



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA E
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA
QUÍMICA



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Eficiencia en el consumo de coagulante y floculante en el Sistema de Flotación por Aire Disuelto en el tratamiento de las aguas residuales industriales de la empresa San Fernando – Huaral.

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA QUÍMICA

AUTORA:

Bachiller Chavez Torres Oryana Mercedes.

ASESORA:

Dra. Cabrera Salazar Tarcila Amelia.

CÓDIGO ORCID N° 0000-0001-2152-9605-2152

LIMA – PERÚ

2025



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA E
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA
QUÍMICA



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Eficiencia en el consumo de coagulante y floculante en el Sistema de Flotación por Aire Disuelto en el tratamiento de las aguas residuales industriales de la empresa San Fernando – Huaral.

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA QUÍMICA

APROBADO POR EL SIGUIENTE JURADO:

Dra. Ysabel Nevado Rojas

Presidente

M. Sc. Manuel Antonio Diaz Paredes

Secretario

M. Sc. Gerardo Santamaría Baldera

Vocal

Dr. Cabrera Salazar Tarcila Amelia

Asesor



ACTA DE SUSTENTACIÓN - 2025

Siendo las 12:30 pm del viernes 24 de octubre del 2025, se reunieron en la sala de sustentación de la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias los miembros del jurado evaluador del Trabajo de Suficiencia Profesional Titulado: **Eficiencia en el consumo de coagulante y floculante en el sistema de flotación por aire disuelto en el tratamiento de las aguas residuales industriales de la empresa San Fernando - Huaral**; designados por Res. N°323-2025-D-FIQIA de fecha 24 de julio del 2025 y aprobada con Res. N°462-2025-D-FIQIA de fecha 29 de setiembre del 2025, con la finalidad de Evaluar y Calificar la sustentación del Trabajo de Suficiencia Profesional antes mencionado, conformados por los siguientes docentes:

- Dra. Ysabel Nevado Rojas - Presidente
- M.Sc. Manuel Antonio Diaz Paredes - Secretario
- M.Sc. Gerardo Santamaria Baldera - Vocal.

El Trabajo de Suficiencia Profesional fue asesorado por la Dra. Tarcila Amelia Cabrera Salazar, nombrada por Res. N°283-2025-D-FIQIA de fecha 10 de julio del 2025. El acto de sustentación es autorizado mediante Res. N°508-2025-D-FIQIA de fecha 16 de octubre del 2025.

El Trabajo de Suficiencia Profesional fue presentada y sustentada por la Bachiller: **ORYANA MERCEDES CHAVEZ TORRES de la Escuela Profesional de Ingeniería Química**; y tuvo una duración de minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado; se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el calificativo de 18 (Diecerocho) en la escala vigesimal, mención Muy Buena

Por lo que quedan APTO (s) para obtener el Título Profesional de **INGENIERA QUIMICA** de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 1:58 se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto, con la firma de los miembros del jurado.

.....
Presidente
Dra. YSABEL NEVADO ROJAS

.....
Vocal
M.Sc. GERARDO SANTAMARIA BALDERA

.....
Secretario
M.Sc. MANUEL ANTONIO DIAZ PAREDES

.....
Asesora
Dra. TARCILA AMELIA CABRERA SALAZAR

CONSTANCIA DE VERIFICACION DE ORIGINALIDAD

Yo Dra. Tarcila Amelia Cabrera Salazar usuario revisor del Trabajo de Suficiencia Profesional Titulado:

Eficiencia en el consumo de coagulante y floculante en el Sistema de Flotación por Aire Disuelto en el tratamiento de las aguas residuales industriales de la empresa San Fernando – Huaral.

Cuyo autor (a) es: **Oryana Mercedes Chavez Torres**; identificado con DNI N° **76239047**; declaro que la evaluación realizada por el Programa informático ha arrojado un porcentaje de similitud 14%, verificables en el Resumen del Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito (a) analizó reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos,

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 11 de agosto del 2025



.....
Firma (Asesor)

Nombres y Apellidos: TARCILA AMELIA CABRERA SALAZAR

DNI: 16641632

Se Adjunta:

Resumen de Reporte automatizado de similitudes.

Recibo digital.

Eficiencia en el consumo de coagulante y floculante en el Sistema de Flotación por Aire Disuelto en el tratamiento de las aguas residuales industriales de la empresa San Fernando – Huaral.

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	repository.eia.edu.co Fuente de Internet	1%
3	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
5	bibdigital.epn.edu.ec Fuente de Internet	1%
6	spenagroup.com Fuente de Internet	<1%
7	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Unidades Tecnológicas de Santander Trabajo del estudiante	<1%
9	docplayer.es Fuente de Internet	<1%
10	dspace.ucacue.edu.ec Fuente de Internet	<1%
11	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	<1%
12	cmc.ihmc.us Fuente de Internet	<1%
13	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%

Firma (Asesor)

Nombres y Apellidos: TARCILA AMELIA CABRERA SALAZAR

DNI: 16641632

14	idoc.tips Fuente de Internet	<1 %
15	Submitted to Universidad Santo Tomas Trabajo del estudiante	<1 %
16	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
17	revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
18	patents.google.com Fuente de Internet	<1 %
19	Submitted to Universidad Tecnica De Ambato- Direccion de Investigacion y Desarrollo , DIDE Trabajo del estudiante	<1 %
20	de Sousa, Jadir Jorge Rodrigues. "Utilização de linguagens de modelação de processos e da plataforma SharePoint 2007 no desenvolvimento de um sistema de informação", Universidade do Porto (Portugal), 2024 Publicación	<1 %
21	helvia.uco.es Fuente de Internet	<1 %
22	issuu.com Fuente de Internet	<1 %
23	Calvino, Natalia Otero. "Filtracion de aguas residuales para reutilizacion", Universidad de La Laguna (Canary Islands, Spain), 2022 Publicación	<1 %
24	Submitted to Universidad Alas Peruanas Trabajo del estudiante	<1 %
25	quercuslab.es Fuente de Internet	<1 %
26	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
27	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1 %



Firma (Asesor)

Nombres y Apellidos: TARCILA AMELIA CABRERA SALAZAR

DNI: 16641632

28	Fuente de Internet	<1 %
29	Submitted to UNIV DE LAS AMERICAS Trabajo del estudiante	<1 %
30	repositorio.cientifica.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
31	wateractionhub.org Fuente de Internet	<1 %
32	www.energiayambienteandina.net Fuente de Internet	<1 %
33	blog.condorchem.com Fuente de Internet	<1 %
34	repositorio.uwiener.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
35	DESARROLLO AMBIENTAL SOC ANONIMA. "EIA-SD para la Instalación de una Planta de Congelado con Capacidad de 150 t/día Ubicada en el Distrito de Chimbote, Áncash- IGA0002925", Cert. Amb. N° 006-2009- PRODUCE/DIGAAP, 2021 Publicación	<1 %
36	Ome Barrera, Oscar Danilo. "Bioestimulación de Microorganismos Como Estrategia Sustentable de Pretratamiento para Aguas Residuales Industriales del Procesamiento de Aceite de Palma: Un Estudio de Caso en Bogotá D.C.", Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Colombia), 2024 Publicación	<1 %
37	documentop.com Fuente de Internet	<1 %
38	doku.pub Fuente de Internet	<1 %
39	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
40	repositoriodspace.unipamplona.edu.co Fuente de Internet	<1 %
41	ribuni.uni.edu.ni	



Firma (Asesor)

Nombres y Apellidos: TARCILA AMELIA CABRERA SALAZAR

DNI: 16641632

	Fuente de Internet	<1 %
42	www.hyparion.com Fuente de Internet	<1 %
43	astra.hi.gemini.edu Fuente de Internet	<1 %
44	documents.mx Fuente de Internet	<1 %
45	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
46	inba.info Fuente de Internet	<1 %
47	repositorio.ug.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
48	utec.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
49	www.iese.edu Fuente de Internet	<1 %
50	www.ptolomeo.unam.mx:8080 Fuente de Internet	<1 %
51	www2.uca.es Fuente de Internet	<1 %
52	Laura Settler Ramírez. "Envases activos portadores de microorganismos para la bioconservación de alimentos", Universitat Politècnica de Valencia, 2021 Publicación	<1 %
53	asaga.org.ar Fuente de Internet	<1 %
54	catalogobiblioteca.unach.cl Fuente de Internet	<1 %
55	catarina.udlap.mx Fuente de Internet	<1 %
56	docshare.tips Fuente de Internet	<1 %
57	moam.info Fuente de Internet	<1 %



Firma (Asesor)

Nombres y Apellidos: TARCILA AMELIA CABRERA SALAZAR

DNI: 16641632





Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Oryana Chavez
Título del ejercicio: Quick Submit
Título de la entrega: Eficiencia en el consumo de coagulante y floculante en el Siste...
Nombre del archivo: INFORME_TRABAJO_DE_SUFICIENCIA_PROFESIONAL_2.docx
Tamaño del archivo: 1.65M
Total páginas: 39
Total de palabras: 10,116
Total de caracteres: 55,108
Fecha de entrega: 11-ago-2025 02:50p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2728388803

 UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA E
INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA
QUÍMICA

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL


Eficiencia en el consumo de coagulante y floculante en el Sistema de Flotación por Aire Disuelto en el tratamiento de las aguas residuales industriales de la empresa San Fernando - Huaral.

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA QUÍMICA

AUTORA:
Bachiller Chavez Torres Oryana Mercedes.

ASESORA:
Dra. Cabrera Salazar Tarcila Amelia.
CÓDIGO ORCID N° 0000-0001-2152-9605-2152

LIMA - PERÚ
2025



Firma (Asesor)

Nombres y Apellidos: TARCILA AMELIA CABRERA SALAZAR

DNI: 16641632

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres, Claudia Catherine Torres Ochoa y Jhonny Merardo Chavez Vidarte, por ser mis guías en los momentos más difíciles, por darme la fortaleza para seguir adelante, por su amor incondicional y apoyo constante en cada etapa de mi formación.

A mis hermanos, Edwin, Anthony y Jampier por su amor, paciencia y apoyo sincero e incondicional. Cada uno de ustedes ha sido un ejemplo de fortaleza y unión familiar.

A mi novio, Franco Guevara, por acompañarme con amor, por motivarme a no rendirme, escucharme en los días difíciles y celebrar conmigo cada pequeño logro. Tu apoyo incondicional ha sido fundamental para culminar esta meta.

A mis abuelos, por sus enseñanzas, consejos y oraciones que me han acompañado en cada etapa de mi vida.

Oryana Chavez Torres.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios por darme la fortaleza y salud para culminar esta etapa académica y por darme la fuerza para seguir adelante.

A mis padres Caludia Torres y Jhonny Chavez, por su sacrificio, amor y por creer siempre en mí.

A mi asesora, Dra. Tarcila Cabrera Salazar, por su orientación, compromiso y valiosos aportes que enriquecieron este trabajo.

Agradezco profundamente a la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, por brindarme una formación académica de calidad.

A la empresa SPENA GROUP, por la oportunidad de desarrollarme profesionalmente y participar en proyectos de gran impacto ambiental. Y a cada persona que formó parte de este proceso, gracias por su apoyo y confianza.

Oryana Chavez Torres.

INDICE

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
CAPITULO I: ASPECTOS GENERALES DEL TEMA ELEGIDO.....	10
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE EXPERIENCIA	10
1.2 REFERENCIA EMPRESARIAL	10
1.3 RESEÑA HISTÓRICA	11
1.4 VALORES INSTITUCIONALES.....	12
1.5 FUNCIONES DENTRO DE LA EMPRESA.....	13
1.6 DEFINICIÓN DE TERMINOS.....	13
CAPITULO II: FUNDAMENTACIÓN SOBRE EL TEMA ELEGIDO	17
2.1. DIAGRAMA DE BLOQUES.....	17
2.2. PRUEBA DE JARRAS	19
2.3. TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO: COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN	19
2.3.1. Coagulación:	20
2.3.2. Floculación:.....	21
2.3.3. Factores que afectan el proceso de coagulación - floculación:	22
2.4. TUBERÍA FLOCULADORA	25
2.5. SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (DAF)	26
2.5.1. Diagrama de flujo del proceso DAF.....	26
2.5.2. Componentes básicos de un Sistema DAF.....	27
2.5.3. Variables operativas de un Sistema DAF	27
CAPITULO III: APORTE Y DESARROLLO DE EXPERIENCIA	30
3.1. METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN EN EL USO DE COAGULANTES Y FLOCULANTES EN EL SISTEMA DAF.	30
3.1.1. Prueba de Jarras.....	30
3.1.2. Validación en campo de las condicione seleccionadas.....	32
3.2. RESULTADOS DE LABORATORIO DE LOS ENSAYOS ANALIZADOS.....	34
3.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	35
3.4. ANÁLISIS ECONÓMICO	38
CONCLUSIONES.....	41
RECOMENDACIONES.....	42
BIBLIOGRAFÍA.....	43
ANEXOS	45
ANEXO 1: Resultados de laboratorio.....	45
ANEXO 2: Registro fotográfico.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Diagrama de bloques de la Planta de Tratamiento de aguas residuales industriales de la empresa San Fernando – Huaral.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2. Floculador portátil para prueba de jarras.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3. Coagulación.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 4. Floculación.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 5. Diagrama de remoción de turbiedad.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 6. Tubería Floculadora y sus partes.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 7. Diagrama de flujo de un proceso DAF.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 8. Comparación de la Turbidez Inicial y Final con Eficiencia de Remoción.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 9. Comparación de la DBO Inicial y Final con Eficiencia de Remoción.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 10. Comparación de la DQO Inicial y Final con Eficiencia de Remoción.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 11. Comparación de los SST Inicial y Final con Eficiencia de Remoción.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 12. Comparación de los A&G Inicial y Final con Eficiencia de Remoción.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 13. Consumo de químicos (ppm), costo de tratamiento por m³ de efluente tratado y eficiencia de remoción respecto a la turbidez.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 14. Tubería Floculadora.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 15. Lectura en el medidor de flujo en el Sistema DAF.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 16. Lectura de pH y turbidez del afluente.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 17. Muestras de los ensayos N°1, 2, 4, 5, 6, 7 y 8 después de las pruebas de jarras.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 18. Mediciones de turbidez de los ensayos 1, 3 y 4.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 19. Mediciones de turbidez de los ensayos 5, 6 y 7.....</i>	<i>50</i>

RESUMEN

Este documento presenta un análisis técnico enfocado en mejorar la eficiencia del proceso de dosificación de productos químicos (coagulante y floculante) dentro del sistema de Flotación por Aire Disuelto (DAF) utilizado en la planta de tratamiento de efluentes de la empresa San Fernando – Huaral, con el fin de reducir costos operativos y mantener altos niveles de eficiencia en el proceso.

