



**Universidad
Católica de
Santa María**

**Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental**

**Reducción de DBO₅ y DQO utilizando la microalga *Spirulina sp.* como
tratamiento secundario de la planta de tratamiento de aguas residuales en
el distrito de Callalli, provincia de Caylloma, 2024.**

Tesis presentada por:

Huachani Chullo, Yeselyn Yeisy

ORCID: 0009-0008-8390-3737

Laura Maldonado, Angela Belen

ORCID: 0009-0009-6250-6692

para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesor(a):

Mag. Lazarte Arredondo, Sonia

ORCID: 0000-0002-8696-6708

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA AMBIENTAL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 16 de Octubre del 2025

Dictamen: 011788-C-EPIA-2025

Visto el borrador del expediente 011788, presentado por:

2016400112 - HUACHANI CHULLO YESELYN YEISY

2016602342 - LAURA MALDONADO ANGELA BELEN

Titulado:

**REDUCCIÓN DE DBO5 Y DQO UTILIZANDO LA MICROALGA SPIRULINA SP. COMO
TRATAMIENTO SECUNDARIO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN EL
DISTRITO DE CALLALLI, PROVINCIA DE CAYLLOMA,2024.**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO AMBIENTAL

**43297964 - CAMPOS OLAZAVAL LIZBETH MARIANELLA
DICTAMINADOR**



**46769238 - CHANOVE MANRIQUE ANDREA MARIETA
DICTAMINADOR**



**43238145 - BENEGAS LLANOS ROSARIO CAROLINA
DICTAMINADOR**



Reducción de DBO5 y DQO utilizando la microalga Spirulina sp. como tratamiento secundario de la planta de tratamiento de aguas residuales en el distrito de Callalli, provincia de Caylloma, 2024.

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

10%

FUENTES DE INTERNET

5%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

hdl.handle.net

Fuente de Internet

3%

2

repositorio.cientifica.edu.pe

Fuente de Internet

3%

3

repositorio.xoc.uam.mx

Fuente de Internet

1%

4

www.researchgate.net

Fuente de Internet

1%

5

repositorio.unc.edu.pe

Fuente de Internet

1%

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Apagado

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi guía y fortaleza en cada etapa de este camino, otorgándome la sabiduría, la salud y la perseverancia necesarias para alcanzar esta meta; a mis padres, Eusebio Huachani y Albina Chullo, por su amor incondicional, sacrificio y apoyo permanente, cuyo ejemplo de esfuerzo y dedicación me ha inspirado a superar cada desafío; a mis hermanos, Joseph y Daniela, por su constante motivación y por recordarme siempre la importancia de avanzar con optimismo; a mi compañera de tesis, por su compromiso y trabajo conjunto, que hicieron posible culminar con éxito esta significativa etapa académica y personal; y finalmente, a mí misma, por no rendirme ante las dificultades, por la disciplina, el esfuerzo y la dedicación invertidos en cada paso de este recorrido, porque este logro también es fruto de mi constancia, mi fe y mi determinación para alcanzar mis metas.

YESELYN HUACHANI CHULLO

A Dios, por darme vida y protección, por permitirme sonreír ante éste logro que es resultado de su infinita ayuda. A mi compañero de vida José, por creer en mí, por su comprensión y apoyo. A mis hijos, Ángel y Thiago por ser mi mayor inspiración y motivo para seguir adelante. A mis padres, Jorge Laura y Sonia Maldonado, por estar siempre conmigo, por todo el sacrificio que hicieron por mí y por haberme forjado como la persona que soy. A mi mamá Zoraida por inculcarme valores y encaminarme por el buen sendero. A mi hermana y familia en general, por sus consejos y motivación. A mi compañera de tesis, por su paciencia, colaboración y comprensión que me ha brindado. Y finalmente, a mis fieles compañeros de cuatro patas, por ser parte importante de mi proceso de formación y acompañarme en los buenos y malos tiempos. Éste logro es de todos ustedes, con todo mi amor y gratitud.

ANGELA LAURA MALDONADO

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento a la Mag. Sonia Lazarte Arredondo, quien, con su orientación, paciencia y constante apoyo, fue una guía fundamental en el desarrollo de esta tesis, brindándonos sus conocimientos, experiencia y motivación para culminar con éxito este trabajo de investigación. Asimismo, manifestamos nuestro reconocimiento y gratitud a todos los docentes de nuestra carrera, quienes a lo largo de nuestra formación profesional nos impartieron enseñanzas, valores y herramientas que fortalecieron nuestro crecimiento académico y personal, inspirándonos a alcanzar nuestras metas. Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento a la Municipalidad Distrital de Callalli, por las facilidades y colaboración otorgado durante el proceso de ejecución de la investigación, contribuyendo de manera significativa al logro de los objetivos propuestos y al desarrollo de nuestra formación profesional.

