

UNIVERSIDAD DE HUANUCO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERIA AMBIENTAL



TESIS

“Comparación de la eficacia de Azolla filiculoides Y Lemna minor en humedal de flujo superficial para reducir la contaminación orgánica de agua residual del PTAR de Esmeralda Corp, Lima, 2024”

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA AMBIENTAL

AUTORA: Iglesias Chaupis, Lesly Rubhy

ASESOR: Cajahuanca Torres, Raúl

HUÁNUCO – PERÚ

2026

U



UDH
UNIVERSIDAD DE HUANCAYO
<http://www.udh.edu.pe>

TIPO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:

- Tesis (X)
- Trabajo de Suficiencia Profesional()
- Trabajo de Investigación ()
- Trabajo Académico ()

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: Contaminación Ambiental

AÑO DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN (2020)

CAMPO DE CONOCIMIENTO OCDE:

Área: Ingeniería, Tecnología

Sub área: Ingeniería ambiental

Disciplina: Ingeniería ambiental y geológica

DATOS DEL PROGRAMA:

Nombre del Grado/Título a recibir: Título Profesional de Ingeniera ambiental

Código del Programa: P09

Tipo de Financiamiento:

- Propio (X)
- UDH ()
- Fondos Concursables ()

DATOS DEL AUTOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 74071173

DATOS DEL ASESOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 22511841

Grado/Título: Maestro en gestión pública

Código ORCID: 0000-0002-5671-1907

DATOS DE LOS JURADOS:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES	GRADO	DNI	Código ORCID
1	Morales Aquino, Milton Edwin	Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible	44342697	0000-0002-2250-3288
2	Cámara Llanos, Frank Erick	Doctor en ciencias de la salud	44287920	0000-0001-9180-7405
3	Tarazona Mirabal, Herman Atilio	Magister en salud pública y gestión sanitaria gestión y planeamiento educativo	22411008	0000-0001-5319-4708

D

H



UNIVERSIDAD DE HUANUCO

Facultad de Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA AMBIENTAL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO(A) AMBIENTAL

En la ciudad de Huánuco, siendo las 17:00 horas del día 29 del mes de mayo del año 2026, en cumplimiento de lo señalado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad de Huánuco, se reunieron el sustentante y el **Jurado Calificador** integrado por los docentes:

- Dr. Milton Edwin Morales Aquino (Presidente)
- Dr. Frank Erick Camara Llanos (Secretario)
- Mg. Herman Atilio Tarazona Mirabal (Vocal)

Nombrados mediante la **Resolución N° 0856-2026-D-FI-UDH** para evaluar la Tesis intitulada: "**COMPARACIÓN DE LA EFICACIA DE *Azolla filiculoides* Y *Lemna minor* EN HUMEDAL DE FLUJO SUPERFICIAL PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN ORGÁNICA DE AGUA RESIDUAL DEL PTAR DE ESMERALDA CORP, LIMA, 2024**", presentado por el (la) Bach. **IGLESIAS CHAUPIS, LESLY RUBHY** para optar el Título Profesional de Ingeniero(a) Ambiental.

Dicho acto de sustentación se desarrolló en dos etapas: exposición y absolución de preguntas: procediéndose luego a la evaluación por parte de los miembros del Jurado.

Habiendo absuelto las objeciones que le fueron formuladas por los miembros del Jurado y de conformidad con las respectivas disposiciones reglamentarias, procedieron a deliberar y calificar, declarándolo(a) APROBADA Por UNANIMIDAD con el calificativo cuantitativo de 13 y cualitativo de Suficiente (Art. 47)

Siendo las 18:00 horas del día 29 del mes de Mayo del año 2026, los miembros del Jurado Calificador firman la presente Acta en señal de conformidad.


Dr. Milton Edwin Morales Aquino
DNI: 44342697
ORCID: 0000-0002-2250-3288
Presidente


Dr. Frank Erick Camara Llanos
DNI: 44287920
ORCID: 0000-0001-9180-7405
Secretario


Mg. Herman Atilio Tarazona Mirabal
DNI: 22411008
ORCID: 0000-0001-5319-4708
Vocal



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO



CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El comité de integridad científica, realizó la revisión del trabajo de investigación del estudiante: LESLY RUBHY IGLESIAS CHAUPIS, de la investigación titulada "COMPARACIÓN DE LA EFICACIA DE AZOLLA FILICULOIDES Y LEMNA MINOR EN HUMEDAL DE FLUJO SUPERFICIAL PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN ORGÁNICA DE AGUA RESIDUAL DEL PTAR DE ESMERALDA CORP, LIMA, 2024", con asesor(a) RAUL CAJAHUANCA TORRES, designado(a) mediante documento: RESOLUCIÓN N° 2884-2023-D-FI-UDH del P. A. de INGENIERÍA AMBIENTAL.

Puede constar que la misma tiene un índice de similitud del 22 % verificable en el reporte final del análisis de originalidad mediante el Software Turnitin.

Por lo que concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio y cumple con todas las normas de la Universidad de Huánuco.

Se expide la presente, a solicitud del interesado para los fines que estime conveniente.

Huánuco, 18 de diciembre de 2025



RICHARD J. SOLIS TOLEDO
D.N.I.: 47074047
cod. ORCID: 0000-0002-7629-6421



MANUEL E. ALIAGA VIDURIZAGA
D.N.I.: 71345687
cod. ORCID: 0009-0004-1375-5004

126. Lesly Rubhy Iglesias Chaupis.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

22%

INDICE DE SIMILITUD

21%

FUENTES DE INTERNET

10%

PUBLICACIONES

9%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

3%

2

repositorio.udh.edu.pe

Fuente de Internet

2%

3

repositorio.unfv.edu.pe

Fuente de Internet

2%

4

repositorio.utn.edu.ec

Fuente de Internet

1%

5

qdoc.tips

Fuente de Internet

1%



RICHARD J. SOLIS TOLEDO

D.N.I.: 47074047

cod. ORCID: 0000-0002-7629-6421



MANUEL E. ALIAGA VIDURIZAGA

D.N.I.: 71345687

cod. ORCID: 0009-0004-1375-5004

DEDICATORIA

Dedico esta tesis con todo mi amor y gratitud a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental en mi formación, tanto personal como profesional.

A mi hijita Margaret Giulia, mi mayor motivo e inspiración para seguir adelante, con el anhelo de brindarle siempre lo mejor de mí.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por ser mi guía constante desde el primer instante de vida y por darme fortaleza en los momentos más difíciles.

Expreso mi profundo agradecimiento a mis padres, **Flor Chaupis** y **Luis Iglesias**, por su incondicional apoyo a lo largo de estos años de estudio y por las valiosas enseñanzas que me han transmitido. También quiero agradecer a mi tía **Sujay Chaupis** y a todos los familiares cercanos que, con su aliento, apoyo y enseñanzas, me han impulsado a seguir adelante.

A la empresa **Esmeralda Corp.**, por brindarme la oportunidad de desarrollar mi proyecto en las instalaciones de la **PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales)**. Un agradecimiento especial a la **Dra. María Luisa Flores**, Gerente de Sostenibilidad de la empresa, por su invaluable apoyo y financiamiento para la realización de este trabajo de investigación, y al **Ing. Carlos Ochoa**, por su valiosa colaboración.

Agradezco también a los miembros del jurado y a mi asesor, por su apoyo, paciencia y las recomendaciones que contribuyeron de manera significativa al desarrollo de esta investigación.

ÍNDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE GRÁFICOS	VIII
ÍNDICE DE ANEXOS.....	X
RESUMEN	XI
ABSTRACT.....	XII
CAPÍTULO I.....	13
PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN.....	13
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	13
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
1.2.1. PROBLEMA PRINCIPAL	16
1.2.2. PROBLEMA ESPECÍFICO.....	16
1.3. OBJETIVO GENERAL.....	16
1.4. OBJETIVO ESPECÍFICO	17
1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	19
1.7. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN	19
CAPÍTULO II.....	21
MARCO TEÓRICO	21
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	21
2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES	21
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES	24
2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES.....	27

2.2. BASES TEÓRICAS	30
2.2.1. HUMEDAL ARTIFICIAL	30
2.2.2. TIPOS DE HUMEDALES	31
2.2.3. PLANTAS ACUÁTICAS (MACRÓFITAS)	33
2.2.4. PLANTAS ACUÁTICAS EMERGENTES	34
2.2.5. PLANTAS ACUÁTICAS FLOTANTES	35
2.2.6. LENTEJAS DE AGUA (LEMNA MINOR)	36
2.2.7. HELECHO DE AGUA (AZOLLA FILICULOIDES)	37
2.2.8. AGUAS RESIDUALES	38
2.2.9. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	38
2.2.10. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES	39
2.2.11. COMPONENTES DE LAS AGUAS RESIDUALES	39
2.2.12. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES	40
2.2.13. TIPOS DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES	41
2.2.14. PRINCIPALES PROBLEMAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	42
2.2.15. MARCOS LEGALES	42
2.2.16. ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA CUERPOS RECEPTORES DE EFLUENTES INDUSTRIALES ..	45
2.2.17. LMP (LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES)	46
2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES	48
2.4. HIPÓTESIS	51
2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL	51
2.5. VARIABLES	51
2.5.1. VARIABLE DEPENDIENTE	51
2.5.2. VARIABLE INDEPENDIENTE	51
2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	52

CAPÍTULO III.....	53
METODOLOGÍA DE LA INVESTIACIÓN.....	53
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	53
3.1.1. ENFOQUE	53
3.1.2. ALCANCE O NIVEL	53
3.1.3. DISEÑO	54
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	54
3.2.1. POBLACIÓN	54
3.2.2. MUESTRA.....	56
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	
.....	57
3.3.1. TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS	57
3.3.2. INSTRUMENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS .	57
3.4. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE LA	
INFORMACIÓN	57
CAPÍTULO IV.....	59
RESULTADOS.....	59
4.1. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	59
4.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	84
CAPÍTULO V.....	86
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	86
CONCLUSIONES	96
RECOMENDACIONES.....	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
ANEXOS	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Especies emergentes más utilizadas en estudios de depuración de aguas residuales.....	34
Tabla 2 ECA Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales.....	46
Tabla 3 Límites máximos permisibles para efluentes de PTAR.....	47
Tabla 4 Operacionalización de variables (Dimensión e indicadores).....	52
Tabla 5 Coordenadas UTM del punto de muestreo (Zona 18L).....	56
Tabla 6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	57
Tabla 7 Cambios en parámetros de calidad del agua durante las semanas de estudio con diferentes tratamientos vegetales	60
Tabla 8 Descriptivos del DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con Lemna minor y Azolla filiculoides en un humedal de flujo superficial. ...	61
Tabla 9 Prueba de normalidad de los datos obtenidos.	82
Tabla 10 Características del agua residual afluyente (pretratamiento).....	83
Tabla 11 Prueba de hipótesis.	84
Tabla 12 Tabla interpretativa según los tratamientos.	85

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Tipos de humedales artificiales clasificados según las macrófitas predominantes: (a) macrófitas flotantes, (b) macrófitas de hojas flotantes, (c) macrófitas sumergidas y (d) macrófitas emergentes.	32
Gráfico 2 Plantas acuáticas para el tratamiento de aguas servidas y residuales.	33
Gráfico 3 Esquema de una planta emergente típica	35
Gráfico 4 Morfología de una macrófita flotante (<i>Eichhornia crassipes</i>).....	36
Gráfico 5 Planta de lenteja de agua (<i>Lemna minor</i>).....	37
Gráfico 6 Planta de azolla (<i>Azolla filiculoides</i>)	38
Gráfico 7 Tendencia de los valores del DQO (mg/l) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con <i>Lemna minor</i> y <i>Azolla filiculoides</i> en un humedal de flujo superficial	62
Gráfico 8 Tendencia de los valores de los SST (mg/l) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con <i>Lemna minor</i> y <i>Azolla filiculoides</i> en un humedal de flujo superficial.....	65
Gráfico 9 Tendencia de los valores de DBO5 (mg/l) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con <i>Lemna minor</i> y <i>Azolla filiculoides</i> en un humedal de flujo superficial	68
Gráfico 10 Tendencia de los valores del pH del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con <i>Lemna minor</i> y <i>Azolla filiculoides</i> en un humedal de flujo superficial	72
Gráfico 11 Tendencia de los valores de la temperatura (°C) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con <i>Lemna minor</i> y <i>Azolla filiculoides</i> en un humedal de flujo superficial.....	76

Gráfico 12 Tendencia de los valores de la turbidez (NTU) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con Lemna minor y Azolla filiculoides en un humedal de flujo superficial..... 79

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 MATRIZ DE CONSISTENCIA	108
ANEXO 2 CADENA DE CALIDAD DE AGUA.....	110
ANEXO 3 ÁRBOL DE CAUSAS – EFECTOS.....	111
ANEXO 4 ÁRBOL DE MEDIOS Y FINES	112
ANEXO 5 MAPA DE UBICACIÓN	113
ANEXO 6 PANEL FOTOGRÁFICO	114

RESUMEN

Objetivo: El presente trabajo de investigación tuvo como propósito principal comparar la eficacia de dos tipos de plantas flotantes *Azolla filiculoides* y *Lemna minor* en la reducción de los parámetros de DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. **Metodología:** el trabajo de investigación adoptó un enfoque cuantitativo, aplicando los métodos de investigación experimental y aplicada. Se utilizaron dos tipos de plantas acuáticas, *Azolla filiculoides* y *Lemna minor*; se evaluó la capacidad de remoción de los parámetros físico-químicos durante 5 semanas en condiciones ambientales no controladas, sino propios del ambiente de la PTAR Esmeralda Corp. **Resultados:** Entre los hallazgos principales y destacables se encontraron que existe diferencia entre los tratamientos en los indicadores: DQO, pH y Temperatura. En los otros indicadores se tiene que no existe diferencias significativas. Se pudo apreciar que tanto el tratamiento con DQO y con *Azolla filiculoides* son los que tenían tendencia creciente semejantes y mayor que al grupo control. También se encontró que los valores de la turbidez fueron crecientes en el agua tratada con *Lemna minor* y ligeramente creciente en el grupo control, mientras que es decreciente en el agua tratada con *Azolla Filiculoides*. **Conclusión:** El tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial mostró que, en las primeras etapas, *Lemna minor* fue más efectiva en reducir los parámetros de DQO, SST, pH y turbidez. Sin embargo, a medida que avanzó el tratamiento, *Azolla filiculoides* demostró su capacidad para disminuir significativamente los niveles de DBO, DQO5 y pH, mejorando progresivamente la calidad del agua residual tratada.

Palabras clave: Aguas residuales, Humedal de flujo superficial, Reducción de parámetros, Plantas acuáticas, Contaminación orgánica.

ABSTRACT

Objective: The main purpose of this research was to compare the effectiveness of two types of floating plants, *Azolla filiculoides* and *Lemna minor*, in reducing the parameters of COD, TSS, BOD₅, pH, temperature, and turbidity of industrial wastewater from the Esmeralda Corp WWTP. **Methodology:** The research adopted a quantitative approach, applying experimental and applied research methods. Two types of aquatic plants, *Azolla filiculoides* and *Lemna minor*, were used, and their capacity to remove physicochemical parameters was evaluated over a period of 5 weeks under uncontrolled environmental conditions, characteristic of the Esmeralda Corp WWTP. **Results:** Key findings indicated significant differences between treatments in the COD, pH, and temperature indicators. For the other parameters, no significant differences were observed. It was noted that both COD treatment and *Azolla filiculoides* showed similar upward trends, outperforming the control group. Additionally, turbidity values increased in water treated with *Lemna minor* and slightly in the control group, whereas they decreased in water treated with *Azolla filiculoides*. **Conclusion:** Treatment with *Lemna minor* and *Azolla filiculoides* in a surface flow wetland showed that *Lemna minor* was initially more effective at reducing COD, TSS, pH, and turbidity. However, as the treatment progressed, *Azolla filiculoides* demonstrated its ability to significantly lower BOD, COD₅, and pH levels, progressively improving the quality of the treated wastewater.

Keywords: Wastewater, Surface flow wetland, Parameter reduction, Aquatic plants, Organic contamination.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La población latinoamericana se concentra a más del ochenta por ciento en el núcleo urbano. No obstante, el servicio de agua potable no es suficiente. Además, el setenta por ciento de los efluentes residuales no se tratan, debido a la contaminación el proceso de reutilización del agua se ve limitado, impidiendo que esta vuelva de forma adecuada al ciclo natural. En Perú, según los planes nacionales de saneamiento urbano y rural, solo el treinta por ciento de la financiación pública se destina para el proceso de tratamiento del recurso hídrico (Gonzales Taranco, Morales Olivares, & Larios Meoño, 2015).

Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2012), en su Programa Gestión de la Calidad de los Recursos Hídricos en el Perú.

Señala que únicamente una cuarta parte del total de aguas residuales domésticas recibe tratamiento, lo que impide su aprovechamiento en actividades esenciales para la población, y en algunos casos son altamente tóxicas y se encuentran contaminantes. Las principales impurezas comunes son bacterias y microorganismos perniciosos, sustancias orgánicas (OD, DBO, DQO) y nutrientes (fósforo, fosfato, nitrógeno, amonio, nitrito, nitrato). Además, de los contaminantes según la actividad son los metales mineros (plomo, arsénico, mercurio, cadmio, cromo), contaminantes orgánicos traça (HAP), aceites e hidrocarburos y plaguicidas.

Las ciudades con un tratamiento y suministro de agua inadecuados generalmente padecen con enfermedades como la hepatitis, la disentería, el cólera y la gastroenteritis; Por tanto, es fundamental implementar el tratamiento de las aguas residuales a través de la elaboración de lineamientos orientados a la restauración ambiental, Más aún dado que las áreas urbanas generan aguas residuales del resto de sus usos domésticos, industriales y agrícolas.

Según un estudio realizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), alrededor de siete millones de personas en el país carecen de acceso a agua potable segura. El servicio de abastecimiento alcanza más del 80% de

cobertura nacional y depende principalmente de las entidades públicas ubicadas en Lambayeque, Lima, Callao, Ica, Arequipa y Tacna, actualmente administradas por los gobiernos locales. La cobertura en Amazonas, Huánuco, Huancavelica y Puno es inferior al cuarenta por ciento; y alrededor del cuarenta por ciento del agua no tiene ingresos, más de 10 millones de habitantes no tienen instalaciones sanitarias. Solo en Lambayeque, Lima y Tacna se presenta una higiene superior al ochenta por ciento, con una higiene al veinte por ciento y cuarenta por ciento en Ucayali, Loreto y Madre de Dios (Gonzales Taranco, Morales Olivares, & Larios Meoño, 2015).

El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) ha identificado una problemática ambiental relacionada con el bajo nivel de tratamiento de las aguas residuales en el país. A nivel nacional, únicamente el 32% de las aguas residuales recolectadas por las redes de alcantarillado recibe algún tipo de tratamiento. Entre los principales inconvenientes del manejo de estos efluentes se encuentra la limitada cobertura del servicio de alcantarillado, ya que las 50 Empresas Prestadoras de Servicios de Saneamiento (EPS) solo atienden al 69,6% de la población urbana del Perú. Esta deficiencia en la infraestructura y en el tratamiento adecuado de las aguas residuales representa un riesgo ambiental y sanitario. (OEFA, 2014)

De acuerdo con el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA, 2014), en el Perú se estimaba la generación de aproximadamente 2,2 millones de metros cúbicos de aguas residuales al día, conducidas a través de las redes de alcantarillado. Sin embargo, solo el 32% de este volumen recibía un tratamiento previo antes de ser descargado en cuerpos de agua naturales como mares, ríos, lagos o quebradas. En el caso específico de Lima, la producción diaria alcanzaba los 1,2 millones de metros cúbicos, de los cuales únicamente el 20% era tratado antes de su vertimiento.

De igual forma, es importante resaltar que, según información del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2014), en Lima Metropolitana se generaban aproximadamente 1 202 286 metros cúbicos de aguas residuales por día, de los cuales solo el 21,2% recibía tratamiento. En ese mismo año, la ciudad contaba con 43 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR); de ellas, 21 estaban bajo la administración de Sedapal, 8

eran gestionadas por municipalidades distritales y las restantes operaban bajo la administración de otras instituciones, como universidades, centros educativos y clubes privados. (Collacci, 2018)

El 8 de junio de 2022, la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento (Sunass) publicó el informe titulado *Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) del ámbito de las empresas prestadoras de servicios de saneamiento*, en el cual se evalúan las condiciones actuales de infraestructura, eficiencia operativa, mantenimiento y funcionamiento de dichas plantas. De acuerdo con el documento, en el país existen 202 PTAR, de las cuales 171 se encuentran en operación. Esto representa que aproximadamente el 85% de las plantas cumplen con su propósito de remover los contaminantes presentes en las aguas residuales generadas por el uso doméstico e industrial del servicio de agua y alcantarillado, evitando su descarga directa en cuerpos naturales como ríos, lagunas y mares. Asimismo, el estudio destaca que, entre los años 2016 y 2020, el tratamiento de aguas residuales dentro del ámbito de las Empresas Prestadoras de Servicios (EPS) incrementó su cobertura del 66,40% al 77,70%, lo que equivale a un aumento del 11,30%. (Sunass, 2022)

El *Plan Nacional de Saneamiento* proyecta incrementar la cobertura del tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas, pasando del 70,4% registrado en 2020 al 79,7% para el año 2026. Para alcanzar este objetivo, se propone la incorporación de principios de economía circular, aprovechando las disposiciones establecidas en la *Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento*, la cual autoriza la comercialización del agua residual tratada, los residuos sólidos y otros subproductos generados durante los procesos de potabilización y tratamiento. Desde esta perspectiva, la economía circular se consolida como un enfoque clave que no solo contribuye a reducir la contaminación de los cuerpos de agua, sino que también promueve la valorización y el reúso de los subproductos derivados del tratamiento. (Sunass, 2022)

En este contexto, las aguas residuales deben reconocerse como un recurso de alto valor, capaz de generar nuevos insumos aprovechables en distintos sectores, como el industrial, agrícola, recreativo o para actividades

de riego y recarga de fuentes hídricas. Por ello, el presente proyecto de investigación tiene como finalidad contribuir a la mitigación de la contaminación del recurso hídrico generada durante el proceso industrial de la empresa Esmeralda Copr. Se parte de la convicción de que es posible implementar tecnologías limpias en zonas de protección ecológica, promoviendo la recuperación del agua utilizada y su transformación en recurso de reúso. De este modo, se busca generar un impacto ambiental positivo en el ecosistema donde opera dicha industria alimentaria y, al mismo tiempo, abrir la posibilidad de restablecer la fauna acuática mediante procesos de biorremediación del agua contaminada.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. PROBLEMA PRINCIPAL

¿Cuál de las dos especies *Azolla filiculoides* y *Lemna minor* en un humedal de flujo superficial reduce los parámetros de DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp.?

1.2.2. PROBLEMA ESPECÍFICO

¿Cuáles son los descriptivos del DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial?

¿Cuál es la tendencia de los valores del DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial?

1.3. OBJETIVO GENERAL

Comparar la eficacia de dos tipos de plantas flotantes *Azolla filiculoides* y *Lemna minor* en la reducción de los parámetros de DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp.

1.4. OBJETIVO ESPECÍFICO

Determinar los descriptivos del DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial.

Determinar la tendencia de los valores del DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial.

1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio de investigación se argumenta por lo siguiente:

Justificación teórica

Teóricamente, este estudio busca fortalecer el conocimiento sobre el uso de la fitorremediación como alternativa natural y sostenible para el tratamiento de aguas residuales industriales. A través del diseño de un humedal artificial de flujo superficial, se pretende comprobar la capacidad depuradora de especies acuáticas como *Azolla filiculoides* y *Lemna minor*, evaluando su eficiencia en la remoción de parámetros contaminantes como DQO, DBO₅, SST, pH, temperatura y turbidez. De este modo, la investigación contribuye al desarrollo de fundamentos científicos y técnicos que sustenten la aplicación de sistemas biológicos de tratamiento en el contexto peruano.

Justificación práctica

En el ámbito práctico, la investigación permitirá demostrar la viabilidad de aplicar humedales artificiales como una alternativa económica y sostenible para el tratamiento de efluentes industriales. Los resultados obtenidos servirán de referencia para futuras implementaciones a mayor escala en la empresa Esmeralda Corp. o en otras industrias con características similares. Además, el modelo propuesto puede ser replicado por municipios o instituciones que busquen soluciones de bajo costo para el manejo de aguas residuales, contribuyendo así a la mejora de la calidad ambiental y al cumplimiento de las normas establecidas por el MINAM.

Justificación metodológica

El presente estudio tiene como finalidad evaluar alternativas de tratamiento para los efluentes residuales generados por la PTAR de la empresa Esmeralda Corp., mediante la aplicación de la fitorremediación. Para ello, se propone el diseño de un humedal artificial de tipo superficial y flujo libre, desarrollado a escala experimental. En este sistema se emplearán especies acuáticas flotantes como el helecho de agua (*Azolla filiculoides*) y la lenteja de agua (*Lemna minor*), las cuales participarán activamente en el proceso de fitodegradación de los contaminantes presentes en el agua residual industrial. Durante el proceso de fitorremediación se evaluarán los siguientes parámetros de calidad del agua: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅), Sólidos Suspendidos Totales (SST), pH, temperatura y turbidez, considerando los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por el Decreto N.° 003-2010-MINAM.