Inicialmente, la planta operaba con una dosificación de 199.6 ppm de coagulante (sulfato férrico) y 3.54 ppm de floculante (polímero aniónico), lo que representaba un costo de tratamiento de \$0.24 por metro cúbico. A través de pruebas de jarras y validaciones en campo, se evaluaron nueve configuraciones de dosificación, seleccionando cinco de ellas para pruebas a escala real, basadas en su alta eficiencia de remoción de turbidez.

Los resultados indicaron la reducción de la dosificación de productos químicos hasta 124.8 ppm de coagulante y 1.5 ppm de floculante, logrando eficiencias de remoción de hasta 96% en turbidez, 74% en DBO, 74% en DQO, 97% en SST y 88% en aceites y grasas. Esta optimización permitió disminuir el costo de tratamiento hasta \$0.14 por m³, representando un ahorro del 41.7% en insumos químicos.

Se demostró que una correcta selección de dosis químicas basada en pruebas de jarras puede mejorar sustancialmente la eficiencia técnica y económica del tratamiento sin comprometer la eficiencia en la remoción de parámetros como la turbidez, DBO, DQO, SST y aceites y grasas.

Palabras claves: Sistema de flotación por aire disuelto (DAF), coagulante, floculante, prueba de jarras, DBO, DQO, SST, aceites y grasas, eficiencia.

ABSTRACT

This report documents the technical study conducted to optimize coagulant and flocculant dosing in the Dissolved Air Flotation (DAF) system at the San Fernando-Huaral industrial wastewater treatment plant, aiming to reduce operating costs and maintain high levels of process efficiency.

Initially, the plant operated with a dosage of 199.6 ppm of coagulant (ferric sulfate) and 3.54 ppm of flocculant (anionic polymer), representing a treatment cost of \$0.24 per cubic meter. Through jar tests and field validations, nine dosing configurations were evaluated, and five were selected for full-scale testing based on their high turbidity removal efficiency.

The results indicated a reduction in chemical dosage to 124.8 ppm of coagulant and 1.5 ppm of flocculant, achieving removal efficiencies of up to 96% for turbidity, 74% for BOD, 74% for COD, 97% for TSS, and 88% for oils and greases. This optimization reduced treatment costs to \$0.14 per m³, representing a 41.7% savings in chemical inputs.

It was demonstrated that proper chemical dosage selection based on jar tests can substantially improve the technical and economic efficiency of the treatment without compromising the removal efficiency of parameters such as turbidity, BOD, COD, TSS, and oils and greases.

Keywords: Dissolved Air Flotation system (DAF), coagulant, flocculant, jar test, BOD, COD, TSS, oils and grease, efficiency.

INTRODUCCIÓN

El tratamiento adecuado de las aguas residuales industriales es una necesidad crítica en las industrias alimentarias, tanto por el cumplimiento de la normativa ambiental como por la responsabilidad social y el compromiso con la sostenibilidad. Dentro de las tecnologías empleadas para la remoción de sólidos suspendidos, materia orgánica y grasas, el sistema de Flotación por Aire Disuelto es ampliamente utilizado debido a su alta eficiencia y adaptabilidad a diferentes tipos de efluentes.

Sin embargo, el rendimiento de este sistema depende de varios factores operativos, entre ellos, la dosificación de productos químicos como coagulantes y floculantes. Un uso inadecuado de estos insumos puede generar costos operativos excesivos, afectando la rentabilidad del tratamiento, sin necesariamente mejorar la calidad del efluente tratado.

Este trabajo de suficiencia profesional se basa en la experiencia desarrollada en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales de la empresa San Fernando sede Huaral, en el cual se llevó a cabo un estudio técnico – económico que tuvo como objetivo general determinar la eficiencia en el uso de coagulante y floculante en el sistema DAF. Para ello, se planteó como primer paso evaluar el comportamiento del efluente ante diferentes dosis de coagulante y floculante mediante prueba de jarras. Estas pruebas permitieron identificar las combinaciones químicas más efectivas para lograr una adecuada remoción de sólidos suspendidos, aceites y materia orgánica. Posteriormente, las condiciones óptimas determinadas en laboratorio fueron validadas en campo mediante la implementación de ajustes progresivos en el sistema DAF, bajo condiciones reales de operación. Como parte de esta validación, se realizó una caracterización detallada del afluente y del efluente en el sistema de flotación, lo que permitió determinar la dosis óptima manteniendo buena eficiencia en la remoción de parámetros como la turbidez, DBO, DQO, SST y aceites y grasas y cuantificar la eficiencia del sistema tras la optimización, evidenciando mejoras sustanciales en la calidad del agua tratada. Finalmente, se analizó el impacto técnico-económico que permitió comparar los costos de operación antes y después de la intervención, demostrando que la optimización en el uso de productos químicos no solo mejora el desempeño del sistema, sino que también contribuye significativamente a la reducción de costos operativos, fortaleciendo la sostenibilidad del tratamiento.

El presente informe documenta esta intervención, detalla la metodología aplicada y establece recomendaciones técnicas y operativas orientadas a lograr un tratamiento más económico y eficiente.

CAPITULO I: ASPECTOS GENERALES DEL TEMA ELEGIDO.

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE EXPERIENCIA

La autora trabajó en la empresa AGROLMOS S.A. como ayudante de la planta de Ósmosis Inversa en el periodo Agosto 2022 a Diciembre 2022, posteriormente como operadora de las Plantas de Tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales en el periodo Enero 2023 a Julio 2024.

Desde Agosto del 2024 a la actualidad, la autora desempeña el cargo de ingeniero de procesos, cargo perteneciente al área de Ingeniería en la empresa SPENA GROUP.

1.2 REFERENCIA EMPRESARIAL

SPENA GROUP es una empresa especialista en el tratamiento de aguas residuales y aguas potables en el Perú con casi 30 años de experiencia, ofreciendo diferentes soluciones de tratamiento y de tecnologías para un uso sostenible del recurso más importante: el agua. Estas soluciones son seleccionadas dependiendo del tipo de agua, así como de los límites de vertimiento.

Los servicios que ofrece la empresa son los siguientes:

a) Servicios de caracterización del agua:

Este servicio tiene como finalidad cuantificar los parámetros contaminantes, tanto físicos como químicos, presentes en el afluente y en el efluente. Esta evaluación permite determinar la naturaleza del agua residual, facilitando la selección de la solución de tratamiento más adecuada y eficiente, evitando así incurrir en altos costos asociados a la implementación de un sistema incorrecto o sobredimensionado.

b) Servicios de medición de caudal:

Este servicio contempla la cuantificación del volumen de agua residual generado por la empresa, con el propósito de dimensionar de manera precisa la planta de tratamiento a proponer. De esta forma, se evita tanto la sobredimensión como el subdimensión del sistema, lo cual podría traducirse en gastos operativos o de inversión innecesarios.

c) Sistemas de tratamiento para industrias:

Este servicio brinda asesoría técnica al cliente sobre el proceso de tratamiento más adecuado para el efluente generado en su industria. La propuesta de planta se dimensiona en función de los resultados obtenidos en la caracterización del agua residual y la medición de caudal correspondiente, considerando siempre un equilibrio óptimo entre eficiencia técnica y viabilidad económica.

d) Sistemas de tratamiento para aguas doméstica:

Este servicio contempla la implementación de la tecnología de biorreactores de lecho móvil, conocida por sus siglas en inglés como MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor), también referida como sistema de lecho fluidizado. Se trata de un proceso biológico aplicado al tratamiento de aguas residuales, en el cual se emplean microorganismos adheridos a un medio portador para formar una biopelícula. Estos microorganismos son responsables de la degradación de la materia orgánica presente en el agua. En resumen, el MBBR forma parte de los procesos biológicos comúnmente utilizados en el tratamiento de aguas residuales.

e) Sistemas de tratamiento de agua potable

El servicio de tratamiento de aguas potables busca asegurar que el recurso hídrico destinado al consumo humano cumpla con los criterios de calidad exigidos por las regulaciones tanto nacionales como internacionales.

Sectores donde se ofrecen los servicios:

- Industrias alimentarias.
- Industrias pesqueras.
- Industrias mineras.
- Industrias papeleras.
- Industrias azucareras.
- Efluente de campamentos.
- Aguas municipales.
- Aguas de condominios.
- Constructoras.

1.3 RESEÑA HISTÓRICA

Spena Group fue creada en 1996 con la misión de mitigar el impacto ambiental asociado a las aguas residuales y proveer soluciones tecnológicas para el desarrollo eficiente de la acuicultura. Actualmente, respaldados por un equipo altamente capacitado y tecnología de vanguardia, operamos a través de dos divisiones especializadas: Spena Ambientales y Spena Acuicultura, ofreciendo soluciones integrales y confiables que se posicionan entre las más destacadas del mercado.

1.4 VALORES INSTITUCIONALES

- **Compromiso Ambiental**

La empresa asume un firme compromiso con la protección de los sistemas hídricos y del ambiente natural, promoviendo prácticas sostenibles en cada una de sus operaciones de tratamiento de aguas.

- **Responsabilidad Social**

Se trabaja con un enfoque orientado al bienestar de la comunidad, asegurando que los servicios ofrecidos contribuyan a garantizar un entorno más saludable y favorecer una mejor calidad de vida para los ciudadanos.

- **Calidad técnica y operativa**

Se garantiza un alto nivel de desempeño en los procesos, a través de la aplicación de estándares rigurosos y tecnologías confiables que aseguran la eficacia del tratamiento del agua.

- **Innovación constante**

Se impulsa el desarrollo y la mejora continua de los sistemas de tratamiento, incorporando soluciones técnicas modernas que optimicen los resultados y reduzcan impactos negativos.

- **Ética y transparencia**

Todas las acciones y decisiones se rigen por principios éticos sólidos, asegurando la honestidad en la gestión y la transparencia en las relaciones con clientes, proveedores y autoridades.

- **Seguridad y bienestar laboral**

Se prioriza un entorno de trabajo seguro y saludable para todo el personal, aplicando protocolos que minimicen riesgos y fomenten una cultura de prevención.

- **Trabajo en Equipo**

Se reconoce el valor del trabajo conjunto y la participación del personal, promoviendo un ambiente de respeto, cooperación y sentido de pertenencia.

- **Orientación al Cliente**

Escuchamos, comprendemos y respondemos a las necesidades de nuestros clientes, brindando soluciones personalizadas que generen confianza y resultados sostenibles.

- **Transparencia y Ética Profesional**

Actuamos con integridad, cumpliendo con nuestras obligaciones legales, técnicas y contractuales, promoviendo relaciones de confianza a largo plazo.

1.5 FUNCIONES DENTRO DE LA EMPRESA

La autora desempeña el cargo de Ingeniero de Procesos desde Agosto 2024 a la actualidad en la empresa SPENA GROUP, en donde realiza las siguientes funciones:

- Dimensionar y seleccionar tecnologías para un adecuado tratamiento del agua residual.
- Realizar balance de masas de los diseños de tratamiento realizados y definir parámetros operativos.
- Realizar diagrama de flujo de procesos (PFD) y diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID).
- Evaluar las caracterizaciones de aguas residuales domésticas, industriales, potables.
- Apoyar en el diseño de equipos, bombas, sopladores, tuberías, sensores.
- Coordinar con ingeniería civil, eléctrica y mecánica para la realización del diseño de tratamiento seleccionado.
- Estimar consumos de energía, productos químicos y lodos generados en los procesos.
- Realizar análisis costo-beneficio de las alternativas de tratamiento.
- Participar en la elaboración de propuestas técnico-económica.
- Realizar las puestas en marcha y operación de las plantas de tratamiento.
- Ajustar parámetros de operación y optimizar procesos.
- Capacitar al personal del cliente en operación y mantenimiento.
- Explicar soluciones técnicas de forma clara a clientes no técnicos.
- Atender problemas operativos y brindar soporte postventa.
- Visitas técnicas para monitoreo o auditorías de desempeño.

1.6 DEFINICIÓN DE TERMINOS

- **Agua residual industrial**

Agua que fue utilizada en procesos industriales y que, como resultado de dichos procesos, contiene contaminantes físicos, químicos y/o biológicos. Su composición varía ampliamente según el tipo de industria (alimentaria, química, textil, minera, etc.), y generalmente requiere tratamiento antes de su descarga o reutilización para evitar impactos ambientales o sanitarios (Spellman, 2020).

- **Afluente**

Es el flujo de agua residual que ingresa a una planta de tratamiento o a una etapa específica del proceso. Puede contener contaminantes físicos, químicos y biológicos, dependiendo de su origen (doméstico, industrial, etc.) (Metcalf & Eddy, Inc., 2021).

- **Efluente**

Es el flujo de agua que sale de una planta de tratamiento o de una etapa del proceso. En general, ya ha sido tratada y debe cumplir ciertos parámetros de calidad antes de su vertido o reúso (Cheremisinoff, 2019).

- **Coagulación**

Proceso que busca desestabilizar químicamente los coloides presentes en el agua, esta desestabilización ocurre neutralizando las fuerzas electrostáticas que los mantienen en suspensión, a través de la aplicación de coagulantes y la adición de mezcla (Andía, 2010).

- **Coagulante**

Sustancia química que, al añadirse al agua, desestabiliza las partículas coloidales cargadas (normalmente negativas), permitiendo que se aglomeren en partículas más grandes que luego puedan sedimentarse o flotar. Es el primer paso en los procesos de clarificación del agua (Metcalf & Eddy, Inc., 2021).

- **Floculación**

Se refiere a la fase posterior a la coagulación, en la cual se aplica una agitación controlada a la mezcla, permitiendo que los microfloculos generados comiencen a unirse entre sí. Esta acción favorece el crecimiento y consolidación de partículas más grandes y pesadas, facilitando su posterior sedimentación. Inicialmente pequeñas, estas estructuras coloidales se agrupan progresivamente hasta formar floculos de mayor tamaño y densidad (Andía, 2010).

