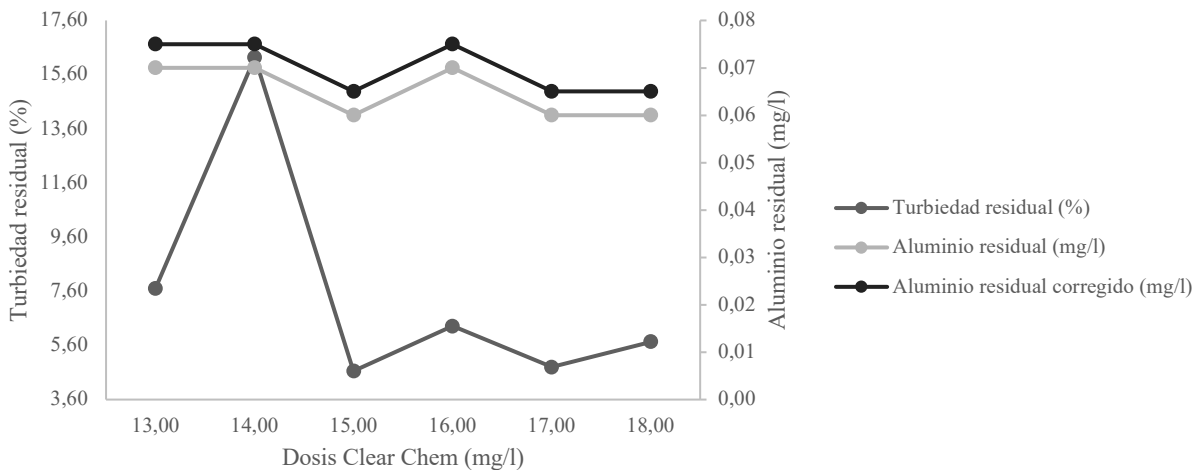


Fig. 4.5. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

Asimismo, para este caso se midió el aluminio residual después de 24 horas tal y como se puede observar en la Tabla XII y gráficamente en la Fig. 4.6. Sin embargo, la eficiencia de remoción es en promedio de -17% en comparación a la obtenida una vez se filtró la muestra, es decir antes de las 24 horas de la medición, ya que para la mayoría de los casos hubo un aumento en lugar de una reducción y solamente un resultado permaneció igual.

TABLA XII
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,2%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual corregido (mg/l)	Aluminio residual después de 24 horas corregido (mg/l)
13,00	7,71	0,075	0,085
14,00	16,23	0,075	0,106
15,00	4,65	0,065	0,075
16,00	6,31	0,075	0,075
17,00	4,80	0,065	0,075
18,00	5,73	0,065	0,075

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,2%.

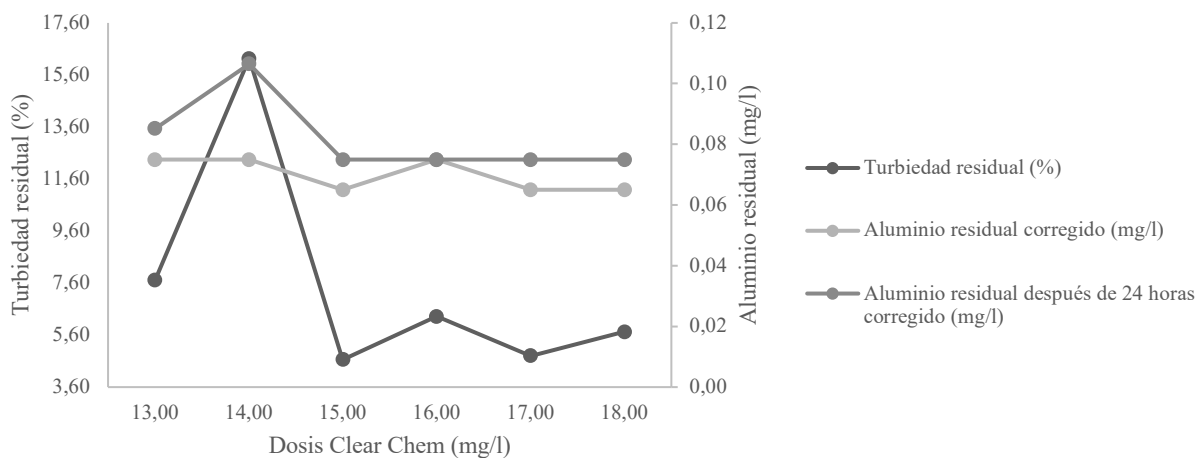


Fig. 4.6. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

Por otro lado, en la Tabla XIII se presentan los parámetros respectivos para concentraciones entre 7 y 12 mg/l de Clear Chem.

TABLA XIII

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,02%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual (mg/l)	Aluminio residual corregido (mg/l)
7,00	4,56	0,06	0,065
8,00	3,67	0,06	0,065
9,00	3,41	0,05	0,055
10,00	4,11	0,04	0,045
11,00	6,62	0,05	0,055
12,00	4,74	0,05	0,055

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,02%.

Además, tal y como se puede observar gráficamente en la Fig. 4.7., el porcentaje de error entre los valores de aluminio residual y los mismos corregidos es en promedio de 9,2%. Además, la eficiencia de remoción en cuanto al aluminio residual corregido es en promedio de -3%, esto debido a que para tres concentraciones distintas el valor permaneció igual (0,055 mg/l), en otras dos aumentó y solamente un valor disminuyó. En cuanto a la turbiedad, la eficiencia de remoción corresponde a 95,5%.

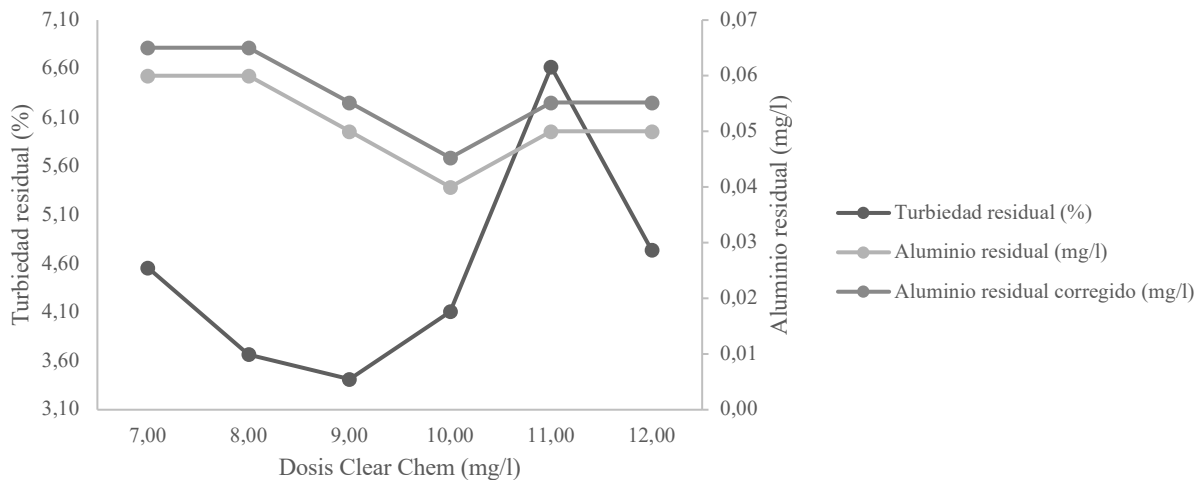


Fig. 4.7. Dosis óptima de Clear Chem al 0,02% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

Del mismo modo, en la Tabla XIV se exponen los resultados de los parámetros analizados para dosis entre 7 y 12 mg/l de Clear Chem, además se incluyen los resultados obtenidos de la medición de aluminio residual después de 12 horas.

TABLA XIV
PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,02%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual corregido (mg/l)	Aluminio residual después de 12 horas corregido (mg/l)
7,00	4,56	0,065	0,075
8,00	3,67	0,065	0,065
9,00	3,41	0,055	0,075
10,00	4,11	0,045	0,075
11,00	6,62	0,055	0,065
12,00	4,74	0,055	0,065

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,02%.

Tal y como se puede apreciar gráficamente en la Fig. 4.8., la eficiencia de remoción en cuanto al aluminio residual medido 12 horas después es en promedio de -23,2% en comparación a los resultados obtenidos en la Fig. 4.7., ya que la mayoría de los valores aumentaron y sólo para un caso el valor permaneció igual.

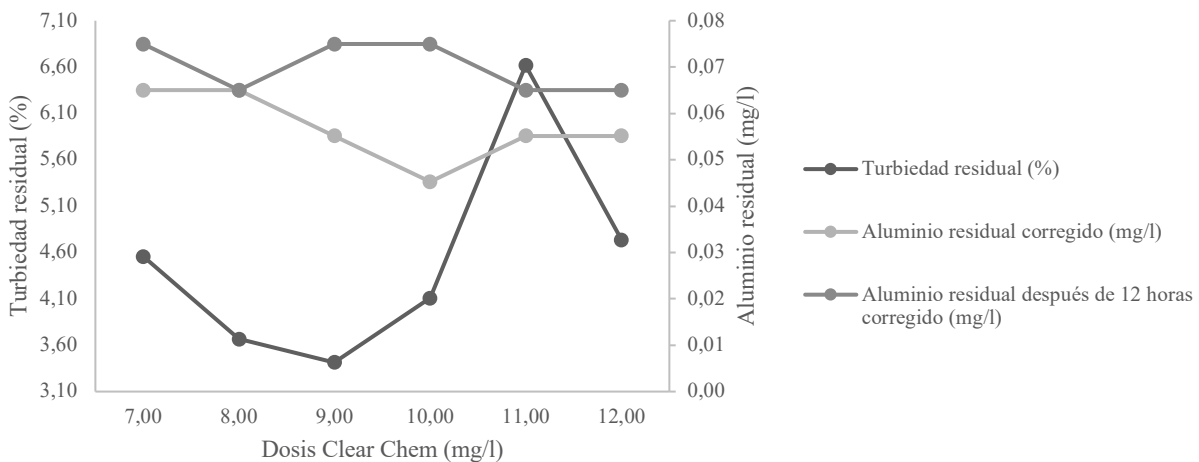


Fig. 4.8. Dosis óptima de Clear Chem al 0,02% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

En cuanto a concentraciones entre 1 y 6 mg/l de Clear Chem, en la Tabla XV y Fig. 4.9. se presentan los resultados de los parámetros analizados. En este caso, el porcentaje de error de los datos de aluminio residual antes y después de ser corregidos es el mismo que para el ensayo anterior, donde se analizaron concentraciones entre 7 y 12 mg/l de Clear Chem. Asimismo, la eficiencia de remoción respecto al aluminio residual no representó ningún cambio respecto al ensayo mencionado anteriormente.