Justificación económica

Desde el punto de vista económico, el presente estudio resulta relevante porque propone una alternativa de tratamiento de aguas residuales de bajo costo y fácil implementación. El uso de sistemas naturales, como los humedales artificiales con plantas acuáticas, representa una opción económicamente accesible frente a las tecnologías convencionales de tratamiento, que requieren una elevada inversión y mantenimiento especializado. Asimismo, este tipo de soluciones puede ser aplicado por municipalidades, comunidades o pequeñas industrias que no cuentan con plantas de tratamiento, contribuyendo a la gestión sostenible de los recursos hídricos sin demandar grandes gastos operativos.

Justificación ambiental

El presente estudio se desarrolla con el propósito de contribuir a la protección del medio ambiente, aspecto de vital importancia para el desarrollo sostenible. Para ello, se plantea la implementación de un sistema basado en el uso de plantas acuáticas capaces de tratar los efluentes residuales mediante procesos naturales de biorremediación.

Este enfoque busca lograr una remoción eficiente de los parámetros contaminantes, reduciendo el impacto ambiental generado por las actividades industriales. En consecuencia, al evaluar la eficacia del sistema propuesto, se pretende ofrecer una alternativa viable que aporte tanto a la mitigación de la contaminación hídrica como al bienestar social de la población.

1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Para la ejecución del presente estudio se identifican como principales limitaciones el costo económico asociado al análisis de las muestras y a la obtención de resultados de los parámetros fisicoquímicos que determinan la calidad de los efluentes residuales. Asimismo, se considera como restricción la construcción e implementación del humedal artificial de flujo superficial a escala piloto, debido a los recursos y condiciones técnicas requeridas. Finalmente, se contempla la dificultad para adquirir las especies acuáticas en el tamaño adecuado para su utilización en el desarrollo experimental de la investigación.

1.7. VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

El presente estudio es viable, dado que cuenta con los recursos y condiciones necesarias para su ejecución en el tiempo previsto. A continuación, se detallan los principales aspectos que garantizan su desarrollo:

Recurso teórico.

El tema de investigación cuenta con amplia información bibliográfica y científica relacionada con la fitorremediación y el uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Asimismo, se dispone de estudios previos, documentos técnicos del MINAM, OEFA y SUNASS, que permiten sustentar teóricamente el presente trabajo. Además, el investigador posee los conocimientos necesarios para aplicar y analizar los fundamentos teóricos relacionados con la biorremediación.

Recurso ético.

El estudio se desarrollará respetando los principios éticos de la investigación, sin causar daño a personas, animales o al medio ambiente.

Por el contrario, busca generar un impacto positivo mediante la aplicación de tecnologías limpias y sostenibles que contribuyan a la protección del recurso hídrico y del entorno natural.

Recurso financiero.

Si bien existen limitaciones económicas, los costos del estudio se mantienen en un nivel accesible debido al uso de materiales de bajo costo y especies vegetales naturales disponibles en el entorno local. La ejecución se realizará a escala piloto, lo cual permite optimizar los recursos financieros sin comprometer la calidad de los resultados.

Recurso temporal.

La investigación se desarrollará en un periodo estimado de tres a cuatro meses durante el año 2024.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Suárez y Vásquez (2020), en su tesis titulada “*Evaluación de dos macrófitos en el tratamiento de aguas residuales domésticas de la parroquia González Suárez, Cantón Otavalo*”, desarrollada en la Universidad Técnica del Norte (Ecuador), tuvieron como objetivo analizar la relación entre dos especies de macrófitos y los parámetros fisicoquímicos del agua a la entrada y salida de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas.

La metodología del estudio se estructuró en tres fases:

Fase I: caracterización de las especies vegetales *Typha latifolia* y *Pistia stratiotes* en el tratamiento de aguas residuales y su funcionalidad dentro de los humedales.

Fase II: análisis de la relación entre los macrófitos y los parámetros fisicoquímicos en la planta de tratamiento de González Suárez.

Fase III: diseño de estrategias para el manejo y aprovechamiento de las especies luego del proceso de fitorremediación.

Los resultados demostraron que el humedal con *Pistia stratiotes* presentó mayor eficiencia en la remoción de contaminantes del efluente. En un periodo de cinco meses, se obtuvo una eficiencia promedio de remoción del 74 % en turbidez, 88 % en DQO y 64 % en nitratos (NO_3^-). Asimismo, se evidenció un incremento del 36 % en el oxígeno disuelto (OD), con valores de pH entre 6 y 7, una conductividad moderadamente alta y sólidos disueltos totales (SDT) de aproximadamente 240 mg/L, observándose una baja reducción de fósforo.

Este estudio evidencia el potencial de los humedales con macrófitos flotantes como una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

González y Hernández (2020), en su tesis titulada “*Evaluación de remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas por plantas ornamentales mediante humedales flotantes en el cantón militar de Apiay, Villavicencio (Meta)*”, desarrollada en la Universidad Santo Tomás (Colombia), evaluaron la capacidad de eliminación de contaminantes orgánicos y nutrientes mediante el uso de plantas ornamentales emergentes en sistemas de humedales flotantes.

El estudio tuvo como objetivo analizar la eficiencia de dos especies, *Pico de loro* y *Alpidia roja*, en la remoción de parámetros como Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Sólidos Suspendidos Totales (SST), fosfatos ($P-PO_4$) y nitrógeno total (NT), en aguas residuales domésticas con pretratamiento.

La metodología se basó en el desarrollo de un sistema experimental conformado por seis humedales flotantes, donde las plantas fueron adaptadas a los efluentes residuales y posteriormente transferidas a estructuras flotantes. Se evaluaron tiempos de retención hidráulica (TRH) de 4, 6 y 8 días, y se compararon los resultados obtenidos con los de estanques estabilizadores tradicionales.

Los resultados indicaron que los humedales flotantes con *Alpidia roja* lograron eficiencias de remoción de 61,91 % en SST, 36,14 % en DBO_5 y 46,35 % en fosfatos ($P-PO_4$). En el caso de *Pico de loro*, se registraron remociones de 62,66 % en SST, 32,20 % en NT, 88,77 % en fosfatos y 23,21 % en DBO_5 . Los estanques tradicionales presentaron menores valores de eliminación, con un 25 % en NT y 57,14 % en DBO_5 .

De acuerdo con los resultados, la especie *Pico de loro* mostró mayor eficiencia general en la remoción de contaminantes, especialmente con un tiempo de retención hidráulica de 4 días (40,56 %). Los autores concluyeron que los humedales flotantes constituyen

una alternativa viable y complementaria a los sistemas convencionales de tratamiento de aguas residuales domésticas, debido a su bajo costo y efectividad en la mejora de la calidad del agua.

Vanegas (2022), en su tesis titulada “Eficiencia del Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*) en la Fitodepuración de Aguas Residuales Domésticas (ARD) y Aguas Residuales no Domésticas (ARnD)”, desarrollada en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (Colombia), tuvo como objetivo determinar la efectividad del lirio acuático en el tratamiento biológico de efluentes residuales domésticos y no domésticos.

La metodología consistió en la aplicación de distintos sistemas de tratamiento, seguidos del análisis de parámetros físicos, químicos y biológicos, comparando las concentraciones iniciales y finales de los contaminantes presentes en las aguas tratadas.

Los resultados mostraron que el *jacinto de agua* presentó una elevada eficiencia en la eliminación de contaminantes en ambos tipos de efluentes. Se obtuvieron tasas de remoción del 91,06 % para la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), 94 % para la Demanda Química de Oxígeno (DQO), 93,9 % para amonio (NH₄⁺), 87,5 % para fosfatos (PO₄³⁻) y hasta un 99,9 % en la reducción de coliformes totales y fecales. Asimismo, se evaluaron otros parámetros como nitratos (NO₃⁻), nitritos (NO₂⁻), nitrógeno total (NTK) y fósforo total (TP), con eficiencias de remoción de 89,83 %, 86,7 %, 85,71 % y 69 %, respectivamente.

Estos resultados demuestran que *Eichhornia crassipes* es una especie altamente eficaz en la fitorremediación de aguas residuales domésticas e industriales, consolidándose como una alternativa natural y sostenible aplicable tanto a nivel nacional como internacional para el tratamiento de efluentes contaminados.

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

Quispe y Ayala (2019) realizaron la investigación titulada “Utilización de la *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* en la remoción de nitrógeno y fósforo de las aguas residuales de la laguna de oxidación de la empresa EMAPACOP S.A - Ucayali 2018”, desarrollada en Pucallpa, Perú. El objetivo principal del estudio fue evaluar la efectividad de la remoción de contaminantes orgánicos mediante el uso de plantas acuáticas, específicamente *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) y *Lemna minor* (lenteja de agua), en un sistema de tratamiento de aguas residuales municipales.

La metodología aplicada combinó un enfoque experimental y aplicado, donde se evaluó la capacidad de remoción de nitrógeno (N) y fósforo (P) durante un periodo de cinco días, a nivel de laboratorio, utilizando aguas residuales municipales (ARM). Ambas especies presentaron un adecuado crecimiento bajo condiciones controladas de luz, temperatura y pH, luego de un periodo previo de adaptación de cuatro meses.

Los resultados mostraron una eficiente capacidad de remoción de nutrientes: la *Lemna minor* alcanzó valores de reducción de nitrógeno entre 55 % y 60 %, y de fósforo entre 70 % y 80 %. En cuanto a la *Eichhornia crassipes*, se registraron concentraciones iniciales de nitrógeno de 0,35 mg/L que disminuyeron hasta 0,09 mg/L, y de fósforo que bajaron de 5 mg/L a 0,53 mg/L. En conjunto, se concluyó que ambas especies son alternativas viables para el tratamiento biológico de efluentes residuales, demostrando una alta eficiencia en la remoción de nutrientes.

Mena (2022) realizó la investigación titulada “Eficiencia del sistema de humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales domésticas”, desarrollada en Lima, Perú. El objetivo principal del estudio fue determinar el grado de eficiencia de un sistema de humedales artificiales a nivel piloto para el tratamiento de efluentes domésticos en el caserío de Nueva Esperanza.

La metodología consistió en la construcción y evaluación de un humedal piloto, donde las aguas residuales domésticas fueron analizadas antes de su ingreso y después de su paso por las pozas de tratamiento. El sistema experimental empleó especies vegetales como *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua), *Schoenoplectus californicus* (junco) y *Phragmites australis* (carrizo), las cuales fueron utilizadas para determinar su capacidad de remoción de contaminantes en condiciones controladas.

Los resultados obtenidos evidenciaron un buen nivel de eficiencia en la depuración de los efluentes domésticos. En los parámetros fisicoquímicos analizados, se alcanzaron porcentajes de remoción significativos: para la DBO, 46 % en *Phragmites australis*, 70 % en *Schoenoplectus californicus* y 72 % en *Eichhornia crassipes*; para la DQO, 40 %, 58 % y 68 % respectivamente; y para aceites y grasas, 37 %, 62 % y 66 % en el mismo orden. Los resultados confirman que el sistema de humedales artificiales es una alternativa eficiente, sostenible y adaptable para el tratamiento de aguas residuales domésticas en zonas rurales o de bajos recursos.

Nuñez (2019) realizó la investigación titulada “Evaluación de la eficiencia del sistema de fitorremediación mediante las especies palustre y flotante, *Zantedeschia aethiopica* y *Eichhornia crassipes* en el tratamiento de aguas residuales domésticas en la zona de la región natural Quechua-Cajamarca”, desarrollada en Cajamarca, Perú. El objetivo principal fue evaluar la efectividad de un sistema de fitorremediación basado en plantas acuáticas emergentes y flotantes — específicamente *Zantedeschia aethiopica* (alcatraz) y *Eichhornia crassipes* (lirio de agua)— para el tratamiento de efluentes domésticos en la región natural Quechua.

La metodología consistió en la implementación de un sistema de humedales artificiales con estructuras de madera, recubrimiento plástico y tuberías de doble grosor para evitar la infiltración. El sistema incluyó humedales de flujo horizontal subsuperficial con un volumen de 13.456 m³ y humedales de flujo superficial de 1.55 m³. El proceso de operación y monitoreo se desarrolló durante tres meses, evaluando los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del afluente y efluente.

Los resultados evidenciaron altos niveles de eficiencia en la remoción de contaminantes, alcanzando porcentajes de eliminación de DBO₅ (95 %), DQO (92 %), SST (95 %), turbidez (96 %), desengrase (76 %), N-NH₃ (64 %) y conductividad (59 %). Los valores más bajos correspondieron al color (34 %) y coliformes totales (22 %). En general, el sistema logró una eficacia promedio del 70 %, demostrando que la fitorremediación con *Zantedeschia aethiopica* y *Eichhornia crassipes* representa una alternativa viable y ecológica para el tratamiento de aguas residuales domésticas, aunque se recomienda un tratamiento previo para alcanzar los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos por la normativa ambiental vigente.

2.1.3. ANTECEDENTES LOCALES

Carhuaricra (2019) realizó la investigación titulada “Fitorremediación por el proceso de fitodegradación con dos especies macrófitas acuáticas, *Limnobium laevigatum* y *Eichhornia crassipes* para el tratamiento de aguas residuales domésticas de la laguna facultativa en la localidad de Pacaypampa, distrito de Santa María del Valle (Huánuco), agosto – setiembre 2018”.

El objetivo principal fue determinar la viabilidad del tratamiento de aguas residuales domésticas mediante la fitorremediación a escala piloto, utilizando dos especies macrófitas flotantes —*Limnobium laevigatum* (trébol de agua) y *Eichhornia crassipes* (lirio de agua)— en un humedal de flujo superficial libre.

La metodología consistió en el diseño e implementación de un humedal artificial piloto, en el que se aplicaron tiempos de retención hidráulica de 23.4, 31.2, 39.0 y 46.8 horas, con el fin de evaluar la eficiencia en la remoción de contaminantes. Se analizaron los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos: demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), pH, conductividad eléctrica, temperatura y coliformes totales, de acuerdo con los Límites Máximos Permisibles (LMP) del DS N° 003-2010-MINAM y los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua, Categoría 4 – Conservación del Ambiente Acuático (DS N° 004-2017-MINAM).

Los resultados demostraron una reducción significativa de contaminantes: los SST disminuyeron hasta valores de 26 mg/L a las 31.2 horas de retención; la DBO_5 se redujo hasta 34.7 mg/L a las 39 horas; y la DQO alcanzó una concentración mínima de 128.4 mg/L en el mismo intervalo. Además, el pH aumentó gradualmente hasta 7.5, evidenciando una mejora en la calidad del agua tratada.

Torres (2019) desarrolló la investigación titulada “Tratamiento de aguas residuales domésticas mediante sistemas de depuración con macrófitas (*Lemna minor* y *Eleocharis palustris*) en la Universidad Nacional de Ucayali, octubre 2018 – setiembre 2019”. El objetivo principal fue determinar la eficiencia de un sistema de depuración con macrófitas acuáticas en el tratamiento de aguas residuales generadas en el campus universitario.

La metodología utilizada fue de tipo viable con diseño experimental a escala piloto y enfoque cuantitativo, donde se tomaron muestras de aguas residuales domésticas provenientes de la universidad, analizando parámetros fisicoquímicos y microbiológicos antes y después del tratamiento. Se implementaron tres sistemas de tratamiento: uno con *Lemna minor* (lenteja de agua), otro con *Eleocharis palustris* (caña de agua), y un tercero con un medio filtrante de grava, manteniendo un tiempo de retención hidráulica de seis semanas, con análisis semanales.

Los resultados evidenciaron una reducción significativa en los principales parámetros de contaminación orgánica. En el sistema con *Lemna minor*, el pH se estabilizó en 6.5, la conductividad disminuyó en un 28.1 %, los sólidos totales en un 24.7 %, la demanda de oxígeno en 52.8 %, la turbidez en 79.1 %, la DBO₅ en 64.3 %, la DQO en 62.9 %, el amonio en 49.7 %, y los coliformes fecales en 99.2 %. En el sistema con *Eleocharis palustris*, se obtuvo una reducción del pH de 6.9 %, conductividad en 29.2 %, sólidos totales en 24.1 %, demanda de oxígeno en 58.8 %, turbidez en 77.3 %, DBO₅ en 51.7 %, DQO en 54.4 %, amonio en 43.1 % y coliformes fecales en 98.9 %.

En general, ambos sistemas demostraron una alta eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos y microbiológicos, confirmando que las macrófitas *Lemna minor* y *Eleocharis palustris* constituyen una alternativa ecológica, económica y efectiva para el tratamiento de aguas residuales domésticas en instituciones educativas.

Cruz (2019) desarrolló la investigación titulada “Efectividad de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales en la remoción de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos antes del vertido al río Huallaga, en la localidad de Pacaypampa, distrito de Santa María del Valle, Huánuco, junio – setiembre 2018”. El objetivo principal fue evaluar el desempeño de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas en la eliminación de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos antes de su descarga al río Huallaga.

La investigación se llevó a cabo en Pacaypampa (Huánuco) durante los meses de junio a setiembre de 2018. Se aplicó una metodología descriptiva y experimental, basada en el control de calidad de aguas residuales según la Resolución Ministerial N.º 273-2013-VIVIENDA y los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM para plantas de tratamiento domésticas.

Se analizaron parámetros como pH, conductividad eléctrica, sólidos suspendidos totales (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), demanda química de oxígeno (DQO), turbidez y coliformes termotolerantes, comparando las concentraciones del agua antes y después del proceso de tratamiento. Los resultados mostraron que la planta no logra una remoción eficiente de los contaminantes, ya que los valores obtenidos no cumplieron con los estándares establecidos por la normativa ambiental.

En conclusión, el estudio determinó que la planta de tratamiento de Pacaypampa requiere mejoras estructurales y operativas, pues su rendimiento actual no garantiza la adecuada depuración de las aguas residuales. Esta situación evidencia la necesidad de implementar sistemas más eficientes que aseguren la protección del ecosistema acuático del río Huallaga y la salud de la población local.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. HUMEDAL ARTIFICIAL

Según la International Water Association (IWA, 2000), un humedal se define como una zona que permanece de forma continua o temporal saturada con agua superficial o subterránea, en la cual se desarrollan especies vegetales adaptadas a condiciones de anegamiento. Estas áreas presentan características físicas y biológicas que permiten el crecimiento de plantas acuáticas, generando un sistema natural de tratamiento del agua.

Los humedales artificiales son ecosistemas diseñados intencionalmente para imitar los procesos naturales de depuración presentes en los humedales naturales, con el propósito de tratar aguas residuales domésticas, industriales o agrícolas. Estos sistemas utilizan interacciones físicas, químicas y biológicas entre el agua, el sustrato, los microorganismos y las plantas acuáticas para eliminar contaminantes.

El uso de humedales como método de tratamiento de aguas no es reciente; desde civilizaciones antiguas se ha aprovechado la capacidad de los suelos y las plantas acuáticas para reducir la contaminación antes de que el agua llegue a ríos o lagos.

En la actualidad, los humedales artificiales se reconocen como una alternativa sostenible, económica y ambientalmente amigable frente a las tecnologías convencionales.

Además de su función principal en la purificación del agua, los humedales ofrecen beneficios ecológicos adicionales, como la conservación de la biodiversidad, la reducción del riesgo de inundaciones, la recarga de acuíferos, la mejora del paisaje y la posibilidad de reutilizar el agua tratada en actividades como el riego o la recreación.

2.2.2. TIPOS DE HUMEDALES

Existen diversas formas de clasificar los humedales artificiales, dependiendo de sus características estructurales, del tipo de flujo del agua y de la vegetación utilizada. Según la clasificación propuesta por Vymazal (1998), estos sistemas se diferencian principalmente por el tipo de macrófitas predominantes en su diseño, identificándose los siguientes grupos:

a) Humedales construidos con macrófitas flotantes: en este tipo, las plantas crecen libremente sobre la superficie del agua, con las raíces suspendidas, lo que permite una alta absorción de nutrientes y materia orgánica disuelta.

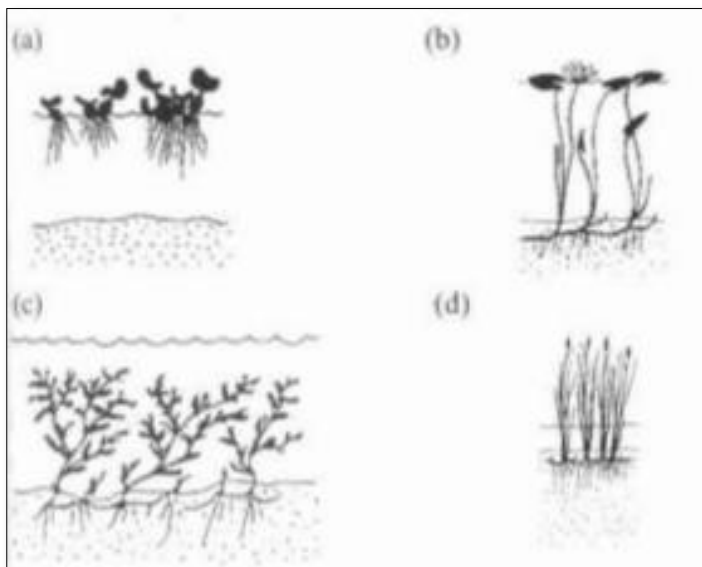
b) Humedales construidos con macrófitas de hojas flotantes: las especies presentan hojas que reposan sobre la superficie, mientras que sus raíces se desarrollan ancladas en el sustrato, contribuyendo al intercambio de gases y nutrientes.

c) Humedales construidos con macrófitas sumergidas: están conformados por plantas completamente bajo el agua, las cuales intervienen directamente en la oxigenación del medio y en la reducción de compuestos orgánicos.

d) Humedales construidos con macrófitas emergentes: en este tipo de sistema, las plantas se desarrollan parcialmente sumergidas, con tallos y hojas que sobresalen del agua, siendo uno de los métodos más empleados por su eficiencia en la remoción de contaminantes.

Gráfico 1

Tipos de humedales artificiales clasificados según las macrófitas predominantes: (a) macrófitas flotantes, (b) macrófitas de hojas flotantes, (c) macrófitas sumergidas y (d) macrófitas emergentes.



Nota. Adaptado de Vymazal [Fotografía], por I. Arias y H. Brix, 2003, Redalyc.

<https://www.redalyc.org>

De acuerdo con Arias y Brix (2003), existen diversas alternativas para el tratamiento de los efluentes residuales mediante humedales artificiales, siempre que las especies vegetales utilizadas logren adaptarse adecuadamente a las condiciones ambientales del entorno. Sin embargo, las plantas pertenecientes al grupo de macrófitas emergentes han demostrado una alta capacidad de adaptación y resistencia frente a las condiciones adversas que suelen estar asociadas a los efluentes residuales.

Dentro de este tipo de humedales artificiales con macrófitas emergentes, se pueden identificar las siguientes subdivisiones:

- A. Sistemas de flujo libre o humedales de flujo superficial (HFS).
- B. Sistemas de flujo horizontal subsuperficial (HFSS).
- C. Sistemas de flujo vertical (HFV).
- D. Sistemas híbridos (SH).

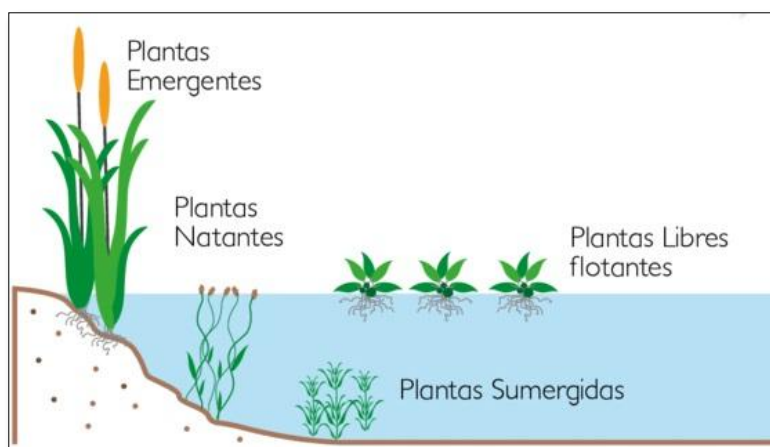
2.2.3. PLANTAS ACUÁTICAS (MACRÓFITAS)

Las macrófitas son organismos vegetales de gran tamaño, perceptibles a simple vista, comúnmente conocidas como plantas acuáticas. Estas especies presentan adaptaciones morfológicas y fisiológicas que les permiten desarrollarse en ambientes acuáticos, ya sea en aguas superficiales o sumergidas. Dentro de este grupo se incluyen las macroalgas y algunas pteridofitas, como los musgos y helechos, que logran adaptarse eficazmente a dichos ecosistemas.

Desde una perspectiva metodológica y evolutiva, las macrófitas acuáticas constituyen un conjunto diverso de plantas con funciones ecológicas heterogéneas. Son elementos esenciales en la cadena trófica de los ecosistemas acuáticos, ya que participan activamente en los procesos de purificación del agua y en el mantenimiento del equilibrio ecológico. Este grupo abarca plantas vasculares acuáticas, carófitas y algas filamentosas (Cirujano, Meco & Cezón).