- **Floculante**

Sustancia (generalmente un polímero) que promueve la unión de partículas desestabilizadas (por coagulación) formando "floculos" más grandes y fácilmente separables del agua mediante sedimentación o flotación. Actúa después del coagulante, reforzando la formación de agregados sólidos. Ejemplos comunes: poliacrilamidas (aniónicas, catiónicas o no iónicas), almidones modificados. (Cheremisinoff, 2019).

- **Desestabilización**

La desestabilización es el proceso mediante el cual se neutralizan las cargas eléctricas superficiales de las partículas coloidales en suspensión (generalmente negativas), lo que reduce la repulsión entre ellas. Esta neutralización, lograda mediante coagulantes como sales de aluminio o hierro, favorece la agregación de partículas y marca el paso previo a la formación de floculos (Jiang, 2015).

- **Micro floculos**

Los microfloculos son agregados iniciales de partículas coloidales y coagulante que se forman inmediatamente después de la desestabilización durante el proceso de coagulación-floculación. Se caracterizan por tener un tamaño pequeño (1–10 μm), baja densidad y ser aún frágiles. Si se aplica

agitación lenta o tiempo adecuado, estos microflóculos crecen y evolucionan en macroflóculos más grandes y densos, que pueden separarse por sedimentación o flotación (Jiang, 2015).

- **Pruebas de jarras**

Es un ensayo de laboratorio utilizado en el tratamiento de aguas para determinar la dosis óptima de coagulante y/o floculante que permite la mejor remoción de turbidez, color, sólidos suspendidos u otros contaminantes. Consiste en replicar en laboratorio, a escala reducida, las condiciones del proceso de coagulación-floculación, utilizando varias jarras en agitación controlada, donde se evalúa el comportamiento de diferentes dosis de productos químicos (AWWA, 2020).

- **Flotación por aire disuelto (DAF)**

El sistema DAF es un sistema tradicional utilizado en el tratamiento de aguas residuales, que permite separar directamente sólidos suspendidos, sustancias oleosas, grasas y materiales fibrosos del efluente. Además, contribuye de manera indirecta a la reducción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅).

El proceso se basa en la remoción de sólidos suspendidos utilizando el mecanismo de flotación inducida por microburbujas de aire. El aire se disuelve en el agua, luego se mezcla con la corriente de desechos y se libera de la solución mientras está en contacto con los contaminantes. Se forman burbujas saturadas de aire, se mezclan con el afluente de aguas residuales y se inyectan en la cámara de separación del sistema DAF. El aire disuelto luego sale de la solución, produciendo literalmente millones de burbujas microscópicas. Estas burbujas se adhieren a la materia particulada y luego flotan hacia la superficie donde desnatán mecánicamente y se eliminan del tanque. La eficiencia del DAF depende de parámetros como el pH, la dosis de químicos, el tiempo de contacto y la calidad del afluente (Cheremisinoff, 2019).

- **Microburbujas**

Las microburbujas son burbujas de gas con tamaños típicos entre 10 y 100 μm , ampliamente utilizadas en tratamiento de aguas y aguas residuales. Su pequeño tamaño genera una alta relación área-volumen, lo cual mejora notablemente la eficiencia en la transferencia de masa gas-líquido, la adsorción de sólidos suspendidos y la flotación de contaminantes. Por su lenta velocidad de ascenso, aumentan el tiempo de contacto con partículas, mejorando procesos como la flotación DAF, la difusión de oxígeno en aireación biológica, y la oxidación en tratamientos avanzados con ozono o radicales (He et al., 2023).

- **Lodos**

Los lodos generados en sistemas de flotación por aire disuelto (DAF), llamados también lodos fisicoquímicos, son una mezcla de sólidos suspendidos, flóculos y microburbujas de aire atrapadas, formados durante procesos de tratamiento de aguas mediante coagulación, floculación y flotación. Estos lodos se caracterizan por su alto contenido de sólidos flotantes y gran volumen aparente, debido

a la incorporación de aire y productos químicos (como coagulantes y floculantes). Su densidad es generalmente baja en comparación con los lodos biológicos, lo que permite su rápida separación por flotación en la superficie del tanque DAF (Muñoz et al., 2021)

- **Alcalinidad**

La alcalinidad del agua se refiere a su capacidad para resistir cambios en el pH, actuando como un sistema tampón frente a la adición de ácidos. Esta propiedad es principalmente atribuida a la presencia de iones bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) e hidroxilo (OH^-), los cuales neutralizan el exceso de acidez. Es un parámetro esencial para el control de procesos de tratamiento de agua potable y residual. (Sawyer, C. N. et al., 2003).

- **Acidez**

La acidez en el agua se refiere a su capacidad para neutralizar bases, y está asociada a la presencia de iones hidrógeno libres (H^+), así como de ácidos minerales (como el ácido sulfúrico, nítrico o clorhídrico) y ácidos débiles (como el ácido carbónico). Es un parámetro clave para evaluar la corrosividad del agua y su estabilidad química, siendo comúnmente medida mediante titulaciones con hidróxido de sodio (NaOH) hasta alcanzar un pH predeterminado (AWWA, 2017).

- **Eficiencia de remoción**

Es un indicador que expresa el porcentaje de reducción de un contaminante o parámetro específico (como DBO, DQO, SST, metales pesados, etc.) luego de haber sido sometido a un proceso de tratamiento. Se calcula comparando la concentración del contaminante en el afluente (entrada) y en el efluente (salida) del sistema de tratamiento (Metcalf & Eddy, Inc., 2021).

$$\text{Eficiencia de remoción (\%)} = \frac{C_{\text{afluente}} - C_{\text{efluente}}}{C_{\text{afluente}}} * 100$$

Donde: C afluente = Concentración inicial del contaminante.

C efluente = Concentración final del contaminante.

- **Costos operativos**

Son los gastos recurrentes necesarios para el funcionamiento continuo de una instalación, sistema o proceso, tales como: consumo de energía, insumos químicos, mano de obra, mantenimiento, repuestos, disposición de residuos, entre otros. En plantas de tratamiento de aguas residuales, los costos operativos son fundamentales para evaluar la sostenibilidad económica del sistema a lo largo del tiempo (Metcalf & Eddy, Inc., 2021).

CAPITULO II: FUNDAMENTACIÓN SOBRE EL TEMA ELEGIDO

Con el propósito de reducir los altos costos operativos asociados al consumo de coagulante y floculante, la empresa San Fernando solicitó el planteamiento de un servicio técnico que permitiera optimizar el uso de estos insumos en su sistema de flotación por aire disuelto (DAF).

En respuesta a esta solicitud, el equipo de trabajo y mi persona, diseñó y ejecutó un plan de diagnóstico técnico en el sistema DAF, el cual incluyó como primera etapa la realización de pruebas de jarras. Estas pruebas tuvieron como objetivo evaluar la posibilidad de disminuir las dosis de coagulante y floculante, asegurando al mismo tiempo una adecuada eficiencia de remoción de sólidos y materia orgánica.

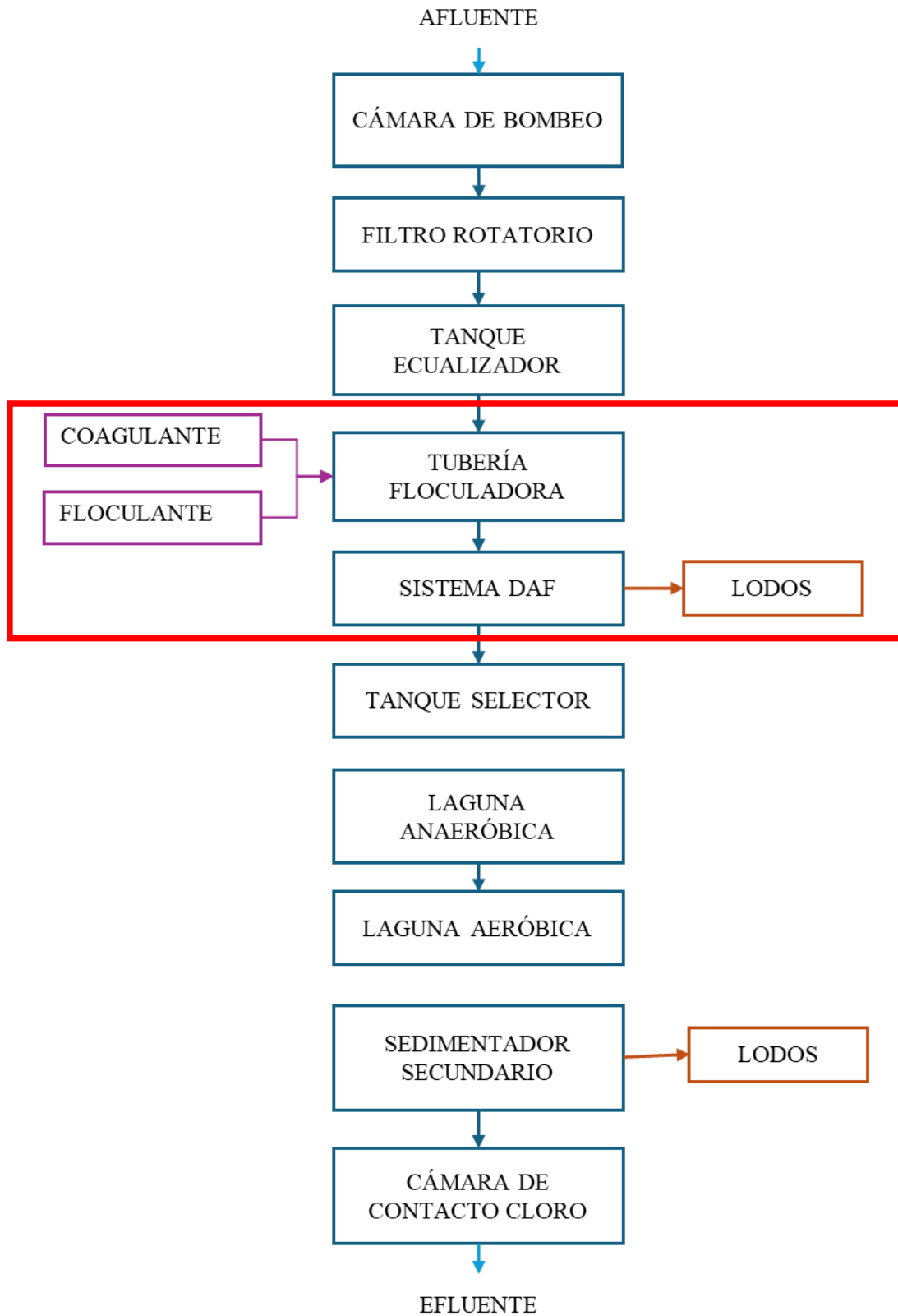
Tras el análisis de los resultados en laboratorio, se seleccionaron cinco condiciones de tratamiento para ser replicadas a escala real en la planta, permitiendo observar el comportamiento del sistema en cuanto a la remoción de DBO, DQO, SST y aceites y grasas.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis comparativo del impacto económico de cada condición aplicada en campo, y se elaboró un informe técnico detallado con conclusiones y recomendaciones enfocadas en mejorar la eficiencia del proceso y reducir el consumo de productos químicos.

2.1. DIAGRAMA DE BLOQUES

En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales de la empresa San Fernando – Huaral, donde se puede observar que el proceso completo consta de tres etapas: pretratamiento, tratamiento primario (físicoquímico) y tratamiento secundario (biológico). Para el presente informe nos enfocaremos en el tratamiento primario, el cual se desarrolla en dos equipos principales: tubería Floculadora, donde se da las reacciones de coagulación – floculación, y el Sistema DAF, en donde se da la clarificación del agua.

Figura 1. Diagrama de bloques de la Planta de Tratamiento de aguas residuales industriales de la empresa San Fernando – Huaral.



Nota. Adaptado de *Memoria Descriptiva de PTARI San Fernando – Huaral*, por Spena Group, 2019. Documento interno.

2.2. PRUEBA DE JARRAS

El ensayo de jarras constituye una técnica de laboratorio frecuentemente empleada para replicar en condiciones controladas los procesos de coagulación y floculación, con el propósito de ajustar y mejorar su rendimiento en sistemas reales de tratamiento de agua y efluentes. Consiste en la preparación de varias muestras de agua en vasos de precipitado (jarras), a las cuales se les aplica distintas dosis de coagulantes y floculantes bajo condiciones controladas de agitación rápida, lenta y sedimentación. Esta técnica permite establecer la dosis óptima de productos químicos, así como el pH ideal y el tipo de reactivo más eficaz para mejorar la remoción de turbidez, SST, aceites, grasas y otros contaminantes.

En el contexto de sistemas de flotación por aire disuelto (DAF), la prueba de jarras permite predecir la calidad del flóculo formado y su comportamiento frente a la flotación, contribuyendo significativamente a la eficiencia del proceso. Además, esta herramienta es fundamental para reducir costos operativos, minimizar el uso excesivo de reactivos y asegurar el cumplimiento de los parámetros de vertimiento.

En la siguiente figura se muestra un floculador portátil de 4 ensayos para realizar pruebas de jarras en campo (Figura 2).

Figura 2. Floculador portátil para prueba de jarras.



Nota. Tomado de *Catálogo técnico de sistemas de tratamiento de aguas residuales*, por Spena Group, 2016. Documento interno.

2.3. TRATAMIENTO FÍSICOQUÍMICO: COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN

La coagulación y floculación conforman un proceso en el cual las partículas presentes en el agua se agrupan formando agregados conocidos como flóculos.

Este tratamiento se implementa con los siguientes fines:

- Eliminar la turbiedad, ya sea de origen orgánico o inorgánico.

- Reducir tanto el color aparente como el verdadero del agua.
- Suprimir compuestos responsables de sabores y olores desagradables, así como residuos químicos suspendidos.
- Reducir la presencia de microorganismos, como bacterias, virus y otros agentes patógenos que pueden ser eliminados mediante métodos de separación física.

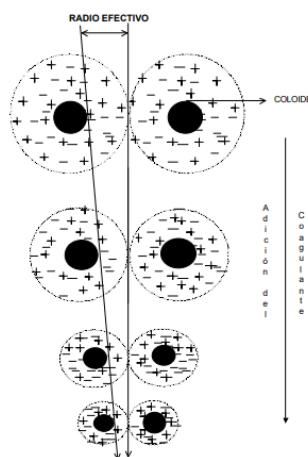
2.3.1. Coagulación:

La coagulación tiene como propósito fundamental desestabilizar las partículas coloidales suspendidas en el agua. Este proceso tiene lugar cuando se eliminan las fuerzas eléctricas que impiden la unión de las partículas, mediante la adición de coagulantes y la aplicación de energía mecánica por agitación.