TABLA XV
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,2%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual (mg/l)	Aluminio residual corregido (mg/l)
1,00	3,65	0,06	0,065
2,00	3,66	0,06	0,065
3,00	4,80	0,05	0,055
4,00	3,07	0,04	0,045
5,00	5,56	0,05	0,055
6,00	3,71	0,05	0,055

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,2%.

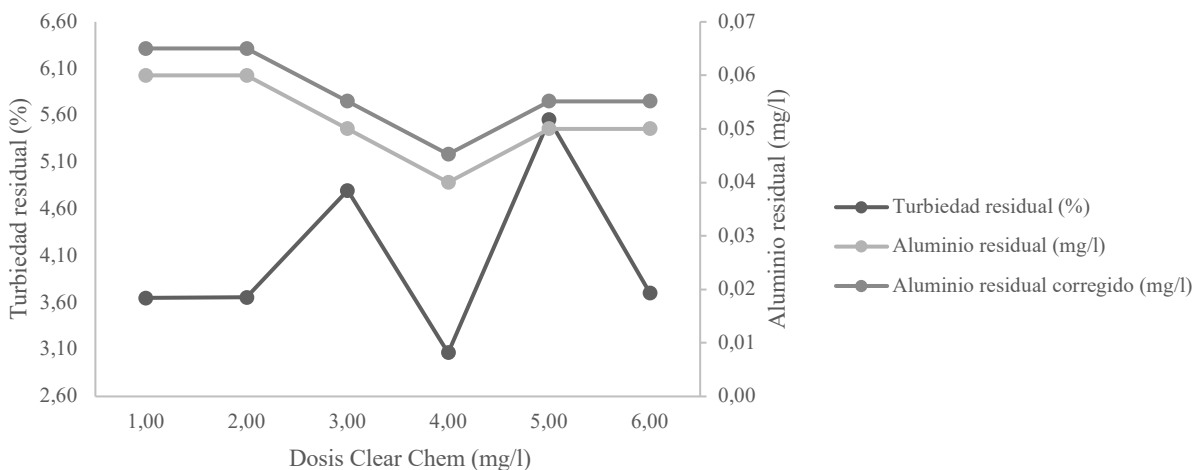


Fig. 4.9. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

Además, en la Tabla XVI se exponen los parámetros analizados una vez se midió el aluminio residual después de 12 horas.

TABLA XVI
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,2%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual corregido (mg/l)	Aluminio residual después de 12 horas corregido (mg/l)
1,00	3,65	0,065	0,065
2,00	3,66	0,065	0,075
3,00	4,80	0,055	0,065
4,00	3,07	0,045	0,075
5,00	5,56	0,055	0,075
6,00	3,71	0,055	0,075

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,2%.

Como se evidencia en la Fig. 4.10., en estas circunstancias, una vez transcurridas las 12 horas, no hubo mayor remoción de aluminio residual, ya que la eficiencia de remoción es de -26,2%, mucho menor en comparación tanto a la obtenida antes de la medición de las 12 horas como también a la obtenida para dosis entre 7 y 12 mg/l de Clear Chem.

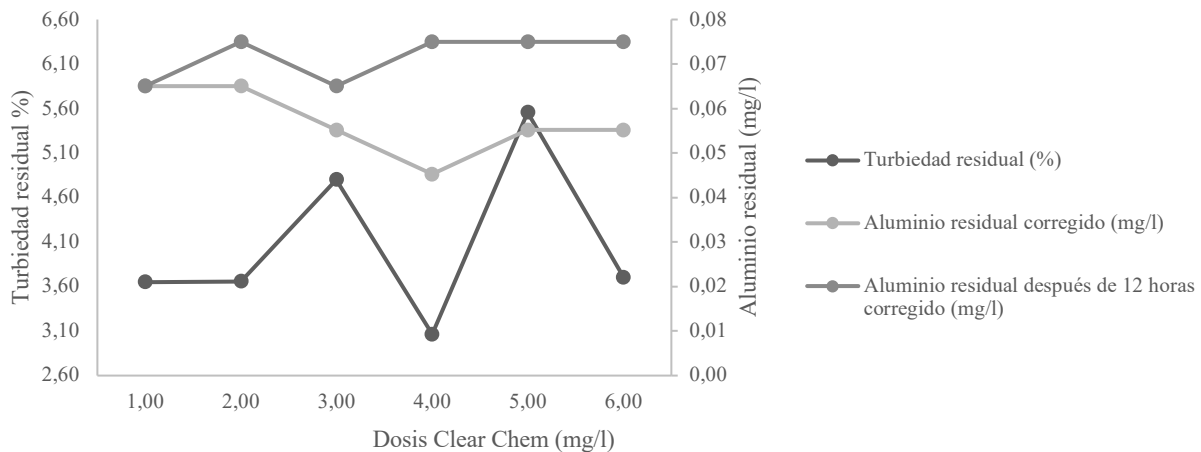


Fig. 4.10. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

4.1.4. Ensayos de prueba de jarras redondas con la condición menos favorable de sulfato de aluminio y aplicación de Clear Chem en el proceso de coagulación

El lunes 26 de junio del 2023 se realizaron los respectivos ensayos de prueba de jarras redondas con el fin de conocer cómo se comporta el producto Clear Chem bajo la condición menos favorable de sulfato de aluminio. En la Tabla XVII se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos del agua cruda utilizada para realizar los ensayos.

TABLA XVII
PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL
AGUA CRUDA

Parámetro	Dato
Caudal agua cruda (l/s)	280
Turbiedad (UNT)	4,30
Color aparente (U-Pt-Co)	25
pH	7,63

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en la muestra de agua cruda del lunes 26 de junio del 2023.

Para este caso y como se mencionó anteriormente, aunque el valor de turbiedad para este ensayo (4,30 UNT) sea menor al VMA establecido en el Reglamento para la Calidad de Agua Potable en Costa Rica, no se puede evitar la aplicación de coagulante.

Similarmente, en la Tabla XVIII se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos analizados en el análisis de la condición menos favorable de sulfato de aluminio. Tal y como se puede observar, la condición menos favorable de sulfato de aluminio ocurre cuando la dosificación es de 26 mg/l, ya que se obtiene un resultado de aluminio residual de 0,20 mg/l, el doble en comparación al obtenido mediante una dosificación de 30 mg/l. Por tal razón, se procedió a realizar los siguientes ensayos de prueba de jarras con dicha dosificación.

TABLA XVIII

**PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO CON LA CONDICIÓN
MENOS FAVORABLE DE SULFATO DE ALUMINIO**

Jarra N°	Dosificación	Agua		Agua Filtrada	
		Sedimentada	Turbiedad (UNT)	Turbiedad (UNT)	Al Residual (mg/l)
1	26	2,10	0,395	0,20	0,263
2	30	2,04	0,210	0,10	0,106
3	34	1,66	0,252	0,15	0,171
4	38	2,57	0,115	0,07	0,075
5	42	2,83	0,132	0,05	0,055
6	46	2,58	0,111	0,07	0,075

Nota. Se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos del ensayo de dosis óptima de sulfato de aluminio del lunes 26 de junio del 2023.

En la Tabla XIX se presentan los parámetros analizados según concentraciones de Clear Chem entre 5 y 10 mg/l. El porcentaje de error entre los valores de aluminio residual y los obtenidos una vez se corrigieron es de 14,8%. Sin embargo, la eficiencia de remoción es de 27,8%, ya que hubo una reducción de aluminio residual en comparación al obtenido en los ensayos en donde se analizó la condición menos favorable de sulfato de aluminio (0,263 mg/l), tal y como se puede observar en la Fig. 4.11. En cuanto a la turbiedad, la eficiencia de remoción disminuyó en relación con los ensayos anteriores, en los cuales se aplicó dosis óptimas de sulfato de aluminio, ya que en promedio es de 90,7%.

TABLA XIX

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,2%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual (mg/l)	Aluminio residual corregido (mg/l)
5,00	10,00	0,17	0,204
6,00	9,77	0,17	0,204
7,00	9,00	0,17	0,204
8,00	10,69	0,15	0,171
9,00	9,05	0,16	0,187
10,00	7,58	0,15	0,171

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,2%.

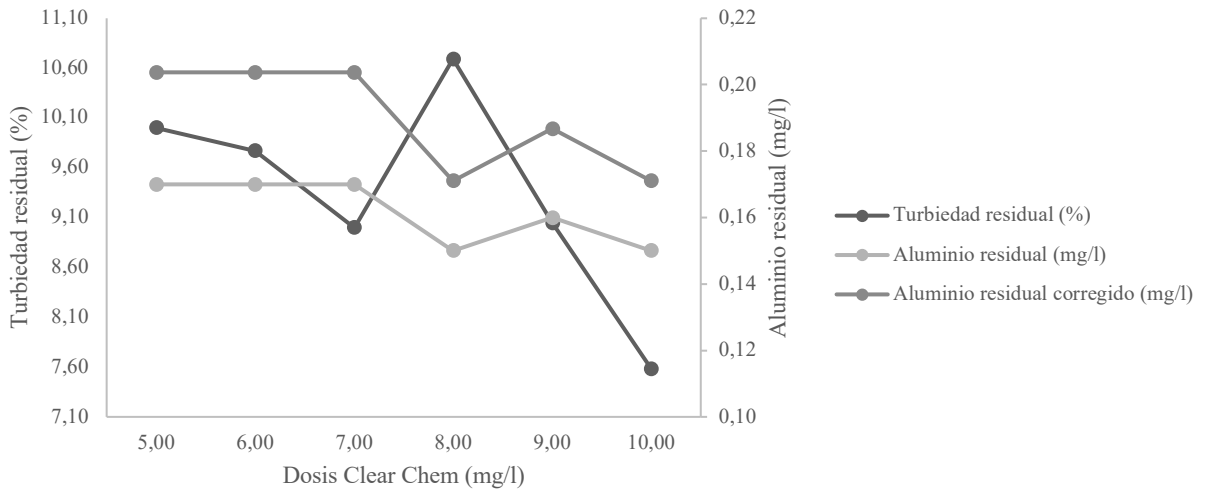


Fig. 4.11. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

Asimismo, para el caso de este ensayo también se analizó el aluminio residual después de 24, 48 y 72 horas. En la Tabla XX y Fig. 4.12. se puede evidenciar los resultados corregidos de la medición después de 24 horas. De esta manera, la eficiencia de remoción representa en promedio 8,4% debido a una reducción del 1,6% en cuanto al promedio del parámetro de aluminio residual corregido antes de la medición de las 24 horas.