Gráfico 2

Plantas acuáticas para el tratamiento de aguas servidas y residuales.



Adaptado de Plantas acuáticas para el tratamiento de aguas servidas y residuales [Fotografía], por R. Mayo, 2020, Aguamarket. <https://www.aguamarket.com>

2.2.4. PLANTAS ACUÁTICAS EMERGENTES

Las plantas acuáticas emergentes, como los juncos, carrizos y eneas, son especies anfibas que crecen en aguas poco profundas, permanecen enraizadas en el sustrato y desarrollan tallos y hojas que sobresalen del agua. Son plantas perennes que se secan en invierno y rebrotan en primavera a partir de estructuras subterráneas, lo que les confiere una alta resistencia y productividad. Su posición entre el ambiente terrestre y acuático les permite aprovechar la disponibilidad continua de agua y un mejor acceso a la luz.

Además, estas especies están adaptadas a las condiciones de baja disponibilidad de oxígeno que caracterizan a los humedales. Esta tolerancia se debe a la presencia de aerénquima, un tejido especializado que facilita el transporte de oxígeno desde las hojas hacia las raíces, permitiendo su supervivencia y funcionamiento en sustratos anóxicos (Martin I. , 1989).

Tabla 1

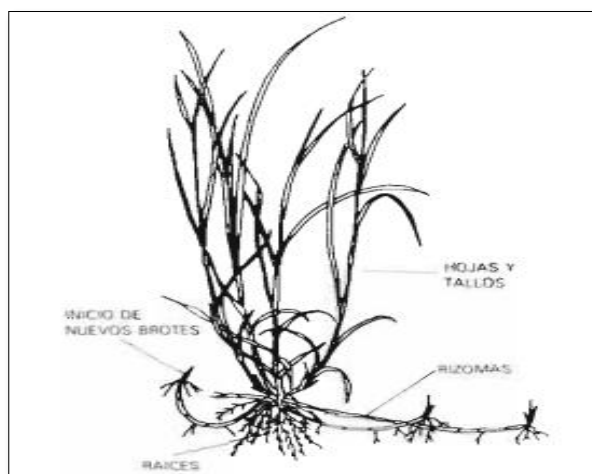
Especies emergentes más utilizadas en estudios de depuración de aguas residuales.

Familia	Nombre Latino	Nombres Comunes
Ciperáceas	Carex sp.	-
	Eleocharis sp.	-
	Scirpus lacustris L. (*)	Junco de laguna
Gramíneas	Glyceria fluitans (L) R. Br	Hierba del maná
	Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steudel (*)	Carrizo
Iridáceas	Iris pseudacorus L.	Lirio amarillo, España fina
Juncáceas	Juncus sp	Juncos
Tifáceas	Typha sp. (*)	Eneas, aneas, espadañas

Nota. Adaptado de Especies emergentes más utilizadas en estudios de depuración de aguas residuales [Fotografía], por I. Martin, 1989, Gobierno de España.

Gráfico 3

Esquema de una planta emergente típica



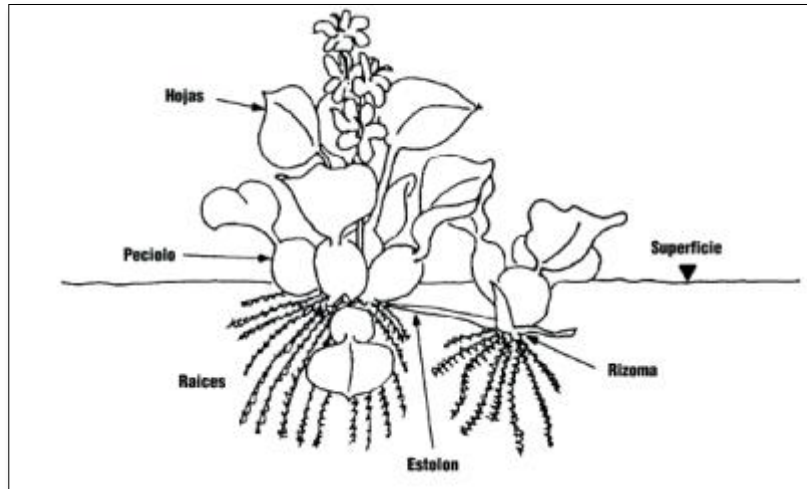
Nota. Adaptado de Esquema de una planta emergente típica [Fotografía], por I. Martín, 1989, Gobierno de España.

2.2.5. PLANTAS ACUÁTICAS FLOTANTES

Las plantas acuáticas flotantes son plantas de especies muy interesantes y crecen flotando libremente en lagos, pantanos, estanques, ríos, embalses o lagos, estas plantas exóticas no necesitan ser afiladas. Raíces en el agua donde las haya, como se les llama plantas acuáticas, es decir, pueden vivir en cualquier lugar donde haya suficiente agua o humedales. Estas plantas acuáticas cuidan de las algas, y sobre todo luchan por los nutrientes que necesitan para su ciclo biológico, además de bloquear la mayor parte de la luz solar, por lo que absorben todos los nutrientes presentes en el agua, así como los diversos contaminantes que pueden encontrarse en el agua. Esta planta acuática corresponde a las familias de las algas, pteridófitas y angiospermas, que también pertenecen a diferentes familias de plantas monocotiledóneas y dicotiledóneas. Además, puedes encontrar diferentes tipos, en unos casos sumergidos, unos parcialmente sumergidos y otros los que mantienen sus hojas flotando en el agua (Postposmo, s.f.).

Gráfico 4

Morfología de una macrófita flotante (*Eichhornia crassipes*)



Nota. Adaptado de Morfología de una macrófita flotante [Fotografía], por J. Lara, 2011, ResearchGate. <https://www.researchgate.net>.

2.2.6. LENTEJAS DE AGUA (LEMNA MINOR)

Lemna minor es una angiosperma monocotiledónea perteneciente a la familia *Lemnaceae*. Presenta un cuerpo vegetativo taloide, sin diferenciación entre tallo y hojas, constituido por una fronda plana y verde de la cual emerge una única raíz delgada y blanca.

Su tamaño es muy pequeño, generalmente entre 2 y 4 mm de longitud, lo que la ubica entre las angiospermas de menor dimensión.

Dentro de esta familia también se encuentra el género *Wolffia*, reconocido como el grupo de plantas con flores más diminutas del mundo. *Lemna minor* es una especie monoica que desarrolla flores unisexuales: las masculinas formadas por un estambre y las femeninas por un pistilo simple. Ambas se originan en una pequeña hendidura situada en el borde de la fronda y se encuentran protegidas por una espata. (Arroyave, 2004)

Gráfico 5

Planta de lenteja de agua (Lemna minor)



Nota. Adaptado de Planta lenteja de agua [Fotografía], por B. Commons wiki, 2005, Wikimedia Commons. <https://commons.wikimedia.org>

2.2.7. HELECHO DE AGUA (AZOLLA FILICULOIDES)

Azolla filiculoides, conocido como helecho de agua, es una especie acuática flotante de origen americano considerada exótica e invasora. Su expansión en distintas regiones se debe a su uso ornamental en acuariofilia y jardinería, así como a su empleo como biofertilizante en cultivos de arroz debido a su asociación simbiótica con la cianobacteria *Anabaena azollae*. Cuando forma capas densas sobre la superficie del agua, reduce significativamente la penetración de luz y genera condiciones de anoxia, afectando a las comunidades vegetales y animales de cuerpos de agua lentos y humedales.

Esta especie prospera especialmente en ambientes eutrofizados con altas concentraciones de fósforo. Forma una cubierta continua que puede extenderse incluso sobre suelos húmedos adyacentes. Sus tallos alcanzan hasta 15 cm de longitud y están cubiertos por hojas pequeñas de 1–2 mm, verdes en verano y rojizas en otoño e invierno. Presenta numerosas raíces flotantes de hasta 6 cm que no se fijan al sustrato. Su ciclo es completamente acuático y se reproduce principalmente por fragmentación del tallo, lo que facilita su dispersión a grandes distancias a través del flujo del agua. (Gasteiz, 2015)

Gráfico 6

Planta de azolla (Azolla filiculoides)



Nota. Adaptado de Planta de azolla [Fotografía], por M. Solá, 2020,

Biodiversidadvirtual.org. <https://www.biodiversidadvirtual.org>

2.2.8. AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales son cuerpos de agua que han sufrido alteraciones en sus características físicas, químicas o biológicas debido a diversas actividades humanas. Por ello, requieren ser tratadas antes de su reutilización, descarga en cuerpos naturales de agua o disposición en los sistemas de alcantarillado. Según la (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), s.f.), estas aguas deben ser gestionadas adecuadamente para evitar impactos negativos en la salud pública y el ambiente.

2.2.9. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

En cuanto a las aguas residuales, su composición proviene principalmente de fuentes urbanas, domésticas y viales. Los efluentes residuales están formados por aguas usadas, aguas de lavado, sólidos suspendidos y diversos residuos de origen orgánico e inorgánico. En muchos casos, las aguas industriales requieren un tratamiento previo antes de su descarga, debido a que suelen presentar una composición variada como se mencionó anteriormente. Además, cuando precipita, el agua de lluvia puede arrastrar material suspendido en la atmósfera, así como dióxido de carbono y polvo, lo cual modifica sus características (INNOTECH, s.f.).

2.2.10. CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

Según el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA,2015), las aguas residuales se clasifican en tres categorías principales:

- Aguas residuales industriales:** Proviene de procesos productivos como actividades mineras, agrícolas, energéticas y otras operaciones industriales. Su composición depende de los insumos y transformaciones utilizados en cada actividad.
- Aguas residuales domésticas:** Son generadas por zonas urbanas y establecimientos comerciales, e incluyen principalmente desechos fisiológicos y residuos propios de la actividad humana.
- Aguas residuales municipales:** Corresponden a la mezcla de aguas residuales domésticas con descargas industriales previamente tratadas y, en algunos casos, con aguas de drenaje pluvial, las cuales se conducen a través de sistemas de alcantarillado combinados.

2.2.11. COMPONENTES DE LAS AGUAS RESIDUALES

Según estadísticas internacionales, los efluentes residuales están compuestos aproximadamente por un 99 % de agua y un 1 % de sólidos suspendidos, disueltos y coloidales. Aunque la composición exacta varía según el origen y las condiciones del entorno, el agua sigue siendo el componente principal. Asimismo, diferentes fuentes de aguas residuales pueden contener diversos tipos de sustancias en concentraciones variables (ONU, 2017).

Es común que las aguas residuales domésticas y municipales presenten altos niveles de bacterias. Si bien muchas bacterias presentes en las heces humanas no son patógenas, cuando ocurre una infección se liberan al ambiente microorganismos causantes de enfermedades — como bacterias, virus, protozoos y helmintos— a través de los desechos fecales. Por ello, la eliminación de patógenos constituye uno de los objetivos principales del tratamiento de aguas residuales, con el fin de reducir la carga de enfermedades y la contaminación (ONU, 2017).

2.2.12. AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

El término *agua industrial* se refiere al recurso hídrico utilizado en los procesos de producción y manufactura dentro de distintos sectores industriales. Esto incluye, por ejemplo, el agua empleada para la limpieza de superficies, preparación de enjuagues, encurtidos o baños activos, entre otros. Una vez cumplida su función en la actividad productiva, esta se transforma en agua residual industrial, generalmente contaminada. La composición de este tipo de aguas no puede generalizarse, ya que depende directamente del tipo de industria y de sus procesos específicos (UNESCO, 2017).

En la actualidad existe una mayor disponibilidad de información referente a las características y la calidad de las aguas residuales industriales. La toxicidad, movilidad y carga de contaminantes presentes en ellas pueden generar impactos significativos sobre los recursos hídricos, la salud humana y el ambiente, incluso más que los volúmenes de agua empleados. Esta problemática se evidencia en los Registros de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (PRTR), los cuales recopilan datos sobre las cantidades de sustancias contaminantes emitidas por la industria —por encima de umbrales establecidos— hacia el agua, el aire y el suelo en países desarrollados (UNESCO, 2017).

De acuerdo con la UNESCO (2017), diversas actividades industriales generan aguas residuales con una amplia variedad de contaminantes. Si bien existen tecnologías capaces de eliminarlos, su aplicación suele depender de factores de costo-efectividad dentro de cada sector. Como resultado del tratamiento, se obtienen dos productos principales: agua tratada y materiales recuperados. El agua depurada puede ser reutilizada dentro de la misma planta, transferida a otra instalación industrial o descargada nuevamente al ciclo hidrológico para su aprovechamiento posterior.

2.2.13. TIPOS DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

Las aguas residuales industriales presentan composiciones muy diversas, ya que dependen directamente del tipo de actividad productiva que las genera. En términos generales, pueden agruparse en varias categorías según la naturaleza de los contaminantes predominantes (UNESCO, 2017):

- **Aguas con alcalinidad elevada:** Asociadas principalmente a procesos metalúrgicos y químicos, donde se emplean soluciones básicas para limpieza, desengrase o tratamiento de superficies.

- **Aguas de enfriamiento contaminadas:** Aunque el agua de refrigeración suele tener baja carga orgánica, en determinadas instalaciones —como plantas que manejan materiales radiactivos o centros médicos con equipos de radiología— puede contener trazas de radionúclidos.

- **Aguas con compuestos orgánicos:** Frecuentes en industrias alimentarias (especialmente cárnicas), papeleras y en la fabricación de detergentes y sustancias tensoactivas.

- **Aguas con aceites y grasas:** Provenientes del mecanizado y tratamiento de metales, refinerías o industrias que manipulan productos animales, tales como mataderos y plantas lácteas.

- **Aguas con acidez o metales pesados:** Generadas en actividades galvánicas, decapado, blanqueo o en procesos vinculados al tratamiento del carbón, donde se utilizan reactivos corrosivos y metales.

- **Aguas con sustancias tóxicas:** Emitidas por industrias químicas que producen explosivos, plaguicidas, colorantes y otros compuestos peligrosos, especialmente en el sector textil.

- **Aguas con residuos de detergentes y agentes limpiadores:** Características de lavanderías industriales, establecimientos comerciales y plantas de producción de productos de limpieza.

2.2.14. PRINCIPALES PROBLEMAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

A. Déficit de cobertura de los servicios de saneamiento a nivel nacional

- Los prestadores de servicios de saneamiento alcanzan solo alrededor del **70 % de la población urbana**, dejando un porcentaje significativo sin acceso adecuado al tratamiento de aguas residuales.

- La población no atendida suele **verter efluentes sin tratar** directamente en ríos, lagos, quebradas o al mar, o incluso reutilizarlos para riego, generando riesgos sanitarios y ambientales.

B. Deficiencias en el tratamiento y gestión por parte de los operadores de aguas residuales

- Muchas plantas de tratamiento operan con **sobrecarga hidráulica y deficiencias estructurales**, lo que impide cumplir los Límites Máximos Permisibles y los Estándares de Calidad Ambiental. Esto ocasiona contaminación de cuerpos de agua, malos olores y conflictos socioambientales.

- La descarga de aguas residuales sin tratamiento adecuado contribuye a la **degradación de las fuentes hídricas** y favorece la contaminación de aguas subterráneas, lo cual representa un riesgo para la salud de la población y afecta la flora y fauna local.

En conjunto, estas limitaciones intensifican la polución de los ecosistemas acuáticos y agravan los impactos ambientales asociados al manejo deficiente de las aguas residuales (ONU-Agua, 2017).

2.2.15. MARCOS LEGALES

Las regulaciones internacionales vinculadas a las aguas residuales se activan cuando estos efluentes —incluidos los provenientes de escorrentías pluviales o agrícolas— se descargan en ríos, lagos o acuíferos compartidos entre varios países. En la actualidad, dos tratados globales constituyen la base de la gobernanza sobre aguas dulces transfronterizas.

En primer lugar, la **Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho de los Usos de los Cursos de Agua Internacionales para Fines Distintos de la Navegación** (ONU, 1997; 2014) establece que los Estados deben adoptar medidas adecuadas para evitar causar daños significativos a otros países que comparten la misma fuente hídrica (artículo 7). Asimismo, promueve la cooperación entre Estados para la protección y uso sostenible de estos recursos (artículo 8). Sus principios han sido integrados en múltiples acuerdos regionales, dado que representan normas consolidadas del derecho internacional consuetudinario.

En segundo lugar, el **Convenio sobre la Protección y Utilización de los Cursos de Agua Transfronterizos y de los Lagos Internacionales**, impulsado por la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UNECE, 1992), nació como un instrumento regional, pero desde 2013 está abierto a la adhesión de todos los Estados miembros de la ONU.

Ambos tratados han impulsado el desarrollo de normativas regionales y nacionales relacionadas con la protección ambiental, incluyendo la gestión de residuos sólidos —entre ellos los peligrosos— y el control de contaminantes atmosféricos que pueden afectar cuerpos de agua a gran distancia del punto de emisión (ONU, 2017).

En el ámbito regional, la **Directiva Marco del Agua de la Unión Europea** (2000/60/EC) establece lineamientos para la protección y mejora de la calidad del agua, incluyendo cuerpos hídricos en riesgo de agotamiento. Complementariamente, la **Directiva de Residuos** (2008/98/EC) promueve el enfoque de las “3R” (reducir, reutilizar y reciclar) y aplica los principios de prevención y responsabilidad del contaminador.

La regulación sobre residuos sólidos constituye un elemento clave para la gestión de lodos y otros tipos de aguas residuales no directamente asociados al medio acuático.

En esta línea, el **Protocolo sobre el Agua y la Salud**, asociado al Convenio del Agua (CEPE/OMS, 1999; en vigor desde 2005), exige que los Estados Parte establezcan metas a nivel nacional y local para asegurar la protección de la salud pública, mejorar la gestión de la calidad del agua y fortalecer la prevención, control y reducción de enfermedades vinculadas al recurso hídrico (ONU, 2017).

En el Perú, la regulación vinculada a la calidad de las aguas residuales se sustenta en un conjunto de normas emitidas principalmente por el **Ministerio del Ambiente (MINAM)**, el **Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS)** y la **Autoridad Nacional del Agua (ANA)**. Estas disposiciones establecen los lineamientos para el control, monitoreo y gestión de los efluentes, con el fin de prevenir impactos negativos en cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Entre las principales normas se destacan las siguientes:

1. Límites Máximos Permisibles (LMP)

- Norma:** Decreto Supremo N.º 010-2019-MINAM, que modifica el D.S. N.º 003-2010-MINAM.

- Alcance:** Define los Límites Máximos Permisibles aplicables a los efluentes generados por actividades industriales, con énfasis en los sectores minero-metalúrgicos y afines.

- Propósito:** Regular las descargas de aguas residuales hacia cuerpos de agua naturales para reducir riesgos ambientales y garantizar condiciones seguras para los ecosistemas receptores.

2. Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA)

- Norma:** Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM.

- Contenido:** Establece los Estándares de Calidad Ambiental para agua, diferenciados según su uso (consumo humano, riego agrícola, recreación, preservación de vida acuática, entre otros).

- Relevancia:** Los ECA funcionan como referencia obligatoria para evaluar la calidad del agua que recibe descargas de efluentes, permitiendo determinar si existe riesgo o deterioro ambiental.

3. Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos

- Norma:** Decreto Supremo N.º 001-2010-AG.

- Descripción:** Regula la gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos en el país, incluyendo los procedimientos para autorización, control y fiscalización de los vertimientos de aguas residuales.

- Entidad responsable:** **Autoridad Nacional del Agua (ANA)**, encargada de supervisar el cumplimiento de los vertimientos y de proteger la disponibilidad y calidad del recurso hídrico.

4. Protocolo Nacional para el Monitoreo de Calidad de Aguas Residuales

- Institución:** MINAM / ANA

- Finalidad:** Uniformiza los métodos y procedimientos para el monitoreo de aguas residuales tratadas y no tratadas, estableciendo parámetros de análisis, frecuencias de muestreo y metodologías de laboratorio.

2.2.16. ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA CUERPOS RECEPTORES DE EFLUENTES INDUSTRIALES

La evaluación de la calidad del agua es fundamental para garantizar su idoneidad en diversos usos, tales como consumo humano, riego agrícola, procesos industriales, producción farmacéutica y gestión ambiental. En ese sentido, el concepto de calidad hídrica varía según las exigencias específicas de cada aplicación. Para ello, se han establecido normas que fijan concentraciones máximas de parámetros físicos, químicos y biológicos, las cuales permiten asegurar condiciones adecuadas según cada finalidad (Pinto, 2018).

En el caso peruano, los **Estándares de Calidad Ambiental para Agua**, establecidos mediante el **D.S. N.º 004-2017-MINAM**, constituyen el marco técnico de referencia para evaluar la aptitud de los cuerpos receptores. De acuerdo con esta normativa, los efluentes industriales del sector alimentario que se descargan en canales de almacenamiento destinados posteriormente al riego deben cumplir los valores establecidos para dicha categoría de uso, garantizando así la protección del suelo, los cultivos y la salud pública.

Tabla 2

ECA Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales

Parámetros	Unidad de medida	D:1 riesgo de vegetales		D2: Bebida de animales
		Agua para riego no restringido (c)	Agua para riego restringido	Bebida de animales
FÍSICOS - QUÍMICOS				
Aceites y Grasas	mg/L	5		10
Bicarbonatos	mg/L	518		-
Cianuro Wad	mg/L	0.1		0.1
Cloruros	mg/L	500		-
Color (b)	Escala Pt/Co	100 (a)		100 (a)
Conductividad	(μ S/cm)	2500		5000
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBQ)	mg/L	15		15
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	40		40
Detergentes	mg/L	0.2		0.5
Fenoles	mg/L	0.002		0.01
Fluoruros	mg/L	1		-
Nitratos (NO ₃ -N) + Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L	100		100
Nitritos (NO ₂ -N)	mg/L	10		10
Oxígeno Disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 4		≥ 4
Potencial de Hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6.5 – 8.5		6.5 – 8.4
Sulfatos	mg/L	1000		1000
Temperatura	°C.	$\Delta 3$		$\Delta 3$
INORGANICOS				
Aluminio	mg/L	5		5

Nota. Adaptado de *ECA Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales* por Ministerio del Ambiente, 2017.

2.2.17. LMP (LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES)

En el Perú, los Límites Máximos Permisibles (LMP) representan la concentración o nivel máximo permitido de cualquier elemento, sustancia o parámetro físico, químico o biológico caracterizado como una emisión. Cuando estos valores son superados, pueden generar impactos significativos en la salud humana, la seguridad de las personas y el ambiente.

El objetivo principal de los LMP es **controlar y regular la concentración de sustancias contaminantes** presentes en las aguas residuales o emisiones atmosféricas, con el fin de prevenir efectos adversos y asegurar una gestión ambiental adecuada. Para el caso de las descargas líquidas de origen doméstico e industrial, se aplica el Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, por el cual se aprueban los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR).

Según lo indicado por el MINAM, las PTAR que forman parte están obligadas a ajustarse a los LMP fijados para distintos parámetros, como DBO₅, DQO, sólidos suspendidos totales (SST), aceites y grasas, entre otros. Cumplir con estos límites permite disminuir la carga contaminante del efluente y garantizar la protección de los cuerpos de agua que reciben las descargas (MINAM, 2015).

Tabla 3

Límites máximos permisibles para efluentes de PTAR.

N°	Parámetro	Unidad	Límite Máximo Permissible
1	pH	unidad	6.5 – 8.5
2	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	mg/L	100
3	Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	200
4	Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mL/L	150
5	Aceites y Grasas	mg/L	20
6	Temperatura del efluente	°C	< 35
7	Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000

Nota. Adaptado de Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM que aprueba los Límites Máximos Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales.

2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES

Fitorremediación

La fitorremediación se refiere al uso de especies vegetales para recuperar ambientes afectados por diversos contaminantes. En términos más amplios, constituye una tecnología sostenible que emplea plantas para disminuir, directamente en el sitio, la concentración o la peligrosidad de compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en suelos, sedimentos, agua o aire. Esto se logra mediante procesos bioquímicos realizados por las propias plantas y por los microorganismos que habitan en la rizosfera, los cuales permiten transformar, inmovilizar, degradar o volatilizar distintos tipos de contaminantes. (Núñez, Meas, Ortega, & Olguín, 2004)

Vertimientos

Los vertimientos se refieren al proceso mediante el cual se descargan sustancias, compuestos o elementos disueltos o en suspensión dentro de un medio acuoso. Estas descargas pueden dirigirse a cuerpos naturales de agua, a sistemas de alcantarillado o incluso al suelo, constituyendo la fase final del manejo de diversos residuos líquidos. (ORARBO, 2020)

Reutilización de agua

La reutilización de agua consiste en aprovechar nuevamente el recurso hídrico que previamente ha sido empleado en actividades municipales o en procesos industriales. Para que este recurso pueda tener un segundo uso seguro y beneficioso, se requiere la aplicación de un tratamiento adicional que complemente las etapas habituales de depuración. Al agua que pasa por este proceso para ser utilizada nuevamente se le denomina *agua tratada*. (AEDyR, 2019)

Calidad de agua

La calidad del agua se entiende como el conjunto de características físicas y químicas que presenta una masa de agua, además de los organismos que alberga y su estado biológico. Según Chapman (1996), estas propiedades permiten evaluar las condiciones del recurso hídrico. Generalmente, la calidad se determina en función del uso previsto del agua, comparando sus

parámetros con estándares establecidos que aseguran su adecuada utilización. Los ecosistemas acuáticos cumplen múltiples funciones esenciales, entre ellas el abastecimiento de agua, el riego, el consumo para la ganadería, actividades recreativas y procesos naturales de depuración (AguasUrbanas, 2018).