Una vez desestabilizadas, estas partículas tienden a unirse entre sí, facilitando su agrupación y posterior remoción. Esto no solo permite una reducción significativa de los sólidos suspendidos, sino que también mejora la claridad del agua y disminuye la presencia de materia orgánica y microorganismos.

La Figura 3 ilustra cómo, mediante la adición del coagulante, se neutralizan las cargas eléctricas en la superficie de los coloides, lo cual permite que se adhieran entre sí, dando paso a la formación de flóculos más fácilmente separables.

Figura 3. Coagulación



Nota. Tomado de *Tratamiento de Agua: Coagulación Floculación*, por Andía, 2010, Lima, Perú.

Los coagulantes actúan eliminando la estabilidad de las partículas suspendidas en el agua, las cuales suelen presentar una carga eléctrica negativa. Esto se logra mediante la neutralización de dichas cargas coloidales, utilizando compuestos de carga positiva (Diaz Claros, 2014). Como resultado, se genera el colapso de la “capa iónica” que rodea a los coloides, permitiendo su agrupación (Andía, 2010).

Coagulantes: Son compuestos químicos que, al añadirse al agua, reaccionan con los componentes presentes formando un precipitado voluminoso y con gran capacidad de adsorción, compuesto principalmente por el hidróxido metálico del coagulante introducido.

Entre los agentes coagulantes más empleados en el tratamiento de aguas para lograr la desestabilización de partículas y la generación de flóculos se encuentran:

- ✓ Sulfato de aluminio.
- ✓ Cloruro Férrico.

Las sales de aluminio y de hierro son los coagulantes más frecuentemente utilizados en el tratamiento de aguas. Estas sustancias reaccionan con la alcalinidad presente en el agua, produciendo hidróxidos metálicos —de aluminio o de hierro— que no son solubles, lo que da lugar a la formación de sólidos precipitados.

2.3.2. Flocculación:

Es la etapa que sigue a la coagulación y corresponde a la segunda fase de mezcla, caracterizada por una agitación más suave. Su finalidad es promover el contacto entre los flóculos ya formados, favoreciendo así el aumento de su tamaño y densidad, lo que facilita su posterior separación mediante procesos como la flotación.

Durante esta fase, los flóculos, inicialmente pequeños, comienzan a agruparse y formar estructuras mayores que pueden sedimentarse de manera más eficiente. La agitación debe mantenerse en niveles controlados: lo suficientemente baja como para generar diferencias de velocidad dentro del flujo sin romper los flóculos, ya que una mezcla excesiva podría desintegrarlos, incluso si el tiempo de agitación se encuentra dentro del rango adecuado para la flocculación.

En la figura 4 se muestra como el floculante actúa uniendo las partículas coloidales previamente agrupadas, formando estructuras de mayor tamaño y peso, lo que facilita su separación por sedimentación o flotación.

Figura 4. Flocculación.



Nota. Tomado de *Tratamiento de Agua: Coagulación Flocculación*, por Andía, 2010, Lima, Perú.

La floculación mejora cuando se aplica una agitación moderada, la cual permite que los flóculos se unan de forma progresiva. Si la intensidad de la mezcla es excesiva, estos aglomerados pueden romperse, y es poco probable que vuelvan a alcanzar el tamaño y la consistencia necesarios para una remoción eficiente. Además de incrementar el volumen de los flóculos, este proceso también contribuye a aumentar su masa.

La floculación puede optimizarse mediante la incorporación de agentes floculantes.

Floculantes utilizados: Los floculantes son sustancias poliméricas, también conocidas como polielectrolitos, caracterizadas por su elevado peso molecular. Se componen de largas cadenas de monómeros repetitivos, y son solubles en agua. Estas moléculas orgánicas tienen la capacidad de atraer y unir partículas finas, favoreciendo la formación de flóculos de mayor tamaño y estabilidad.

- ✓ Aniónicos.
- ✓ Neutros o no iónicos.
- ✓ Catiónicos.

2.3.3. Factores que afectan el proceso de coagulación - floculación:

Se debe tomar en cuenta los siguientes factores con la finalidad de tener un proceso de coagulación – floculación óptima:

pH: El pH representa el nivel de acidez o alcalinidad de una solución, y se determina a partir de la concentración de iones hidrógeno presentes en ella.: $\text{pH} = -\log\{\text{H}^+\}$

El pH es el factor más crucial para considerar durante el proceso de coagulación - floculación. Cada tipo de agua presenta un intervalo de pH específico en el que la coagulación es más eficiente, lo cual está determinado por su alcalinidad y composición iónica. Este intervalo puede variar en función del coagulante empleado y las propiedades del agua a tratar. Cuando la coagulación sucede fuera de este rango ideal, la solubilidad del reactivo disminuye, lo que implica un aumento en la dosis necesaria y un tiempo más prolongado para la formación del flóculo. (Dominguez Amorocho, 2010).

En procesos de coagulación, las sales de aluminio presentan un desempeño más eficaz dentro de un intervalo de pH que va de 6.5 a 8.0. En el caso de los compuestos férricos, su efectividad se encuentra en un rango más amplio, comprendido entre 5.5 y 8.5 unidades de pH. (Andía, 2010).

Turbiedad: método indirecto utilizado para estimar la cantidad de partículas suspendidas en un líquido, basado en el análisis de la dispersión de la luz al atravesar la muestra. Este fenómeno depende de la cantidad, el tamaño y la forma de las partículas presentes.

En aguas superficiales, la turbidez suele originarse por la presencia de lodos con partículas finas de sílice, cuyas dimensiones oscilan entre 0.2 y 5 μm . Estas partículas pueden ser removidas eficientemente mediante coagulación, siempre que el pH se mantenga dentro de los valores óptimos

para el proceso. Según las variaciones en la cantidad de sólidos presentes, es posible establecer las siguientes estimaciones:

- ✓ Para cada nivel de turbidez inicial, existe una cantidad determinada de coagulante que permite alcanzar la menor turbidez remanente posible, identificándose, así como la dosis óptima.
- ✓ Cuando los niveles de turbidez son elevados, la coagulación se ve favorecida, ya que la alta concentración de partículas incrementa la probabilidad de colisión entre ellas, permitiendo una buena eficiencia sin necesidad de grandes dosis de coagulante. En cambio, en condiciones de baja turbidez, el proceso se complica debido a la menor frecuencia de encuentros entre partículas, lo que puede requerir una dosis igual o incluso superior a la empleada en aguas con mayor turbidez.

Sales disueltas: Las sales presentes en el agua tienen los siguientes efectos sobre los procesos de coagulación y floculación:

- ✓ Modifican las condiciones ideales de pH para el proceso.
- ✓ Modifican la cantidad óptima de coagulante que debe aplicarse.
- ✓ Afectan la cantidad de coagulante requerido.

Temperatura del agua: Una variación de tan solo 1 °C en la temperatura del agua puede generar diferencias en la densidad, formando gradientes que afectan la uniformidad del fluido. Cuando la temperatura se incrementa, se altera la energía cinética de las partículas suspendidas, lo que puede ralentizar las reacciones implicadas en la coagulación. Por ello, a temperaturas más altas, este proceso tiende a ser menos eficiente y más lento.

De igual forma, una reducción en la temperatura del agua (bajas temperaturas) resulta en un aumento de su viscosidad, lo que genera complicaciones en la sedimentación de un floc.

Tipo y Dosis de coagulante y floculante utilizado: La cantidad de coagulante y floculante utilizados tienen un impacto directo en la eficiencia de la coagulación de la siguiente manera:

Una cantidad insuficiente de coagulante no neutraliza completamente la carga de las partículas coloidales, generando una mínima formación de flóculos y, por lo tanto, una alta turbidez residual.

- ✓ Una cantidad excesiva de coagulante provoca la inversión de la carga de las partículas coloidales, lo que genera una gran cantidad de micro flóculos de tamaño muy pequeño con velocidades de sedimentación muy bajas, lo que también produce una turbidez residual elevada.
- ✓ La selección de los productos químicos y la dosificación más adecuada se establece a partir de los resultados obtenidos en las pruebas de jarras.
- ✓ La elección de los productos químicos y sus respectivas dosis influye significativamente en la calidad del agua clarificada, así como en el rendimiento del sistema DAF.

Condiciones de Mezcla: El grado de mezcla aplicado al incorporar los químicos en el agua influye directamente en la efectividad del tratamiento. Si se generan turbulencias desiguales, el coagulante puede distribuirse de forma no homogénea, dando lugar a zonas con exceso del reactivo y otras con deficiencia o ausencia total. Por ello, es esencial mantener una mezcla vigorosa y equilibrada en toda la masa de agua, lo que garantiza una adecuada dispersión del coagulante y facilita la neutralización de las cargas superficiales de las partículas.

En el tratamiento mediante coagulación y floculación, la incorporación de los productos químicos se realiza en dos fases diferenciadas. La primera, denominada mezcla rápida, consiste en una agitación intensa de corta duración (generalmente no superior a 60 segundos), cuyo propósito es asegurar una distribución uniforme del coagulante en toda la masa de agua a tratar. Posteriormente, en una segunda etapa, se reduce la velocidad de agitación con el objetivo de permitir la formación y crecimiento de microfloculos.

La etapa de mezcla rápida se lleva a cabo para introducir los productos químicos en la zona de alta turbulencia. Una mezcla rápida inadecuada resulta en un aumento en la cantidad de productos químicos utilizados.

Tipos de Mezcla:

- ✓ Mezcladores Mecánicos: Retro mezcladores (agitadores)
- ✓ Mezcladores Hidráulicos: En línea: Tuberías (Tubería Floculadora) y canales.

Remoción de turbiedad: Al incrementar progresivamente la dosis del coagulante en el agua, se pueden identificar distintas etapas del proceso de coagulación, tal como se muestra en la Figura 5.

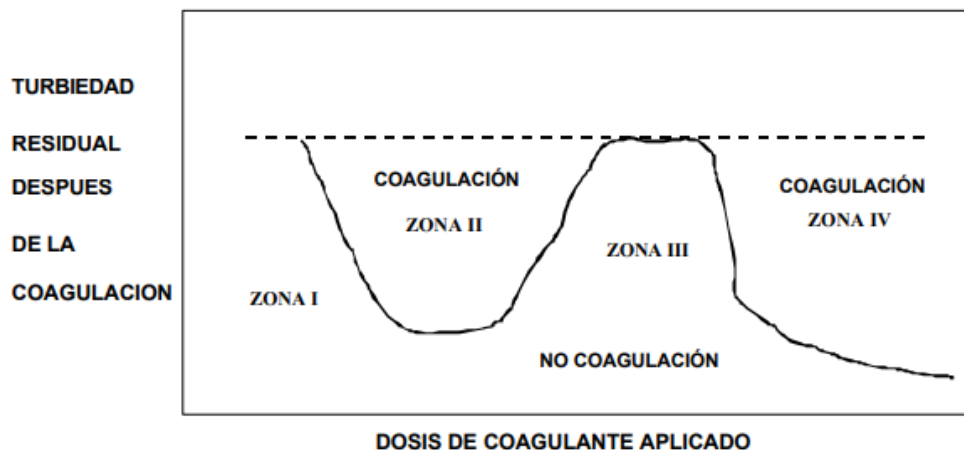
Zona 1: La cantidad de coagulante añadida es insuficiente para lograr la desestabilización de las partículas presentes en el agua, por lo que el proceso de coagulación no se lleva a cabo de manera efectiva.

Zona 2: Al aumentar la dosis del coagulante, se alcanza una etapa en la que los coloides comienzan a agruparse rápidamente, favoreciendo la formación de floculos.

Zona 3: Si la adición de coagulante continúa en exceso, puede generarse una sobresaturación que provoca la reestabilización de las partículas, reduciendo la eficiencia del proceso de coagulación.

Zona 4: Cuando se incrementa excesivamente la dosis de coagulante, se genera una sobresaturación que provoca una precipitación rápida del reactivo. Este fenómeno produce un arrastre mecánico de las partículas suspendidas responsables de la turbidez, conocido como efecto de barrido, que favorece su eliminación junto con el precipitado. (Andía, 2010).

Figura 5. Diagrama de remoción de turbiedad.



Nota. Tomado de *Tratamiento de Agua: Coagulación Floculación*, por Andía, 2010, Lima, Perú.

2.4. TUBERÍA FLOCULADORA

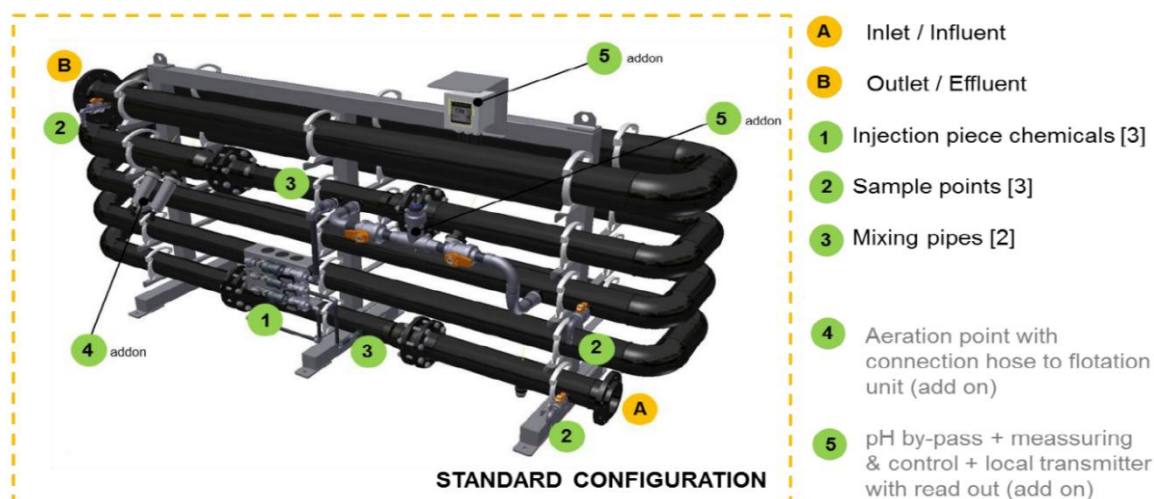
Es una tubería especialmente diseñada en la que se llevan a cabo los procesos de coagulación y floculación. Su dimensionamiento hidráulico permite que el afluente circule a una velocidad controlada, adecuada para mantener las partículas en suspensión y promover una mezcla eficiente, evitando al mismo tiempo la ruptura de los flóculos ya formados.