RESUMEN

La creciente preocupación por la contaminación del agua en distintas regiones del mundo ha incentivado la búsqueda de alternativas más eficientes y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales, la presente investigación tuvo como objetivo reducir los niveles de DBO₅ y DQO mediante el uso de *Spirulina sp.* como tratamiento secundario en la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Callalli, el tratamiento de aguas residuales mediante procesos biológicos ha cobrado relevancia en los últimos años debido a su eficiencia, bajo costo y menor impacto ambiental en comparación con métodos tradicionales, la microalga *Spirulina sp.* mostró una destacada capacidad para absorber y eliminar contaminantes como la DBO₅ y la DQO, posicionándola como una opción viable para mejorar la calidad del agua tratada. El enfoque metodológico de la investigación fue de tipo experimental y aplicada, basado en el diseño de un tratamiento secundario con *Spirulina sp.*. Se llevaron a cabo ensayos en la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Callalli, monitoreando periódicamente los niveles de DBO₅ y DQO antes y después de la aplicación del tratamiento. Se evaluaron diferentes concentraciones de *Spirulina sp.* y tiempos de exposición para determinar su efectividad, los resultados obtenidos evidenciaron una reducción significativa en ambos parámetros, en el caso de la DBO₅ (mg/L), se observó una disminución de 557.82 mg/L a 180.44 mg/L, lo que representa una reducción del 67.67%. Por otro lado, la DQO (mg/L) se redujo de 2756.12 mg/L a 2436.31 mg/L, equivalente a una disminución del 11.62%, el tratamiento fue más eficaz frente a compuestos biodegradables que frente a sustancias químicas más resistentes a la oxidación, estos hallazgos indican que el uso de *Spirulina sp.* como agente biológico representa una estrategia efectiva para el tratamiento secundario de aguas residuales, contribuyendo de manera significativa a la mejora de la calidad del agua tratada.

Palabras Clave: Aguas residuales, DBO₅, DQO

ABSTRACT

The growing concern about water pollution in various regions around the world has driven the search for more efficient and sustainable alternatives for wastewater treatment. This research aimed to reduce BOD₅ and COD levels through the use of *Spirulina sp.* as a secondary treatment at the wastewater treatment plant in the district of Callalli. Wastewater treatment through biological processes has gained relevance in recent years due to its efficiency, low cost, and reduced environmental impact compared to traditional methods. The microalga *Spirulina sp.* demonstrated a remarkable ability to absorb and eliminate contaminants such as BOD₅ and COD, positioning it as a viable option to improve the quality of treated water.

The methodological approach of the research was experimental and applied, based on the design of a secondary treatment using *Spirulina sp.* Tests were conducted at the wastewater treatment plant in the district of Callalli, where BOD₅ and COD levels were periodically monitored before and after the application of the biological treatment. Different concentrations of *Spirulina sp.* and exposure times were evaluated to determine their effectiveness. The results showed a significant reduction in both parameters. In the case of BOD₅ (mg/L), a decrease from 557.82 mg/L to 180.44 mg/L was observed, representing a 67.67% reduction. This result demonstrates high efficiency of the treatment in removing biodegradable organic matter. On the other hand, COD (mg/L) was reduced from 2756.12 mg/L to 2436.31 mg/L, equivalent to an 11.62% decrease. These findings indicate that the use of *Spirulina sp.* as a biological agent represents an effective strategy for secondary wastewater treatment, significantly contributing to the improvement of treated water quality.