Contaminantes

Se consideran contaminantes a aquellas sustancias químicas que no forman parte de la composición natural del suelo y que, al presentarse en concentraciones superiores a los niveles considerados normales, pueden generar impactos negativos en la salud humana y en el ambiente. (MINAM, Calidad Ambiental)

Turbidez

La turbidez se define como la disminución de la claridad del agua causada por la presencia de partículas suspendidas que dispersan la luz. Estas partículas pueden ser de origen mineral, como arcillas o limos, o de naturaleza orgánica, como restos de vegetación, materia en descomposición o microorganismos —incluyendo fitoplancton—. Aunque puede originarse por procesos naturales vinculados a la erosión o a la dinámica ecológica del cuerpo de agua, también puede incrementarse por actividades humanas, tales como descargas de aguas residuales y escorrentía urbana, que aportan sólidos y compuestos que elevan este parámetro. (Universidad Complutense de Madrid, 2015)

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La DBO representa la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para descomponer la materia orgánica presente en una muestra de agua. Este parámetro refleja el nivel de carga orgánica y, por ello, el grado de contaminación del recurso hídrico. Su determinación es un proceso biológico que demanda condiciones controladas, realizándose comúnmente a 20 °C durante cinco días, lo que se conoce como DBO₅. Esta duración fue adoptada como estándar debido al tiempo promedio que tardan los ríos británicos en llegar al mar. (Ibanez, 2017)

Demanda Química de Oxígeno (DQO)

La DQO corresponde a la cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente la materia orgánica presente en el agua hasta transformarla en compuestos inorgánicos como CO_2 y H_2O . Al igual que otros indicadores de calidad, se expresa en $\text{mg O}_2/\text{L}$, y valores elevados reflejan un mayor nivel de contaminación. A diferencia de la DBO, este análisis es más rápido, ya que puede completarse en aproximadamente tres horas. En efluentes industriales, los valores típicos de DQO suelen variar entre 50 y 2 000 $\text{mg O}_2/\text{L}$, pudiendo alcanzar hasta 5 000 $\text{mg O}_2/\text{L}$ dependiendo del tipo de actividad. (Ibanez, 2017)

Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Los Sólidos Suspendidos Totales representan la fracción de material particulado que permanece en suspensión dentro de aguas superficiales o residuales. Su determinación se basa en cuantificar los residuos retenidos en un filtro de fibra de vidrio con un tamaño de poro aproximado de $0,45 \mu\text{m}$. Este parámetro permite evaluar la presencia de partículas orgánicas e inorgánicas que afectan la claridad del agua y su calidad general. (ANDINA, 2005)

pH

El pH es un indicador que expresa el nivel de acidez o alcalinidad de una solución, en este caso de las aguas residuales. Constituye un parámetro fundamental en la evaluación de la calidad del agua, ya que influye directamente en la eficiencia de los procesos de tratamiento y en los posibles efectos sobre los cuerpos receptores donde se descargan los efluentes. Su escala varía de 0 a 14: valores inferiores a 7 representan condiciones ácidas, un pH de 7 corresponde a neutralidad y valores superiores a 7 reflejan un medio alcalino. (Metcalf & Eddy, 2014)

2.4. HIPÓTESIS

2.4.1. HIPÓTESIS GENERAL

Hi: La eficacia de dos especies *Azolla filiculoides* y *Lemna minor* en un humedal de flujo superficial reduce los parámetros de DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez en aguas residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp.

Ho: La eficacia de dos especies *Azolla filiculoides* y *Lemna minor* en un humedal de flujo superficial no reduce los parámetros DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez en aguas residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp.

2.5. VARIABLES

2.5.1. VARIABLE DEPENDIENTE

Contaminación orgánica de agua residual.

2.5.2. VARIABLE INDEPENDIENTE

Eficacia de *Azolla filiculoides* Y *Lemna minor*.

2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Título: “COMPARACIÓN DE LA EFICACIA DE *Azolla filiculoides* Y *Lemna minor* EN HUMEDAL DE FLUJO SUPERFICIAL PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN ORGÁNICA DE AGUA RESIDUAL DEL PTAR DE ESMERALDA CORP, LIMA, 2024”

Tabla 4

Operacionalización de variables (Dimensión e indicadores).

Variables	Indicadores	Valor Final	Tipo de Variable
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Especies remediadoras 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Azolla filiculoides</i> ▪ <i>Lemna minor</i> 	
	Parámetros	Unidad de medición	
Variable Independiente:	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DQO ▪ TSS ▪ DBO5 ▪ pH ▪ Temperatura ▪ Turbiedad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ O2 (mg/L) ▪ mg/L ▪ mg/L ▪ Unid. pH ▪ ° C ▪ NTU 	Nominal Politémica
Eficacia de <i>Azolla filiculoides</i> Y <i>Lemna minor</i>.			

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con la clasificación propuesta por Supo y Zacarías (2020), el estudio presenta las siguientes características:

En función del tipo de intervención del investigador, se trata de una investigación con intervención, ya que se realizará una acción directa sobre la realidad para posteriormente analizar los resultados obtenidos.

Respecto al número de variables analíticas, corresponde a un diseño analítico multivariable, debido a que se evaluará más de una variable en el proceso.

Según el número de mediciones realizadas, el estudio es de tipo longitudinal, dado que se efectuará más de una medición a lo largo del tiempo.

Finalmente, con base en el control y seguimiento de las mediciones, se clasifica como un estudio prospectivo, puesto que la recolección y evaluación de los datos se llevará a cabo hacia adelante en el tiempo mediante diversas mediciones.

3.1.1. ENFOQUE

La investigación se desarrolló bajo un **enfoque cuantitativo**, debido a que se centra en el análisis objetivo de un problema delimitado, empleando procedimientos estandarizados y técnicas estadísticas para procesar e interpretar los datos (Supo & Zacarías, 2020).

3.1.2. ALCANCE O NIVEL

El estudio corresponde al **nivel aplicativo**. Según Supo y Zacarías (2020), este nivel se caracteriza por incluir una dimensión evaluativa e interventiva, orientada a generar mejoras en la realidad estudiada. La intervención se ejecuta de manera planificada y sistemática, y sus resultados son sometidos a evaluación con el propósito de determinar su eficacia.

3.1.3. DISEÑO

$$GE_1: O_1 \dots \dots x_1 \dots \dots O_2$$
$$GE_2: O_1 \dots \dots x_2 \dots \dots O_2$$

GE_1 : Grupo de estudio

GE_2 : Grupo de estudio

O_1 : Análisis inicial

O_1 : Análisis inicial

O_2 : Análisis final

O_2 : Análisis final

x_1 : Intervención con *Azolla filiculoides*.

x_2 : Intervención con *Lemna minor*.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. POBLACIÓN

La población del estudio estuvo constituida por el agua residual y doméstica, principalmente contaminada por procesos industriales de tipo industrial y domésticos teniendo como tipo de efluente: efluente hidrobiológicos, agroindustriales, domésticos, lavado de jabas, comedor, etc., y de procesos cárnicos. Estas aguas residuales fueron recolectadas posterior a sus unidades de tratamiento primario, tratamiento secundario para luego ser Fito remediados con las plantas acuáticas en los dos estanques de flujo superficial hechos de madera, que estuvieron ubicados en el área de SBR – Tratamiento biológico aeróbico de las instalaciones de la PTAR de la empresa ESMERALDA CORP. La cantidad de agua residual utilizada semanalmente por cada estanque, según el tipo de especie acuática, fue de 60 litros. En total, durante las 5 semanas de tratamiento, se emplearon 300 litros de agua residual.

La PTAR está compuesta por Unidades de TRATAMIENTO -UT que se clasifican en función al tipo de tratamiento aplicado: Tratamiento Primario (Tamizado y Sedimentación), Tratamiento Secundario (Biológico aeróbico), Tratamiento Terciario (Ultrafiltración – MBR), posterior a ello el agua tratada por la PTAR pasa por los difusores de

aire, colector principal y finalmente al reservorio de almacenamiento final para ser utilizada en el riego de áreas verdes.

El humedal artificial de flujo superficial o llamado también wetland piloto, fue construido utilizando cajones de madera. Se acondicionaron dos estanques con las siguientes dimensiones: 0.30 m de ancho, 0.40 m de profundidad y 1.60 m de largo, lo que resulta en una capacidad total de 0.192 metros cúbicos (m^3) en las cuales se han desarrollado las plantas acuáticas por un tiempo de 7 días durante 5 semanas, es decir se cambian las plantas y el agua residual semanalmente. Para asegurar la impermeabilización y evitar filtraciones de las aguas residuales, los estanques de madera fueron reforzados con geomembrana y recubiertos con plástico. En el Anexo 5, correspondiente a la vista fotográfica N°1 del proceso de construcción del humedal artificial de madera, se observa la instalación y montaje del estanque recolector, el cual utiliza tuberías de PVC con un diámetro de 1 pulgada.

El caudal máximo de ingreso promedio del agua residual es de 31.01 ($m^3/día$), lo cual es el caudal promedio de ingreso durante las 24 horas de operación de la PTAR. El ingreso de afluentes a la PTAR se da mediante 3 tanques colectores donde ingresa el agua residual y doméstica: Colector 1 (procesos industriales y domésticos: 307 $m^3/día$), Colector 2 (procesos industriales y domésticos: 277.21 $m^3/día$), Colector 3 (Procesos cárnicos: 160 $m^3/día$). En total el volumen de ingresa a la PTAR es de 744.24 ($m^3/día$), lo cual indica que es el ingreso actual promedio de aguas residuales a la PTAR ($m^3/día$) de los colectores 1, 2 y 3.

Las plantas acuáticas flotantes *Lemna minor* (lenteja de agua) y *Azolla filiculoides* (helecho de agua) fueron proporcionadas por un proveedor especializado en plantas acuáticas durante todo el desarrollo del proyecto. Se adquirieron 120 gramos de cada especie por semana, acumulando un total de 600 gramos de cada tipo de planta al final de las 5 semanas.

Tabla 5*Coordenadas UTM del punto de muestreo (Zona 18L)*

Coordenadas Este	0284780 m E
Coordenadas Norte	8649346 m S

3.2.2. MUESTRA

Durante las 5 semanas de tratamiento, se recolectaron 5 muestras para el estudio Pre-Test y 10 muestras para el Post-Test. En la semana 1, se realizó la muestra inicial (Pre-Test) del agua residual, y, tras completar los 7 días de tratamiento, se efectuó el Post-Test del agua tratada con las plantas acuáticas flotantes *Lemna minor* (lenteja de agua) y *Azolla filiculoides* (helecho de agua) a cabo de 3 muestreos por semana.

El control de las muestras se llevó a cabo en el laboratorio interno de la PTAR Esmeralda Corp. No obstante, para la validación y certificación de los análisis de calidad del agua, se contó con el apoyo de un laboratorio de ensayo acreditado por INACAL- DA, con registro N° LE-047 (Servicios Analíticos Generales SAC). La toma de muestras fue realizada por el personal del laboratorio en colaboración con el autor de la tesis. Una vez recolectadas, las muestras fueron trasladadas a las instalaciones del laboratorio. en la ciudad de Lima, siguiendo estrictamente los protocolos establecidos, con especial atención a la cadena de custodia.

En el Anexo 5, correspondiente a la vista fotográfica N°5 del proceso de medición de parámetros del laboratorio acreditado, se observa en detalle el procedimiento de muestreo llevado a cabo por el personal certificado ante INACAL. Asimismo, en el Anexo 6 se incluyen los informes emitidos por el laboratorio acreditado Servicios Analíticos Generales SAC (SAG).

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1. TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

La observación.

3.3.2. INSTRUMENTO PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Tabla 6

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Variable	Indicador	Técnica	Instrumento
Calidad del agua residual.	DQO	Observación	Reactor COT
	SST		Equipo de filtración
	DBO5		Equipo OXITOP
	pH		Medidor de pH Portátil
	Temperatura		Medidor de T° Portátil
	Turbiedad		Turbidímetro

3.4. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO Y ANALISIS DE LA INFORMACIÓN

El proyecto se desarrolló con base en los resultados obtenidos del laboratorio y el análisis de muestras, siguiendo los procedimientos y protocolos establecidos para este tipo de evaluaciones. Asimismo, se consideraron las disposiciones del Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM, que regula la gestión de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas y municipales del Perú. Establece los límites de contaminantes en los efluentes de aguas residuales y fija los lineamientos para su monitoreo, incluyendo protocolos para la correcta recolección y manejo de muestras.

Los trabajos experimentales a nivel piloto fueron documentados mediante fotografías y filmaciones, con el respaldo de personal de laboratorio acreditado. Las muestras de agua residual se enviaron al laboratorio ubicado en la Av. Naciones Unidas Nro. 1565, Lima, en menos de 5 horas tras su recolección en la PTAR situada en la Carretera Panamericana Sur, Manzana G, Lote 01, distrito de San Juan de Miraflores. Para garantizar su autenticidad, las muestras se sellaron con cinta adhesiva, se etiquetaron minuciosamente y se entregaron bajo una estricta cadena de custodia. Todas las etapas del

proceso, desde la recolección hasta la entrega, se realizaron siguiendo protocolos rigurosos.

Acciones previas a la toma de muestras

Antes de iniciar el muestreo, es necesario preparar los equipos e instrumentos que se utilizarán, seleccionar los recipientes adecuados y definir el volumen de muestra requerido. Asimismo, se establece el tipo de preservante a emplear y el tiempo máximo de conservación. También se reúnen los materiales complementarios y se verifica la disponibilidad del equipo de protección personal para garantizar una toma de muestras segura.

Acciones durante la toma de muestras

En el proceso de recolección, se obtienen las muestras siguiendo el protocolo establecido; posteriormente, los envases son identificados correctamente. Se asegura su adecuada manipulación y protección, así como las condiciones de transporte y almacenamiento temporal. Además, se consideran precauciones específicas del sitio de muestreo y se registran mediciones *in situ* que complementan la información obtenida.

Acciones posteriores a la toma de muestras

Una vez concluido el muestreo, se realiza la verificación o calibración de los equipos empleados y se procede al análisis de las muestras en laboratorio.

Para la presentación de datos

Para la presentación de la información, se utilizaron todas las muestras obtenidas durante el trabajo de campo. Dichas muestras fueron posteriormente procesadas y evaluadas en laboratorio, a fin de generar los resultados que sustentan el análisis del estudio.

Para el análisis e interpretación de los datos

El análisis se realizó utilizando el software SPSS, aplicando la prueba paramétrica *ANOVA de un factor (One-Way ANOVA)*. Para la elaboración de los descriptivos se empleó Microsoft Excel.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. PROCESAMIENTO DE DATOS

Durante el período de cinco semanas de estudio (S1-S5), el sistema de humedales fue recargado semanalmente con agua residual nueva. Esto significa que, en cada semana, el proceso de tratamiento comenzó con agua residual fresca, cuyas características iniciales fueron evaluadas antes de su ingreso al sistema.

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos durante el período de estudio de cinco semanas, donde se evalúan los parámetros de calidad del agua antes (pre- test) y después (post- test) del tratamiento con humedales artificiales. Además, se incluyen los efectos del tratamiento usando *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* como especies vegetales en el sistema de tratamiento.

Tabla 7

Cambios en parámetros de calidad del agua durante las semanas de estudio con diferentes tratamientos vegetales

Semana	Parámetro	Agua residual sin tratar	Tratamiento con <i>Lemna minor</i>	Tratamiento con <i>Azolla filiculoides</i>
SEM1	DQO	25 mg/l	32 mg/l	38 mg/l
	SST	5 mg/l	3 mg/l	5 mg/l
	DBO5	5 mg/l	10 mg/l	10 mg/l
	pH	7,59	8.2	8.27
	Temperatura	20,1 °C	19,3 °C	19,1 °C
	Turbidez	1,02 UNT	0,837 UNT	1,93 UNT
SEM2	DQO	34 mg/l	58 mg/l	39 mg/l
	SST	5 mg/l	5 mg/l	5 mg/l
	DBO5	5 mg/l	10 mg/l	10 mg/l
	pH	7.84	7.67	7,94
	Temperatura	21 °C	18,5 °C	18,4 °C
	Turbidez	0,873 UNT	1,74 UNT	1,82 UNT
SEM3	DQO	20 mg/l	57 mg/l	47 mg/l
	SST	5 mg/l	3 mg/l	5 mg/l
	DBO5	5 mg/l	30 mg/l	25 mg/l
	pH	7.71	7,89	8.33
	Temperatura	19,4 °C	19,5 °C	19,5 °C
	Turbidez	0,761 UNT	0,668 UNT	1,72 UNT
SEM4	DQO	42 mg/l	44 mg/l	35 mg/l
	SST	5 mg/l	3 mg/l	5 mg/l
	DBO5	5 mg/l	17 mg/l	15 mg/l
	pH	7.87	7.52	7,98
	Temperatura	19,8 °C	18,4 °C	18,2 °C
	Turbidez	1,93 UNT	0,632 UNT	1,05 NTU
SEM5	DQO	24 mg/l	64,9 mg/l	59,2 mg/l
	SST	3 mg/l	9,69 mg/l	3,43 mg/l
	DBO5	7,6 mg/l	34,6 mg/l	22,25 mg/l
	pH	7,77	7.83	8.12
	Temperatura	20,6 °C	17,4 °C	17,7 °C
	Turbidez	0,75 UNT	2,4 NTU	1,7 UNT

Nota. Los valores de **DQO**, **DBO5**, **SST**, **pH**, **Temperatura** y **Turbidez** fueron analizados tanto antes del tratamiento (pre-test) como después de haber utilizado ***Lemna minor*** y ***Azolla filiculoides*** como especies vegetales en el proceso.

En la siguiente tabla 8 se presentan los resultados de los análisis realizados al agua residual en diferentes condiciones. El término "control" hace referencia al agua residual sin tratar, utilizada como referencia inicial para evaluar la efectividad de los humedales artificiales en la remoción de contaminantes.

Esta agua residual se alimentó directamente a los humedales experimentales y sirvió como punto de comparación con los resultados obtenidos tras el tratamiento.

Tabla 8

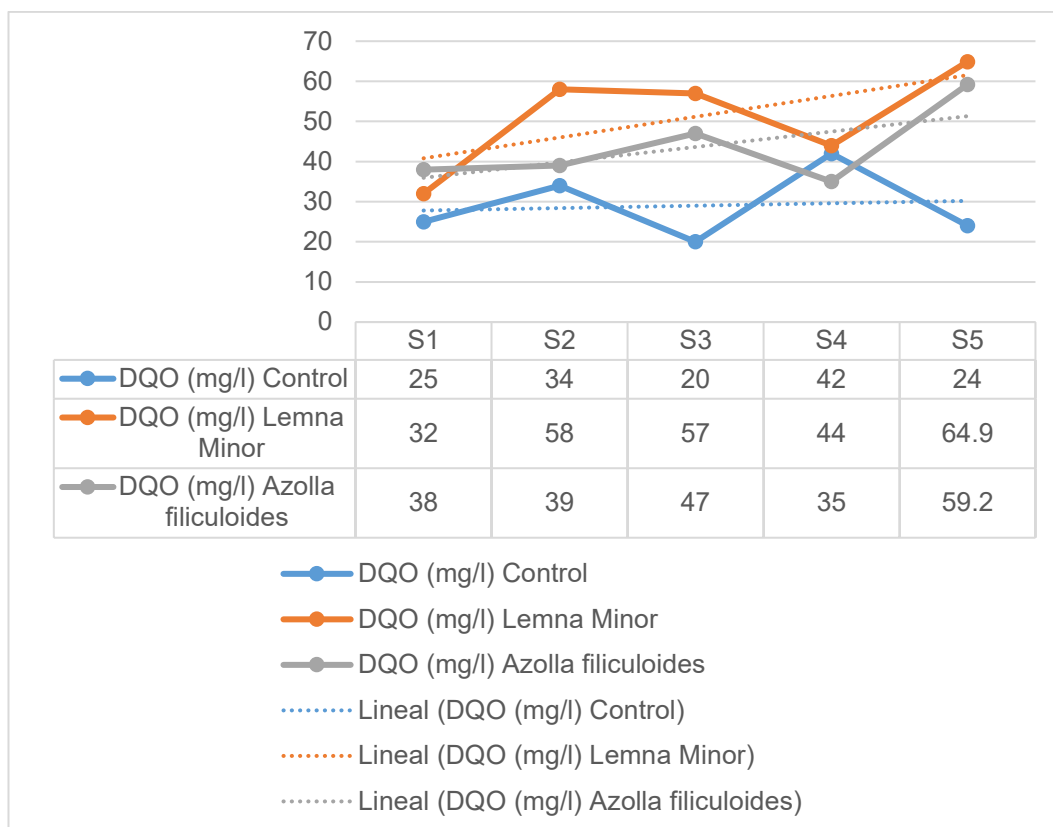
Descriptivos del DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con Lemna minor y Azolla filiculoides en un humedal de flujo superficial.

	GRUPO	S1	S2	S3	S4	S5	LMP
DQO (mg/l)	Control (agua sin tratar)	25	34	20	42	24	200 mg/L
	<i>Lemna Minor</i>	32	58	57	44	64.9	
	<i>Azolla filiculoides</i>	38	39	47	35	59.2	
SST (mg/l)	Control (agua sin tratar)	5	5	5	5	3	150 mg/L
	<i>Lemna Minor</i>	3	5	3	3	9.69	
	<i>Azolla filiculoides</i>	5	5	5	5	3.43	
DBO5 (mg/l)	Control (agua sin tratar)	5	5	5	5	76	100 mg/L
	<i>Lemna Minor</i>	10	10	30	17	34.6	
	<i>Azolla filiculoides</i>	10	10	25	15	22.25	
pH	Control (agua sin tratar)	7.59	7.84	7.71	7.87	7.6	6,5 – 8,5
	<i>Lemna Minor</i>	8.2	7.67	7.89	7.52	7.83	
	<i>Azolla filiculoides</i>	8.27	7.94	8.33	7.98	8.12	
Temperatura (°C)	Control (agua sin tratar)	20.1	21	19.4	19.8	20.6	(<35°C)
	<i>Lemna Minor</i>	19.3	18.5	19.5	18.4	17.4	
	<i>Azolla filiculoides</i>	19.1	18.4	19.5	18.2	17.7	
Turbidez (NTU)	Control (agua sin tratar)	1.02	0.87	0.76	1.93	0.75	*
	<i>Lemna Minor</i>	0.84	1.74	0.67	0.63	2.4	
	<i>Azolla filiculoides</i>	1.93	1.82	1.72	1.05	1.7	

Nota. En esta tabla se presentan los datos descriptivos obtenidos durante el período de estudio, que abarcó cinco semanas (S1, S2, S3, S4 y S5). Los datos fueron recolectados mediante trabajo de campo y corresponden a los indicadores de interés para el agua residual tratada en la PTAR, evaluados durante el proceso de tratamiento en la unidad de estudio. Además, se incluyó al final del cuadro una columna que especifica los valores máximos permitidos (LMP) y sus respectivas unidades, conforme a lo establecido en el Decreto Supremo N.° 003-2010-MINAM.

Gráfico 7

Tendencia de los valores del DQO (mg/l) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial



Nota. Se aprecia que tanto el tratamiento con DQO y con *Azolla filiculoides* son los que tienen tendencia creciente semejantes y mayor a la que se encuentra en el grupo control.

Interpretación de la gráfica y tabla de DQO.

1. Comportamiento del DQO en el grupo control

- El grupo control (línea azul) mantiene valores relativamente bajos de DQO a lo largo de las cinco semanas (S1 a S5).
- Esto indica que, en ausencia de plantas, el sistema parece mantenerse más estable, con un rango de variación limitado (20-42 mg/L).
- Las fluctuaciones observadas en S2 (34 mg/L) y S4 (42 mg/L) podrían estar relacionadas con factores externos, como una variación en las características del agua residual ingresada al sistema.

Interpretación:

El grupo control refleja un punto de comparación importante, mostrando que los tratamientos con plantas parecen influir significativamente en el comportamiento de la DQO.

2. Efecto del tratamiento con *Lemna minor*

- Los valores de DQO en el tratamiento con *Lemna minor* (línea naranja) presentan una clara tendencia ascendente, pasando de 32 mg/L en S1 a 64,9 mg/L en S5.
- Este incremento sugiere que *Lemna minor* podría estar liberando compuestos orgánicos al agua, posiblemente debido a:
 - **Excreción metabólica:** Durante su crecimiento, las plantas pueden liberar azúcares, lípidos o compuestos fenólicos al agua.
 - **Descomposición:** Las hojas o raíces de *Lemna minor* podrían estar en descomposición en el humedal, contribuyendo a la carga orgánica.
 - **Competencia por oxígeno:** La presencia densa de esta planta podría reducir la oxigenación del agua, lo que disminuye la capacidad de degradación de materia orgánica por parte de microorganismos aerobios.