Entre sus principales ventajas se destacan:

- ✓ **Reducción del espacio requerido**, al sustituir estructuras voluminosas de obra civil por un sistema compacto y lineal.
- ✓ **Mayor control del tiempo de residencia y del gradiente de velocidad**, parámetros críticos para asegurar una floculación efectiva.
- ✓ **Optimización en el uso de productos químicos**, gracias a una mejor interacción entre las partículas y los reactivos dosificados.

La figura 6 muestra la tubería Floculadora con sus partes. En el número 1 se ubica los puntos de inyección de químicos: neutralizante, coagulante y floculante, en el número 2 se ubica los puntos muestreadores, en el número 3 están ubicados los mixers estáticos, en el número 4 se ubican los puntos de aireación y en el número 5 se ubican el punto del sensor de pH en línea que va conectado a su controlador.

Figura 6. Tubería Floculadora y sus partes.



Nota. Tomado de *Catálogo técnico de sistemas de tratamiento de aguas residuales*, por Spena Group, 2016. Documento interno.

2.5. SISTEMA DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO (DAF)

El sistema de flotación por aire disuelto (DAF por sus siglas en inglés) es uno de los métodos antiguos para remover de forma directa sólidos, aceites y grasas, y materiales fibrosos de aguas residuales; y de forma indirecta DBO₅ y DQO.

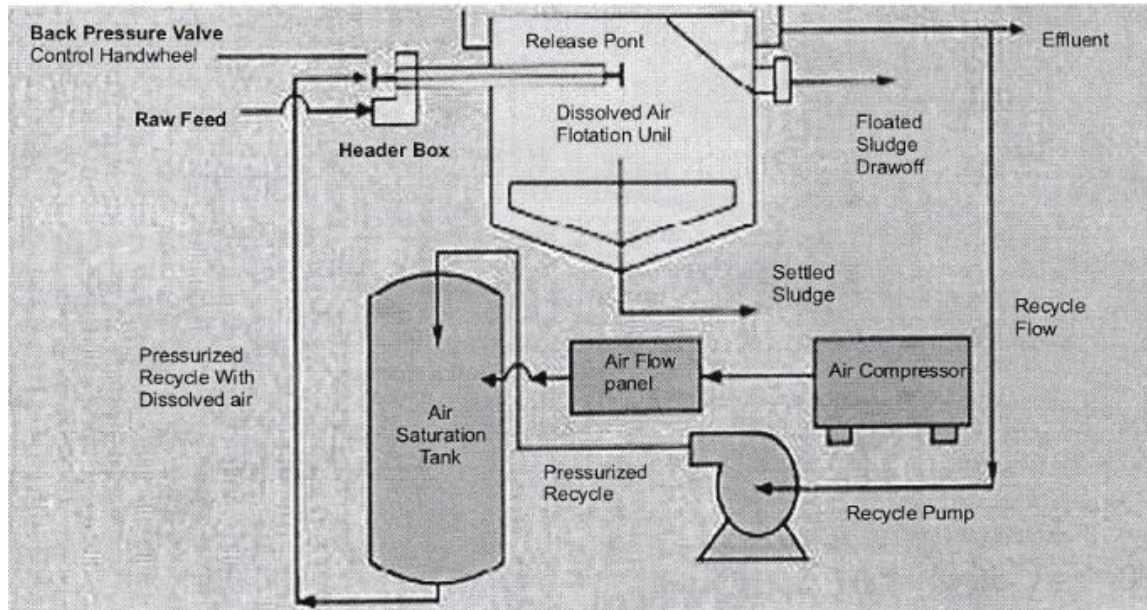
En el sistema DAF se forman microburbujas al introducir de forma controlada en la celda de flotación un flujo de agua saturada con aire a alta presión (5 – 7 bar). La saturación del agua con el aire se da en un tanque de presurización o tanque de saturación, que está conectado al equipo que inyectará aire al sistema (compresor de aire o inyector de aire). El afluente que está en el saturador es liberado a través de una válvula de reducción de presión a la celda de flotación. Debido al cambio brusco de presión, se liberan pequeñas burbujas (20 µm a 100 µm de diámetro) que se adhieren a las partículas suspendidas de floc, formando un aglomerado partícula-burbuja con una densidad menor a la del agua, haciendo posible el ascenso hacia la superficie del tanque de flotación y se aglomeran en forma de lodo flotante para luego ser removidos continuamente por un sistema de raspado presente en el flotador y evacuadas hacia otro tanque – tanque de lodo. El agua clarificada puede separarse cerca del fondo del tanque.

Con este proceso se puede lograr una remoción de hasta el 99% de sólidos suspendidos, aceites y grasas dependiendo del líquido a tratar. (Cheremisinoff, 2019)

2.5.1. Diagrama de flujo del proceso DAF.

En la figura 7 se muestra el diagrama de flujo del sistema DAF el cual tiene bomba de recirculación, presurizando solo se el flujo de recirculación. El flujo presurizado se mezcla con el afluente antes de ser liberado al tanque de flotación. Este tipo de sistema es con el que trabaja la PTARI de la avícola San Fernando – Huaral.

Figura 7. Diagrama de flujo de un proceso DAF



Nota. Tomado de *Proceso de flotación por aire disuelto en el tratamiento de agua residual de bombeo en la industria de harina de pescado*, por Salas Colotta, 2003, Lima, Perú.

Por lo menos se pueden distinguir 4 etapas en un sistema DAF:

- Disolución del aire en el agua, debido a las diferencias de presiones entre la presión de descarga en la bomba de recirculación de agua y la presión del aire. **La presión del aire debe ser ligeramente mayor que la del agua**, para que el aire pueda entrar al saturador y mezclarse con el agua presurizada. El diferencial de presión debe ser **mayor o igual a 0.5 bar**.
- Generación de burbujas, debido a las diferencias de presiones: presión relativa y de liberación de la solución aire - agua.
- Contacto y unión entre las burbujas y las partículas floc.
- Ascenso de la unión aire/partícula en el tanque de flotación.

2.5.2. Componentes básicos de un Sistema DAF.

- a. Compresor de aire.
- b. Bomba de recirculación.
- c. Tanque de presurización o tanque de saturación (para conseguir el contacto aire-agua).
- d. Tanque de flotación.

2.5.3. Variables operativas de un Sistema DAF

Las variables operativas que influyen directamente en la eficiencia del sistema DAF son:

- a. **Relación aire – sólidos (A/S):** Es un parámetro dominante en la velocidad de ascenso de la unión aire/partícula. Si el aire es insuficiente se genera pocas microburbujas para enfrentarse

con los sólidos suspendidos entrantes, entonces una cantidad de estos sólidos estará presente en el efluente tratado.

El rango óptimo de la relación A/S debe estar entre 0.02 – 0.06 Kg aire/Kg sólidos. Esta relación se calcula de la siguiente manera: $A/S = M (\text{aire disuelto}) / M (\text{sólidos suspendidos})$

Donde: M (aire disuelto): Masa de aire disuelto (Kg/día).

M (sólidos suspendidos): Masa de sólidos suspendidos (Kg/día).

Calculamos la masa de aire disuelto: $M (\text{aire disuelto}) = C (\text{aire disuelto}) * Q (\text{recirculado})$

Donde: C (aire disuelto): Concentración de aire disuelto en agua a presión del saturador (g/m^3).

Q (recirculado): Caudal de agua recirculada ($\text{m}^3/\text{día}$).

Para calcular la concentración de aire disuelto – C (aire disuelto) – usaremos la ley de Henry, la cual nos dice que la cantidad de aire que puede disolverse en el agua aumenta con la presión y disminuye con la temperatura. Para calcular esta concentración usaremos la siguiente fórmula:

$$C (\text{aire disuelto}) = K * P$$

Donde: C (aire disuelto): Concentración de aire disuelto en agua a presión del saturador (g/m^3).

K: Constante de Henry ($\text{mol}/\text{L} * \text{atm}$); para el caso del aire trabajaremos con las constantes del N_2 y $\text{O}_2 \rightarrow K_{\text{O}_2} = 1.3 * 10^{-3} / K_{\text{N}_2} = 6.3 * 10^{-4}$ a 20°C

P: Presión parcial del gas; presión del saturador.

Por ejemplo, si la presión de trabajo del saturador es de 5 bar (4.93 atm); la concentración de aire disuelto se calcula de la siguiente manera: $C (\text{aire disuelto}) = K * P$

$$C (\text{aire disuelto}) = [(1.3 * 10^{-3} * 0.21) \text{ g}/(\text{L} * \text{atm}) + (6.3 * 10^{-4} * 0.79) \text{ g}/(\text{L} * \text{atm})] * 4.93 \text{ atm}$$

$$C (\text{aire disuelto}) = 0.11176 \text{ g}/\text{L} * 1000 \text{ mg}/\text{g}$$

$$C (\text{aire disuelto}) = 111.76 \text{ mg}/\text{L}$$

Calculamos la masa de sólidos suspendidos: $M (\text{sólidos suspendidos}) = SST * Q_{\text{afluente}}$

Donde: SST: Concentración de sólidos suspendidos (g/m^3)

Q afluente: Caudal afluente ($\text{m}^3/\text{día}$)

b. Presión aplicada al tanque de saturación: Es la presión a la que se somete el agua recirculada con aire en el tanque de saturación para que el aire se disuelva adecuadamente en el agua. Los valores típicos para la presión en el tanque de saturación son de 70 a 100 psi, valores menores a 45 psi aumentan las dificultades para alcanzar la saturación completa, por ende, no se

logra disolver suficiente aire, reduciendo así la eficiencia en el sistema de flotación. Valores muy altos de presión incrementan los costos energéticos y riesgos de sobrepresión.

c. **Relación de reciclo:** La relación de reciclo es la razón:

$$R = Q \text{ (alimento al tanque de saturación)} / Q \text{ (agua residual alimentada)}$$

Normalmente la razón de reciclo va desde el 10% al 50%, sin embargo, esta relación depende en gran parte de las condiciones específicas de operación, necesarias para tener una adecuada eficiencia en el proceso de flotación, siendo más común trabajar en el rango de **15% a 30%**. Una relación baja genera pocas microburbujas, mientras que una relación alta incrementa el consumo de energía.

d. **Relación aire/agua (A/W):** Es la proporción entre el caudal de aire inyectado y el caudal de agua recirculada en el sistema de saturación. El rango recomendado de trabajo es de 0.02 – 0.06 m³ aire/m³ agua.

Controlar esta relación permite formar microburbujas del tamaño adecuado (<100 μm). Relación baja: pocas burbujas; relación alta: burbujas grandes y turbulencia.

$$A/Q = Q \text{ (aire)} / Q \text{ (agua recirculada)}$$

Donde: Q aire: Caudal de aire (m³/h).

Q agua recirculada: Caudal de agua recirculada (m³/h).

e. **Tiempo de retención hidráulico (TRH) en el tanque de flotación:** Es el tiempo que permanece el agua residual dentro del tanque de flotación para permitir que las partículas adheridas al aire floten a la superficie. El TRH recomendado es de 20 – 30 minutos.

Un TRH demasiado corto impide que las partículas alcancen la superficie, mientras que uno muy largo reduce la capacidad de tratamiento y aumenta el volumen del tanque.

CAPITULO III: APOORTE Y DESARROLLO DE EXPERIENCIA

DESEMPEÑO PROFESIONAL

La ingeniería química es una de las profesiones con más relevancia dentro de la industria de procesos debido a la diversa aplicación de sus principios teóricos sobre termodinámica, mecánica de fluidos, balance de materia, física, diseño de plantas, operaciones unitarias, entre otros. Las habilidades blandas y los conocimientos adquiridos durante la formación profesional en la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo han sido de gran base para desempeñarme como ingeniero de procesos dentro de la industria principalmente en el campo de tratamiento de aguas, proporcionándome las herramientas necesarias para la identificación de problemas y para la correcta toma de decisiones para solucionar y minimizar dichos eventos dentro del proceso. Por otro lado, la correcta aplicación de las bases teóricas aprendidas en la universidad me ha permitido aplicar mejoras tanto para una mejor eficiencia del proceso, obtener una mejor calidad del agua tratada y minimizar los riesgos y la concurrencia de eventos que afectan el óptimo desarrollo de la operación.

Durante mi desempeño como ingeniero de procesos en la empresa SPENA GROUP he sido partícipe de resoluciones de muchos problemas operativos y de procesos en las diferentes plantas de tratamiento que se tienen a nivel nacional e internacional, los cuales han tenido distintas causas raíz, así como de la optimización de estos. En esta oportunidad el presente informe se centrará en la mejora del consumo de coagulante y floculante en el Sistema de Aire Disuelto de la planta de tratamiento de la empresa San Fernando ubicada en Huaral.

3.1. METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN EN EL USO DE COAGULANTES Y FLOCULANTES EN EL SISTEMA DAF.

3.1.1. Prueba de Jarras

Se realizó prueba de jarras el día 16/05/2025 a la muestra recolectada de la salida del tanque ecualizador (efluente que ingresa al tratamiento físico químico DAF). En la prueba de jarras se usó el coagulante **Sulfato férrico** con composición entre 39.4 - 48.3% (según ficha técnica), considerando para los cálculos **40%** y con densidad entre 1.45 – 1.67 g/mL (según ficha técnica) considerando para los cálculos **1.56 g/mL** y el polímero floculante Poliacrilamida aniónico preparado al 0.3% (3 kg de polímero en 1 m³ agua), ambos químicos son los que se usan actualmente en planta.

La capacidad de tratamiento del DAF oscila entre 120 – 140 m³/h, y para esta capacidad la dosificación de coagulante en planta antes de iniciar la prueba de jarras fue de 42 L/h, mientras que la dosificación de floculante al 0.3% fue de 160 L/h según datos del supervisor ya que la bomba de floculante no tiene como medir su caudal en planta, y tampoco tiene un lector de flujo.

Con las dosificaciones de químicos descritos líneas arriba la turbidez a la salida del DAF tuvo una lectura de 19.92 NTU.

En la tabla 1 se muestra la turbidez de ingreso y salida del efluente en el sistema DAF, mientras que en la tabla 2 se muestra las dosificaciones de coagulante y floculante utilizados en las pruebas de jarras realizadas en campo.