TABLA XX

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,2%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual corregido (mg/l)	Aluminio residual después de 24 horas corregido (mg/l)
5,00	10,00	0,204	0,204
6,00	9,77	0,204	0,171
7,00	9,00	0,204	0,171
8,00	10,69	0,171	0,171
9,00	9,05	0,187	0,171
10,00	7,58	0,171	0,156

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,2%.

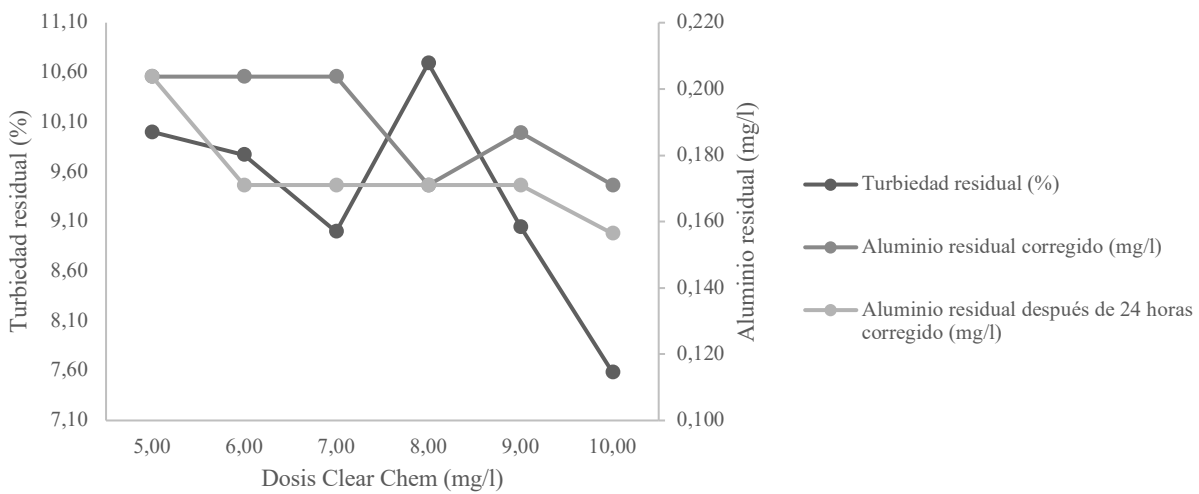


Fig. 4.12. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

Por otro lado, en la Tabla XXI y Fig. 4.13. se muestran los resultados corregidos de la medición del aluminio residual después de 48 horas. Para este caso, la eficiencia de remoción en cuanto al promedio de los valores obtenidos de aluminio residual antes de las 48 horas es de 21,1%. Mientras que, en comparación a la medición realizada después de 48 horas a la prueba con la dosificación de 26 mg/l de sulfato de aluminio, la eficiencia de remoción corresponde a 19,8%.

TABLA XXI

**PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,2%**

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual corregido (mg/l)	Aluminio residual después de 48 horas corregido (mg/l)
5,00	10,00	0,204	0,171
6,00	9,77	0,204	0,143
7,00	9,00	0,204	0,130
8,00	10,69	0,171	0,156
9,00	9,05	0,187	0,156
10,00	7,58	0,171	0,143

Nota. Se presentan los parámetros físicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,2%.

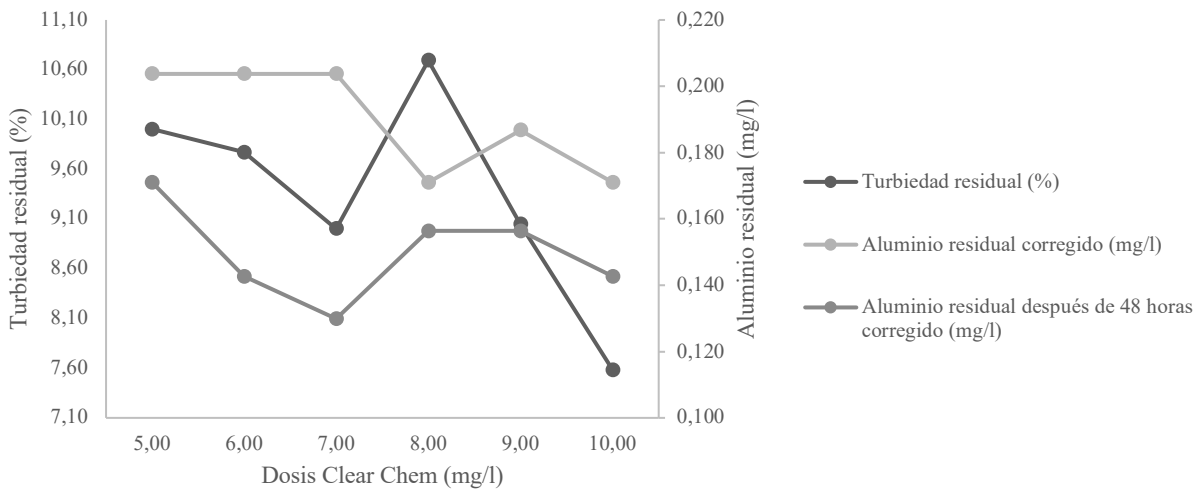


Fig. 4.13. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

Con respecto a la medición realizada 72 horas después, en la Tabla XXII se muestran los resultados corregidos de la medición del aluminio residual. En este caso, la eficiencia de remoción en cuanto al promedio de los valores obtenidos de aluminio residual antes de las 72 horas es de 21,1%, tal y como sucedió para el caso anterior. No obstante, en comparación a la medición realizada 72 horas después a la prueba con la dosificación de 26 mg/l de sulfato de aluminio, la eficiencia de remoción corresponde a 32,5%.

TABLA XXII

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,2%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual corregido (mg/l)	Aluminio residual después de 72 horas corregido (mg/l)
5,00	10,00	0,204	0,171
6,00	9,77	0,204	0,130
7,00	9,00	0,204	0,156
8,00	10,69	0,171	0,143
9,00	9,05	0,187	0,143
10,00	7,58	0,171	0,156

Nota. Se presentan los parámetros físicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,2%.

Por otro lado, como se observa en la Fig. 4.14. para una concentración de 6 mg/l de Clear Chem se logró la mejor remoción, ya que se obtuvo un resultado de 0,13 mg/l de aluminio residual. No obstante, dicho valor se obtuvo mediante el comparador visual de la marca Lovibond; el cual una vez medido mediante el colorímetro de la marca HACH aumentó a 0,14 mg/l. Por lo tanto, representa un porcentaje de error de 14,3%, es decir un error por defecto, ya que el valor obtenido por el equipo Lovibond es menor que el valor aceptado obtenido por el equipo HACH.

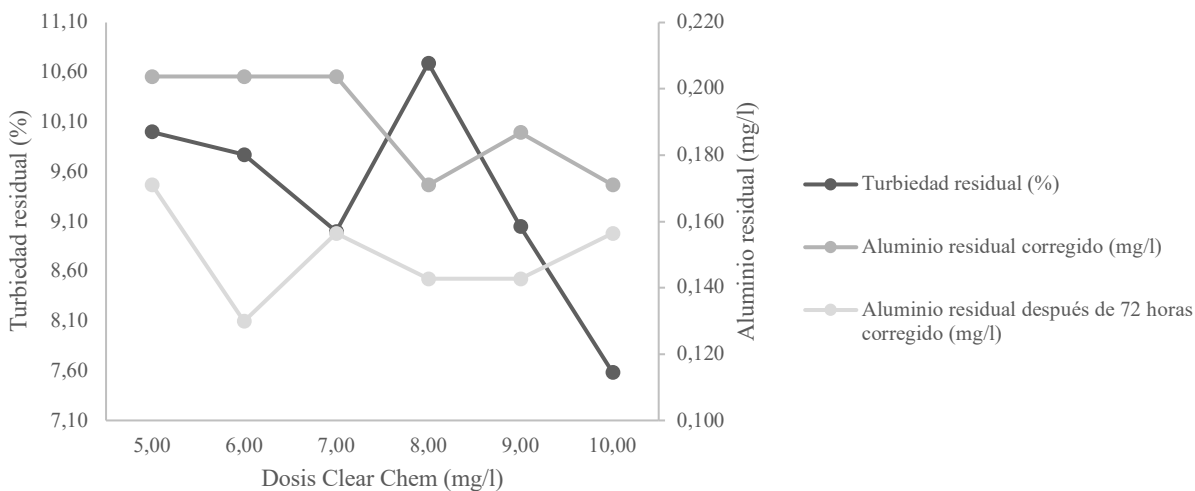


Fig. 4.14. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

En la Tabla XXIII se presentan los parámetros analizados según concentraciones de Clear Chem entre 11 y 15 mg/l. El porcentaje de error entre los valores de aluminio residual y los obtenidos una vez se corrigieron es de 18,9%. Para este caso, a diferencia del ensayo anterior en donde se analizaron concentraciones entre 5 y 10 mg/l de Clear Chem, los valores de aluminio residual corregidos sobrepasan los 0,2 mg/l en su totalidad. Asimismo, tal y como se puede apreciar en la Fig. 4.15. para todas las pruebas, se obtuvo un valor de 0,222 mg/l de aluminio residual corregido. Sin embargo, la eficiencia de remoción es de 15,6% ya que hubo una reducción de aluminio residual en comparación al obtenido en los ensayos en donde se analizó la condición menos favorable de sulfato de aluminio (0,263 mg/l). En cuanto a la turbiedad, es de notar que para este ensayo se obtuvo la menor eficiencia de remoción en relación con todos los ensayos mencionados anteriormente, ya que en promedio es de 85,4%.

TABLA XXIII

**PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,2%**

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual (mg/l)	Aluminio residual corregido (mg/l)
11,00	13,05	0,18	0,222
12,00	11,16	0,18	0,222
13,00	17,42	0,18	0,222
14,00	15,68	0,18	0,222
15,00	15,74	0,18	0,222

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,2%.