Interpretación:

Aunque *Lemna minor* puede ser eficiente en la remoción de otros contaminantes (como nutrientes), su impacto en el DQO parece ser negativo, dado que contribuye al aumento de la carga orgánica.

3. Efecto del tratamiento con *Azolla filiculoides*

- Los valores de DQO en el tratamiento con *Azolla filiculoides* (línea gris) también muestran un incremento, pero con una fluctuación más moderada en comparación con *Lemna minor*.
- La DQO comienza en 38 mg/L en S1, aumenta a 47 mg/L en S3, disminuye en S4 (35 mg/L) y finalmente llega a 59,2 mg/L en S5.
- Este patrón sugiere que, aunque *Azolla filiculoides* también puede liberar compuestos orgánicos, su impacto es menos constante. Esto podría deberse a:

- **Crecimiento controlado:** *Azolla filiculoides* puede tener un menor índice de proporción en comparación con *Lemna minor*.
- **Efecto biológico:** Esta planta podría favorecer la actividad de microorganismos que consumen ciertos compuestos orgánicos, lo que explicaría la disminución en S4.

Interpretación:

El tratamiento con *Azolla filiculoides* parece tener un menor impacto negativo en la DQO en comparación con *Lemna minor*, aunque los valores finales siguen siendo más altos que el grupo control.

4. Comparación entre tratamientos y control

- Ambos tratamientos con plantas muestran valores de DQO más altos que el grupo control en todos los puntos evaluados (S1-S5).
- Esto sugiere que, en este sistema de humedal de flujo superficial, las plantas pueden actuar como una fuente adicional de materia orgánica, aumentando los valores de DQO.
- Sin embargo, *Lemna minor* tiene una tendencia creciente más pronunciada, lo que indica que su impacto en la calidad del agua podría ser más significativo que el de *Azolla filiculoides*.

Conclusiones y recomendaciones

1. Impacto general de las plantas en el DQO:

- Los tratamientos con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* no parecen ser efectivos para reducir los valores de DQO en este sistema, ya que, en lugar de remover materia orgánica, contribuyen a un aumento significativo.

2. Ajustes potenciales al sistema:

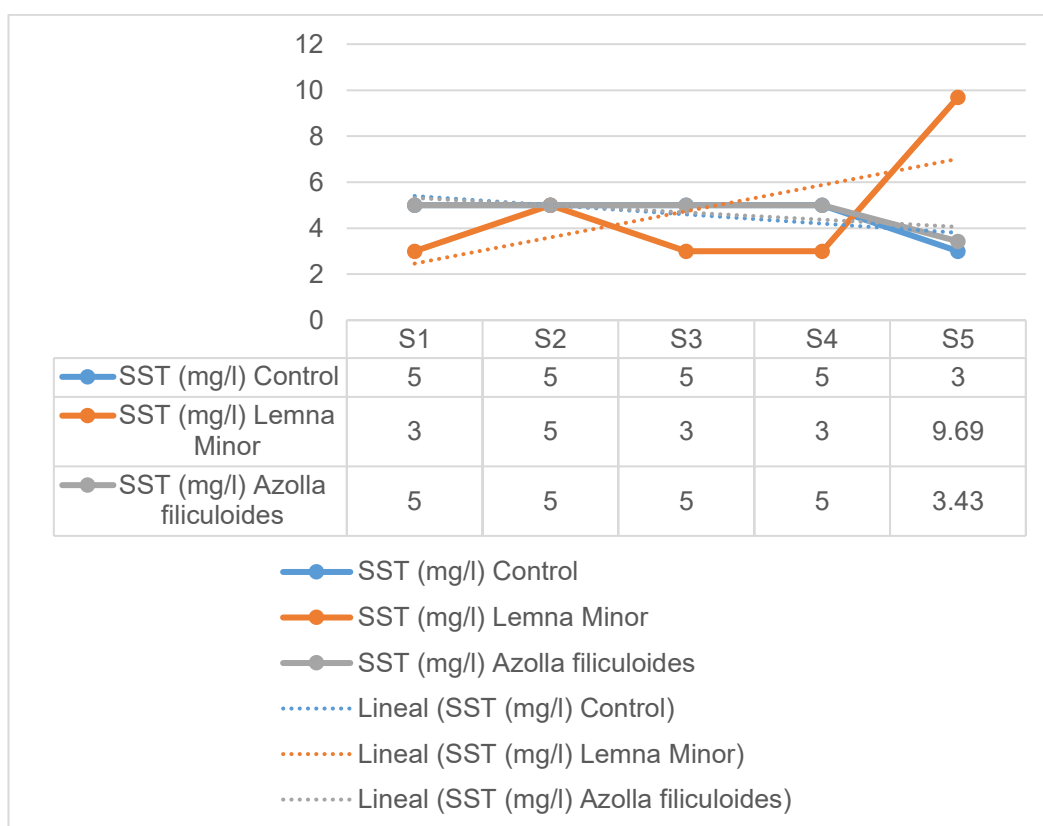
- Considerar combinar estas plantas con otros mecanismos que favorecen la remoción de materia orgánica, como:
 - Incrementar la aireación del sistema para favorecer la actividad de microorganismos aerobios.
 - Incorporar etapas adicionales de filtración o remoción mecánica de biomasa vegetal para evitar su descomposición en el agua.

3. Investigaciones futuras:

- Evaluar si la densidad de las plantas influye en la liberación de compuestos orgánicos.
- Analizar otros parámetros del agua (pH, oxígeno disuelto, nutrientes) para comprender mejor cómo estas plantas afectan el ecosistema del humedal.

Gráfico 8

Tendencia de los valores de los SST (mg/l) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial



Nota. Se aprecia que el grupo control y el agua tratada con *Azolla filiculoides* tienen tendencia decreciente en los valores de SST, por otro lado, el agua tratada con *Lemna minor* tiene tendencia creciente en los valores de SST.

Interpretación de la gráfica y tabla de SST

Grupo control (línea azul)

1. Los valores de SST se mantienen constantes en 5 mg/L durante las primeras cuatro semanas (S1-S4) y disminuyen a 3 mg/L en S5.
2. Esto indica estabilidad en el sistema sin la influencia de las plantas, con una ligera disminución al final, posiblemente por sedimentación natural de los sólidos suspendidos en el humedal.

Interpretación:

El grupo control representa un sistema más estable en cuanto a sólidos suspendidos, sin una tendencia creciente ni fluctuaciones significativas.

1. Tratamiento con *Lemna minor* (línea naranja)

- El tratamiento comienza con valores de 3 mg/L en S1 y S2, se mantiene constante hasta S4, y luego presenta un aumento drástico a 9.69 mg/L en S5.
- Este comportamiento sugiere que *Lemna minor* podría estar contribuyendo a una liberación repentina de partículas o sólidos al sistema.
- Las posibles razones incluyen:
 - **Descomposición del tejido vegetal:** En la última semana, partes de las plantas podrían haberse degradado, liberando sólidos al agua.
 - **Disturbios físicos:** Algún cambio en las condiciones del humedal (como el flujo) podría haber causado la resuspensión de sólidos.

Interpretación:

Aunque los valores son bajos inicialmente, el aumento final implica que *Lemna minor* puede influir negativamente en la calidad del agua al incrementar los sólidos suspendidos en ciertas condiciones.

2. Tratamiento con *Azolla filiculoides* (línea gris)

- Los valores de SST permanecen constantes en 5 mg/L durante las primeras cuatro semanas y luego disminuyen a 3.43 mg/L en S5.
- Este patrón es similar al del grupo control, pero con una reducción más moderada en S5.
- Esto sugiere que *Azolla filiculoides* tiene un efecto más neutro en los sólidos suspendidos, contribuyendo mínimamente al aumento de partículas en el agua.

Interpretación:

Azolla filiculoides parece mantener una estabilidad en los SST, con una ligera capacidad para reducirlos hacia el final, posiblemente debido a su capacidad de retener partículas en su estructura.

3. Comparación general entre tratamientos y control

- El control y *Azolla filiculoides* muestran valores similares de SST a lo largo del tiempo, lo que indica que este último tiene un impacto reducido en la cantidad de sólidos suspendidos.
- Por el contrario, *Lemna minor* presenta un aumento considerable en S5, lo que sugiere que bajo ciertas condiciones puede ser menos eficiente para mantener la calidad del agua en términos de SST.

Conclusiones y recomendaciones

1. Impacto de *Lemna minor*:

- Aunque inicialmente muestra valores más bajos de SST, su aumento drástico al final indica que podría no ser adecuado en sistemas donde se prioriza la reducción de sólidos suspendidos.
- Se recomienda investigar más a fondo los factores que provocan este aumento, como la densidad de la planta, el tiempo de residencia del agua o la acumulación de biomasa.

2. Efectividad de *Azolla filiculoides*:

- Este tratamiento muestra un comportamiento similar al control, sugiriendo que podría ser una opción más estable para el manejo de SST en humedales.

3. Revisión de diseño del humedal:

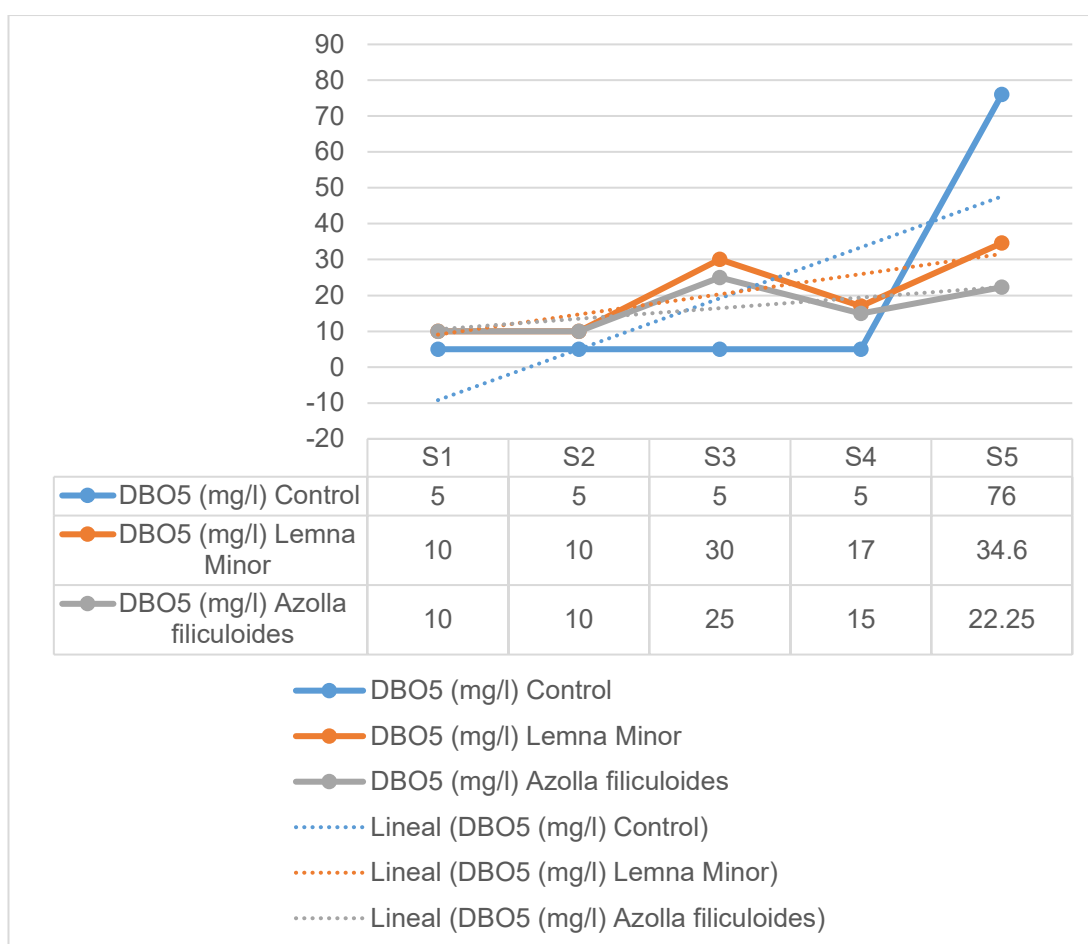
- Considere la implementación de un pretratamiento o una etapa de sedimentación adicional para reducir los sólidos antes de que el agua entre en contacto con las plantas.

4. Investigaciones futuras:

- Evaluar si las condiciones ambientales (como la temperatura o el flujo de agua) influyen en la liberación de sólidos suspendidos.

Gráfico 9

Tendencia de los valores de DBO5 (mg/l) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial



Nota. Se aprecia que todos los grupos tienen tendencia creciente en sus valores de DBO5 en el agua residual en estudio. El grupo control es el que presenta mayor tendencia justo al final del estudio, luego de haberse mantenido estático durante varios periodos evaluados. El tratamiento con *Lemna minor* le sigue en valores de tendencia creciente.

Interpretación de la gráfica y tabla de DBO5

1. Grupo control (línea azul)

- Los valores permanecen constantes en 5 mg/L desde S1 hasta S4, pero muestran un incremento súbito y pronunciado a 76 mg/L en S5.
- Este comportamiento puede deberse a:
 - **Acumulación de materia orgánica no industrial:** Podría haber un aumento en la carga orgánica en el sistema debido a procesos externos, como aportes adicionales de contaminantes o falta de biodegradación eficiente.
 - **Ausencia de plantas en el tratamiento:** Sin la acción de plantas que reduzcan la materia orgánica, los cambios en el sistema quedan más expuestos a fluctuaciones bruscas.

Interpretación:

Aunque inicialmente el control mantiene valores estables, su aumento drástico al final resalta la falta de mecanismos para controlar eficazmente la materia orgánica en sistemas sin plantas.

2. Tratamiento con *Lemna minor* (línea naranja)

- Presenta valores iniciales constantes de 10 mg/L (S1 y S2), seguidos de un incremento significativo a 30 mg/L en S3, una disminución a 17 mg/L en S4 y un aumento a 34.6 mg/L en S5.
- Este comportamiento sugiere que *Lemna minor*:
 - **Tiene capacidad limitada para estabilizar la DBO5:** Aunque puede reducir los valores después de un pico, el sistema no logra mantener una tendencia decreciente constante.
 - **Podría liberar compuestos orgánicos:** La materia orgánica liberada por la planta (como hojas muertas o exudados) podría haber contribuido al aumento en S3 y S5.

Interpretación:

Aunque *Lemna minor* parece más efectiva que el control en contener el aumento de DBO5, su efectividad es variable, con fluctuaciones que sugieren un equilibrio delicado entre su capacidad de tratamiento y la liberación de materia orgánica propia.

3. Tratamiento con *Azolla filiculoides* (línea gris)

- Comienza con valores constantes de 10 mg/L en S1 y S2, alcanza un pico moderado de 25 mg/L en S3, disminuye a 15 mg/L en S4 y sube ligeramente a 22.25 mg/L en S5.
- Este patrón sugiere que *Azolla filiculoides*:
 - **Tiene un efecto estabilizador más fuerte que *Lemna minor*** : Aunque también presenta un pico, las fluctuaciones son menos pronunciadas, y los valores finales son menores.
 - **Reduce efectivamente la DBO5 en ciertas condiciones**: El descenso observado en S4 podría reflejar una mayor capacidad de biodegradación en el sistema.

Interpretación:

Azolla filiculoides parece ser más consistente que *Lemna minor* en reducir la DBO5, aunque no elimina completamente las fluctuaciones.

4. Comparación general entre tratamientos y control

- El control muestra un aumento extremadamente alto de DBO5 en S5, lo que refuerza la importancia de las plantas en el control de la materia orgánica en sistemas de humedales.
- *Lemna minor* es menos estable, con picos pronunciados en S3 y S5, lo que podría dificultar su uso como única solución en sistemas de tratamiento.
- *Azolla filiculoides* se desempeña mejor, con fluctuaciones más controladas y valores finales menores en comparación con el control y *Lemna minor*.

Conclusiones y recomendaciones

1. Efectividad de *Azolla filiculoides*:

- Es más consistente en el control de la DBO5, con valores finales más bajos que los otros tratamientos. Se recomienda priorizar esta planta en sistemas de tratamiento donde se busca reducir la materia orgánica.

2. Limitaciones de *Lemna minor*:

- Su capacidad para estabilizar la DBO5 parece limitada, especialmente en condiciones donde se acumula materia orgánica. Se recomienda combinar su uso con pretratamientos o con otras especies de plantas.

3. Importancia del control de DBO5 en el grupo control:

- La falta de plantas expone al sistema a incrementos abruptos de materia orgánica. Esto refuerza la necesidad de usar humedales plantados en sistemas de tratamiento de aguas residuales.

4. Investigaciones futuras:

- Analizar las causas de las fluctuaciones, como densidad de plantas, tiempo de retención hidráulica o cambios en la composición del agua residual.
- Evaluar combinaciones de *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* para aprovechar los beneficios de ambas especies.

- **Estabilidad química:** El agua residual podría contener compuestos que amortiguan los cambios de pH, manteniéndolo en un rango cercano a la neutralidad.

Interpretación:

El grupo control refleja la estabilidad natural del agua residual, pero esta ausencia de fluctuaciones podría limitar su capacidad de adaptación a condiciones externas que alteren el pH.

2. Tratamiento con *Lemna minor* (línea naranja)

- Los valores comienzan altos (8.2 en S1), disminuyen de forma sostenida hasta **7.67** en S2 y **7.52** en S4, pero terminan en un ligero aumento a **7.83** en S5.
- Posibles causas del comportamiento:
 - **Liberación de compuestos orgánicos:** El metabolismo de *Lemna minor* podría estar generando compuestos orgánicos o liberando hojas en procesamiento, que pueden influir en la acidificación inicial.
 - **Actividad biológica fluctuante:** La fotosíntesis y respiración de *Lemna minor* podrían alterar la concentración de CO₂ en el agua, afectando el pH.

Interpretación:

El tratamiento con *Lemna minor* tiende a disminuir el pH inicialmente, posiblemente debido a su metabolismo, pero muestra fluctuaciones que indican una interacción dinámica entre procesos biológicos y químicos.

3. Tratamiento con *Azolla filiculoides* (línea gris)

- Los valores comienzan altos (8.27 en S1), presentan un ligero descenso en S2 (7.94), un pico máximo en S3 (8.33), y una estabilización en torno a **8.12** en S5.
- Posibles causas del comportamiento:
 - **Fotosíntesis activa:** *Azolla filiculoides* podría estar aumentando el pH debido a la eliminación de CO₂ durante la fotosíntesis.

- **Capacidad alcalinizante:** Este comportamiento puede deberse a la presencia de metabolitos o compuestos en la planta que tienden a estabilizar el pH en rangos alcalinos.

Interpretación:

El tratamiento con *Azolla filiculoides* mantiene un pH más elevado y con menor fluctuación, lo que sugiere que es más adecuado para sistemas que requieren estabilidad en rangos ligeramente alcalinos.

4. Comparación general entre tratamientos y control

- El **grupo control** presenta la mayor estabilidad del pH, sin grandes fluctuaciones, pero carece de la capacidad de amortiguar cambios químicos significativos.
- *Lemna minor* tiende a acidificar ligeramente el sistema, pero sus fluctuaciones hacen que sea menos predecible para el control de pH.
- *Azolla filiculoides* es más consistente en mantener un rango alcalino, lo que la convierte en una opción más confiable para sistemas donde se busca prevenir acidificaciones.

Conclusiones y recomendaciones

1. Efectividad de *Azolla filiculoides*:

- Es más adecuado para mantener un pH estable en sistemas de tratamiento, especialmente cuando se busca prevenir acidificaciones.
- Su capacidad de alcalinización moderada la hace ideal para aguas residuales con tendencia ácida.

2. Limitaciones de *Lemna minor*:

- Aunque puede acidificar el sistema, su variabilidad lo hace menos confiable como único mecanismo de control.
- Se recomienda combinar su uso con otras especies o pretratamientos que complementen su acción.

3. Importancia del control del pH en el grupo control:

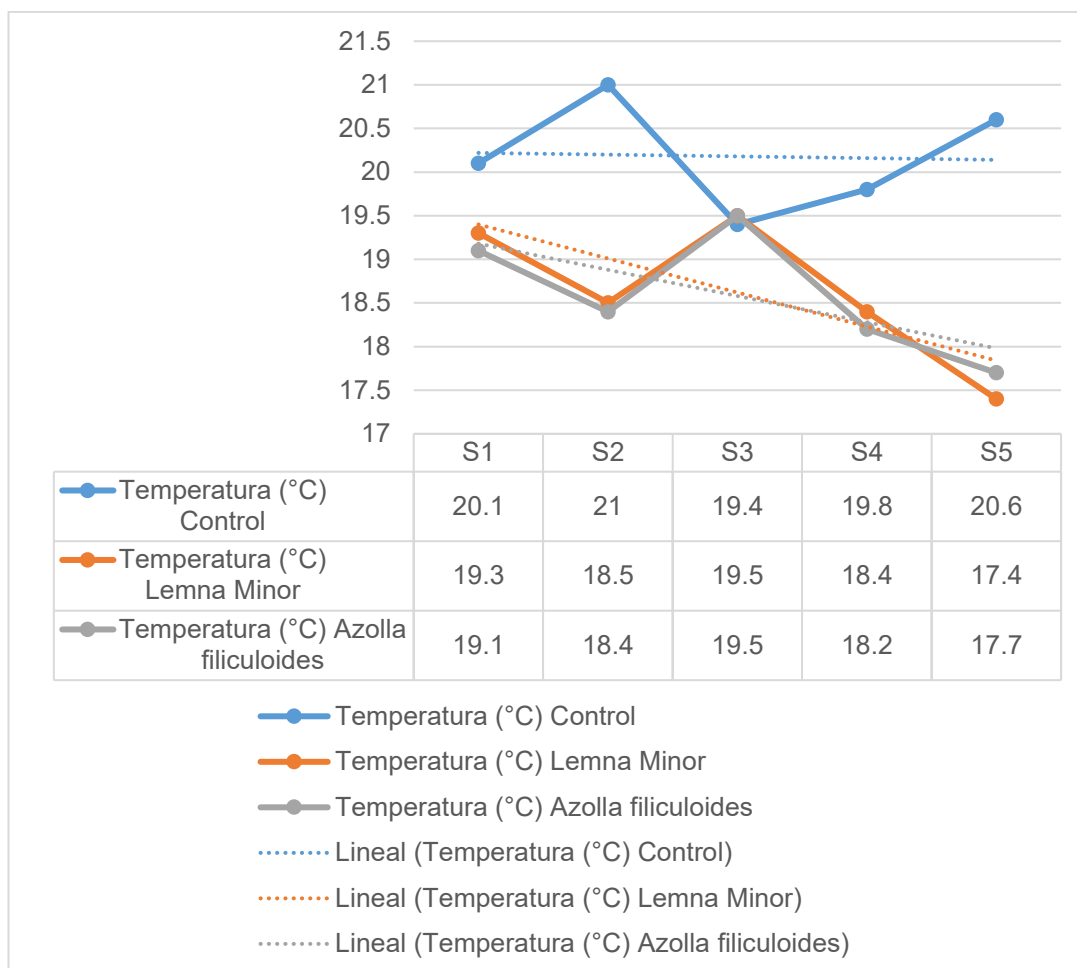
- La estabilidad del grupo control refleja la ausencia de procesos biológicos, pero también la falta de capacidad para adaptarse a cambios químicos extremos. Esto refuerza la necesidad de usar plantas en sistemas de tratamiento.

4. Investigaciones futuras:

- **Evaluar combinaciones de plantas:** Investigar cómo la combinación de *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* podría equilibrar los efectos acidificantes y alcalinizantes.
- **Monitorear otros parámetros:** Analizar cómo el pH interactúa con otros parámetros del agua residual, como oxígeno disuelto o DBO5.
- **Analizar tiempos de retención hidráulica:** Determinar cómo los cambios en el tiempo de tratamiento afectan la estabilidad del pH en presencia de plantas.

Gráfico 11

Tendencia de los valores de la temperatura (°C) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con Lemna minor y Azolla filiculoides en un humedal de flujo superficial



Nota. Se aprecia que los valores de la temperatura tienen tendencia decreciente tanto en el agua tratada con Lemna minor como en el agua tratada con Azolla filiculoides, en el grupo control la tendencia es estacionaria.

Interpretación de la gráfica y tabla de temperatura

1. Grupo control (línea azul)

- La temperatura inicia en **20.1 °C** (S1), presenta un aumento a **21 °C** en S2, una disminución progresiva a **19.4 °C** en S3, y un leve repunte a **20.6 °C** en S5.
- Posibles causas del comportamiento:
 - **Variación ambiental:** Los cambios de temperatura en el control probablemente reflejan las condiciones ambientales (temperatura ambiente y radiación solar).

- **Ausencia de cobertura vegetal:** Al no haber plantas que modifiquen la temperatura del agua, los cambios son más susceptibles a las fluctuaciones externas.

Interpretación:

El grupo control refleja la influencia directa de las condiciones externas sobre la temperatura del sistema, mostrando mayor variabilidad en comparación con los tratamientos.

2. Tratamiento con *Lemna minor* (línea naranja)

- La temperatura comienza en **19.3 °C** (S1), desciende hasta **18.5 °C** en S2, aumenta ligeramente a **19.5 °C** en S3, y termina en **17.4 °C** en S5, mostrando una tendencia general decreciente.
- Posibles causas del comportamiento:
 - **Efecto aislante de *Lemna minor*:** La cobertura vegetal puede reducir la exposición directa del agua a la radiación solar, disminuyendo la temperatura.
 - **Transpiración y evaporación:** Procesos asociados con la planta podrían favorecer la disipación del calor del sistema.