Tabla 1

Turbidez del efluente en el tratamiento DAF en condiciones actuales de la planta.

Turbidez ingreso	Turbidez salida	% Remoción
618	19.92	96.77%

Nota. Elaboración propia.

Tabla 2

Dosis de coagulante y floculante utilizados en las pruebas de jarras.

Nº de ensayo	Caudal de tratamiento	Dosis coagulante mL/L	Dosis coagulante ppm	Dosis floculante mL/L	Dosis floculante ppm
1	130	0.32	199.6	1.18	3.54
2	130	0.20	124.8	1.00	3.00
3	130	0.25	156.0	1.00	3.00
4	130	0.18	112.3	1.00	3.00
5	130	0.10	62.4	1.00	3.00
6	130	0.20	124.8	0.90	2.70
7	130	0.20	124.8	0.80	2.40
8	130	0.20	124.8	0.70	2.10
9	130	0.20	124.8	0.50	1.50

Nota. Elaboración propia.

El ensayo 1 representa las condiciones de operación en las que se encontró la planta.

Se realizaron 9 ensayos empezando con una **dosis de coagulante de 199.6 ppm** (0.32 mL/L) y una **dosis de floculante de 3.54 ppm** (1.20 mL/L) para luego ir disminuyendo paulatinamente las dosis. Se midió la turbidez inicial del efluente crudo (efluente de ingreso al sistema DAF) y la turbidez final de cada ensayo y se calculó la eficiencia de remoción en base a la turbidez, en la tabla 3 se muestran los resultados.

Tabla 3

Eficiencia en la remoción respecto a la turbidez del afluente en cada prueba de jarras.

N° de ensayo	Dosis coagulante ppm	Dosis floculante ppm	Turbidez inicial	Turbidez final	Eficiencia %
1	199.6	3.54	618	19.92	96.77%
2	124.8	3.00	618	25.21	95.93%
3	156.0	3.00	618	35.51	94.74%
4	112.3	3.00	618	39.70	93.57%
5	62.4	3.00	618	47.53	92.31%
6	124.8	2.70	618	34.91	94.35%
7	124.8	2.40	618	34.36	94.44%
8	124.8	2.10	618	26.27	95.75%
9	124.8	1.50	618	25.62	95.85%

Nota. Elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos en las nueve pruebas de jarras realizadas (ver Tabla 3), se seleccionaron cinco condiciones de dosificación, que presentaron eficiencias de remoción de turbidez superiores al 93%, con dosis moderadas de coagulante y floculante. Estas condiciones se consideraron óptimas para ser implementadas en el proceso, mediante la modificación de los caudales de las bombas dosificadoras correspondientes. Se consideró también la condición actual en la que se encontró operando la planta. El registro fotográfico de las pruebas de jarras se encuentra en el Anexo 2 del presente informe.

Las condiciones seleccionadas fueron los ensayos N.º **1, 2, 4, 8 y 9**, que presentan eficiencias de remoción de 96.77%, 95.93%, 93.57%, 95.75% y 95.85% respectivamente. La selección se basó en la eficiencia de remoción, así como en la búsqueda de un equilibrio entre una buena calidad de efluente y un consumo racional de productos químicos.

3.1.2. Validación en campo de las condiciones seleccionadas.

Luego de seleccionar los ensayos N.º 1, 2, 4, 8 y 9 como condiciones óptimas de dosificación de coagulante y floculante, se procedió a implementar cada una de estas configuraciones en el proceso real, ajustando los caudales de las bombas dosificadoras según las dosis establecidas.

Cada configuración fue operada durante un periodo de 40 minutos bajo condiciones controladas, permitiendo la estabilización del sistema. Durante este tiempo, se recolectaron muestras del efluente

tratado para cada ensayo con el fin de evaluar los parámetros críticos de calidad: DBO₅, DQO, SST, aceites y grasas, nitrógeno total Kjeldahl.

El objetivo de esta validación fue comparar las remociones reales de dichos parámetros con los resultados obtenidos en la prueba de jarras, y así determinar la eficiencia del tratamiento en condiciones operativas reales.

Los resultados obtenidos del laboratorio permitirán seleccionar la dosificación más adecuada no solo en términos de remoción de turbidez, sino también considerando la mejora integral del efluente final, con base en parámetros fisicoquímicos clave.

En la tabla 4 se muestra las dosificaciones con las modificaciones de caudal usados en el proceso de los 4 ensayos seleccionados:

Tabla 4

Modificación de los caudales de las bombas dosificadoras para cada ensayo seleccionado en la prueba de jarras.

N° de ensayo	Dosis coagulante ppm	Caudal de la bomba coagulante L/h	Dosis floculante ppm	Caudal de la bomba floculante L/h
1	199.6	42.0	3.54	154
2	124.8	27.5	3.00	140
4	112.3	23.6	3.00	140
8	124.8	27.5	2.10	98
9	124.8	27.5	1.50	70

Nota. Elaboración propia.

El ensayo N° 1 corresponde a las condiciones actuales de operación de la planta, mientras que los ensayos N° 2, 4, 8 y 9 representan condiciones seleccionadas a partir de los resultados de la prueba de jarras, ajustadas al proceso real de la planta.

La calidad de agua obtenida en cada uno de estos ensayos ha sido monitoreadas y caracterizadas en laboratorio para verificar la eficiencia de remoción en cada parámetro evaluado DBO, DQO, SST, A&G. Los resultados de las caracterizaciones realizadas se muestran en la tabla 5.

3.2. RESULTADOS DE LABORATORIO DE LOS ENSAYOS ANALIZADOS.

En la Tabla 5 se presentan los resultados de laboratorio obtenidos para el afluente y el efluente del sistema DAF, correspondientes a las cinco muestras seleccionadas para su evaluación en campo a escala real. Dichos resultados se detallan en el Anexo 1 de este informe.

Tabla 5

Cuadro comparativo de resultados en la eficiencia de remoción de los ensayos N° 1, 2, 4, 8 y 9.

Parámetro	U.M	VMA	A	B	Eficiencia	B1	Eficiencia	B2	Eficiencia	B3	Eficiencia	B4	Eficiencia
DBO	mg/L	500	1602.5	316.6	80%	443.5	72%	464.5	71%	428.5	73%	421.6	74%
DQO	mg/L	1000	3028.2	556.7	82%	767.2	75%	937.0	69%	819.5	73%	780.3	74%
SST	mg/L	500	760.0	17.5	98%	46.0	94%	47.0	94%	29.0	96%	25.0	97%
A&G	mg/L	100	67.1	6.6	90%	8.8	87%	9.6	86%	8.4	87%	8.2	88%
Turbidez	NTU	-	618	19.9	97%	34.9	94%	25.2	96%	26.3	96%	25.62	96%

Nota. Elaboración propia.

Donde:

A: Muestra del afluente crudo, ingreso al sistema DAF.

B: Muestra del ensayo N°1 de la prueba de jarras, salida del sistema DAF.

B1: Muestra del ensayo N°2 de la prueba de jarras, salida del sistema DAF.

B2: Muestra del ensayo N°4 de la prueba de jarras, salida del sistema DAF.

B3: Muestra del ensayo N°8 de la prueba de jarras, salida del sistema DAF.

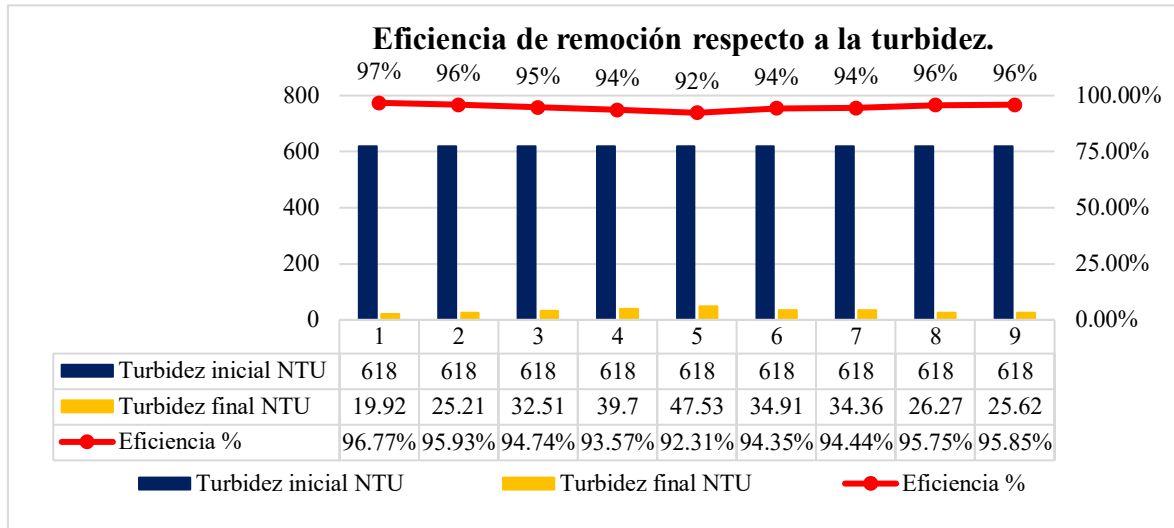
B4: Muestra del ensayo N°9 de la prueba de jarras, salida del sistema DAF.

3.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Con base en los resultados presentados en la Tabla 5, se realiza la siguiente interpretación considerando los parámetros de turbidez, DBO, DQO, SST y aceites y grasas:

Respecto a la turbidez: Todas las configuraciones ensayadas muestran eficiencias de remoción superiores al 93 %, evidenciando que es posible reducir la dosis de coagulante y floculante sin afectar significativamente la calidad del efluente. Ver figura 8.

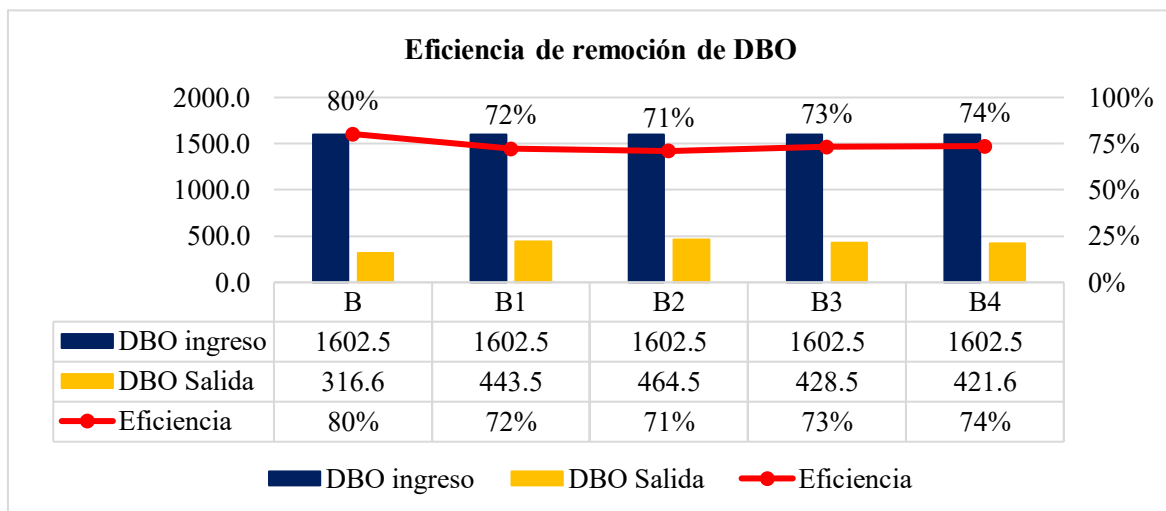
Figura 8. Comparación de la Turbidez Inicial y Final con Eficiencia de Remoción.



Nota. Elaboración propia.

Respecto al DBO: Aunque la disminución de la dosificación química genera ligeras variaciones en la remoción de materia orgánica (entre el 71% y 80%), los valores obtenidos (316.6 ppm – 464.5 ppm) se mantienen dentro de rangos aceptables para un tratamiento primario avanzado. Ver figura 9.

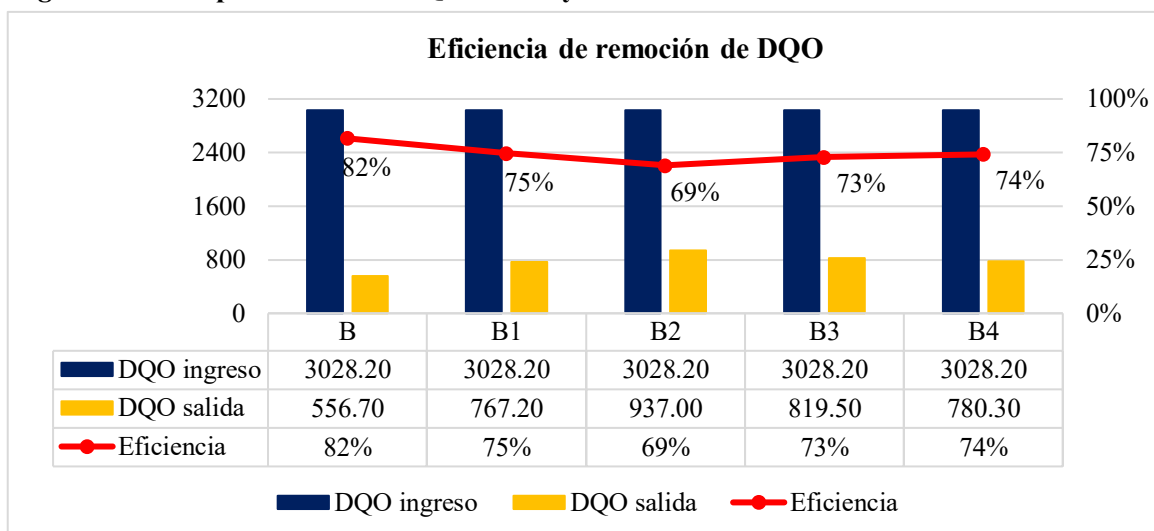
Figura 9. Comparación de la DBO Inicial y Final con Eficiencia de Remoción.



Nota. Elaboración propia.

Respecto al DQO: se caracterizó el efluente a la salida del DAF obteniendo resultados de DQO entre 556.70 y 937.00 mg/L con una eficiencia de remoción entre 69% y 82%, estos resultados se muestran en la Figura 10.