Key Words: Wastewater, DBO₅, DQO

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

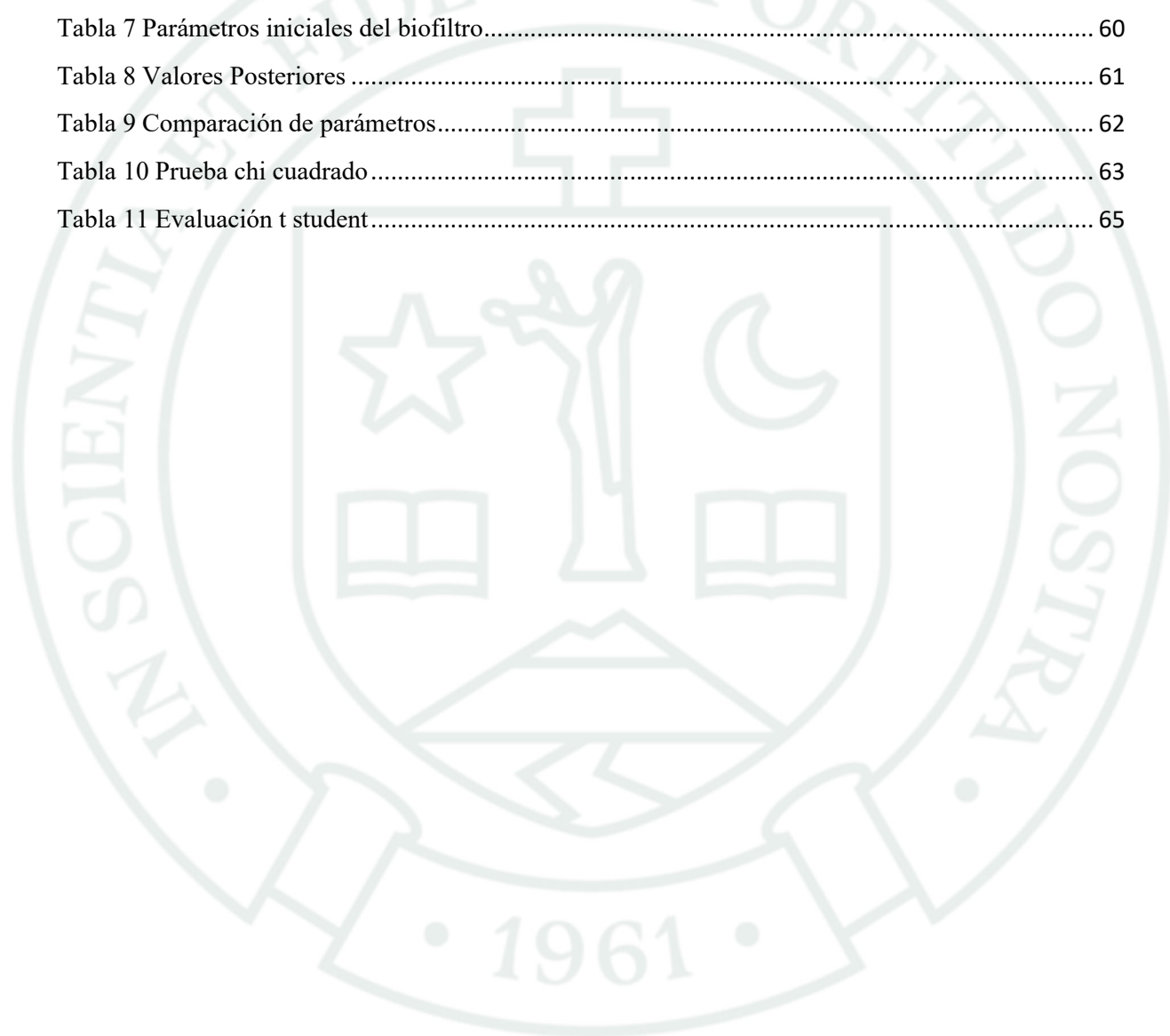
RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I : PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
Problemática de la investigación	4
Justificación de la Investigación	6
Objetivos de la investigación.....	8
Hipótesis.....	9
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÒRICO	10
Antecedentes de la investigación.....	10
Marco teórico	19
Marco legal	33
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA PROPUESTA.....	36
Tipo y nivel de investigación	36
Diseño de la investigación.....	37
Métodos de investigación.....	38
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
RESULTADOS	59
DISCUSIÓN	73
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
CONCLUSIONES.....	76
RECOMENDACIONES.....	78
CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
ANEXOS.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Distritos de Arequipa con Mayor Riesgo de enfermedades diarreicas agudas 2010-2020	7
Tabla 2 Coordenadas geográficas de la zona de Estudio.....	40
Tabla 3 Límites máximos permisibles para los efluentes para vertidos a cuerpos de aguas.	47
Tabla 4 Composición de los nutrientes agregados al agua de mesa para obtener el Medio de Cultivo	49
Tabla 5 Factores a tomar en cuenta para el cultivo de la Spirulina sp.	52
Tabla 6 Parámetros iniciales del agua residual del PTAR de Callalli.....	59
Tabla 7 Parámetros iniciales del biofiltro.....	60
Tabla 8 Valores Posteriores	61
Tabla 9 Comparación de parámetros.....	62
Tabla 10 Prueba chi cuadrado	63
Tabla 11 Evaluación t student.....	65



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Vertimiento de las Aguas Residuales del PTAR - Callalli	5
Figura 2 Ubicación del Distrito de Callalli.	40
Figura 3 Ríos presentes en la Provincia de Caylloma y Distrito de Callalli	41
Figura 4 Vista Panorámica de la ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Callalli	41
Figura 5 Cepa de la microalga <i>Spirulina</i> sp.....	48
Figura 6 Preparación del Medio de Cultivo	49
Figura 7 Cultivo de la Microalga <i>Spirulina</i> sp. en crecimiento	50
Figura 8 Cultivo de la Microalga <i>Spirulina</i> sp. después de 10 días	51
Figura 9 Diagrama de entradas y salidas del sistema de biofiltro.....	58
Figura 10 Comparación general de parámetros antes y después del tratamiento.....	66
Figura 11 Distribución de valores antes y después (diagrama de caja)	67
Figura 12 Variación pH	68
Figura 13 Variación conductividad.....	68
Figura 14 Variación turbidez	69
Figura 15 Variación de la DBO ₅ antes y después del tratamiento	70
Figura 16 Variación DQO.....	71
Figura 17 Variación Aceites y Grasas.....	71
Figura 18 Variación Sólidos Suspendidos.....	72

INTRODUCCIÓN

La creciente preocupación por la contaminación del agua en diversas regiones del mundo impulsa la búsqueda de alternativas más eficientes y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales, la planta de tratamiento de aguas residuales en el distrito de Callalli, provincia de Caylloma, enfrenta el desafío de reducir los niveles de contaminantes clave, como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), parámetros fundamentales para evaluar la calidad del agua. Para abordar esta problemática, la presente investigación propone evaluar el uso de la microalga *Spirulina sp.* como tratamiento secundario para la remoción de estos contaminantes.