Interpretación:

El tratamiento con *Lemna minor* parece amortiguar las fluctuaciones de temperatura, pero favorece una tendencia general a la disminución, probablemente debido a su efecto aislante y la pérdida de calor.

3. Tratamiento con *Azolla filiculoides* (línea gris)

- Los valores iniciales son similares a los de *Lemna minor* (**19.1 °C** en S1), disminuyen a **18.4 °C** en S2, y presentan una tendencia descendente hasta **17.7 °C** en S5.
- Posibles causas del comportamiento:
 - **Cobertura densa de *Azolla filiculoides*:** La planta probablemente actúa como una barrera térmica, reduciendo la influencia de la radiación solar y favoreciendo la estabilización en temperaturas más bajas.

- **Disminución de la energía térmica:** La menor temperatura en *Azolla filiculoides* puede estar asociada con su estructura densa y menor transmisión de calor al agua.

Interpretación:

El tratamiento con *Azolla filiculoides* muestra una tendencia consistente a la reducción de la temperatura, lo que sugiere que esta planta tiene un efecto significativo en amortiguar el impacto de las fluctuaciones externas.

4. Comparación general entre tratamientos y control

- El **grupo control** muestra mayor variabilidad en la temperatura, reflejando la influencia directa de las condiciones externas.
- *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* actúan como moderadores térmicos, manteniendo temperaturas más bajas y estables, aunque *Azolla filiculoides* es ligeramente más efectiva en la reducción de temperatura.

Conclusiones y recomendaciones

1. Efectividad de *Azolla filiculoides*:

- Es más eficiente para reducir la temperatura y evitar fluctuaciones marcadas, lo que podría ser beneficioso en sistemas donde se busca mantener temperaturas bajas para procesos biológicos específicos.

2. Limitaciones de *Lemna minor*:

- Aunque también reduce la temperatura, muestra una ligera mayor variabilidad en comparación con *Azolla filiculoides*, lo que podría limitar su efectividad en sistemas que requieren estabilidad térmica.

3. Importancia del control de la temperatura en el grupo control:

- La falta de plantas expone al sistema a cambios térmicos más pronunciados, lo que podría impactar negativamente procesos biológicos sensibles a la temperatura.

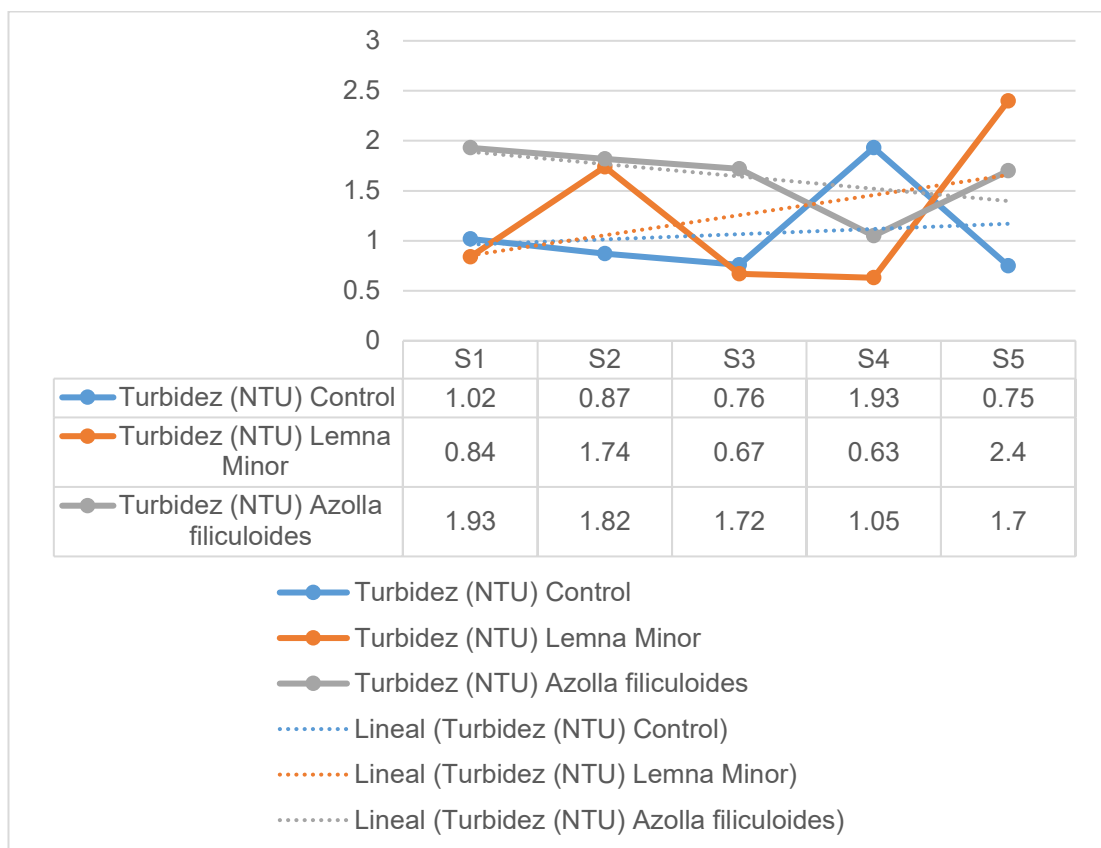
4. Investigaciones futuras:

- **Evaluar la combinación de plantas:** Determinar si la combinación de *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* puede generar un control térmico aún más eficiente.

- **Monitorear la influencia ambiental:** Analizar cómo factores externos como la radiación solar, el viento y la temperatura ambiental afectan la temperatura del sistema tratado y no tratado.
- **Analizar el impacto en procesos biológicos:** Investigar cómo las fluctuaciones y reducciones de temperatura influyen en la actividad microbiológica del sistema.

Gráfico 12

Tendencia de los valores de la turbidez (NTU) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial



Nota. Se aprecia que los valores de la turbidez son crecientes en el agua tratada con *Lemna minor* y ligeramente creciente en el grupo control, mientras que es decreciente en el agua tratada con *Azolla filiculoides*.

Interpretación de la gráfica y tabla de turbidez (NTU)

1. Grupo control (línea azul)

- El control presenta valores iniciales de turbidez relativamente bajos (1.02 NTU en S1) y una disminución progresiva hasta 0.75 NTU en S5, con una ligera variabilidad en S4 (1.93 NTU).

- Este comportamiento sugiere que, sin intervención de plantas, el sistema depende únicamente de procesos pasivos como sedimentación natural, lo que resulta en fluctuaciones moderadas, pero no tan drásticas como los tratamientos con plantas.

2. Tratamiento con *Lemna minor* (línea naranja)

- Este tratamiento muestra mayor inestabilidad a lo largo del tiempo, con picos pronunciados en S2 (1.74 NTU) y S5 (2.4 NTU). A pesar de que logra una reducción considerable en S3 y S4 (0,67 NTU y 0,63 NTU, respectivamente), su comportamiento es errático.
- La variabilidad en los valores de turbidez podría deberse a la liberación de material vegetal en descomposición, lo que sugiere que *Lemna minor* no es completamente eficiente para mantener una turbidez baja de manera consistente.

3. Tratamiento con *Azolla filiculoides* (línea gris)

- Presenta valores iniciales altos de turbidez (1.93 NTU en S1) que disminuyen hasta S4 (1.05 NTU) y vuelven a aumentar en S5 (1.7 NTU). Aunque este tratamiento también experimenta fluctuaciones, estas son menos marcadas que en el caso de *Lemna minor*
- *Azolla filiculoides* parece más efectivo para estabilizar la turbidez en comparación con *Lemna minor*, lo que podría atribuirse a su capacidad para retener sólidos en suspensión mediante sus raíces y la menor liberación de materia orgánica al agua.

4. Comparación general entre tratamientos y control

- El control sin plantas puede ser eficaz para mantener bajos niveles de turbidez en sistemas con bajas cargas iniciales, pero carece de mecanismos activos para lidiar con mayores cargas de sólidos suspendidos.
- *Lemna minor* muestra mayor capacidad para reducir la turbidez en ciertos puntos (S3 y S4), pero su variabilidad y tendencia a liberar materia orgánica hacen que su desempeño sea menos confiable.
- *Azolla filiculoides* es el tratamiento más equilibrado, con una reducción de la turbidez más consistente y menor variabilidad general,

lo que lo hace más adecuado para sistemas que requieren estabilidad en la calidad del agua.

Conclusiones y recomendaciones

1. Efectividad de los tratamientos:

- *Azolla filiculoides* es el tratamiento más consistente en reducir y estabilizar la turbidez. Sus fluctuaciones son menores, lo que lo hace más confiable.
- *Lemna minor* muestra una mayor capacidad inicial para reducir la turbidez, pero su desempeño es inconsistente debido a la liberación de sólidos orgánicos y posibles desequilibrios en el sistema.

2. Limitaciones del control de grupo:

- Sin cobertura vegetal, el sistema presenta mayores picos y fluctuaciones, demostrando la importancia de las plantas para regular la turbidez en sistemas de tratamiento de agua.

3. Investigaciones futuras:

- **Priorizar el uso de *Azolla filiculoides*** en sistemas de tratamiento donde se busca reducir la turbidez de manera más estable y eficiente.
- **Combinar *Lemna minor* y *Azolla filiculoides*** para aprovechar la capacidad inicial de *Lemna* y el efecto estabilizador de *Azolla*.
- **Monitorear la densidad de plantas y el tiempo de retención hidráulica**, ya que una alta densidad de *Lemna* puede generar picos de turbidez debido a la acumulación de materia orgánica.

Tabla 9*Prueba de normalidad de los datos obtenidos.*

Grupo		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
DQO	Control	0.274	5	,200*	0.918	5	0.520
	Lemna	0.271	5	,200*	0.926	5	0.571
	minor						
SST	Azolla filiculoides	0.283	5	,200*	0.874	5	0.283
	Control	0.473	5	0.051	0.552	5	0.131
	Lemna	0.325	5	0.090	0.722	5	0.160
DBO5	minor						
	Azolla filiculoides	0.473	5	0.051	0.552	5	0.131
	Control	0.473	5	0.051	0.552	5	0.131
pH	Lemna	0.217	5	,200*	0.860	5	0.227
	minor						
	Azolla filiculoides	0.224	5	,200*	0.870	5	0.267
Temperatura	Control	0.225	5	,200*	0.872	5	0.275
	Lemna	0.195	5	,200*	0.974	5	0.900
	minor						
Turbidez	Azolla filiculoides	0.205	5	,200*	0.916	5	0.506
	Control	0.150	5	,200*	0.982	5	0.944
	Lemna	0.196	5	,200*	0.933	5	0.618
	minor						
	Azolla filiculoides	0.199	5	,200*	0.966	5	0.851
	Control	0.338	5	0.064	0.733	5	0.204
	Lemna	0.303	5	0.149	0.838	5	0.159
	minor						
	Azolla filiculoides	0.365	5	0.286	0.794	5	0.072

Nota. En la prueba de normalidad realizada, los valores de significancia (p-valor) fueron superiores a 0.05, considerado como el nivel de significancia convencional. En consecuencia, se acepta la hipótesis nula, concluyendo que los datos siguen una distribución normal. Por lo tanto, es adecuado el uso de pruebas estadísticas paramétricas para el análisis de los datos.

Para el análisis de las características iniciales del agua residual afluyente al humedal, se realizaron ensayos en el laboratorio SAG, certificado bajo la norma ISO / IEC 17025:2017.

Los análisis se llevaron a cabo siguiendo los protocolos estandarizados, detallados en el informe de ensayo, disponible en el Anexo 6. identificado con el N° 1805790-2024, emitido el 09 de agosto del 2024 por el laboratorio SAG.

A continuación, se presentan los parámetros evaluados y sus valores iniciales:

Tabla 10*Características del agua residual afluyente (pretratamiento).*

Parámetro	Unidad	Método de análisis	Valor Obtenido
<i>pH (medición en campo)</i>	Unid. pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24th Ed., 2023. pH Value. Electrometric Method.	7.77
<i>Temperatura (medición en campo)</i>	° C	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2550 B, 24th Ed., 2023. Temperature. Laboratory and Field Methods.	20.6
<i>Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO₅)</i>	mg/L	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed., 2023. Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test.	7.60
<i>Demanda Química de oxígeno (DQO)</i>	O ₂ mg/L	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed., 2023. Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method.	24.0
<i>Sólidos suspendidos totales (TSS)</i>	mg/L	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed., 2023. Solids. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C.	<3.00
<i>Turbiedad</i>	NTU	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 24th Ed., 2023. Turbidity. Nephelometric Method.	0.75

Nota. Los valores en la tabla corresponden al agua residual recolectada antes del tratamiento en el humedal artificial. El laboratorio SAG utilizó métodos basados en la normativa **ISO/IEC-17025:2017** para la determinación de estos parámetros.

4.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

Hi: La eficacia de dos especies *Azolla filiculoides* y *Lemna minor* en un humedal de flujo superficial reduce los parámetros de DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez en aguas residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp.

Ho: La eficacia de dos especies *Azolla filiculoides* y *Lemna minor* en un humedal de flujo superficial no reduce los parámetros DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez en aguas residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp.

Nivel de significancia: 0.05

Estadístico de prueba: ANOVA de un factor (One-Way ANOVA)

Tabla 11

Prueba de hipótesis.

		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
DQO	Entre grupos	1271.889	2	635.945	5.508	0.020
	Dentro de grupos	1385.440	12	115.453		
SST	Entre grupos	0.049	2	0.024	0.008	0.993
	Dentro de grupos	38.825	12	3.235		
DBO5	Entre grupos	39.656	2	19.828	0.050	0.951
	Dentro de grupos	4746.498	12	395.542		
pH	Entre grupos	0.447	2	0.224	5.987	0.016
	Dentro de grupos	0.448	12	0.037		
Temperatura	Entre grupos	8.325	2	4.163	7.728	0.007
	Dentro de grupos	6.464	12	0.539		
Turbidez	Entre grupos	0.866	2	0.433	1.330	0.301
	Dentro de grupos	3.907	12	0.326		

Nota. Prueba realizada en cada uno de los indicadores en estudio.

Los resultados muestran que existe diferencia entre los tratamientos en los indicadores: DQO, pH y Temperatura. En los otros indicadores se tiene que no existe diferencias significativas.

Tabla 12

Tabla interpretativa según los tratamientos.

Indicador	Límites Permisibles Descarga a Agua	Máximos (LMP) para Cuerpos de Agua	Pre test	Interpretación	Post test		Interpretación
					T1	T2	
	Valor	Rango Recomendado					
DQO	200 mg/L	*	25	Cumple el Standard	64.9	59.2	No cumple el standard
SST	150 mL/L	*	5	Cumple el standard	9.69	3.43	Cumple el standard
DBO5	100 mg/L	*	5	Cumple el standard	34.6	22.25	No cumple el standard
pH	6,5 – 8,5	*	7.59	Cumple el standard	7.83	8.12	Cumple el standard
T°	(<35)	*	20.1	Cumple el standard	17.4	17.7	Cumple el standard
Turbidez	*	*	1.02	Dentro del Standard	2.4	1.7	No cumple el standard

Nota. Se interpretó a base del DS N° 003-2010-MINAM.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo General de esta investigación fue comparar la eficacia de dos tipos de plantas flotantes *Azolla filiculoides* y *Lemna minor* en la reducción de los parámetros de DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp.

Los resultados mostraron que existe diferencia entre los tratamientos en los indicadores: DQO, pH y Temperatura. En los otros indicadores no existe diferencias significativas. Tal como se muestra en la contrastación de hipótesis; Hi: La especie *Azolla filiculoides* y *Lemna minor* en un humedal de flujo superficial difieren en los resultados de los parámetros de DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez en aguas residuales industriales del PTAR de Esmeralda Corp. Ho: La especie *Azolla filiculoides* y *Lemna minor* en un humedal de flujo superficial no difieren en los resultados de los parámetros de DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez en aguas residuales industriales del PTAR de Esmeralda Corp.

Comparación con otros estudios: Según Quispe y Ayala (2019) en su investigación titulada “*Utilización de la Eichhornia crassipes y Lemna minor en la remoción de nitrógeno y fósforo, de las aguas residuales de la laguna de oxidación de la empresa EMAPACOP S.A - Ucayali 2018*” Pucallpa – Perú. Teniendo como **objetivo** la evaluación de la efectividad de la remoción de contaminantes orgánicos a través de una planta integrada y un sistema de tratamiento de biofilm utilizando berro para el tratamiento de efluentes residuales municipales en Huancavelica, donde se concluye que la especie *Lemna minor* es efectivo para la reducción de contaminantes del agua residual municipal.

Mellado (2019). Según su investigación titulada “*Determinación de la eficiencia de tres especies macrófitas para el tratamiento de aguas residuales domésticas*” Lima – Perú. Teniendo como **objetivo** fue determinación de la eficiencia entre las especies de plantas macrófitas Totorá, Carrizo y Junco en el tratamiento de los efluentes residuales, se obtuvieron muestras de efluentes residuales de la planta de procesamiento de efluentes residuales local María

Reiche en la región de Miraflores y se tomaron muestras a la salida del pretratamiento. Como resultado las eficiencias de las especies *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carricillo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) en el tratamiento de las aguas residuales en sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial, se determinaron las concentraciones de los parámetros fisicoquímicos a la salida del tratamiento; así como también, se determinaron los porcentajes de remoción de los mismos en cada humedal artificial. Respecto a la DBO5 se obtuvieron porcentajes de remoción de 73.7%, 74.7% y 73.6 % en los sistemas de humedales artificiales sembrados con totora, carricillo y junco. Sobre la DQO los porcentajes de remoción fueron de 70.37 %, 72.85 % y 70.12% para cada sistema. En relación al Amonio (NH_4^+), se determinaron remociones de 64.89%, 65.32% y 68.94% para el tratamiento respectivamente. Respecto al Fosfato, las eficiencias de remoción fueron de 43.89 %, 35.91 % y 47.96% en cada sistema de humedales artificiales. Sobre los Solidos Suspendidos Totales (SST), los sistemas piloto sembrados con totora, carricillo y junco pudieron reducir significativamente los SST, obteniendo porcentajes de remoción de 95.47 %, 96.51 %, y 96.70 % respectivamente. Por último, en la relación a los Aceites y grasas se obtuvieron porcentajes de remoción de 97.10 %, 95.91 % y 97.29 % en cada sistema piloto. Según este estudio podemos ver que se obtuvo resultados favorables en cuanto a la remoción de los contaminantes mediante especies macrófitos en el tratamiento de las aguas residuales.

Por otra parte, Torres (2019) menciona en su investigación titulada *“Tratamiento de aguas residual doméstica mediante sistemas de depuración con macrófitas (*Lemna minor* y *Eleocharis palustris*) en la universidad nacional de Ucayali octubre 2018-setiembre 2019”*. Cuyo **objetivo** fue determinar el efecto de un sistema de limpieza de celdas grandes en el tratamiento de los efluentes residuales para la Universidad Nacional Ucayali. Del agua utilizada en el mencionado campus se toman muestras de aguas residuales y paralelamente se analizan parámetros fisicoquímicos y microbiológicos. Los resultados indican que en cuanto a los parámetros que determinan la contaminación orgánica; se logró disminuir con la lenteja de agua el pH en

(6.5) %; la conductividad (28.1) %; los STD (24.7) %; el OD (52.8) %; la turbiedad (79.1) %; la DBO5 (64.3) %; la DQO (62.9) %; el amonio (49.7) %; y los Coliformes termofecales (99.2) % mientras que con el junco se logró disminuir en: el pH (6.9) %; la conductividad (29.2) %; los STD (24.1) %; el OD (58.8) %; la turbiedad (77.3) %; la DBO5 (51.7) %; la DQO (54.4) %; el amonio (43.1) %; y los Coliformes termofecales (98.9) %. De tal manera en su procesamiento de los resultados obtenidos y los análisis de datos indicaron que, respecto al objetivo general y en respuesta a la hipótesis general, y concluyó que el uso de *Lemna minor* y *Eleocharis palustris* influyen en el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Nacional de Ucayali.

El estudio de Quispe y Ayala (2019) aporta un valioso precedente en la investigación sobre el tratamiento de aguas residuales mediante plantas acuáticas. Su enfoque, que utiliza especies como *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor*.

Asimismo, cabe mencionar que la investigación de Mellado (2019) ofrece un análisis exhaustivo sobre la eficiencia de diferentes especies de macrófitas en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Los resultados obtenidos muestran un alto nivel de efectividad en la remoción de contaminantes clave como la DBO5, DQO, amonio, fosfatos y sólidos suspendidos totales.

Esto refuerza el potencial de las plantas como *Typha domingensis* (totora), *Phragmites australis* (carrizo) y *Schoenoplectus americanus* (junco) en sistemas de humedales artificiales, lo que no solo es una solución ecológica sino también una alternativa rentable y sostenible frente a métodos tradicionales. Además, los altos porcentajes de remoción de aceites y grasas son especialmente relevantes en la mejora de la calidad del agua tratada, lo que evidencia que los sistemas basados en plantas acuáticas pueden contribuir de manera significativa a mitigar los efectos de la contaminación. Este estudio subraya la importancia de seguir investigando y promoviendo soluciones basadas en la naturaleza para el tratamiento de efluentes residuales.

Del mismo modo, la investigación de Torres (2019) demuestra claramente la efectividad de las macrófitas *Lemna minor* y *Eleocharis palustris* en la mejora de la calidad del agua residual. Los resultados obtenidos, que muestran una notable disminución en la mayoría de los parámetros de contaminación, incluyendo coliformes termofecales, DBO5 y DQO, subrayan la capacidad de estos sistemas naturales para tratar aguas residuales de manera eficiente. En especial, la reducción de casi el 100% de los coliformes termofecales resalta la importancia de estos métodos ecológicos en el control de patógenos. Me parece que este estudio es relevante no solo para la Universidad Nacional de Ucayali, sino también como un ejemplo aplicable a otras instituciones y comunidades con acceso a estos recursos naturales. Además, refuerza la idea de que el uso de plantas acuáticas es una solución sostenible y económica para el tratamiento de aguas residuales, lo que es clave en la búsqueda de alternativas ambientalmente amigables frente a los métodos convencionales.

Objetivo específico 1: Determinar los descriptivos y la tendencia del DQO del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial.

Resultado: Según la **tabla 9** de la tendencia de los valores del DQO (mg/l) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial, se aprecia que tanto el tratamiento con DQO y con *azolla filiculoides* son los que tienen tendencia creciente semejantes y mayor a la que se encuentra en el grupo control.

Comentarios: El resultado obtenido respecto a la tendencia del DQO durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial revela un comportamiento interesante. La observación de una tendencia creciente en los valores del DQO, superior incluso al grupo control, sugiere que el tratamiento con estas macrófitas no está logrando una reducción efectiva de la demanda química de oxígeno en las aguas residuales industriales de Esmeralda Corp. Esto podría indicar limitaciones en la capacidad de estas especies para degradar o remover ciertos compuestos presentes en el agua residual industrial, o bien que las condiciones del sistema de tratamiento no son óptimas para su funcionamiento.

Objetivo específico 1: Determinar los descriptivos y la tendencia del SST del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial.

Resultado: Según la **tabla 10** de la tendencia de los valores de los SST (mg/l) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial, se aprecia que el grupo control y el agua tratada con *azolla filiculoides* tienen tendencia decreciente en los valores de SST, por otro lado, el agua tratada con *lemna minor* tiene tendencia creciente en los valores de SST.

Comentarios: El resultado observado en la tabla 4, que muestra la tendencia de los valores de los sólidos suspendidos totales (SST) durante el tratamiento del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides*, reveló diferencias significativas entre los tratamientos. Mientras que el grupo control y el tratamiento con *Azolla filiculoides* mostraron una tendencia decreciente en los valores de SST, lo que indica una mejora en la calidad del agua, el tratamiento con *Lemna minor* presentó una tendencia creciente en estos valores. Este comportamiento sugiere que *Lemna minor* no fue tan efectiva en la remoción de sólidos suspendidos totales como *Azolla filiculoides*, lo que podría deberse a diferencias en la capacidad de ambas especies para captar y retener partículas suspendidas en el agua. Estos resultados destacan la importancia de evaluar de manera individualizada la efectividad de diferentes macrófitas en procesos de tratamiento de aguas, ya que no todas las especies pueden ofrecer el mismo rendimiento frente a diferentes contaminantes.

Objetivo específico 1: Determinar los descriptivos y la tendencia del DBO5 del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial.

Resultado: Según la **tabla 11** de la tendencia de los valores de DBO5 (mg/l) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial, se aprecia que todos los grupos tienen tendencia creciente en sus valores de DBO5 en el agua residual en estudio. El grupo control es el que presenta mayor tendencia justo al final del estudio, luego de haberse mantenido estático durante varios periodos evaluados. El tratamiento con *lemna minor* le sigue en valores de tendencia creciente.