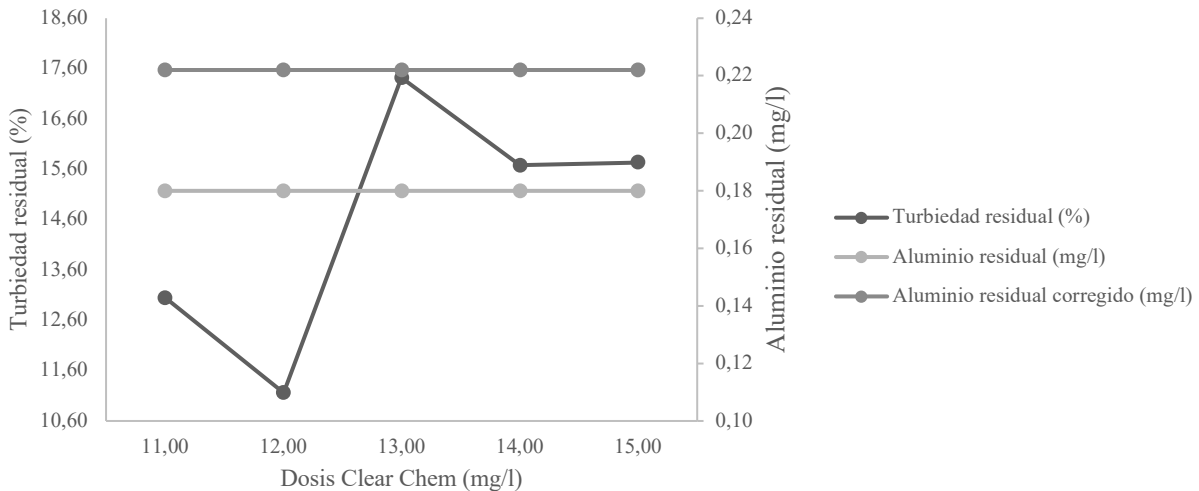


Fig. 4.15. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

De la misma manera, en la Tabla XXIV se presentan los resultados obtenidos al realizar la medición de aluminio residual a las 24 horas después.

TABLA XXIV
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,2%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual corregido (mg/l)	Aluminio residual después de 24 horas corregido (mg/l)
11,00	13,05	0,222	0,187
12,00	11,16	0,222	0,171
13,00	17,42	0,222	0,187
14,00	15,68	0,222	0,143
15,00	15,74	0,222	0,204

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,2%.

Como se puede observar en la Fig. 4.16., la eficiencia de remoción es de 19,7%, ya que para todos los valores hubo una reducción, en comparación al promedio del parámetro de aluminio residual corregido antes de la medición de las 24 horas.

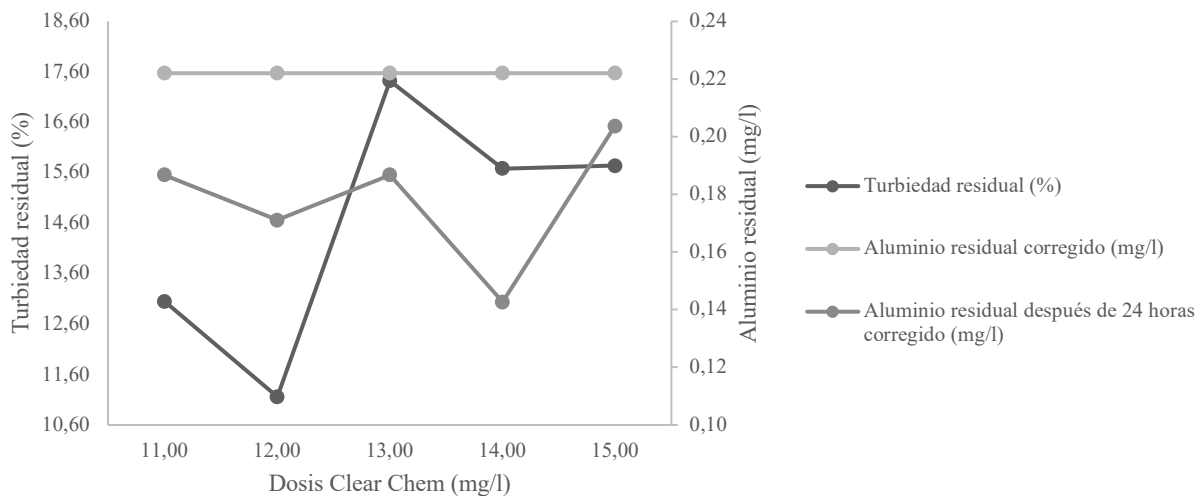


Fig. 4.16. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

En cuanto a los parámetros obtenidos al realizar la medición de aluminio residual a las 48 horas después, tanto en la Tabla XXV como en la Fig. 4.17. se presentan los resultados.

Para este caso, la eficiencia de remoción representa un 13,7% en comparación al resultado obtenido antes de realizar la medición a las 48 horas. No obstante, en comparación a la medición realizada 48 horas después a la prueba con la dosificación de 26 mg/l de sulfato de aluminio, la eficiencia es en promedio -2,6% ya que hubo un aumento en el aluminio residual en lugar de una reducción.

TABLA XXV
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,2%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual corregido (mg/l)	Aluminio residual después de 48 horas corregido (mg/l)
11,00	13,05	0,222	0,187
12,00	11,16	0,222	0,171
13,00	17,42	0,222	0,222
14,00	15,68	0,222	0,222
15,00	15,74	0,222	0,156

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,2%.

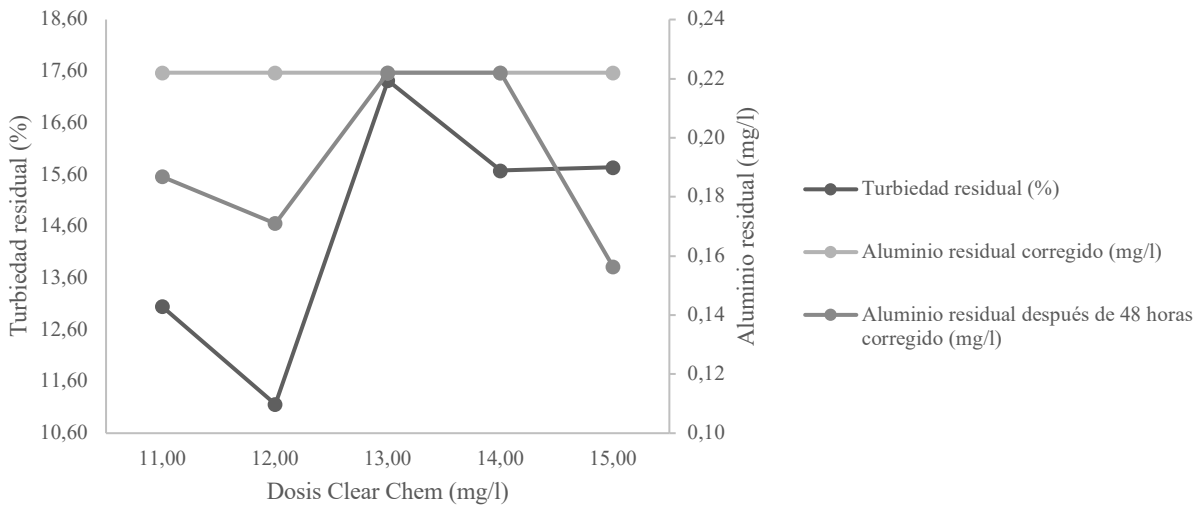


Fig. 4.17. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

Por otro lado, en la Tabla XXVI se muestran los parámetros respectivos una vez se realizó la medición a las 72 horas después del aluminio residual. Para este caso, tanto para la

medición del aluminio residual antes de las 72 horas como en la realizada 72 horas después a la prueba con la dosificación de 26 mg/l de sulfato de aluminio, la eficiencia de remoción es de 24,9%, ya que para ambos casos se logró una reducción.

TABLA XXVI
PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,2%

Clear Chem (mg/l)	Turbiedad residual (%)	Aluminio residual corregido (mg/l)	Aluminio residual después de 72 horas corregido (mg/l)
11,00	13,05	0,222	0,187
12,00	11,16	0,222	0,171
13,00	17,42	0,222	0,204
14,00	15,68	0,222	0,130
15,00	15,74	0,222	0,143

Nota. Se presentan los parámetros físicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,2%.

De la misma manera, tal y como se representa en la Fig. 4.18. para una concentración de 14 mg/l de Clear Chem se logró la mejor remoción, ya que se obtuvo un resultado de 0,12 mg/l de aluminio residual. No obstante, dicho valor se obtuvo mediante el equipo Lovibond; el cual una vez medido mediante el colorímetro HACH disminuyó a 0,10 mg/l. Lo anterior representa un porcentaje de error de -20%, ya que el error es por exceso, es decir, el valor obtenido por el equipo Lovibond es mayor que el valor aceptado obtenido por el equipo HACH.

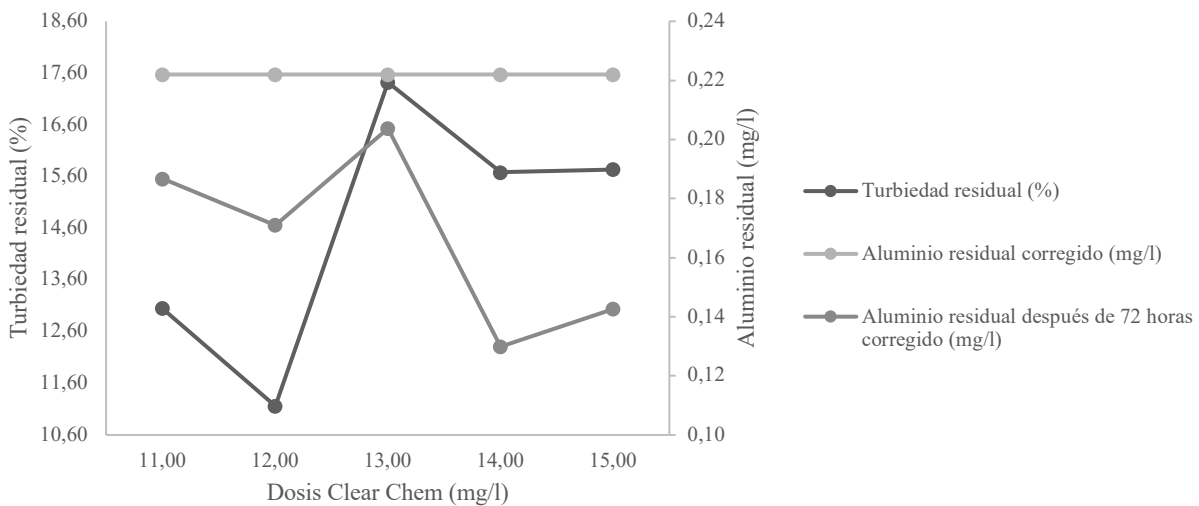


Fig. 4.18. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

4.1.5. Ensayos de prueba de jarras redondas con la condición menos favorable de sulfato de aluminio y aplicación de Clear Chem en el agua filtrada

El lunes 26 de junio del 2023 también se realizaron los respectivos ensayos de prueba de jarras redondas con el fin de conocer cómo se comporta el producto Clear Chem bajo la condición menos favorable de sulfato de aluminio, sin embargo, en este caso agregando el producto en el agua filtrada.