El objetivo principal de la investigación es reducir los niveles de DBO5 y DQO en las aguas residuales utilizando *Spirulina sp.* como tratamiento secundario en la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Callalli. En este sentido, se pretende explorar una alternativa más eficiente y sostenible que complemente los métodos convencionales de tratamiento. El tratamiento biológico mediante microalgas ha ganado popularidad debido a su bajo costo, su capacidad para absorber contaminantes y su menor impacto ambiental en comparación con otras tecnologías más tradicionales.

El enfoque metodológico de la investigación es experimental, basado en el diseño de un tratamiento secundario utilizando *Spirulina sp.*. Se realizarán ensayos en la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Callalli, durante los cuales se monitorean los niveles de DBO5 y DQO antes y después de la aplicación del tratamiento biológico. La investigación está orientada a la aplicación directa de *Spirulina sp.* en diferentes concentraciones y tiempos de exposición para evaluar su efectividad en la reducción de los contaminantes. Las muestras de aguas residuales se tomarán periódicamente y se analizarán para determinar las variaciones en los parámetros de DBO5 y DQO.

La estructura del estudio se organiza en varias secciones clave. En primer lugar, se aborda el planteamiento del problema, presentando la situación actual de la planta de tratamiento de aguas residuales en Callalli y las dificultades para reducir los niveles de DBO5 y DQO. A continuación, se expone la problemática de la investigación, explicando la necesidad urgente de una solución más eficiente para el tratamiento de aguas residuales. La justificación de la investigación establece la

relevancia del estudio, destacando su importancia tanto en términos de sostenibilidad ambiental como de mejora en la calidad del agua tratada.

En la siguiente sección se presentan los objetivos de la investigación, que buscan evaluar la efectividad de *Spirulina sp.* en la reducción de contaminantes en aguas residuales. La hipótesis planteada en este estudio es que el uso de *Spirulina sp.* reducirá significativamente los niveles de DBO5 y DQO en las aguas tratadas.

El fundamento teórico incluye una revisión del marco legal relacionado con el tratamiento de aguas residuales, las normativas vigentes y los estándares de calidad del agua. Asimismo, se desarrolla un marco teórico sobre el tratamiento biológico de aguas residuales y el papel de las microalgas, en particular de *Spirulina sp.*, en la remoción de contaminantes. Además, se revisan los antecedentes de la investigación, identificando estudios previos sobre el uso de microalgas en el tratamiento de aguas residuales. El estado del arte presenta un resumen de los avances más recientes en la investigación sobre *Spirulina sp.* y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales.

En cuanto a la metodología propuesta, se especifican el tipo y nivel de investigación, indicando que se trata de una investigación aplicada y experimental. El diseño experimental contempla la aplicación de *Spirulina sp.* en distintas concentraciones y tiempos de exposición, y los métodos de investigación incluyen la toma periódica de muestras de agua y su análisis en laboratorios para evaluar la reducción de DBO5 y DQO.

Los resultados y la discusión presentan los hallazgos obtenidos durante la implementación de la investigación, comparando los niveles de DBO5 y DQO antes y después del tratamiento con *Spirulina sp.* Además de , las conclusiones y recomendaciones sintetizan los resultados, indicando la efectividad del tratamiento y ofreciendo sugerencias para la mejora y aplicación del proceso en la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Callalli.

La investigación se complementa con la bibliografía, que incluye todas las notas científicas y documentales utilizadas para la elaboración de la investigación, apoyando teóricamente el enfoque y los resultados obtenidos en el estudio, este enfoque integral permite ofrecer una solución viable,

económica y ambientalmente amigable para el tratamiento de aguas residuales en la región, contribuyendo a la sostenibilidad y la mejora de la calidad del agua.



CAPÍTULO I : PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Problemática de la investigación

Se reconoció en el año 2010 por la Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU) el derecho humano al abastecimiento de agua y al saneamiento donde todas las personas tienen derecho a disponer de cantidades suficientes de agua salubre, físicamente accesible y de calidad aceptable (OMS, 2023). Hoy en día a nivel mundial el acelerado crecimiento poblacional urbano y la gestión de los suministros de saneamiento de agua viene siendo ineficiente; según el estudio de Tuholske, el 63 % de la contaminación mundial por nitrógeno es generada por las aguas residuales provenientes de los sistemas de alcantarillado; el 32 % es por salida directa; y el 5 %, generado por los sistemas sépticos, asimismo el problema es causado por la falta de acceso a un saneamiento eficaz, así como a sistemas de tratamiento que no están diseñados para eliminar los nutrientes y otros contaminantes de los desechos (Scherer,2022)