Comentarios: El análisis de la tendencia de los valores de DBO5 durante el tratamiento del agua residual industrial en el PTAR de Esmeralda Corp. con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* mostró resultados interesantes. Según la tabla 5, se observó una tendencia creciente en los valores de DBO5 en todos los grupos, lo que indica un aumento en la demanda biológica de oxígeno a lo largo del tiempo. Llama la atención que el grupo control fue el que presentó la mayor tendencia creciente al final del estudio, a pesar de haberse mantenido estable durante varios periodos previos. El tratamiento con *Lemna minor* mostró una tendencia similar, aunque en menor magnitud. Estos resultados sugieren que ninguno de los tratamientos logró una reducción efectiva de la DBO5, lo que podría indicar la necesidad de ajustes en el diseño del humedal o en las condiciones del tratamiento para mejorar su eficiencia en la remoción de materia orgánica. Además, este aumento en los valores de DBO5 puede estar relacionado con la acumulación de materia orgánica no degradada, lo que requiere una evaluación más detallada de los factores que podrían estar afectando el rendimiento del sistema.

Objetivo específico 1: Determinar los descriptivos y la tendencia del pH del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial.

Resultado: Según la **tabla 12** de la tendencia de los valores del pH del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial, se aprecia que los valores del pH en el agua residual tienen tendencia estacionaria, mientras que en los grupos tratados con *lemna minor* y *azolla filiculoides* tienen tendencia decreciente, una mayor tendencia decreciente se aprecia en el agua tratada con *lemna minor*.

Comentarios: El análisis de la tendencia del pH en el agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* mostró diferencias interesantes. Según la tabla 6, mientras que el grupo control mantuvo una tendencia estacionaria en los valores de pH, los tratamientos con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* presentaron una tendencia decreciente. Es notable que la disminución fue más pronunciada en el grupo tratado con *Lemna minor*. Estos resultados sugieren que ambas especies de macrófitas influyeron en la reducción del pH del agua residual, lo cual podría ser positivo dependiendo de los niveles iniciales de acidez o alcalinidad del agua. Sin embargo, es importante asegurar que el pH se mantenga dentro de un rango adecuado para no afectar negativamente el ecosistema acuático o los procesos posteriores de tratamiento. La mayor reducción observada con *Lemna minor* indica su capacidad para alterar de manera más significativa la química del agua, lo que sugiere que esta especie podría ser particularmente útil en situaciones donde se busca reducir el pH.

Objetivo específico 1: Determinar los descriptivos y la tendencia de la Temperatura (°C) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial.

Resultado: Según la **tabla 13** de la tendencia de los valores de la temperatura (°C) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial, se aprecia que los valores de la temperatura tienen tendencia decreciente tanto en el agua tratada con *lemna minor* como en el agua tratada con *azolla filiculoides*, en el grupo control la tendencia es estacionaria.

Comentarios: El análisis de la temperatura del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* reveló tendencias interesantes. Según la tabla 7, se observó que tanto el agua tratada con *Lemna minor* como con *Azolla filiculoides* mostraron una tendencia decreciente en sus valores de temperatura. Esto sugiere que ambos tratamientos podrían estar contribuyendo a un enfriamiento del agua, lo que puede ser beneficioso, ya que temperaturas más bajas pueden favorecer la actividad biológica y la eficiencia de los procesos de tratamiento. En contraste, el grupo control mantuvo una tendencia estacionaria, lo que indica que el tratamiento con macrófitas podría estar teniendo un efecto significativo en la termorregulación del sistema. Sin embargo, es fundamental monitorear las temperaturas, ya que cambios drásticos podrían afectar a los organismos acuáticos y el equilibrio del ecosistema en el humedal. La capacidad de *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* para influir en la temperatura del agua resalta su potencial en la gestión de aguas residuales industriales, aunque se deben considerar otros factores para evaluar completamente su eficacia en el tratamiento.

Objetivo específico 1: Determinar los descriptivos y la tendencia de la Turbidez (NTU) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial.

Resultado: Según la **tabla 14** de la tendencia de los valores de la turbidez (NTU) del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial, se aprecia que los valores de la turbidez son crecientes en el agua tratada con *lemna minor* y ligeramente creciente en el grupo control, mientras que es decreciente en el agua tratada con *azolla filiculoides*.

Comentarios: El análisis de la turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* reveló tendencias contrastantes. Según la tabla 8, se observó que los valores de turbidez eran crecientes en el agua tratada con *Lemna minor*, lo que podría indicar una acumulación de partículas o sólidos suspendidos que no fueron adecuadamente removidos durante el proceso de tratamiento. Por otro lado, el grupo control también mostró una ligera tendencia creciente en la turbidez, lo que sugiere que las condiciones iniciales de este grupo ya presentaban una cierta carga de sólidos. En cambio, el tratamiento con *Azolla filiculoides* demostró una tendencia decreciente en los valores de turbidez, lo que sugiere que esta especie fue más efectiva en la remoción de partículas suspendidas en comparación con *Lemna minor*. Estos resultados resaltan la importancia de seleccionar adecuadamente las especies de macrófitas para el tratamiento de aguas residuales, ya que no todas las especies presentan la misma eficacia en la reducción de la turbidez. Además, es crucial seguir monitoreando estos parámetros para optimizar el rendimiento del sistema de tratamiento y garantizar la calidad del agua tratada.

CONCLUSIONES

- A partir de los resultados obtenidos durante el tratamiento con *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en un humedal de flujo superficial, se puede concluir que, en las primeras etapas del proceso, *Lemna minor* mostró una mayor efectividad en la reducción de los parámetros de DQO, SST, pH y turbidez, según las mediciones realizadas.
- No obstante, a medida que avanzaba el tratamiento, la planta acuática *Azolla filiculoides* fue demostrando su eficacia de manera progresiva, logrando una reducción significativa en los parámetros de contaminación del agua residual, en particular en los valores de DBO, DQO5 y pH. Su capacidad para remover contaminantes se hizo más evidente con el tiempo, contribuyendo de manera sustancial a la mejora de la calidad del agua tratada.
- Cabe destacar que la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Esmeralda Corp. gestiona las aguas residuales generadas tanto por las operaciones de la corporación como por las actividades de las empresas que operan en sus instalaciones. Entre estas empresas se encuentran aquellas dedicadas a procesos hidrobiológicos y agroindustriales, procesamiento de productos cárnicos, así como actividades domésticas y de comedores. En consecuencia, la variabilidad en la carga de los afluentes provenientes de estas fuentes pudo haber influido en las fluctuaciones observadas en la reducción de los parámetros estudiados, mediante el uso de las plantas acuáticas *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en el humedal artificial de flujo superficial.
- Es importante señalar que el humedal estaba ubicado dentro del área de la PTAR y operaba bajo las condiciones ambientales características de los factores abióticos de la región, tales como el clima (insolación, precipitaciones y temperatura) y las características geográficas (altitud y latitud). Estos factores pudieron haber jugado un papel clave en el desempeño de las plantas acuáticas y la eficacia del tratamiento.

RECOMENDACIONES

- **Monitoreo a largo plazo:** Es recomendable extender el tiempo de monitoreo para observar el comportamiento de las plantas acuáticas a lo largo de diferentes estaciones del año. Esto permitirá evaluar el impacto de las variaciones estacionales en los factores climáticos y cómo influyen en la eficiencia de las plantas *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* en la reducción de los contaminantes.
- **Diversificación de especies vegetales:** Incluir más especies de plantas acuáticas en los ensayos puede proporcionar información valiosa sobre su efectividad en la remoción de diferentes contaminantes. La combinación de varias especies podría mejorar los resultados del tratamiento, ya que diferentes plantas pueden actuar sobre distintos parámetros de manera más eficiente.
- **Optimización del diseño del humedal:** Se podrían investigar distintos diseños de humedales artificiales de flujo superficial o combinarlo con humedales de flujo subsuperficial. De esta manera, sería posible mejorar la distribución del flujo y maximizar la exposición del agua a las plantas, optimizando así la reducción de parámetros como DQO, SST, DBO y turbidez.
- **Análisis de la carga contaminante de los afluentes:** Realizar estudios más detallados sobre la variabilidad de la carga contaminante que entra a la PTAR en diferentes momentos del proceso productivo. Con esta información, se podrían ajustar mejor los tiempos de tratamiento, la cantidad de biomasa vegetal y los procedimientos específicos según las cargas máximas o mínimas de contaminantes.
- **Evaluación de condiciones abióticas:** Ampliar el análisis de los factores abióticos, como la temperatura, la radiación solar, y las precipitaciones, y su influencia en la eficiencia de las plantas. Un análisis más detallado de cómo estos factores impactan el crecimiento y desempeño de *Lemna minor* y *Azolla filiculoides* podría ayudar a optimizar las condiciones operativas del humedal.

- Estudio de los nutrientes remanentes: Evaluar la capacidad de estas plantas no solo para reducir parámetros clásicos de calidad de agua como DQO y DBO, sino también para la remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo, que son comunes en los efluentes agroindustriales y que, en exceso, pueden causar eutrofización.
- Reutilización de la biomasa: Investigar posibles aplicaciones para la biomasa generada por las plantas acuáticas tras el tratamiento. La biomasa podría ser utilizada para producir biocombustibles, composta o ser empleada como abono en actividades agrícolas, contribuyendo a la sostenibilidad del proceso.
- Evaluación económica: Incluir un análisis económico detallado que permita evaluar el costo-beneficio del uso de humedales artificiales de flujo superficial frente a otros métodos de tratamiento de aguas residuales. Este análisis podría incluir costos de instalación, mantenimiento y posibles ingresos derivados de la reutilización de biomasa.
- Mejora en la caracterización del agua tratada: Incorporar una mayor variedad de parámetros en la caracterización del agua tratada, como la presencia de metales pesados, pesticidas o compuestos emergentes (como microplásticos o fármacos), que podrían ser relevantes dependiendo de la naturaleza de los efluentes industriales.
- Integración de tecnología de sensores: Implementar tecnología de sensores en tiempo real para monitorear los niveles de los parámetros clave (como pH, DQO, DBO y turbidez) en el agua tratada. Esto podría ayudar a ajustar el proceso de manera más eficiente y rápida, optimizando el uso de los recursos naturales y humanos en la PTAR.

Estas recomendaciones podrían contribuir a mejorar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales, así como a proporcionar una base más sólida para estudios futuros sobre el uso de plantas acuáticas en sistemas de humedales artificiales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEDyR. (2 de Febrero de 2019). ¿Qué es la reutilización de agua? Obtenido de <https://aedyr.com/que-es-reutilizacion-agua/#:~:text=La%20reutilizaci%C3%B3n%20de%20agua%20es,al%20tratamiento%20convencional%20de%20depuraci%C3%B3n.>
- AguasUrbanas. (17 de Noviembre de 2018). Conceptos sobre monitoreo de calidad de agua. Obtenido de <http://www.aguasurbanas.ei.udelar.edu.uy/index.php/2018/11/17/conceptos-sobre-monitoreo-de-calidad-de-agua/>
- ANA. (2012). *Gestión De La Calidad De Los Recursos Hídricos En El Perú*. Lima: Autoridad Nacional del Agua. Obtenido de http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/1_problema_de_la_contaminacion_del_agua_en_el_peru_0_2.pdf
- Andina, C. (2005). *Manual de Estadísticas Ambientales*. Obtenido de www.dane.gov.co
- Andrade Jiménez, K. C. (2015). *Fitorremediación mediante el uso de dos especies vegetales Eichhornia crassipes mart. (jacinto de agua), en el tratamiento de aguas residuales domésticas procedentes de la planta de tratamiento de aguas residuales en la parroquia Unión Milagreña*. Universidad Nacional De Loja, Nueva Loja, Ecuador. Obtenido de <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/11868>
- Annan, K. (22 de Marzo de 2001). Mensaje del Secretario General, Kofi Annan, con ocasión del Día Mundial del Agua. Obtenido de https://www.un.org/es/sg/annan_messages/2001/waterday.htm
- Aponte Moreno, J. P. (2016). *Evaluación de la Capacidad de Depuración de las Aguas Residuales Grises Mediante un Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial en la Vereda El Peñón, Municipio de San Francisco, Cundinamarca*. Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10185/20421>

- Aponte, H. (Enero de 2009). El junco: clasificación, biología y gestión. *ResearchGate*. Obtenido de https://museohn.unmsm.edu.pe/docs/pub_dico/APONTE%202009.pdf
- Arias I., C. A., & Brix, H. (2003). *Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales*. Bogotá, Colombia. Obtenido de <http://biblioteca.cehum.org/bitstream/123456789/1023/1/Arias%2C%20Brix.%20Humedales%20artificiales%20para%20el%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales.pdf>
- Arias, I., & Brix, H. (2003). *Redalyc*. Obtenido de <https://www.redalyc.org>
- Arroyave, M. d. (Junio de 2004). la lenteja de agua (Lemna minor L.): una planta acuática promisoría. *Scielo*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372004000100004
- Bitton, & Lambert. (1998). *Hevos De Helminto*. Obtenido de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/18851/Capitulo2.pdf>
- Carhuaricra Ferrer, P. (2019). *Fitorremediación por el proceso de fitodegradación con dos especies macrófitas acuáticas, Limnobium laevigatum y Eichhornia crassipes para el tratamiento de aguas residuales domésticas de la laguna facultativa en la localidad de Pacaypampa*. Universidad de Huánuco, Huánuco, Lima. Obtenido de <http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/1598>
- Chaux, G., Caicedo, J., & Fernandez, J. (2013). Tratamiento de efluentes piscícolas (tilapia roja) en lagunas con Azolla pinnata. *Scielo*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612013000200006
- Cirujano, S., Meco, A., & Cezón, K. (s.f.). Flora acu flora acuática: macr tica: macrófitos. Obtenido de https://www.miteco.gob.es/es/agua/formacion/06-Macrofitos-Santos%20Cirujano_tcm30-175307.pdf

- Collacci, A. (2018). *La situación de las aguas residuales en Lima*. Obtenido de <https://www.pucp.edu.pe/climadecambios/noticias/la-situacion-de-las-aguas-residuales-en-lima/>
- Commonswiki, B. (2005). *Wikimedia Commons*. Obtenido de <https://commons.wikimedia.org>
- Cruz Ortiz, K. L. (2019). *Efectividad de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales en la remoción de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos antes del vertido al río Huallaga, en la localidad de Pacaypampa*. Universidad De Huánuco, Huánuco, Perú. Obtenido de <http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/1649>
- Curasma Matamoros, M. A., & Sandoval Condori, E. K. (2019). *Evaluación de la eficiencia de un sistema integrado de biopelícula y fitorremediación con Nasturtium officinale (berro) para el tratamiento de agua residual municipal en Huancavelica*. Universidad Nacional De Huancavelica, Huancavelica, Perú. Obtenido de <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/3072>
- Extension, P. (19 de Octubre de 2020). bacterias coliformes. Obtenido de <https://extension.psu.edu/bacterias-coliformes>
- Gasteiz, V. (2015). *Guía de identificación de Azolla filiculoides*. Obtenido de <https://www.vitoria-gasteiz.org/docs/wb021/contenidosEstaticos/adjuntos/eu/88/46/58846.pdf>
- Gerritsen, P., Ortiz, C., & González, R. (2009). Usos populares, tradición y aprovechamiento del carrizo: estudio de caso en la costa sur de Jalisco, México. *Scielo*. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-84212009000100009
- Gobierno de México. (13 de Julio de 2018). El equilibrio del PH en el organismo. Obtenido de <https://www.gob.mx/issste/articulos/el-equilibrio-del-ph-en-el-organismo?idiom=es>

- Gonzales Taranco, C., Morales Olivares, Y., & Larios Meoño, F. (2015). LAS AGUAS RESIDUALES Y SUS CONSECUENCIAS EN EL PERU. *Facultad de Ingeniería de la USIL*. Obtenido de <https://www.usil.edu.pe/sites/default/files/revista-saber-y-hacer-v2n2.2-1-19set16-aguas-residuales.pdf>
- HACH. (2022). Parámetros de Carbono orgánico total. Obtenido de <https://es.hach.com/parameters/toc>
- HANNA. (2022). ¿Qué es el pH? Obtenido de <https://www.hannacolombia.com/blog/post/447/que-es-el-ph>
- Ibanez, A. (20 de Noviembre de 2017). Obtenido de <https://nihonkasetu.com/es/dbo-y-dqo-para-caracterizar-aguas-residuales/>
- INNOTEC. (s.f.). *INNOTEC laboratorios*. Obtenido de <https://www.innotec-laboratorios.es/la-importancia-y-caracteristicas-de-las-aguas-residuales/#:~:text=Caracter%C3%ADsticas%20y%20composici%C3%B3n%20de%20las%20aguas%20residuales&text=Est%C3%A1n%20constituidas%20por%20aguas%20fecales,tratamiento%20previo%2>
- Lara, J. (2011). *ResearchGate*. Obtenido de <https://www.researchgate.net>
- Llagas Chafloque, W. A., & Guadalupe Gómez, E. (2006). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Obtenido de https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/geologia/vol9_n17/a11.pdf
- Martin, I. (1989). *Depuración de aguas con plantas emergentes*. Madrid: Rivadeneyra, S. A. Obtenido de https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1989_16.pdf

- Martin, I. (1989). Esquema de una planta emergente típica. En G. d. España. España.
- Mayo, R. (2020). Obtenido de Aguamarket: <https://www.aguamarket.com>
- Mellado Delgado, G. (2019). *Determinación de la eficiencia de tres especies macrófitas para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Universidad Nacional Ferderico Villareal, Lima. Obtenido de <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2729>
- MINAM. (17 de Marzo de 2010). Decreto Supremo N° 003. Obtenido de <https://institutoambiental.pe/normativa-eca-imp/>
- MINAM. (2015). *Decreto Supremo N.º 015-2015-MINAM que aprueba los Límites Máximos Permisibles (LMP) para el subsector alimentos, bebidas y tabaco*. Lima.
- MINAM. (s.f.). Calidad Ambiental. Obtenido de <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/definiciones/>
- Núñez Morales, E. (2019). *Evaluación de la eficiencia del sistema de fitorremediación mediante las especies palustre y flotante, Zantedeschia aethiopica y Eichhornia crassipes en el tratamiento de aguas residuales domésticas en la zona de la región natural Quechua-Cajamarca*. Universidad Peruana Unión, Cajamarca, Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12840/1797>
- Núñez, R., Meas, Y., Ortega, R., & Olguín, E. (2004). *Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones*. Obtenido de https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/55_3/Fitorremediacion.pdf
- O, G. A. (2020). *Evaluación de remoción de contaminantes en aguas residuales domésticas por plantas ornamentales mediante humedales flotantes en el cantón militar de Apiay, Villavicencio (meta)*. UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, VILLAVICENCIO, Colombia. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11634/30317>

- OEFA. (2014). *El OEFA advierte problemática ambiental por déficit de tratamiento de las aguas residuales a nivel nacional*. Lima. Obtenido de <https://www.oefa.gob.pe/el-oefa-advierte-problematICA-ambiental-por-deficit-de-tratamiento-de-las-aguas-residuales-a-nivel-nacional/ocac07/#:~:text=Uno%20de%20los%20principales%20problemas,poblaci%C3%B3n%20urbana%20en%20el%20Per%C3%BA>.
- ONU. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017*. Obtenido de [https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/9A13A8A4E16D102F05258175006A9AD1/\\$FILE/1__15.247647s.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/9A13A8A4E16D102F05258175006A9AD1/$FILE/1__15.247647s.pdf)
- ORARBO. (5 de Noviembre de 2020). Información Ambiental para la Gestión Integral de la Cuenca Hídrica del Río Bogotá. *RIO VIVO*. Obtenido de <http://www.orarbo.gov.co/es/con-la-comunidad/noticias/descubre-que-es-un-vertimiento-y-cuales-son-sus-caracterizaciones#:~:text=Seg%C3%BAn%20la%20Secretar%C3%ADa%20Distrital%20de,agua%2C%20alcantarillado%20o%20al%20suelo>.
- Perales Vasquez, K. L. (2018). *Tratamiento de aguas residuales domésticas por fitorremediación con Eichornia crassipes en la zona rural del caserío Santa Catalina Moyobamba 2017*. Universidad Nacional De San Martín, Moyobamba, Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11458/2734>
- Pinto, M. (2018). Calidad de agua superficial en el río Chili. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/6160/AMpipama.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Postposmo. (s.f.). Obtenido de <https://www.postposmo.com/plantas-acuaticas-flotantes/>
- Poveda Ocaña, R. A. (2014). *Evaluación de especies acuáticas flotantes para la fitorremediación de aguas residuales industrial y de uso agrícola previamente caracterizadas en el Cantón Ambato, provincia de Tungurahua*. Universidad Técnica De Ambato, Ambato, Ecuador.

- Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/8455>
- Quispe Pulido, A. E. (2018). Evaluación de la eficiencia entre dos sistemas de biofiltros para el tratamiento de las aguas residuales domésticas de la localidad de Carapongo, Lurigancho-Chosica. Obtenido de http://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/UNFV/1930/TESIS_ANDREA%20QUISPE%20PULIDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Sigler, A., & Bauder, J. (15 de Noviembre de 2012). Programa de Extensión en Calidad del Agua Departamento de Recursos de la Tierra y Ciencias Ambientales. Obtenido de http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Alkalinity_pH_TDS%202012-11-15-SP.pdf
- Solá, M. (2020). *Biodiversidad virtual*. Obtenido de <http://www.biodiversidadvirtual.org>
- Sotil, H. (2017). *Análisis de indicadores de contaminación bacteriológica (coliformes totales y termotolerantes) en el lago de Moronacocha*. San Juan. Obtenido de <http://repositorio.ucp.edu.pe/bitstream/handle/UCP/274/SOTIL-1-Trabajo-Análisis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Suárez, V., & Vásquez, K. (2020). Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10582/2/03%20RN%20360%20TRABAJO%20GRADO.pdf>
- Sunass. (2022). *El tratamiento de aguas residuales en el Perú aumentó en 11 %, entre el 2016 y el 2020*. Lima. Obtenido de <https://www.sunass.gob.pe/lima/el-tratamiento-de-aguas-residuales-en-el-peru-aumento-en-11-entre-el-2016-y-el-2020/>
- Supo, & Zacarías. (2020). *Metodología de la Investigación Científica*.
- Tejada, C., Paz, I., Villabona, A., Espinosa, M., & López, C. (Mayo-Agosto de 2018). Aprovechamiento del Jacinto de Agua (*Eichhornia crassipes*) para la síntesis de carboximetilcelulosa. *Scielo*. Obtenido de

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212018000200003

Torres Torres , A. G. (2019). *Tratamiento de aguas residual doméstica mediante sistemas de depuración con macrófitas (Lemna minor y Eleocharis palustris) en la universidad nacional de Ucayali octubre 2018-setiembre 2019*. Universidad de Huánuco, Huánuco, Perú. Obtenido de <http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/2394>

UNESCO. (2017). *Aguas residuales el recurso desaprovechado*. Obtenido de www2.congreso.gob.pe

Universidad Complutense de Madrid. (2015). *DESCRIPCIÓN DE INDICADORES*. Madrid. Obtenido de <https://www.ucm.es/data/cont/docs/952-2015-02-14-turbidez%20f.pdf>

Vanegas Gómez, E. V. (2022). *Eficiencia del Jacinto de Agua (Eichhornia Crassipes) en la Fitodepuración de Aguas Residuales Domésticas (ARD) y Aguas Residuales no Domésticas (ARnD)*. Universidad Nacional Abierta y A Distancia, Puerto Gaitán, Colombia. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/35009>

COMO CITAR ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Iglesias Chaupis, L. (2026). *Comparación de la eficacia de Azolla filiculoides Y Lemna minor en humedal de flujo superficial para reducir la contaminación orgánica de agua residual del PTAR de Esmeralda Corp, Lima, 2024* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional UDH. <http://...>