En la Tabla XVII se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos del agua cruda utilizada para realizar los ensayos y en la Tabla XVIII se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos analizados en el análisis de la condición menos favorable de sulfato de aluminio. Tal y como se realizó para el ensayo anterior, se utilizó una dosificación de 26 mg/l, ya que corresponde a la condición menos favorable de coagulante.

Por otro lado, tanto en la Tabla XXVII como en la Fig. 4.19. se presentan los resultados de los parámetros analizados para concentraciones de Clear Chem entre 5 y 10 mg/l. La eficiencia de remoción de realizar la medición de aluminio residual después de 24 horas es de 22,5% en comparación al obtenido en la prueba con la dosificación de 26 mg/l de sulfato de aluminio.

No obstante, al realizar la medición de aluminio residual después de 48 horas, se obtiene una eficiencia de -4,8%, ya que en promedio la cantidad de aluminio residual aumentó. Mientras que cuando se midió a las 72 horas después, se obtuvo una eficiencia de 22,6%, lo que quiere decir que para este caso si hubo una reducción.

Además, para una concentración de 9 mg/l de Clear Chem se logró la mejor remoción, ya que se obtuvo un resultado de 0,13 mg/l de aluminio residual. No obstante, dicho valor se obtuvo mediante el comparador visual Lovibond; el cual una vez medido mediante el colorímetro HACH disminuyó a 0,11 mg/l. Lo anterior representa un porcentaje de error de -18,2%, ya que el valor obtenido por el equipo Lovibond es mayor que el valor aceptado obtenido por el equipo HACH, lo que resulta en un error por exceso.

Sin embargo, si se compara la eficiencia de remoción tomando en cuenta el tiempo transcurrido después de la medición del aluminio residual, se obtiene una eficiencia de remoción de 4% entre las mediciones a las 24 y 48 horas, mientras que entre las 48 y 72 la eficiencia aumenta a un 12,2%.

TABLA XXVII

PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,2%

Clear Chem (mg/l)	Aluminio residual después de 24 horas corregido (mg/l)	Aluminio residual después de 48 horas corregido (mg/l)	Aluminio residual después de 72 horas corregido (mg/l)
5,00	0,204	0,187	0,187
6,00	0,204	0,171	0,171
7,00	0,204	0,187	0,156
8,00	0,204	0,222	0,187
9,00	0,204	0,204	0,143
10,00	0,204	0,204	0,187

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,2%.

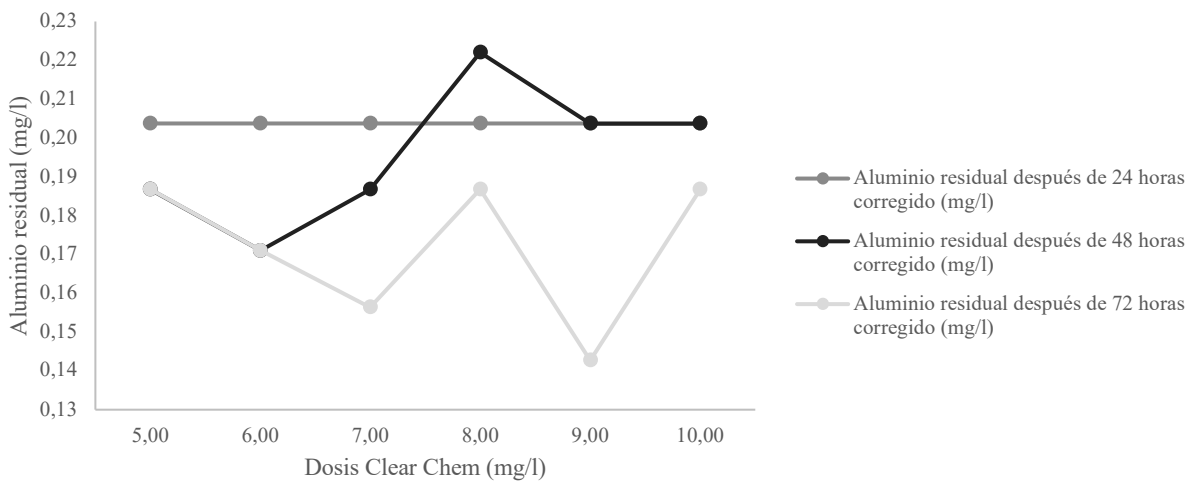


Fig. 4.19. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

Análogamente, en la Tabla XXVIII y Fig. 4.20. se representan los resultados de los parámetros analizados para concentraciones de Clear Chem entre 11 y 15 mg/l. La eficiencia de remoción de realizar la medición de aluminio residual después de 24 horas en comparación al obtenido en la prueba con la dosificación de 26 mg/l de sulfato de aluminio, es de 22,4%, similarmente a lo que sucedió para el caso anterior con concentraciones entre 5 y 10 mg/l de Clear Chem.

Por otro lado, al realizar la medición de aluminio residual después de 48 horas, se obtiene una eficiencia de remoción de -1,8%, ya que en promedio la cantidad de aluminio

residual aumentó. Mientras que cuando se midió a las 72 horas después, se obtuvo una eficiencia de 20,1%, lo que quiere decir que para este caso si hubo una reducción.

No obstante, para una concentración de 12 mg/l de Clear Chem se logró la mejor remoción, ya que se obtuvo un resultado de 0,15 mg/l de aluminio residual. Dicho valor se obtuvo mediante el equipo Lovibond; el cual una vez medido mediante el colorímetro HACH disminuyó a 0,11 mg/l. Lo anterior representa un porcentaje de error de -36,4%, la razón es porque tal y como sucedió para una concentración de 9 mg/l de Clear Chem, el valor obtenido por el equipo Lovibond es mayor que el valor aceptado obtenido por el equipo HACH.

Ahora bien, si se compara la eficiencia de remoción tomando en cuenta el tiempo transcurrido después de la medición del aluminio residual, se obtiene una eficiencia de 6,8% tanto para las mediciones realizadas entre las 24 y 48 horas como para las realizadas entre las 48 y 72 horas.

TABLA XXVIII

**PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL ENSAYO DE DOSIS ÓPTIMA
DE CLEAR CHEM AL 0,2%**

Clear Chem (mg/l)	Aluminio residual después de 24 horas corregido (mg/l)	Aluminio residual después de 48 horas corregido (mg/l)	Aluminio residual después de 72 horas corregido (mg/l)
11,00	0,187	0,187	0,171
12,00	0,204	0,187	0,171
13,00	0,204	0,187	0,187
14,00	0,222	0,204	0,187
15,00	0,204	0,187	0,171

Nota. Se presentan los parámetros fisicoquímicos analizados en el ensayo de dosis óptima para concentraciones de Clear Chem al 0,2%.

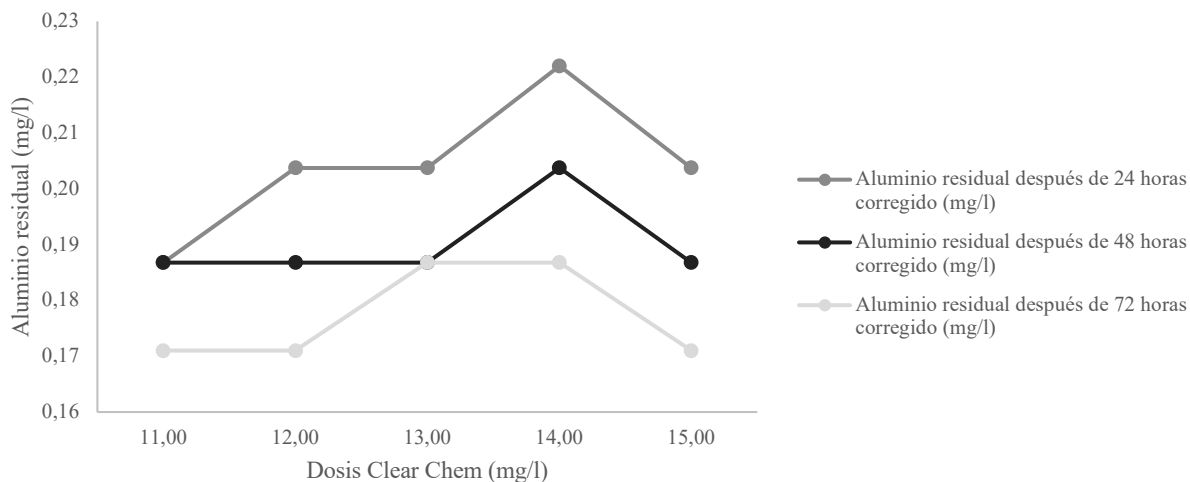


Fig. 4.20. Dosis óptima de Clear Chem al 0,2% para la remoción de turbiedad y aluminio en agua de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

4.2. Viabilidad de la aplicación del producto Clear Chem en la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe

En este apartado se discuten los hallazgos encontrados de los análisis realizados en el laboratorio, así como en el capítulo anterior.

En primera instancia, el R^2 de 0,9963 obtenido mediante la curva de corrección en el apartado 4.1.1. indica que el modelo de regresión es certero, ya que entre más cercano sea este valor a 1, más exitoso es el modelo de regresión al explicar la proporción de la variación en y [32].

En cuanto a la verificación realizada con jarras cuadradas y redondas, es posible inferir que, aunque el escalamiento con jarras cuadradas es más realista, debido a que por lo general el diseño de las PTAP no cuenta con estructuras de forma cilíndrica, la toma de la muestra entre ambas jarras resulta en diferencias significativas en los datos obtenidos. El problema radica en la altura de la toma de la muestra en contraposición al tiempo de sedimentación, ya que en el laboratorio se demostró que la profundidad de 10 cm de las jarras cuadradas no se comporta igual que la profundidad de 6 cm de las jarras redondas, en los mismos 10 minutos de sedimentación.

Análogamente, los porcentajes de error, tomando en consideración los datos obtenidos de aluminio residual mediante el equipo Lovibond y como valores aceptados los datos corregidos mediante la curva de corrección, resultó en porcentajes positivos para todas las

pruebas. Lo anterior indica que los errores son por “defecto”, es decir que los valores obtenidos son menores que los valores aceptados. Además, el promedio de los porcentajes de error para todas las pruebas corresponde a 11,7%.