El Perú no se encuentra exento de esta coyuntura, puesto que la gestión del tratamiento de las aguas residuales domésticas presenta notorias deficiencias estructurales y operativas. En numerosos casos, incluso, se evidencia la inexistencia o precariedad de sistemas de depuración, lo cual genera amplias brechas en materia de cobertura, eficiencia y sostenibilidad dentro de los servicios de saneamiento básico. Dichas disparidades afectan de manera más intensa a los sectores poblacionales con menor capacidad económica, reflejando con claridad las asimetrías sociales y territoriales que persisten en el acceso equitativo a los servicios sanitarios (Buleje, 2023). De acuerdo con ENAPRES 2020, el 8.8% de la población peruana carecían de acceso al servicio de agua potable y 23.2 % al servicio de alcantarillado sanitario o de otras formas de disposición sanitaria de excretas; además que la población no cubierta vierte directamente sus aguas residuales sin tratamiento al mar, ríos, lagos y quebradas (MVCS,2021). Del total de las aguas residuales Nacionales vertidas, 34 % recibe un previo tratamiento antes de ser descargados algún cuerpo de agua y en razón al último informe emitido por las municipalidades, el tercer gran problema ambiental Nacional son las aguas residuales, siendo uno de los motivos del deterioro de la calidad de las aguas de los ríos (Lima,2020).

El Distrito de Callalli se encuentra ubicada en la Provincia de Caylloma, Departamento de Arequipa, dentro de su territorio se encuentra el Río Llapa tributario del Río Colca. Actualmente el distrito cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas (PTAR) en deterioro, por lo que los vertimientos de los efluentes se vierten directamente en el río. Es por ello que a través de la investigación se pretende dar a conocer el efecto del vertimiento de aguas residuales domiciliarias en la calidad de agua del Río Llapa - Río Colca.

En el año 2016 se inicia un proceso sancionador a la Municipalidad distrital de Callalli (ANEXO 1) por efectuar vertimientos de aguas residuales en el cuerpo de agua sin Autorización del ANA verificando que existen dos vertimientos de agua residual al Río Llapa, tributario del río Colca; se menciona que la coloración de las aguas es negra y se ha formado una laguna con estas aguas por lo que se incurre en infracción a la legislación de Recursos hídricos por lo que se sanciona con el pago de una multa de 2.1 UIT. En el año 2022 se realiza por segunda vez la supervisión a la Municipalidad Distrital de Callalli (ANEXO 2) y al hacer caso omiso a las medidas del primer proceso sancionador se le aplicó a la Municipalidad una multa de 4,5 UIT. Como podemos ver en la Figura 1, el Vertimiento de las Aguas Residuales del PTAR - Callalli.

Figura 1

Vertimiento de las Aguas Residuales del PTAR - Callalli



Nota: Vertimiento de las Aguas residuales del PTAR de Callalli hacia el río Llapa

Justificación de la Investigación

Justificación Ambiental

La investigación se origina como el efecto de la contaminación de las aguas del Río Llapa tributario del Río Colca, por las descargas de las aguas residuales domiciliarias generadas por el PTAR que no se encuentra en un estado óptimo, para así dar a conocer los parámetros que exceden en las concentraciones establecidas en los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de los elementos fisicoquímicos y microbiológicos, que de modo directo deterioran la calidad del agua del río Colca.

Reducir la contaminación en la cuenca del río Colca que atenta contra la flora y fauna del lugar ya que el tratamiento de aguas residuales también contribuye al cambio climático y poder cumplir con algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas.

Justificación Social

La presente investigación adquiere relevancia social al centrarse en el distrito de Callalli, una jurisdicción de reducida extensión poblacional cuya economía se sustenta principalmente en las actividades agropecuarias. En este contexto, la disponibilidad de agua de calidad constituye un elemento esencial para el sostenimiento de dichas prácticas productivas y para la salud de la comunidad. No obstante, la contaminación hídrica generada por el vertimiento de efluentes domésticos provenientes de una planta de tratamiento con baja eficiencia operativa ha comprometido la salubridad del recurso, afectando directamente las condiciones de vida y el desarrollo sostenible del territorio. Con esta investigación se busca mejorar la calidad de vida de los habitantes del distrito de Callalli ya que las enfermedades relacionadas con el agua y el saneamiento siguen estando entre las principales causas de fallecimiento de niños menores de 5 años por enfermedades diarreicas asociadas a la falta de higiene y saneamiento ambiental (GRSA,2022). Los Distritos con mayor riesgo de enfermedades diarreicas agudas 2010 -2020 se presentan en la Tabla 1.

El análisis epidemiológico histórico permitió identificar las zonas más vulnerables de la región Arequipa frente a enfermedades diarreicas agudas (EDA). A continuación, se presentan los distritos que registraron mayores tasas de incidencia acumulada de EDA entre los años 2010 y 2020, lo cual evidencia un patrón persistente de riesgo sanitario.

Tabla 1

Distritos de Arequipa con Mayor Riesgo de enfermedades diarreicas agudas 2010-2020

Nº	Provincia	Distrito	EDAs T.I.
1	Arequipa	Sta. Isabel de S.	38.83
2	Caylloma	Tapay	36.59
3	Arequipa	Pocsi	32.26
4	Caylloma	Sibayo	21.74
5	Castilla	Uñon	15.87
6	Caylloma	Callalli	15.63
7	La Union	Tomepampa	15.63
8	Caylloma	Tisco	13.16
9	Castilla	Machaguay	12.66
10	Arequipa	Characato	12.14

Nota.: Elaboración propia

NOTA: Los datos son proporcionados por la Gerencia Regional de Salud Arequipa, 2022

De igual manera, la investigación aporta un valor significativo tanto a la Municipalidad Distrital de Callalli como a la comunidad en su conjunto, al ofrecer una base técnica que facilite la identificación y análisis de la problemática asociada al funcionamiento deficiente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Este diagnóstico permitirá diseñar y sustentar el perfil de un nuevo sistema de tratamiento más eficiente, orientado a optimizar la gestión del recurso hídrico y respaldar procesos de toma de decisiones informadas en materia ambiental. En consecuencia, la implementación de dichas acciones contribuirá a preservar la calidad del agua del río Colca y a garantizar un desarrollo territorial sostenible en la jurisdicción.