ANEXOS

ANEXO 1

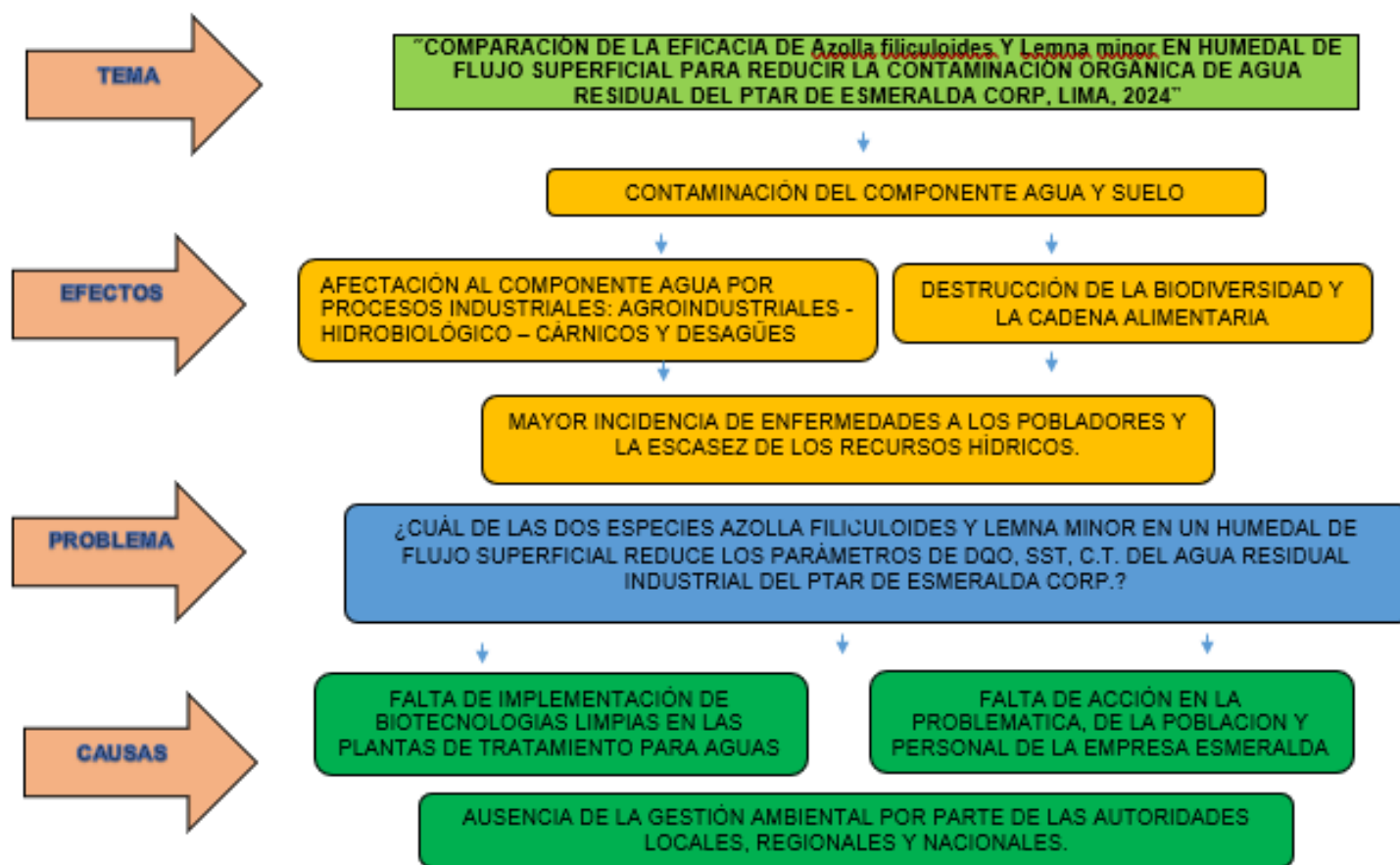
MATRIZ DE CONSISTENCIA

TITULO	“COMPARACIÓN DE LA EFICACIA DE Azolla filiculoides Y Lemna minor EN HUMEDAL DE FLUJO SUPERFICIAL PARA REDUCIR LA CONTAMINACIÓN ORGÁNICA DE AGUA RESIDUAL DEL PTAR DE ESMERALDA CORP, LIMA, 2024”		
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL (*)	ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN:
¿Cuál de las dos especies Azolla filiculoides y Lemna minor en un humedal de flujo superficial reduce los parámetros de DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp.?	Comparar la eficacia de dos tipos de plantas flotantes Azolla filiculoides y Lemna minor en la reducción de los parámetros de DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp.	Hi: La eficacia de dos especies Azolla filiculoides y Lemna minor en un humedal de flujo superficial reduce los parámetros de DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez en aguas residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp.	Cuantitativa
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS		NIVEL DE INVESTIGACIÓN:
			Aplicativa
			DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.
			Transversal

<p>¿Cuáles son los descriptivos del DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con Lemna minor y Azolla filiculoides en un humedal de flujo superficial?</p>	<p>Determinar los descriptivos del DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con Lemna minor y Azolla filiculoides en un humedal de flujo superficial.</p>	<p>Ho: La eficacia de dos especies Azolla filiculoides y Lemna minor en un humedal de flujo superficial no reduce los parámetros DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez en aguas residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp..</p>	<p>MÉTODO DE LA INVESTIGACIÓN. Experimental</p> <p>POBLACIÓN. Aguas residuales industriañ (mg/l).</p> <p>MUESTRA. tomas de muestras - semanal.</p> <p>MUESTREO. Probabilístico, Aleatorio Simple (Muestreo Simple al Azar).</p> <p>VARIABLES. VI: Remediación. VD: Calidad del agua residual doméstica. Relación: Experimental. Condición: De lugar: PTAR, Lima. De tiempo: 2023 - 2024. Unidad de Análisis: Aguas residuales industrial.</p>
<p>¿Cuál es la tendencia de los valores del DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con Lemna minor y Azolla filiculoides en un humedal de flujo superficial?</p>	<p>Determinar la tendencia de los valores del DQO, SST, DBO5, pH, Temperatura y turbidez del agua residual industrial del PTAR de Esmeralda Corp. durante el tratamiento con Lemna minor y Azolla filiculoides en un humedal de flujo superficial.</p>		

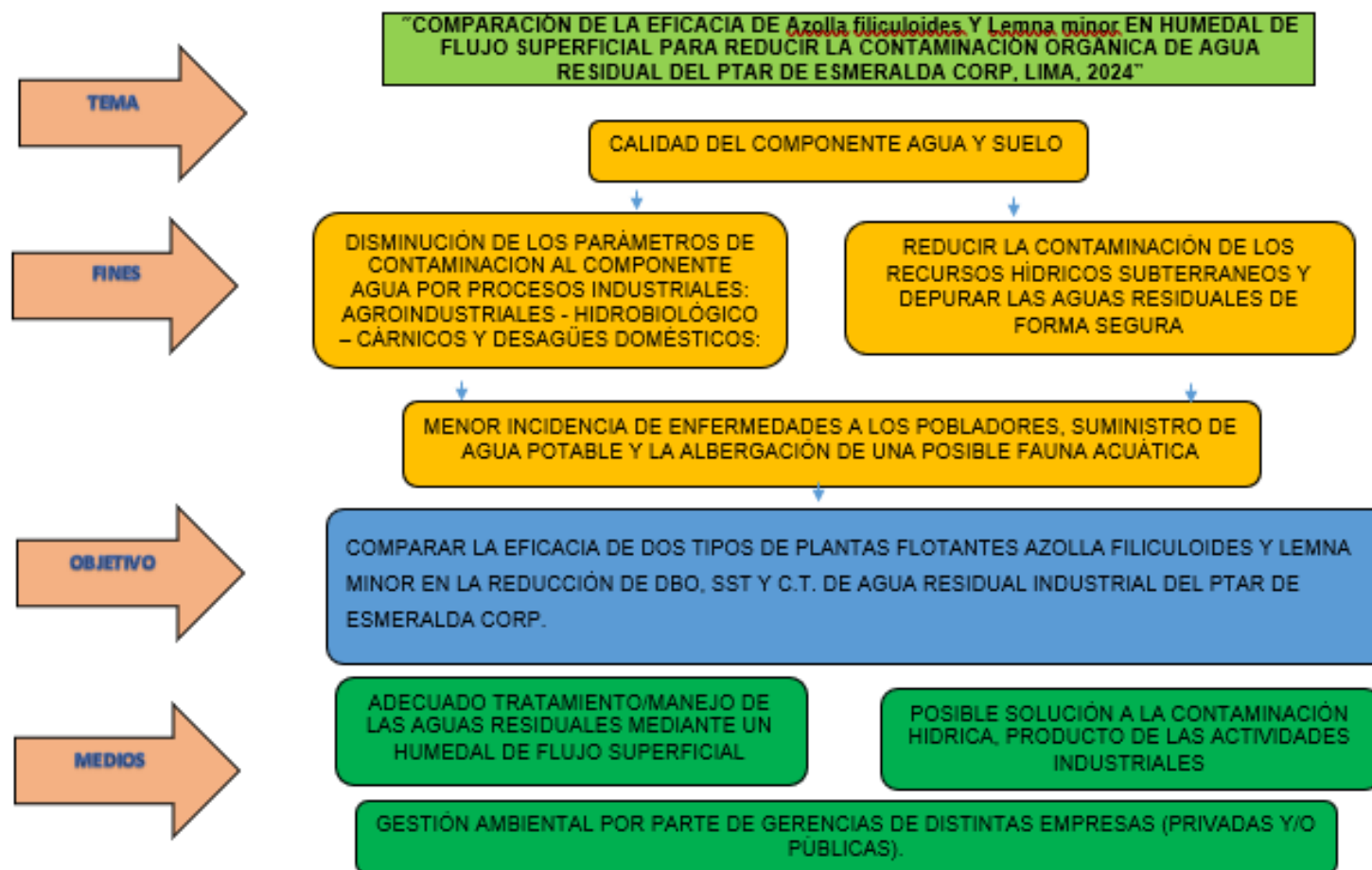
ANEXO 3

ÁRBOL DE CAUSAS – EFECTOS

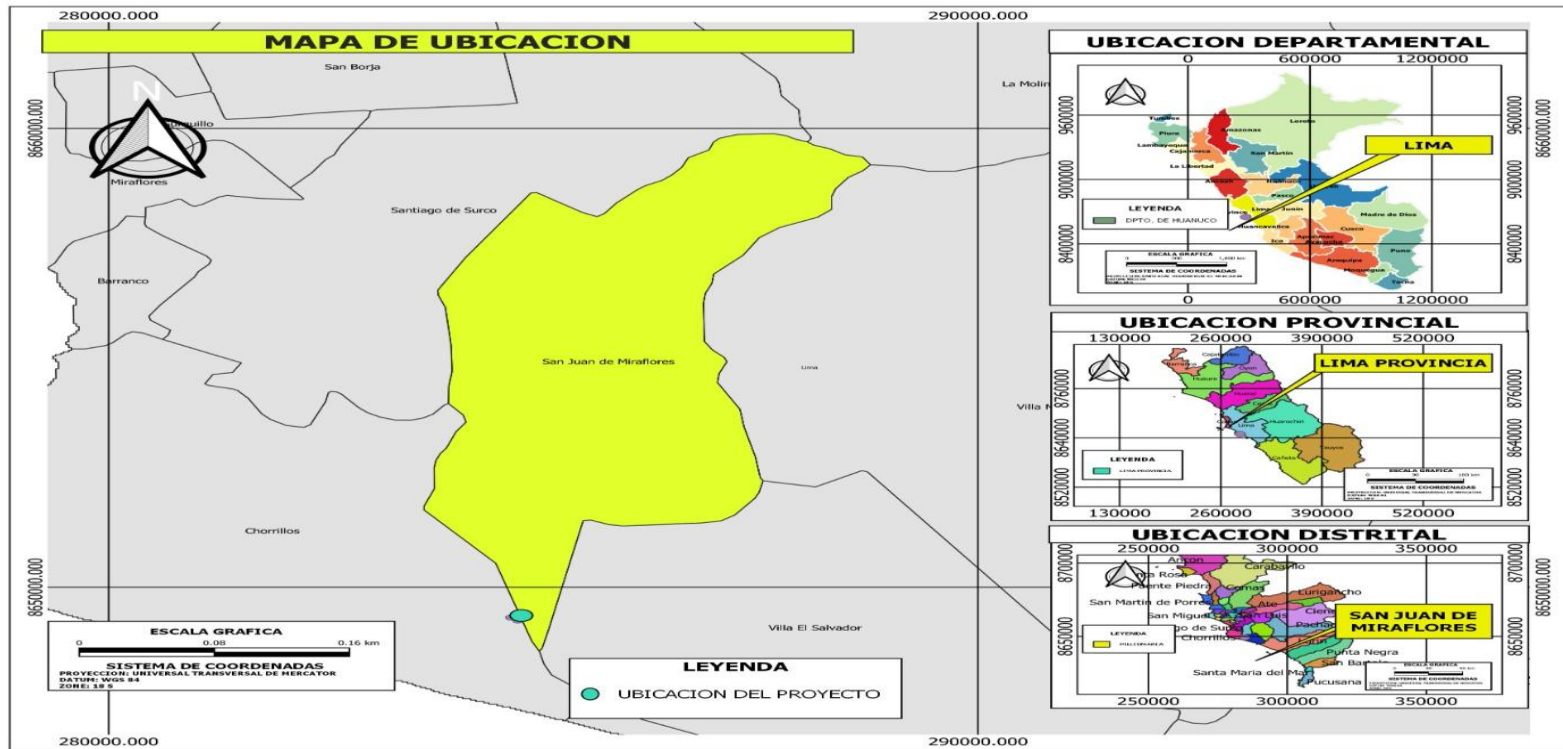



ANEXO 4

ÁRBOL DE MEDIOS Y FINES



ANEXO 5 MAPA DE UBICACIÓN



	UNIVERSIDAD DE HUANCAYO FACULTAD DE INGENIERIA P. A. INGENIERIA AMBIENTAL			DEPARTAMENTO: LIMA	DATUM: EPSG: 32718
	MAPA DE UBICACION			PROVINCIA: LIMA PROVINCIA	PROYECCION: UTM-84
FECHA:		14 DE NOVIEMBRE DE 2023		DISTRITO: SAN JUAN DE MIRAFLORES	ESCALA: 1: 3200
DESCRIPCIÓN	COORDENADAS UTM WGS 84 - 18S				
P-01	CANTERA PANAMERICANA SUR, MANZANA G, LOTE 01	ESTE 284780.00	NORTE 8649346.00		

ANEXO 6

PANEL FOTOGRÁFICO

Vista fotográfica N°1, del proceso de construcción del humedal artificial -madera.



Vista fotográfica N°2, de la colocación de plantas acuáticas para la remediación.



Vista fotográfica N°3, de las tomas de muestras del proceso de remediación.



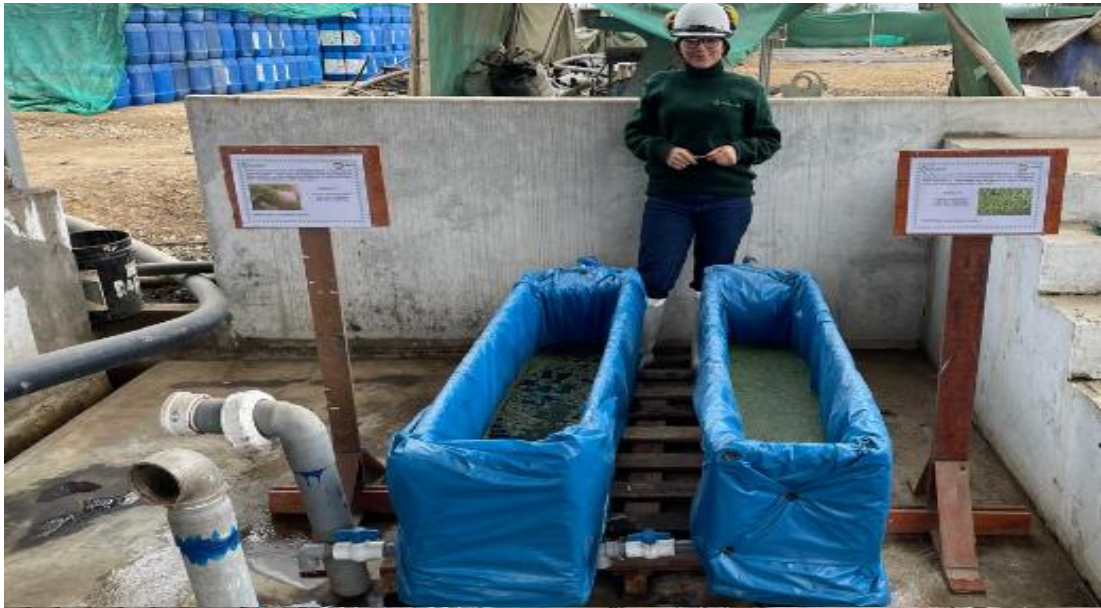
Vista fotográfica N°4, del proceso de medición de parámetros en laboratorio Interno.



Vista fotográfica N°5, del proceso de medición de parámetros del Lab. acreditado.



Vista fotográfica N°6, del Seguimiento, Monitoreo y Evaluación del proyecto - Tesis.



ANEXO 6

INFORMES DEL LABORATORIO ACREDITADO -SAG.



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL-DA CON REGISTRO N° LE - 047



INFORME DE ENSAYO N° 1805790-2024 CON VALOR OFICIAL

RAZÓN SOCIAL : ESMERALDA CORP S.A.C.
DOMICILIO LEGAL : AV. AUTOP. PANAMERICANA SUR KM. 18.5 MZA. G LOTE. 01 Z.I. LA CONCORDIA ALT. PARADERO - LECHÓN - SAN JUAN DE MIRAFLORES - LIMA - LIMA
SOLICITADO POR : LESLY IGLESIAS
REFERENCIA : MONITOREO AMBIENTAL
PROCEDENCIA : SAN JUAN DE MIRAFLORES - LIMA
FECHA(S) DE RECEPCIÓN DE MUESTRAS : 2024-07-27
FECHA(S) DE ANÁLISIS : 2024-07-26 AL 2024-08-05
FECHA(S) DE MUESTREO : 2024-07-26
MUESTREADO POR : SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.⁽¹⁾

I. METODOLOGÍA DE ENSAYO:

Ensayo	Método	L.C.	Unidades
pH (medición en campo)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24th Ed., 2023. pH Value. Electrometric Method.	no aplica	Unid. pH
Temperatura (medición en campo)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2550 B, 24th Ed., 2023. Temperature. Laboratory and Field Methods.	---	° C
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed., 2023. Biochemical Oxygen Demand (BOD). 5-Day BOD Test.	2.00 ^(a)	mg/L
Demanda Química de oxígeno (DQO)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 24th Ed., 2023. Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Colorimetric Method.	10.0	O ₂ mg/L
Sólidos suspendidos totales (TSS)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 D, 24th Ed., 2023. Solids. Total Suspended Solids Dried at 103-105°C.	3.00	mg/L
Turbiedad	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2130 B, 24th Ed., 2023. Turbidity. Nephelometric Method.	0.40	NTU

L.C.: Límite de cuantificación.
 (1) Toma de muestra de acuerdo a plan de muestreo N° 1805790 procedimiento PL-009.
 (a) Expresado como límite de detección del método.


ING. TELLO PAUCAR MARILU
 SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES SAC
 Firmado con www.tocapu.pe

DIRECTOR TÉCNICO DE LABORATORIO

**EXPERTS
WORKING
FOR YOU**

Este informe de ensayo al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral mutuo de los miembros firmantes de IAAC o ILAC.

OBSERVACIONES: • Está prohibida la reproducción parcial o total del presente documento a menos que sea bajo la autorización escrita de Servicios Analíticos Generales S.A.C. • Los resultados emitidos en este documento sólo son válidos para las muestras referidas en el presente informe. • Las muestras serán conservadas de acuerdo al periodo de perechibilidad del parámetro analizado con un máximo de 30 días de haber ingresado las muestras al laboratorio. Luego será eliminadas.

IMPORTANTE: • Este documento fue emitido con firma electrónica de valor legal en formato PDF. Debe solicitar su documento electrónico para verificar la autenticidad. Puedes comprobar la validez del mismo haciendo clic sobre la firma, saldrá un aviso: 'Validez de firma: firma válida', de no validarse el documento es falso. Notifique al correo: laboratorio@sagperu.com si su informe ha sido adulterado.

SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.

Laboratorios: INACAL-DA (Sede Lima 1): Av. Naciones Unidas N° 1565 Urb. Chacra Ríos Norte - Lima y INACAL-DA (Sede Lima 2): Pasaje Clorinda Matto de Turner N° 2079 Urb. Chacra Ríos Norte - Lima.

• Central telefónica (511) 425-6885 • Web: www.sagperu.com • Contacto Electrónico: sagperu@sagperu.com

Página 1 de 2

Cod. F/002 / Versión: 11/ FE.: 06/2023



INFORME DE ENSAYO N° 1805790-2024 CON VALOR OFICIAL

II. RESULTADOS:

Producto declarado	Agua residual industrial	
Matriz analizada	Agua residual	
Fecha de muestreo	2024-07-26	
Hora de inicio de muestreo (h)	15:15	
Coordenadas UTM WGS 84 18L	0284680E	
	8649315N	
Altitud (msnm)	12	
Descripción del punto de muestreo	Salida DAF	
Condiciones de la muestra	Refrigerada / preservada	
Código del Cliente	Lesly Iglesias	
Código del Laboratorio	24072257	
ENSAYOS ACREDITADOS ANTE INACAL-DA (SEDE LIMA 1)		
Ensayos	Unidades	Resultados
pH (medición en campo)	Unid. pH	7.77
Temperatura (medición en campo)	°C	20.6
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	7.60
Demanda Química de oxígeno (DQO)	O ₂ mg/L	24.0
Sólidos suspendidos totales (TSS)	mg/L	<3.00
Turbiedad	NTU	0.75

Medición de pH realizada a 25°C.

Lima, 09 de Agosto del 2024.

Cod. FI 002 / Versión: 11 / FE: 06/2023

Este informe de ensayo al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

OBSERVACIONES: • Está prohibida la reproducción parcial o total del presente documento a menos que sea bajo la autorización escrita de Servicios Analíticos Generales S.A.C. • Los resultados emitidos en este documento sólo son válidos para las muestras referidas en el presente informe. • Las muestras serán conservadas de acuerdo al período de perecibilidad del parámetro analizado con un máximo de 30 días de haber ingresado las muestras al laboratorio. Luego será eliminadas.

IMPORTANTE: • Este documento fue emitido con firma electrónica de valor legal en formato PDF. Debe solicitar su documento electrónico para verificar la autenticidad. Puedes comprobar la validez del mismo haciendo clic sobre la firma, saldrá un aviso: Validez de firma: firma válida, de no validarse el documento es falso. Notifique al correo: laboratorio@sagperu.com si su informe ha sido adulterado.

SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.

Laboratorios: INACAL-DA (Sede Lima 1): Av. Naciones Unidas N° 1565 Urb. Chacra Ritos Norte - Lima y INACAL-DA (Sede Lima 2): Pasaje Clorinda Matto de Turner N° 2079 Urb. Chacra Ritos Norte - Lima.

• Central telefónica (511) 425-6885 • Web: www.sagperu.com • Contacto Electrónico: sagperu@sagperu.com

EXPERTS
WORKING
FOR YOU



INFORME DE ENSAYO N° 1805914-2024 CON VALOR OFICIAL

II. RESULTADOS:

Producto declarado	Agua residual industrial	Agua residual industrial		
Matriz analizada	Agua residual	Agua residual		
Fecha de muestreo	2024-08-02	2024-08-02		
Hora de inicio de muestreo (h)	16:50	17:10		
Coordenadas UTM WGS 84 18L	0284674E 8649315N	0284674E 8649315N		
Altitud (msnm)	12	12		
Descripción del punto de muestreo	Agua residual tratada / Planta B: Azolla filiculoides	Agua residual tratada / Planta A: Lemna minor		
Condiciones de la muestra	Refrigerada / preservada	Refrigerada / preservada		
Código del Cliente	ESTANQUE B	ESTANQUE A		
Código del Laboratorio	24080245	24080246		
ENSAYOS ACREDITADOS ANTE INACAL-DA (SEDE LIMA 1)				
Ensayos	Unidades	Resultados		
pH (medición en campo)	Unid. pH	8.12 7.83		
Temperatura (medición en campo)	° C	17.7 17.4		
Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	22.25 34.60		
Demanda Química de oxígeno (DQO)	O ₂ mg/L	59.2 64.9		
Sólidos suspendidos totales (TSS)	mg/L	3.43 9.69		
Turbiedad	NTU	1.70 2.40		
Código del Cliente	DUPLICADO (ESTANQUE B)	Blanco de campo (BKc)	Blanco viajero (BKv)	
Código del Laboratorio	24080247	24080248	24080249	
Demanda Química de oxígeno (DQO)	O ₂ mg/L	60.1	<10.0	////
Sólidos suspendidos totales (TSS)	mg/L	////	////	<3.00
Medición de pH realizada a 25°C				

////: Ensayo no solicitado.

17025 Lima, 15 de Agosto del 2024.

EXPERTS WORKING FOR YOU

Este informe de ensayo al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/mutuo de los miembros firmantes de IAAC e ILAC.

OBSERVACIONES: • Está prohibida la reproducción parcial o total del presente documento a menos que sea bajo la autorización escrita de Servicios Analíticos Generales S.A.C. • Los resultados emitidos en este documento sólo son válidos para las muestras referidas en el presente informe. • Las muestras serán conservadas de acuerdo al período de perecibilidad del parámetro analizado con un máximo de 30 días de haber ingresado las muestras al laboratorio. Luego será eliminadas.

IMPORTANTE: • Este documento fue emitido con firma electrónica de valor legal en formato PDF. Debe solicitar su documento electrónico para verificar la autenticidad. Puedes comprobar la validez del mismo haciendo clic sobre la firma, saldrá un aviso: Validez de firma : firma válida, de no validarse el documento es falso. Notifique al correo: laboratorio@sagperu.com si su informe ha sido adulterado.

SERVICIOS ANALÍTICOS GENERALES S.A.C.

Laboratorios: INACAL-DA (Sede Lima 1): Av. Naciones Unidas N° 1565 Urb. Chacra Rios.Norte - Lima y INACAL-DA (Sede Lima 2): Pasaje Clorinda Matto de Tumar N° 2079 Urb. Chacra Rios Norte - Lima.

• Central telefónica (511) 425-6885 • Web: www.sagperu.com • Contacto Electrónico: sagperu@sagperu.com

Página 2 de 2