No obstante, es de notar que entre mayor es el resultado de la medición de aluminio residual, mayor será el porcentaje de error entre los datos. Lo último indicado puede ser causa de una difícil interpretación del resultado mediante el comparador visual Lovibond. Dicho equipo cuenta con discos, los cuales poseen una graduación continua de color, lo que hace posible un ajuste directo del color [33]. Sin embargo, conforme aumenta el valor de aluminio residual, aumenta la dificultad de comparar los colores entre el disco y la muestra.

Por otro lado, el mayor porcentaje de eficiencia ocurre con la dosis menos favorable de aluminio residual, con concentraciones entre 5 y 10 mg/l de Clear Chem y un tiempo de medición de 72 horas después de filtrada la muestra, ya que el valor obtenido es de 32,5%. No obstante, el valor no es significativo, ya que se esperaría una eficiencia de remoción de al menos 50%. Además, los resultados para este caso sobrepasan los 0,13 mg/l de aluminio residual, lo que resulta en valores muy cercanos a 0,2 mg/l, valor límite que establece el Reglamento para la Calidad del Agua Potable en Costa Rica [4].

Asimismo, las eficiencias de remoción en cuanto al parámetro de aluminio residual, para concentraciones de Clear Chem entre 0,10 y 18 mg/l, aplicadas en el proceso de coagulación junto a la dosis óptima de coagulante, resultaron en valores negativos, lo que induce a un aumento del aluminio residual en lugar de alcanzar una reducción.

Mientras que, las eficiencias de remoción para concentraciones de Clear Chem entre 5 y 15 mg/l, aplicadas en el proceso de coagulación junto a la condición menos favorable de sulfato de aluminio, resultaron en su mayoría en valores positivos. No obstante, en algunos casos, las mediciones corregidas de aluminio residual superan los 0,2 mg/l, incumpliendo los lineamientos establecidos en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable.

De la misma manera, para el caso de las eficiencias de remoción para concentraciones de Clear Chem entre 5 y 15 mg/l, aplicadas en el agua filtrada junto a la condición menos favorable de sulfato de aluminio, resultaron en su mayoría en valores positivos. Sin embargo, similarmente a lo sucedido cuando se aplica las concentraciones en el proceso de coagulación, las mediciones de aluminio residual, en algunos casos, superan los 0,2 mg/l.

Por último, no es posible evaluar en la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe el efecto que tiene el producto Clear Chem en la reducción de turbiedad y aluminio residual, ya que la eficiencia de remoción obtenida en el laboratorio no es suficiente para determinar aplicar el producto en la planta.

Además, el producto Clear Chem no cuenta con la certificación NSF/ANSI CAN 60, dicha certificación garantiza que los productos químicos a utilizar en el tratamiento de agua cumplen con los estándares globales de salud pública aceptados [22]. Por lo tanto, sería sumamente peligroso, riesgoso e insalubre aplicar el producto en planta.

4.3. Guía metodológica

En el Anexo 1 se puede apreciar la guía metodológica realizada con el objetivo de que el AyA evalúe productos químicos que pueda utilizar en la reducción del aluminio residual en la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe.

La guía consta de siete apartados, en el primer apartado, se detalla una breve introducción de la problemática reflejada en la PTAP de Guadalupe y se menciona el objetivo de dicha metodología. En el segundo apartado se presentan los parámetros fisicoquímicos junto con los límites máximos permisibles establecidos en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable en Costa Rica, los cuales son relevantes para el análisis de cualquier producto químico.

Asimismo, en el tercer apartado, se propone una metodología para la recolección de la muestra y se plantean los métodos de análisis. En el cuarto apartado, se expone el equipo a utilizar para las pruebas de jarras y con respecto al quinto apartado, se menciona la metodología a seguir con la finalidad de encontrar la dosis óptima de sulfato de aluminio y del coadyuvante de coagulación.

Por otro lado, se abordó un apartado de buenas prácticas de laboratorio con el objetivo de obtener resultados reproducibles y disminuir las fuentes de error. En dicho apartado se incluyó técnicas para una adecuada limpieza de equipos para el muestreo de agua, así como para la recolección y conservación de las muestras. Además, se incluyó prácticas seguras de laboratorio, con el fin de realizar los análisis de manera adecuada y sin representar un riesgo para la salud humana. Por último, se detalló un apartado con la bibliografía consultada para realizar la guía metodológica.

5. CONCLUSIONES

Es posible inferir que la toma de la muestra en contraposición al tiempo de sedimentación entre las jarras cuadradas y las jarras redondas resulta en diferencias significativas en los datos obtenidos.

En los ensayos de jarras redondas se identificó que los valores obtenidos de turbiedad disminuyeron considerablemente en comparación a los ensayos con jarras cuadradas. No obstante, los valores de aluminio residual se comportaron de manera similar. Por lo tanto, si se requiere de datos más asertivos y similares a los que se presentan en la planta potabilizadora AyA Guadalupe, se debe realizar los ensayos con jarras de tipo redondas.

El escalamiento del proceso de filtración que se realiza en el laboratorio mediante el papel filtro no es similar a la filtración que realizan los filtros de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe. Por lo anterior, existen diferencias significativas entre las mediciones que obtiene el laboratorio de la planta en comparación a los datos que obtiene el Laboratorio Nacional de Aguas.

La Planta Potabilizadora AyA Guadalupe no está configurada para el proceso de filtración directa, ya que la planta dispone de un sistema de filtración que requiere de modificaciones en el pH del agua para activar los filtros.

Los datos de las mediciones de aluminio residual tomados mediante el comparador visual de la marca Lovibond en el laboratorio de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe difieren de los datos que obtiene el Laboratorio Nacional de Aguas (LNA) para las mismas mediciones.

Cuanto mayor sea el resultado de la medición de aluminio residual con el comparador visual Lovibond, mayor será el porcentaje de error entre los datos obtenidos por dicho equipo y los corregidos mediante la curva de corrección. Lo anterior debido a que conforme aumenta

el valor de aluminio residual, aumenta la dificultad de comparar los colores entre el disco y la muestra.

El producto Clear Chem evaluado a escala de laboratorio, presentó valores de eficiencia de remoción menores a 35%, por tanto, se puede concluir que el producto no resultó viable como coadyuvante de coagulación en la reducción de turbiedad y aluminio residual.

Las eficiencias de remoción en cuanto al parámetro de aluminio residual, para concentraciones de Clear Chem entre 0,10 y 18 mg/l, aplicadas en el proceso de coagulación junto a la dosis óptima de coagulante, resultaron en valores negativos, lo que induce a un aumento del aluminio residual en lugar de buscar una reducción.

Con respecto a las eficiencias de remoción para concentraciones de Clear Chem entre 5 y 15 mg/l, aplicadas tanto en el proceso de coagulación como en el agua filtrada, junto a la condición menos favorable de sulfato de aluminio, resultaron en su mayoría en valores positivos. No obstante, en algunos casos, las mediciones corregidas de aluminio residual superan los 0,2 mg/l, incumpliendo los lineamientos establecidos en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable.

Además de no resultar viable como coadyuvante de coagulación, el producto Clear Chem no cuenta con la certificación NSF/ANSI CAN 60, por lo que no fue posible evaluar el producto en Planta.

6. RECOMENDACIONES

Para investigaciones posteriores sobre posibles productos químicos a implementar en el tratamiento de agua potable de la PTAP de Guadalupe, se recomienda realizar los ensayos de laboratorio con jarras de tipo redondas.

Se recomienda realizar un análisis de regresión mediante una curva de corrección; tomando como base las mediciones realizadas en el laboratorio de la PTAP de Guadalupe en comparación a los datos obtenidos por el ICP-MS del LNA. Lo anterior con el fin de analizar la relación entre las dos variables asociadas en una forma no determinística e interpretar la proporción de variación en y .

En caso de querer evaluar un producto químico en el tratamiento de agua potable de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe, se debe verificar que el producto cuente con la certificación NSF/ANSI CAN 60.

Se recomienda revisar factores de diseño y hacer ajustes en el tamaño de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe en función de la calidad del agua que se recibe actualmente. Dado que las condiciones han cambiado desde los años 50`s, cuando se diseñó la planta.

7. REFERENCIAS

- [1] World Health Organization, *Guidelines for drinking-water quality*, Fourth edition incorporating the first and Second addenda. Geneva: World Health Organization, 2022.
- [2] Naciones Unidas, *La agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2018.
- [3] M. Aschner y L. G. Costa, Eds., *Neurotoxicity of Metals*, vol. 18. en *Advances in Neurobiology*, vol. 18. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-60189-2.
- [4] Poder Ejecutivo, Presidente de la República, y Ministro de Salud, “Reglamento para la Calidad del Agua Potable”, sep. 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?para_m1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80047&nValor3=101480&strTipM=TC
- [5] A. Lazo. (12 abr., 2023). Generalidades del proceso de potabilización del AyA [En línea]. Disponible correo electrónico: alazo@aya.go.cr
- [6] D. Mora Alvarado y C. F. Portuguez B, “Agua para consumo humano y saneamiento en Costa Rica al 2020: Brechas en tiempos de pandemia”, Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, San José, Costa Rica, jun. 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.aya.go.cr/transparenciaInst/rendicion_cuentas/PlanesEspecificosSectorial/Agua%20para%20consumo%20humano%20y%20saneamiento%20en%20Costa%20Rica%20al%202020_%20Brechas%20en%20tiempos%20de%20pandemia.pdf
- [7] United States Environmental Protection Agency (EPA), “Drinking Water Treatment Plant Residuals Management Technical Report”, sep. 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-11/documents/dw-treatment-residuals-mgmt-tech-report-sept-2011.pdf>
- [8] Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS/OPS), “Tratamiento de agua para consumo humano”. 2004.
- [9] F. Arellano *et al.*, “Diagnóstico Nacional de Entes Operadores (Levantamiento 2017-2020)”, 2019.
- [10] J. C. Crittenden, J. H. Borchardt, J. C. Crittenden, y Montgomery Watson Harza, Eds., *MWH’s water treatment: principles and design*, 3. ed. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2012.
- [11] Organización Panamericana de la Salud, *Calidad del agua potable en Costa Rica: Situación actual y perspectivas*. San José, Costa Rica: OPS, 2003.
- [12] N. Otero Calviño, *Filtración de aguas residuales para reutilización*. La Laguna: Servicio de Publicaciones, Universidad de la Laguna, 2009.
- [13] WHO, “Aluminium in drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality”. 2010. [En línea]. Disponible en: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/aluminium.pdf?sfvrsn=e54f4db9_4
- [14] I. Krupińska, “Aluminium Drinking Water Treatment Residuals and Their Toxic Impact on Human Health”, *Molecules*, vol. 25, núm. 3 feb. 2020, doi: 10.3390/molecules25030641.
- [15] H. E. Hudson y E. G. Wagner, “Conduct and uses of jar tests”, *J. - Am. Water Works Assoc.*, vol. 73, núm. 4, pp. 218–223, abr. 1981, doi: 10.1002/j.1551-8833.1981.tb04683.x.
- [16] M. Pivokonský, K. Novotná, L. Čermáková, y R. Petříček, *Jar Tests for Water Treatment Optimisation. How to Perform Jar Tests – a handbook*. London, UK: IWA Publishing, 2022.