Justificación Económica

El cultivo de la *Spirulina sp.* es económicamente factible, se le puede dar un valor agregado además que el mantenimiento es de bajo costo y se puede utilizar para producir biomasa, creación de biodiesel y mitigar olores nocivos de las mismas.

Por otro lado, se crearían nuevos puestos de trabajo en gestión y mantenimiento del PTAR, haciéndola auto sostenible, biocompatible y elevando el nivel de desarrollo del distrito.

Justificación Tecnológica

La implementación de *Spirulina sp.* como tratamiento de aguas residuales, se justifica tecnológicamente por su capacidad para reducir eficientemente parámetros clave de contaminación, como la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Esta microalga, ampliamente estudiada por sus propiedades bioadsorbentes y metabólicas, tiene la capacidad de capturar y transformar compuestos orgánicos presentes en aguas residuales. Su aplicación permite disminuir significativamente la carga contaminante, optimizando los procesos de depuración sin recurrir a tratamientos químicos costosos. Asimismo, su alta biocompatibilidad y autosostenibilidad reducen los costos operativos y mejoran la eficiencia general del sistema de tratamiento. El uso de *Spirulina sp.* como parte de un enfoque tecnológico innovador no solo asegura el cumplimiento de los estándares de calidad del agua, sino que también contribuye a la sostenibilidad ambiental mediante la posibilidad de aprovechar su biomasa en aplicaciones económicas o energéticas. Esta tecnología representa una alternativa viable y rentable para enfrentar los desafíos locales en la gestión de aguas residuales en el distrito de Callalli, garantizando impactos positivos a largo plazo.

Objetivos de la investigación

Objetivo General

Reducir el DQO Y DBO₅ utilizando la Microalga *Spirulina sp.* como tratamiento secundario de la Planta de tratamiento de aguas residuales en el Distrito de Callalli.

Objetivos Específicos

- Caracterizar mediante monitoreos el estado actual de las aguas residuales del PTAR de Callalli.
- Aplicar un biofiltro a base de la microalga *Spirulina sp.* como tratamiento secundario a escala laboratorio para reducir la contaminación de las aguas residuales vertidas por el PTAR.
- Evaluar el biofiltro con respecto a los resultados iniciales de las aguas residuales provenientes del PTAR y los obtenidos aplicando el biofiltro a base de la microalga *Spirulina sp.*

Hipótesis

Es posible reducir el DQO y DBO₅ utilizando la Microalga *Spirulina sp.* como tratamiento secundario en las aguas residuales del PTAR de la Provincia de Caylloma, Distrito de Callalli.



CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

Antecedentes de la investigación

De acuerdo con Betancur, J.; Meneses, E. & Patiño, P. (2018) el objetivo de este estudio fue validar la remoción de cromo de aguas residuales industriales mediante tratamientos físicos, químicos y biológicos para determinar una alternativa sostenible ya que el cromo es un metal pesado comúnmente utilizado en la industria y se vierte directamente en las aguas.

Para ello se utilizaron inicialmente ocho reactores de empresas metalmecánicas para el tratamiento de aguas residuales industriales a escala de laboratorio, se evaluó la remoción de cromo por sedimentación primaria, con una tasa de remoción del 16%, luego por efecto del sulfato de aluminio y óxido de calcio. Probado mediante precipitación química, finalmente se evaluó la capacidad de biosorción de la microalga *Spirulina sp.* utilizando biomasa viva y muerta después de 24 horas y 96 horas. Se descubrió que los mecanismos para evitar las emisiones directas eran fáciles de implementar y se descubrió que el tratamiento químico podría reducir los niveles de cromo a 0,1 mg/l con una tasa de eliminación del 99 %, pero producía más del 30 % de cromo y no favorece la separación de metales. Utilizando biomasa se logró una tasa de eliminación de hasta el 96,5% en las primeras 24 h con un valor de cromo final de 1,02 mg/l. La ventaja es que el método produce menos del 10% de lodo y el cromo se puede recuperar para un uso posterior. Por lo que se recomienda un tratamiento fisicobiológico, ya que aumenta la sostenibilidad del proceso.