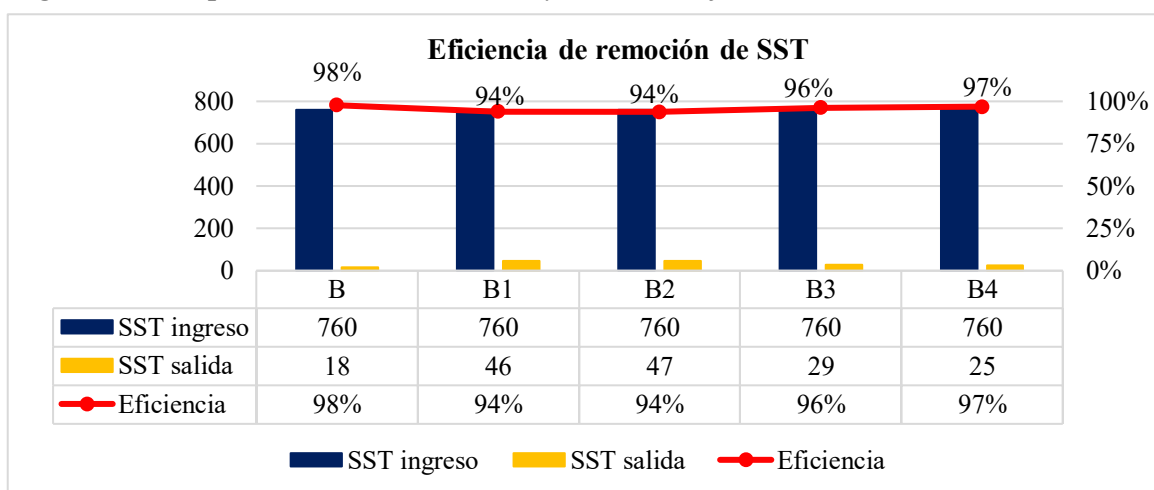
Figura 10. Comparación de la DQO Inicial y Final con Eficiencia de Remoción.



Nota. Elaboración propia.

Respecto al SST: Se observa un alto nivel de remoción, con eficiencias superiores al 94 % en todos los casos, lo que confirma la efectividad del sistema DAF en la separación de sólidos. Ver figura 11.

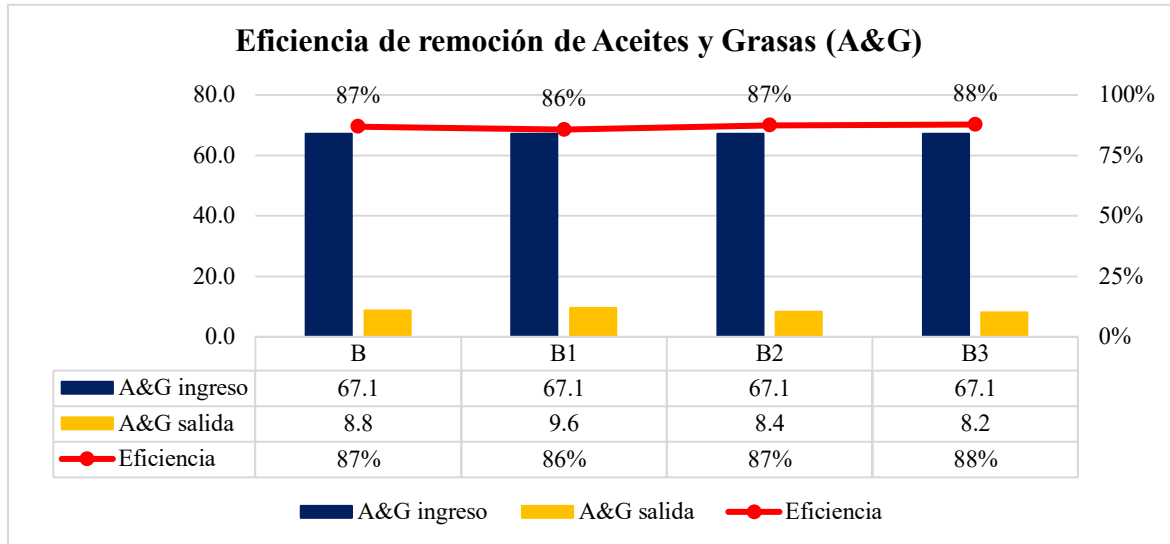
Figura 11. Comparación de los SST Inicial y Final con Eficiencia de Remoción.



Nota. Elaboración propia.

Respecto a A&G: Las eficiencias de remoción se mantienen entre 86 % y 90 %, lo que indica que la optimización de dosis no compromete la separación de compuestos oleosos. Esto se muestra en la figura 12.

Figura 12. Comparación de los A&G Inicial y Final con Eficiencia de Remoción.



Nota. Elaboración propia.

3.4. ANÁLISIS ECONÓMICO

Considerando que el costo por kilogramo de coagulante es de \$0.45 dólares y el costo por kilogramo de floculante es de \$4.80 dólares, en la **Tabla 6** se presenta el detalle del gasto mensual de ambos productos químicos para cada ensayo realizado en campo (B, B1, B2, B3 y B4). Cabe señalar que el costo mensual por kilogramo de coagulante y floculante puede variar en función del proveedor con el que la empresa realice la adquisición.

Tabla 6

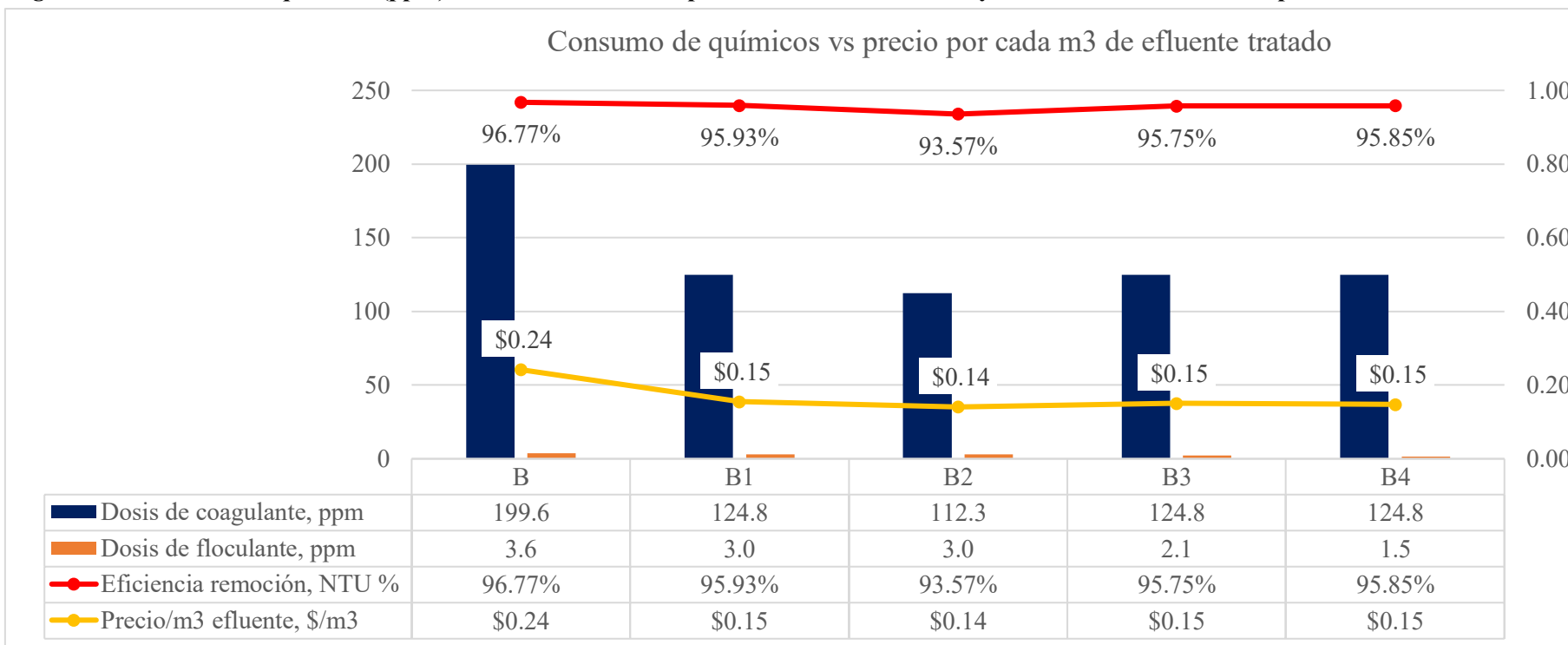
Precio de químicos usados en el proceso DAF (coagulante y floculante) por m³ de agua tratada.

Nº ensayo	Laboratorio	Dosis de coagulante	Dosis de floculante	Consumo coagulante	Precio unitario coag. (*)	Precio/día coagulante	Precio/m3 efluente coag.	Consumo floculante	Precio unitario floc. (*)	Precio/día floculante	Precio/m3 efluente floc	Precio/m3 efluente químicos
		ppm	ppm	Kg/d	\$/Kg	\$/d	\$/m3	Kg/d	\$/Kg	\$/d	\$/m3	\$/m3
1	B	199.6	3.6	1556.88	\$ 0.45	\$ 700.60	\$ 0.22	11.23	\$ 4.80	\$ 53.91	\$ 0.017	\$ 0.24
2	B1	124.8	3.0	973.44	\$ 0.45	\$ 438.05	\$ 0.14	9.36	\$ 4.80	\$ 44.93	\$ 0.014	\$ 0.15
4	B2	112.3	3.0	875.94	\$ 0.45	\$ 394.17	\$ 0.13	9.36	\$ 4.80	\$ 44.93	\$ 0.014	\$ 0.14
8	B3	124.8	2.1	973.44	\$ 0.45	\$ 438.05	\$ 0.14	6.55	\$ 4.80	\$ 31.45	\$ 0.010	\$ 0.15
9	B4	124.8	1.5	973.44	\$ 0.45	\$ 438.05	\$ 0.14	4.68	\$ 4.80	\$ 22.46	\$ 0.007	\$ 0.15

Nota. Elaboración propia.

En la evaluación económica realizada (Tabla 6), el **ensayo B** representa la **condición con la que se encontró operando la planta**, mientras que los **ensayos B1, B2, B3 y B4** corresponden a configuraciones con **caudales de dosificación modificados** para las bombas de coagulante y floculante, según los resultados obtenidos en las pruebas de jarras. Como se observa en la tabla comparativa, el **costo por metro cúbico de efluente tratado en la condición actual (ensayo B) es de \$0.24/m³**. No obstante, se evidencia que bajo las condiciones del **ensayo B2** —el cual mantiene una buena eficiencia en la remoción de parámetros clave como DBO, DQO y SST—, **el costo de tratamiento puede reducirse hasta \$0.14/m³**, representando una mejora significativa en la eficiencia económica del proceso sin comprometer la calidad del efluente tratado. **En la figura 13** se muestra un comparativo de los consumos en ppm de coagulante y floculante, el costo de tratamiento por m³ de efluente tratado y las eficiencias de remoción respecto a la turbidez de cada prueba de jarras realizadas en campo.

Figura 13. Consumo de químicos (ppm), costo de tratamiento por m³ de efluente tratado y eficiencia de remoción respecto a la turbidez.



Nota. Elaboración propia.

En la figura 13 se observa que los ensayos evaluados mostraron que, a medida que se reduce la dosificación de coagulante y floculante, el costo por metro cúbico tratado disminuye significativamente, sin afectar de forma considerable la eficiencia de remoción de turbidez, SST, DBO y DQO.

El ensayo **B (condición inicial)** presentó el mayor consumo químico y, por tanto, el mayor costo de tratamiento:

- **Costo total: \$0.24/m³**
- **Dosis: 199.6 ppm de coagulante y 3.54 ppm de floculante**

En contraste, el **ensayo B2** logró una eficiencia de remoción superior al 93% en todos los parámetros evaluados con un costo total de solo **\$0.14/m³**, empleando:

- **Dosis: 112.3 ppm de coagulante y 3.00 ppm de floculante**

Esto representa un **ahorro del 41.67%** en costos químicos por cada metro cúbico tratado.

La relación entre eficiencia de remoción y costos demuestra que una optimización basada en pruebas de jarras permite lograr una eficiencia técnica y económica sin comprometer la calidad del efluente tratado.

PROYECCIÓN DEL AHORRO ANUAL POR OPTIMIZACIÓN DE DOSIS

Dado que la planta trata un promedio de **130 m³/h** y opera **24 horas al día, 30 días al mes**, se estima:

Volumen mensual tratado:

$$130 \text{ m}^3/\text{h} \times 24 \text{ h/día} \times 30 \text{ días} = 93,600 \text{ m}^3/\text{mes}$$

Costo mensual actual (ensayo B)

$$93,600 \text{ m}^3 \times \$0.24/\text{m}^3 = \$22,464$$

Costo mensual optimizado (ensayo B2)

$$93,600 \text{ m}^3 \times \$0.14/\text{m}^3 = \$13,104$$

Ahorro mensual estimado:

$$\$22,464 - \$13,104 = \$9,360$$

Ahorro anual estimado:

$$\$9,360 \times 12 = \$112,320$$

Este ahorro anual (**\$112,320**) refleja un impacto económico considerable solo por optimizar la dosificación de químicos, sin necesidad de inversiones adicionales en infraestructura. Además, este ajuste puede tener efectos positivos en la reducción de la carga química residual en el lodo generado, mejorando también la gestión de residuos.

CONCLUSIONES

- ✓ Se evidenció que la planta operaba inicialmente con una sobredosificación de químicos, empleando 199.6 ppm de coagulante (sulfato férrico) y 3.54 ppm de floculante (polímero aniónico), lo que implicaba altos costos operativos sin una mejora significativa en la eficiencia de remoción.
- ✓ Se realizó la caracterización del afluente y efluente en cada ensayo realizado a escala real.
- ✓ Se logró mantener eficiencias de remoción de turbidez superiores al 93% con dosificaciones significativamente menores, sin comprometer la calidad del efluente tratado.
- ✓ Se identificó que el costo de tratamiento por m³ de efluente puede reducirse de \$0.24 a \$0.14, lo cual representa una mejora del 41.7% en los costos de insumos químicos, manteniendo niveles aceptables de remoción de DBO, DQO, SST y A&G.
- ✓ La implementación de condiciones óptimas requerirá el ajuste preciso de los caudales de las bombas dosificadoras, lo cual deberá ser validado periódicamente en campo.
- ✓ Actualmente, la dosificación de químicos no está sincronizada con el caudal de tratamiento, lo que genera una variabilidad significativa en la relación entre la dosis aplicada (ppm) y el caudal de efluente tratado (m³/h).