- [17] R. Baird, A. D. Eaton, E. W. Rice, y L. Bridgewater, Eds., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Twenty-Third edition. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.
- [18] WHO, “pH in Drinking-water. Revised background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality”. 2007.
- [19] Dirección de mercadeo GAM, San José. Proceso de potabilización AyA (ago., 2022). Consultado: 15 may., 2023. [Video en línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=jMaV8EASe48>
- [20] Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, “Laboratorio Nacional de Aguas”, Laboratorio Nacional de Aguas. Consultado: 14 ago., 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.aya.go.cr/laboratorio/Paginas/default.aspx>
- [21] Agilent Technologies, “ICP-MS Agilent Serie 7700”. Consultado: 14 ago., 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.agilent.com/cs/library/brochures/5990-4025ES.pdf>
- [22] NSF International, “NSF/ANSI 60-2016. Drinking Water Treatment Chemicals-Health Effects.” NSF International, 2016.
- [23] National Sanitation Foundation, “NSF/ANSI/CAN 60 Technical Requirements”, ene. 2018, [En línea]. Disponible en: <https://www.nsf.org/knowledge-library/nsf-ansi-60-technical-requirements>
- [24] A. Lazo Paez y M. Quesada, comunicación personal, may., 2023.
- [25] Sistema de Acueducto GAM. (2022). SCADA V2. Consultado: 22 jun., 2023.
- [26] H. Méndez. (23 oct., 2023). Características de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe [En línea]. Disponible correo electrónico: hmendez@aya.go.cr
- [27] A. Pérez A., (San José). Componentes y Área de Cobertura Sistema ME-A-02 Guadalupe Acueducto Metropolitano. (2 nov., 2023).
- [28] Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, “Pronóstico climático”. Consultado: 6 nov., 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.imn.ac.cr/web/imn/pronostico-climatico>
- [29] AgriGro Marketing, Inc., “Ficha Técnica Clear Chem”. 2022.
- [30] F. Salas, “Descripción de las características y aplicaciones de Clear Chem”, 2023.
- [31] Latam Chemical Solutions S.A., “Recomendaciones de pruebas para eliminación de trazas de sulfato de aluminio”. 2021.
- [32] J. L. Devore, *Introducción a la probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. Ciudad de México: Cengage Learning, 2019.
- [33] Lovibond Water Testing Tintometer Group, “Datasheet-CHECKIT® Comparator Aluminium, tablet reagents”. [En línea]. Disponible en: <https://www.lovibond.com/en/PW/Water-Testing/Products/Test-Kits/CHECKITComparator/Test-Kits-Single-Parameter/CHECKITComparator-Aluminium-tablet-reagents>

8. ANEXOS

Anexo 1. Guía metodológica para analizar productos químicos que reduzcan el aluminio residual en la PTAP AyA Guadalupe.

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS



GUÍA METODOLÓGICA

VERSION 1.0

15/09/23

ELABORADO POR
VALERIA CASTRO RAMÍREZ

COMO PARTE DEL PROYECTO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL
GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	77
2.	PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA	78
3.	RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA Y MÉTODOS DE ANÁLISIS	79
4.	EQUIPO PARA PRUEBA DE JARRAS	80
5.	ENSAYOS DE PRUEBA DE JARRAS	80
5.1.	Dosis óptima de sulfato de aluminio	80
5.2.	Dosis óptima de coadyuvante de coagulación	81
6.	BUENAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO.....	82
6.1.	Limpieza de equipos para muestreo de agua	82
6.2.	Recolección y conservación de muestras	83
6.3.	Prácticas seguras de Laboratorio	84
7.	REFERENCIAS.....	85

1. INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable es uno de los derechos humanos básicos y un componente imprescindible en las políticas eficaces de protección de la salud. Todas las personas deben disponer de un abastecimiento satisfactorio, es decir, suficiente, seguro y accesible [1]. Por tal razón, la meta 6.1 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) exige un acceso universal y equitativo al agua potable salubre y asequible [2].

Con el objetivo de garantizar un abastecimiento salubre, en el tratamiento del agua, las sales de aluminio comúnmente se utilizan en el proceso de coagulación para reducir el color, turbiedad, contenido de materia orgánica y el nivel de microorganismos presentes en el agua. No obstante, este uso puede incrementar la concentración de aluminio residual en el agua tratada; lo que puede conferir, entre sus muchos efectos adversos, color y turbiedad no deseables [1]. Análogamente, puede representar un riesgo potencial para la salud humana [3].

La problemática del sistema de tratamiento de agua potable del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) radica en que, a pesar de sus esfuerzos por aplicar dosis óptimas de sulfato de aluminio y controlar los procesos fisicoquímicos, en ciertas plantas, como es el caso de la Planta Potabilizadora Guadalupe, ocasionalmente se obtienen valores de aluminio residual superiores a 0,2 mg/l en el agua tratada, siendo éste el valor máximo admisible según el Reglamento para la Calidad del Agua Potable en Costa Rica [4]. Por lo que surge la necesidad de investigar alternativas de un producto químico o mecanismo que logre mantener los valores de aluminio residual inferiores a 0,2 mg/l.

El presente documento tiene como objetivo desarrollar una metodología que le permita al AyA utilizar productos químicos que reduzcan el aluminio residual en la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe, Goicoechea, San José.

2. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA

Con el fin de abastecer y gestionar agua para uso y consumo humano de forma segura, el Reglamento para la Calidad del Agua Potable en Costa Rica tiene como objetivo establecer los límites máximos permisibles de parámetros físicos, químicos y microbiológicos para el agua potable, con el fin de garantizar su inocuidad y la salud de la población [4].

Para analizar a escala de laboratorio, posibles productos químicos que puedan ser utilizados por el AyA en el tratamiento de agua potable de la Planta Potabilizadora Guadalupe, es necesario que los parámetros fisicoquímicos a estudiar permanezcan por debajo de los valores máximos admisibles que se presentan en la Tabla I.

TABLA I
PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA. NIVEL PRIMERO (N1)
Y NIVEL SEGUNDO (N2)

Parámetros de aceptabilidad	Unidad	Valor Alerta (VA)	Valor Máximo Admisible (VMA)
Turbiedad	UNT	1	5
Color aparente	U-Pt-Co	< 5	15 o No detectable
pH	Valor pH	6,0	8,0
Olor	-	Debe ser aceptable	Debe ser aceptable
Aluminio residual	mg/l	-	0,2

Nota. Parámetros establecidos en el Reglamento para la Calidad del Agua Potable en Costa Rica [4].

Cualquier producto que se quiera utilizar para el tratamiento de agua potable, deberá disponer de la certificación NSF/ANSI CAN 60, ya que dicha certificación establece los requisitos mínimos sobre los efectos en la salud de los productos químicos, contaminantes químicos e impurezas que agregan directamente al agua potable a partir de los productos químicos para el tratamiento del agua potable [5].

Entre los productos químicos que entran en el ámbito de aplicación de esta norma, se encuentran: inhibidores de corrosión e incrustación, coagulantes y floculantes, productos

químicos de ajuste del pH, ablandamiento y precipitación, productos químicos de desinfección y oxidación, entre otros productos químicos utilizados en el tratamiento del agua potable [5].

3. RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA Y MÉTODOS DE ANÁLISIS

Con la intención de analizar un producto químico que cumpla con las condiciones deseadas, se precisa de una metodología para la recolección de la muestra y para establecer los métodos de análisis.

De esta manera, la muestra de agua cruda a utilizar en las pruebas de laboratorio debe ser tomada específicamente en la canaleta Parshall, ubicada en la entrada de la Planta Potabilizadora AyA Guadalupe. Análogamente, en el agua cruda se evalúan los parámetros de turbiedad, color, pH, alcalinidad y olor según corresponda. En la Tabla II se detallan los parámetros con el respectivo método y equipo para su análisis.

Es importante aclarar que la cristalería sucia y la presencia de burbujas de aire dan resultados falsos en la medición de turbiedad, por lo que se recomienda lavar correctamente la cristalería y eliminar la presencia de burbujas. Asimismo, la turbiedad podría interferir en la medición del color, por lo que es imprescindible eliminar dicho parámetro mediante el método de filtración [6].

TABLA II
ANÁLISIS DE PARÁMETROS EN MUESTRA
DE AGUA CRUDA

Parámetro	Método	Equipo
Turbiedad	2130 B Mod	TL2300 HACH
Color aparente	2120 B	Comparador Orbeco Hellige
pH	4500-H+ B	Sension+ HACH
Alcalinidad	2310 B	Bureta, Erlenmeyer
Olor	Olfato	No aplica

Nota. Parámetros para análisis en muestras de agua cruda

En cuanto al agua filtrada, se evalúa el parámetro de aluminio residual mediante un comparador visual de la marca Lovibond para medir Al^{+3} , específicamente con el método M2501 o mediante el colorímetro DR300 de la marca HACH, con el método M8012.

4. EQUIPO PARA PRUEBA DE JARRAS

Con respecto a los ensayos de prueba de jarras, se utiliza una máquina de jarras PB900 de la marca Phipps & Bird, la cual cuenta con un “display” de cuatro funciones, entre ellas, la programación de cuatro memorias. La memoria uno se utiliza con arranque suave para proteger los engranajes y se agita a 100 RPM durante 5 a 10 segundos, se procede con la memoria dos con la mezcla rápida, la cual se utiliza durante 1 minuto a 300 RPM. Asimismo, la memoria tres corresponde a la etapa de floculación, en este caso de 15 minutos a 85 RPM. Por último, la memoria cuatro, la cual realiza la función de sedimentación, se utiliza a 0 RPM durante 10 minutos. Además, se recomienda utilizar jarras redondas de dos litros, las cuales cuentan con flotadores que permiten tomar las muestras a los seis cm de profundidad.

5. ENSAYOS DE PRUEBA DE JARRAS

A continuación, se presenta la metodología respectiva a seguir con la finalidad de encontrar la dosis óptima de sulfato de aluminio y del coadyuvante de coagulación.