Según Gonzales (2018) el agua es un importante medio de vida. Sin agua, la vida no existiría. Según investigaciones, el agua cubre aproximadamente el 71% de la corteza terrestre; a pesar de ser tan abundante, sólo se consume una pequeña cantidad. Este estudio propuso objetivos para reducir la contaminación por aguas residuales de la empresa Pomalca S.A.A. utilizando biofiltros a base de la microalga *Spirulina sp.* El estudio utilizó un diseño no experimental, descriptivo y transversal. Se realizaron muestreos semanales durante tres semanas para evaluar la eficacia del tratamiento del biofiltro a base de la microalga *Spirulina sp.* dando como resultado que el pH se mantuvo entre los 6.6-8.5, también se obtuvo la disminución en cuanto a la conductividad eléctrica, los SST, la turbidez, la

demanda bioquímica de oxígeno (DBO)y demanda química de oxígeno (DQO) demostrando así la eficacia del biofiltro a base de la microalga *Spirulina sp.*

De acuerdo con lo señalado por Meza et al. (2018), la investigación se centra en la aplicación de un tratamiento biológico ex situ en la laguna de Ubaque, mediante la utilización del método de biorremediación con cepas de microalgas de los géneros *Spirulina máxima*, *Spirulina platensis* y *Chlorella vulgaris*. El propósito principal del estudio fue disminuir las concentraciones de nitratos, nitritos y fosfatos presentes en esta masa hídrica, con el fin de evaluar la capacidad depuradora de cada una de las especies seleccionadas.

Para determinar la efectividad del proceso de biorremediación, los autores emplearon el software Design-Expert, bajo el diseño experimental Compuesto Central Factorial 2², que permitió optimizar las condiciones del cultivo. Las microalgas fueron previamente aclimatadas a las condiciones fisicoquímicas de la laguna de Ubaque y posteriormente cultivadas conforme a los parámetros del diseño experimental establecido.

Los resultados obtenidos evidenciaron que la biorremediación basada en microalgas constituye una alternativa técnicamente viable para reducir el grado de eutrofización del cuerpo de agua; sin embargo, se observaron diferencias significativas entre las cepas evaluadas. En particular, la cepa *Chlorella vulgaris* registró una cinética de crecimiento superior a la obtenida por las cepas del género *Spirulina*, comportamiento que se atribuye a su mayor capacidad de adaptación al medio, dado que es una especie autóctona de Colombia.

En contraste, las cepas de *Spirulina* presentaron limitaciones durante la fase de aclimatación, probablemente asociadas a las condiciones ambientales de su hábitat natural, el Lago Chad (África), donde las temperaturas promedio alcanzan los 37 °C, notablemente superiores a los 20,5 °C característicos de la laguna de Ubaque. Esta diferencia térmica habría influido en la eficiencia metabólica y la velocidad de crecimiento de dichas microalgas, condicionando su desempeño depurativo.

El autor Aguilar (2020) considera que existen tecnologías de tratamiento de aguas residuales que son tan efectivas como los métodos tradicionales, pero requieren altos costos, operación y mantenimiento. Por otro lado, el uso de microalgas en el tratamiento de aguas residuales ofrece un

método alternativo excelente, rentable y respetuoso con el medio ambiente para eliminar nutrientes (fósforo, nitrógeno y potasio, metales pesados, DBO, DQO y otros contaminantes de las aguas residuales). El objetivo de esta revisión es analizar las características, composición y clasificación de las aguas residuales, así como el uso de métodos tradicionales y biológicos y su capacidad para eliminar microalgas. En el proceso de selección de cepas de microalgas destinadas a la biorremediación, es fundamental considerar una serie de criterios biológicos y funcionales que determinan su eficiencia en sistemas de tratamiento de aguas. Entre los principales aspectos destacan:

En primer lugar, que las especies presenten una tasa de crecimiento elevada, lo cual permite una rápida colonización y aprovechamiento de nutrientes; en segundo término, su capacidad para remover compuestos nitrogenados y fosforados, asegurando una reducción significativa de la carga eutrofizante; en tercer lugar, su versatilidad fisiológica y adaptabilidad frente a variaciones ambientales de temperatura, luminosidad y pH; y finalmente, su alta productividad de biomasa, condición indispensable para la viabilidad económica del proceso y la posible valorización de los subproductos generados. Entre las especies más empleadas en estudios de biorremediación se encuentran *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis sp.*, *Botryococcus braunii*, *Arthrospira platensis* y *Phaeodactylum sp.*, reconocidas por su eficiencia metabólica y su capacidad de adaptación a distintos ecosistemas acuáticos.

Según García et. al (2020) la creciente contaminación de las aguas residuales de las empresas agrícolas tiene consecuencias negativas tanto para el agua como para el suelo. En esta investigación se presenta información de investigaciones sobre el cultivo de la *Spirulina sp.* en aguas residuales agroindustriales. Por ello, el uso de la microalga *Spirulina sp.* ayudará a eliminar factores nocivos como; Insecticidas, herbicidas y otras plagas, porque ayudan a concentrar el compuesto tóxico, sin afectar su actividad biológica, también son útiles en la liberación de O₂. Asimismo, se explicará la función de la microalga *Spirulina sp* que se realizará a través de una búsqueda bibliográfica de otros estudios referente a esta variable. Se concluye que las microalgas como la *Spirulina sp* como efluentes de tratamiento secundario para aguas industriales, es la opción sostenible, económica y eficiente, al visualizar un buen resultado en biomasa con un 0.11 g/L, en su revolución de nitrato es de 82% y en la remoción de fosfato supera el 84% demostrando eficacia como biorremediadores de fosfato, al mismo tiempo, se evita utilizar aireación, así como los bioproductos que proporcionan un valor extra al bioproceso.