RECOMENDACIONES

- ✓ Monitorear parámetros críticos del afluente y efluente para mantener un seguimiento sistemático de parámetros como turbidez, SST, DBO, DQO y aceites y grasas.
- ✓ Realizar pruebas de jarras al menos una vez al mes o ante cualquier cambio significativo en las características del afluente, para ajustar la dosificación química en tiempo real.
- ✓ Calibrar y controlar las bombas dosificadoras instalando o verificando sistemas de medición de caudal en las bombas dosificadoras, especialmente para el floculante, a fin de mantener dosis precisas y evitar sobredosificación.
- ✓ Automatizar la dosificación de químicos a través de la implementación de un sistema de dosificación automática de coagulante y floculante vinculado al caudalímetro del efluente, a fin de asegurar una dosificación proporcional y constante, reducir la variabilidad operativa y optimizar el consumo de químicos.
- ✓ Capacitar al personal encargado de la operación del sistema DAF en la interpretación de resultados, ajuste de dosificaciones y realización de pruebas de jarras.
- ✓ Evaluar el uso de coagulantes alternativos (por ejemplo, PAC, cloruro férrico, polímeros mixtos), que puedan mejorar aún más la eficiencia y/o reducir costos.

BIBLIOGRAFÍA

- Andía, A. (2010). *Tratamiento de aguas: coagulación y floculación*. Lima, Perú.
- AWWA – American Water Works Association. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed.
- AWWA – American Water Works Association. (2020). *Water treatment: Principles and practices* (3rd ed.). McGraw-Hill Education.
- Bashir, M. J. K., & Aziz, H. A. (2020). Optimization of chemical dosing and hydraulic parameters in DAF systems for wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 12845–12857.
- Binnie, C., Kimber, M., & Smethurst, G. (2019). *Basic Water Treatment* (6th ed.). ICE Publishing.
- Cheremisinoff, N. P. (2019). *Handbook of water and wastewater treatment technology*. CRC Press.
- Dlamini, L. P., Basson, A. K., & Brouckaert, B. M. (2020). Evaluation of floc characteristics during coagulation–floculation using alternative coagulants. *Water SA*, 46(2), 212–219.
- De Nardi, I. R., Fuentes, B., & da Costa, R. H. R. (2018). Sludge characterization and management from dissolved air flotation systems in food industries. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 2621–2627.
- Díaz Claros, M. (2014). *Tratamiento de aguas residuales: fundamentos y aplicaciones*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- González, R. K. (2018). *Aguas residuales: aceites y grasas*. En *Manual de tratamiento de residuos* (pp.-). FOSAC.
- He, Y., Zhang, T., Lv, L., Tang, W., Wang, Y., Zhou, J., & Tang, S. (2023). Application of microbubbles in chemistry, wastewater treatment, medicine, cosmetics, and agriculture: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(6), 3245–3271. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01640-z>
- IWA – International Water Association. (2018). *Best Practices in Physical-Chemical Wastewater Treatment*. IWA Publishing.
- Jiang, J.-Q. (2015). The role of coagulation in water treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*.
- Laboratorio Analytical Laboratory ALAB (2025). Informe de Ensayo N° IE-25-16664. Laboratorio Analytical Laboratory ALAB. Documento interno.
- Metcalf & Eddy. (2021). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2010). *Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM. Límites Máximos Permisibles para Vertimientos de Aguas Residuales Industriales*.

- Ministerio del Ambiente MINAM. (2020). *Evaluación del tratamiento de aguas residuales industriales en el Perú*. Ministerio del Ambiente del Perú.
- Muñoz, J., Muñoz, E., & Flores, J. (2021). *Dissolved Air Flotation: A Review from the Perspective of System Parameters and Uses in Wastewater Treatment*. *Tecnológicas*, 24, 52.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA]. (2013). *Resolución de Consejo Directivo N° 045-2013-OEFA/CD. Aprueban la tipificación de infracciones administrativas y la escala de sanciones aplicables por el incumplimiento de los Límites Máximos Permisibles (LMP)*. Diario Oficial El Peruano.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2023). ¿Qué es el OEFA?
- Ramírez, C., Torres, L., & Díaz, P. (2018). *Evaluación de coagulantes en sistema DAF en industria cárnica*. *Revista Colombiana de Ingeniería Ambiental*, 12(1), 55–66.
- Rubio, J., Rojas, M. V., & Matos, C. (2017). Overview of dissolved air flotation (DAF) for industrial wastewater treatment: Design, operation and optimization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 3890–3900.
- Salas Colotta, C. (2003). *Proceso de flotación por aire disuelto en el tratamiento de agua residual de bombeo en la industria de harina de pescado* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina].
- Sander, R. (2015). Compilation of Henry's Law constants (version 4.0) for water as solvent. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 4399–4981.
- Sánchez, F., & Morales, R. (2021). *Comparación de coagulantes para tratamiento DAF en industria avícola*. *Journal of Environmental Process Engineering*, 8(4), 788–799.
- Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F., (2003). *Chemistry for Environmental Engineering and Science*, 5th ed., McGraw-Hill
- Spellman, F. R. (2020). *Handbook of water and wastewater treatment plant operations* (3rd ed.). CRC Press.
- Spena Group. (2016). *Catálogo técnico de sistemas de tratamiento de aguas residuales* [Catálogo]. Spena Group. Documento interno.
- The Engineering ToolBox. (s.f.). *Solubility of air in water*. Recuperado el día 30 julio 2025 de https://www.engineeringtoolbox.com/air-solubility-water-d_639.html
- UNESCO. (2021). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua*. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- U.S. Environmental Protection Agency. (2001). *Dissolved Air Flotation Theory and Practice*.
- Villegas, J. (2020). *Optimización del consumo de coagulante y floculante en sistema DAF en industria alimentaria*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Water Environment Federation (WEF). (2016). *Pretreatment of Industrial Wastewater. Manual of Practice* No. FD-3. WEF Press.

ANEXOS

ANEXO 1: Resultados de laboratorio.



INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-16664

N° Id.: 0000157725

I.- DATOS DEL CLIENTE Y/O SOLICITANTE

- | | |
|------------------|--|
| 1.- RAZON SOCIAL | : SPENA GROUP S.A.C. |
| 2.- DIRECCIÓN | : AV. ALAMEDA DEL SUR NRO. 300 URB. VILLA MARINA (TAMBIEN 302-CRUCE CON AV VILLA MARINA)
LIMA - LIMA - CHORRILLOS |
| 3.- PROYECTO | : MONITOREO DE AGUAS RESIDUALES |
| 4.- PROCEDENCIA | : SAN FERNANDO |
| 5.- SOLICITANTE | : SPENA GROUP S.A.C. |
| 6.- PRODUCTO | : Agua Residual |

II.- DATOS DEL SERVICIO

- | | |
|----------------------------------|------------------------|
| 1.- ORDEN DE SERVICIO N° | : 0000003011-2025-0000 |
| 2.- FECHA DE EMISIÓN DE INFORME: | : 2025-05-28 |

III.- DATOS DEL ÍTEM DE ENSAYO

- | | |
|----------------------------|---|
| 1.- MUESTREO POR | : MUESTRA Y DATOS PROPORCIONADO POR EL CLIENTE SEGUN CADENA DE CUSTODIA |
| 2.- NÚMERO DE MUESTRAS | : 6 |
| 3.- FECHA DE RECEPCIÓN | : 2025-05-17 |
| 4.- CONDICIÓN DE RECEPCIÓN | : Conservación de la cadena de frío (<= 8°C) / Preservada. |
| 5.- PERÍODO DE ENSAYO | : 2025-05-17 al 2025-05-28 |


Erika Aliaga Ibarra
Jefe de Laboratorio
CIP N° 100391



Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados. No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory. Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Su adulteración o su uso indebido constituye delito contra la fe pública y se regula por las disposiciones civiles y penales en la materia. Pág.1 de 4

SEDE PRINCIPAL
Av. Guardia Chalaca N° 1877,
Barrionuevo, Callao.
Tel.: (011) 713 0750 / 713 0630
Cel: 977 516 676 / 937 111 379

SEDE ZARUMILLA
Prolongación Zarumilla Mz 02 Lt 3,
Barrionuevo, Callao.
Cel.: 977 538 670 / 932 646 460

SEDE AREQUIPA
COOP SIDSUR MZ. E.LT. 9,
Arequipa
Tel.: (054) 816 543
Cel.: 932 646 942

SEDE PIURA
Urb. San Isidro El Estero,
Mz. D3 Lt. 02,
Castillo - Piura
Tel.: (011) 713 4036
Cel.: 919 475 133

SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A.Lt. 29,
Alto Saicamery - Trujillo
Tel.: (011) 713 0530
Cel.: 919 475 133

 www.alab.com.pe

Nota. Tomado de Laboratorio Analytical Laboratory ALAB (2025). Informe de Ensayo N° IE-25-16664. Laboratorio Analytical Laboratory ALAB. Documento interno.

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-16664

N° Id: 0000157725

V.- RESULTADOS

ITEM	1	2	3	4
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-25-41710	M-25-41711	M-25-41712	M-25-41713
CÓDIGO CLIENTE ^(A)	A	B	B1	B2
PRODUCTO ^(A)	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual	Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)	16-05-2025 12:30	16-05-2025 12:50	16-05-2025 15:50	16-05-2025 15:50

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS			
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,8	2,0	1 602,5	316,6	443,5	464,5
Aceites y Grasas (*)	mg/L	1,40	5,00	67,10	6,60	8,80	9,60
Sólidos Suspendidos Totales (*)	mg/L	2,00	5,00	760,00	17,50	46,00	47,00
Nitrogeno Total Kjeldahl ²	mg N/L	0,04	0,10	65,06	33,17	-	-
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	3 028,2	556,7	767,2	937,0

⁽¹⁾ Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<->" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<->" Menor que el L.D.M.

"-": No ensayado

^(A)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

Pág.3 de 4

INFORME DE ENSAYO N°: IE-25-16664

N° Id.: 0000157725

ITEM	5	6
CÓDIGO DE LABORATORIO	M-25-41714	M-25-41715
CÓDIGO CLIENTE ^(A)	B3	B4
PRODUCTO ^(A)	Agua Residual	Agua Residual
SUB PRODUCTO ^(A)	Agua Residual Industrial	Agua Residual Industrial
FECHA y HORA DE MUESTREO ^(A)	16-05-2025 16:40	16-05-2025 17:20

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg/L	0,8	2,0	428,5	421,6
Acetres y Grasas (*)	mg/L	1,40	5,00	8,40	8,20
Sólidos Suspendidos Totales (*)	mg/L	2,00	5,00	29,00	25,00
Nitrogeno Total Kjeldahl ²	mg N/L	0,04	0,10	-	-
Demanda Química de Oxígeno (*)	mg/L	2,0	5,0	819,5	780,3

^(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "-<"- Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "-<"- Menor que el L.D.M.

"-": No ensayado

^(A)Datos proporcionados por el cliente y/o solicitante. El laboratorio no es responsable cuando la información proporcionado por el cliente y/o solicitante pueda afectar la validez de los resultados.

VI.- OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Pág.4 de 4

SEDE PRINCIPAL
Av. García Chacón N° 1877,
Beltranes, Callao.
Tel.: (+51) 713 0756 / 713 0630
Cel.: 977 828 976 / 937 321 379

SEDE ZARUMILLA
Protección Zorobá N° 02 U 3,
Beltranes, Callao.
Cel.: 977 535 675 / 932 646 460

SEDE AREQUIPA
COOP SIDOSUR N° 6 U 5,
Arequipa.
Tel.: (+054) 616 943
Cel.: 932 646 942

SEDE PIURA
Urb. San Isidro El Estero
Mz. D5 U 32,
Castillo - Piura
Tel.: (+01) 713 0636
Cel.: 919 475 133

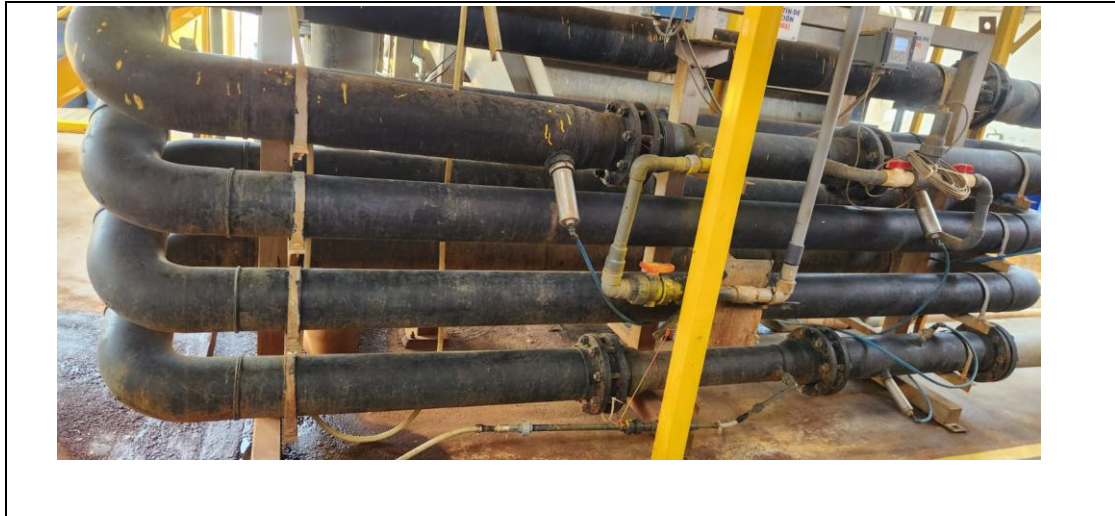
SEDE TRUJILLO
Urb. Sol de Trujillo Mz. A L1 20,
Alo Salaverry - Trujillo
Tel.: (+01) 713 0535
Cel.: 929 475 233

www.alab.com.pe

Nota. Tomado de Laboratorio Analytical Laboratory ALAB (2025). Informe de Ensayo N° IE-25-16664. Laboratorio Analytical Laboratory ALAB. Documento interno.

ANEXO 2: Registro fotográfico.

Figura 14. Tubería Floculadora.



Nota. Elaboración propia.

Figura 15. Lectura en el medidor de flujo en el Sistema DAF.



Nota. Elaboración propia.

Figura 16. Lectura de pH y turbidez del afluente



Nota. Elaboración propia.