5.1. DOSIS ÓPTIMA DE SULFATO DE ALUMINIO

En primer lugar, se debe realizar un primer ensayo de prueba de jarras con el fin de analizar la dosis óptima de sulfato de aluminio. Para ello, se debe preparar una disolución acuosa de sulfato de aluminio al porcentaje masa/volumen (m/v) más conveniente (Ecuación 1).

$$\% m/v = \frac{\text{masa (g)}}{\text{solución total (ml)}} \times 100 \quad \text{Ecuación 1.}$$

El ensayo de jarras se realiza con seis concentraciones distintas del coagulante, por lo que para cada concentración de sulfato de aluminio, es necesario calcular los ml de jeringa a preparar en función del porcentaje de la solución de trabajo (m/v) y la dosis a aplicar en mg/l, tal y como se presenta en la Ecuación 2.

$$ml \text{ de jeringa} = \frac{[volumen \text{ de la jarra (ml)} \times dosis \text{ (mg/l)}]}{[solución \text{ preparada (\%)} \times 10000 \text{ (mg/l)}]} \times 100 \quad \text{Ecuación 2.}$$

Una vez realizado los cálculos anteriores, se procede a realizar el ensayo de jarras. Cuando haya transcurrido el tiempo de sedimentación, correspondiente a la memoria cuatro del equipo de jarras, se debe descartar entre los primeros 10 a 20 ml y se debe extraer la muestra en un Erlenmeyer de un volumen aproximado de 250 ml.

A cada muestra se le mide la turbiedad y se procede a filtrar con los respectivos embudos y papel de filtro de la marca CHMLAB Group. Nuevamente, se mide la turbiedad del agua filtrada de cada muestra y el aluminio residual, mediante el comparador visual de la marca Lovibond. Por último, en función de los parámetros evaluados, se procede a elegir la dosis óptima de sulfato de aluminio que cumpla con los requisitos y condiciones deseadas.

5.2. DOSIS ÓPTIMA DE COADYUVANTE DE COAGULACIÓN

Con respecto al análisis de la dosis óptima de coadyuvante de coagulación, se requiere realizar los ensayos de prueba de jarras necesarios hasta encontrar la dosis con las condiciones esperadas y niveles adecuados que cumplan con el Reglamento para la Calidad del Agua Potable en Costa Rica [4].

Inicialmente se debe preparar la disolución acuosa del coadyuvante de coagulación al porcentaje masa/volumen (m/v) más adecuada por medio de la Ecuación 1. En caso de requerir analizar cómo se comporta el coadyuvante en dosis bajas, se puede preparar soluciones derivadas a partir de la solución madre mediante la Ecuación 3.

$$ml \text{ solución de trabajo} = \quad \text{Ecuación 3.}$$

$$= \frac{1000}{solución \text{ de trabajo (\%)}} \times solución \text{ final (\%)} \times \frac{volumen \text{ de solución final (ml)}}{1000}$$

Asimismo, a partir de la Ecuación 2 se puede calcular los ml de jeringa a utilizar en los ensayos de jarras, para lo cual, se le agregará en la etapa de coagulación la dosis óptima de sulfato de aluminio encontrada anteriormente. Después de 15 segundos, se agregará a cada jarra la concentración de coadyuvante de coagulación que se quiera analizar y una vez finalizado el tiempo de sedimentación, se descartará los primeros ml de muestra en un

recipiente y se procederá a depositar la muestra de cada jarra en un Erlenmeyer con capacidad de 250 ml debidamente etiquetado.

A continuación, se debe medir la turbiedad al agua sedimentada para después filtrar la muestra con los respectivos embudos y papel de filtro. Asimismo, se deberá recolectar la muestra filtrada en un Erlenmeyer con capacidad de 250 ml etiquetado de manera apropiada y medir nuevamente la turbiedad al agua filtrada. Además, es necesario que a cada muestra se le mida el aluminio residual o cualquier otro parámetro que se considere pertinente analizar.

Es importante realizar tantos ensayos de jarras como sean necesarios con el objetivo de analizar diferentes concentraciones de coadyuvante de coagulación hasta encontrar la dosis óptima que cumpla con las características y parámetros deseados.

6. BUENAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Con el objetivo de obtener resultados reproducibles y disminuir las fuentes de error, es muy importante ejecutar las técnicas básicas de laboratorio en forma correcta.

6.1. LIMPIEZA DE EQUIPOS PARA MUESTREO DE AGUA

La importancia de la limpieza del equipo radica en garantizar que dicho equipo no sea una fuente de sustancias externas que puedan afectar la concentración o la composición química de las muestras [7].

Por tal razón, se debe lavar el equipo con una solución de 0,1 a 2% de detergente sin fosfato. La cantidad dependerá de la dureza del agua del grifo y del grado de suciedad o contaminación del equipo. Además, el equipo deberá ser remojado por 30 minutos y una vez transcurrido el tiempo, se deberá restregar tanto el exterior como el interior de las superficies del equipo utilizando una esponja para eliminar cualquier material adherido, como aceite y grasa, sedimentos, algas y depósitos químicos. Luego, se deberá enjuagar el equipo con agua tibia del grifo para eliminar los residuos de detergente. Por último, se deberá enjuagar nuevamente el equipo, pero esta vez con agua desionizada [7].

Cabe destacar que para equipos construidos principalmente de vidrio o polímero de fluorocarbono o algún otro plástico, se deberá remojar en una solución de HCl al 5% (v/v) para eliminar cualquier película orgánica restante y depósitos inorgánicos [7].

Asimismo, para garantizar que no ocurran diluciones imprevistas o se contamine la muestra, es necesario ambientar el equipo. Esta técnica consiste en agregar al equipo pequeños volúmenes de la disolución a medir e inclinar y dar vuelta para que todas las paredes internas sean lavadas, luego se desecha el líquido y se realiza dicho procedimiento por triplicado.

Además, es necesario ser cauteloso con el área de trabajo donde se realiza la preparación de disoluciones y el área donde se trabaja con las muestras, ya que puede haber contaminación cruzada. Por tal razón, durante el ensayo es importante enjuagar la cristalería y el equipo con agua destilada para eliminar cualquier interferencia.

6.2. RECOLECCIÓN Y CONSERVACIÓN DE MUESTRAS

En general, cuanto menor sea el tiempo que transcurra entre la recolección de una muestra y su análisis, más confiables serán los resultados analíticos [6]. Sin embargo, si el análisis se demorará tiempo y se requiere conservar la muestra, es necesario tomar en cuenta algunas consideraciones generales.

Entre las consideraciones generales para una adecuada preservación de la muestra, es importante realizar un registro de cada muestra recolectada para evitar confusiones y análisis incorrectos, para ello se debe identificar cada botella o recipiente utilizado con un número de muestra único, preferiblemente colocando una etiqueta con la descripción adecuada. De esta manera, con el propósito de realizar una descripción correcta, se propone incluir el número único de identificación de la muestra, el nombre del recolector de la muestra, la fecha, hora y cualquier otro dato que pueda ser de utilidad [6].

Algunas muestras podrían sufrir cambios en su composición mientras son almacenadas, esto debido a que ciertos cationes están sujetos a pérdida por adsorción o intercambio iónico con las paredes de los recipientes de vidrio. Entre estos se incluye el aluminio, por lo que se recomienda recolectar en una botella limpia y acidificar con ácido nítrico a un pH inferior a dos para minimizar la precipitación y la adsorción en las paredes del recipiente [6]. No obstante, es preferible utilizar botellas plásticas en lugar de botellas de vidrio para el almacenamiento de muestras que contienen metales como el aluminio [8].

Asimismo, el color de una muestra también puede verse afectado por cambios biológicos o físicos que ocurren durante el almacenamiento, por lo que se recomienda realizar la determinación del color dentro de un período razonable [6].

Por otro lado, para obtener mejores resultados, se precisa medir la turbiedad sin alterar las condiciones originales de la muestra, como la temperatura o el pH, ya que estos parámetros pueden cambiar significativamente en cuestión de minutos. Por lo que, para evitar incurrir en cambios en las propiedades básicas de la calidad del agua, es necesario determinar algunos parámetros como la temperatura, el pH, la turbiedad y la alcalinidad inmediatamente después de la recolección de la muestra [6].

No obstante, es importante recalcar que los cambios en la composición de la muestra causados por el crecimiento de microorganismos se pueden postergar en gran medida manteniendo la muestra a bajas temperaturas ($<4^{\circ}\text{C}$ pero siempre por encima del punto de congelación) [6].

6.3. PRÁCTICAS SEGURAS DE LABORATORIO

Es esencial tener en cuenta medidas de laboratorio seguras con el fin de realizar los análisis de manera adecuada y sin representar un riesgo para la salud humana.

La protección personal es de especial cuidado y se debe evitar siempre el contacto de los químicos con la piel mediante el uso de guantes, mangas largas y otras prendas de protección adecuadas. Además, se recomienda lavarse las manos y los brazos inmediatamente después de realizar los respectivos análisis de laboratorio. Por otro lado, se recomienda utilizar protección ocular adecuada donde se almacenan o manipulan productos químicos y evitar el uso de lentes de contacto en el laboratorio a menos de que sea necesario [6].

Asimismo, se debe procurar mantener el área de trabajo limpia y ordenada con los productos químicos y el equipo debidamente etiquetados y almacenados. Por último, es importante manipular y almacenar el material de vidrio de laboratorio con cuidado para evitar cualquier daño [6].

7. REFERENCIAS

- [1] World Health Organization, *Guidelines for drinking-water quality*, Fourth edition incorporating the first and Second addenda. Geneva: World Health Organization, 2022.
- [2] Naciones Unidas, *La agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2018.
- [3] M. Aschner y L. G. Costa, Eds., *Neurotoxicity of Metals*, vol. 18. en *Advances in Neurobiology*, vol. 18. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017. doi: 10.1007/978-3-319-60189-2.
- [4] Poder Ejecutivo, Presidente de la República, y Ministro de Salud, «Reglamento para la Calidad del Agua Potable», sep. 2015. [En línea]. Disponible en: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?para ml=NRTC&nValor1=1&nValor2=80047&nValor3=101480&strTipM=TC
- [5] NSF International, «NSF/ANSI 60-2016. Drinking Water Treatment Chemicals-Health Effects.» NSF International, 2016.
- [6] R. Baird, A. D. Eaton, E. W. Rice, y L. Bridgewater, Eds., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Twenty-Third edition. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.
- [7] U.S. GEOLOGICAL SURVEY, «Chapter A3. Cleaning of equipment for water sampling», 2004. doi: 10.3133/twri09A3.
- [8] United States Environmental Protection Agency, «Quick Guide To Drinking Water Sample Collection». sep., 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-11/documents/drinking_water_sample_collection.pdf