Según Medina (2020) El tratamiento convencional de las aguas residuales domésticas (ARD) se estructura en un conjunto de operaciones unitarias y procesos secuenciales de naturaleza física, química y biológica, orientados a la remoción progresiva de contaminantes sólidos, disueltos y coloidales. Dichas operaciones se desarrollan de manera integral a lo largo de las etapas de pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario, las cuales conforman un sistema dinámico de depuración que busca garantizar la calidad final del efluente antes de su descarga o reutilización, con el fin de minimizar la contaminación que se envía a los cuerpos receptores de agua. Sin embargo, estos tratamientos convencionales requieren altas cantidades de energía y altos costos, lo que hace que no todas las poblaciones tengan acceso a un adecuado tratamiento de aguas residuales. Adicionalmente, estos tratamiento emiten gases de efecto invernadero como CH₄, N₂O y CO₂, este último es el responsable del 72% de estas emisiones, por lo tanto, es importante implementar sistemas de tratamientos de Aguas Residuales Domésticas que logren favorecer el medio ambiente, que requieran poca energía y bajos costos. En los últimos años se ha presentado un interés en el tratamiento de Aguas Residuales Domésticas con microalgas ya que estos microorganismos recuperan nutrientes, transformándolos en biomasa y consecuentemente producen oxígeno para mejorar la calidad del efluente, se presenta disminución de CO₂ que es uno de los gases que causan efecto invernadero, por ende, es un proceso amigable con el ambiente y finalmente la biomasa que se obtiene en el proceso puede ser posteriormente revalorizada en forma de bioproductos.

De acuerdo con Paucar y Iturregui (2020), el Perú enfrenta un panorama de creciente presión hídrica, caracterizado por una demanda cada vez mayor y una disponibilidad limitada del recurso, producto de múltiples factores estructurales. Entre ellos se destacan la distribución geográfica desigual del agua, el rápido incremento demográfico, así como los elevados niveles de contaminación que afectan tanto a las fuentes superficiales como subterráneas. Esta convergencia de condiciones ha generado una situación crítica de estrés y escasez hídrica en diversas regiones del país.

Ante dicho contexto, los autores subrayan la urgente necesidad de incorporar fuentes hídricas alternativas que permitan diversificar el suministro y reducir la dependencia de los recursos convencionales. En este marco, su estudio se orienta a ofrecer lineamientos normativos y propuestas técnicas frente a dos cuestiones fundamentales:

- (i) ¿qué respuesta legislativa se ha formulado frente a la contaminación de las aguas, especialmente las aguas residuales domésticas no tratadas?, y
- (ii) ¿cuál es la pertinencia de reconocer a las aguas residuales tratadas como un recurso alternativo dentro de la gestión integral del agua?

En su análisis, Paucar e Iturregui (2020) identifican que una de las principales fuentes de contaminación hídrica en el país deriva del tratamiento insuficiente o inexistente de las aguas residuales domésticas, lo que deteriora de forma progresiva la calidad de los cuerpos receptores. En consonancia con este diagnóstico, la Evaluación de Desempeño Ambiental (EDA) ha evidenciado la baja calidad del agua en la franja costera peruana, en los ríos y zonas marinas adyacentes, como consecuencia del incremento constante de los efluentes urbanos vertidos sin depuración adecuada.

De acuerdo con Castro (2021), la mitigación de la contaminación hídrica ocasionada por actividades antrópicas puede lograrse mediante la implementación de microalgas como biorreactores naturales dentro de los procesos de desnitrificación fototrófica, aprovechando su notable capacidad de bioasimilación de compuestos nitrogenados y fosforados durante el metabolismo autotrófico. En esta línea, la investigación evaluó la eficiencia depurativa de la microalga *Arthrospira platensis* en aguas residuales domésticas de la urbanización Sol (Ica, Perú), determinándose su potencial para remover iones inorgánicos asociados al desequilibrio eutrófico. El sistema experimental consistió en un lagunaje controlado de 28 días, empleando medios de cultivo de baja concentración nutricional, dado que los efluentes aportaban la carga complementaria. Se diseñaron tres tratamientos (M1, M2 y M3) con variaciones en la proporción de biomasa y agua residual, estableciendo un régimen de evaluación de siete días. Los resultados evidenciaron que la eficiencia máxima de remoción de nitratos alcanzó el 13,27 %, mientras que la reducción de fosfatos fue del 55,19 %, verificándose que la densidad celular y el tiempo de aclimatación condicionan significativamente la cinética de absorción. En consecuencia, *Arthrospira platensis* se perfila como un bioindicador y agente depurador promisorio dentro de los esquemas de biorremediación avanzada, particularmente en sistemas de baja carga orgánica, donde su metabolismo fotosintético contribuye al mejoramiento de la calidad fisicoquímica del efluente tratado.

Para los investigadores Muguerza, R. & Villegas, E. (2021) el objetivo de este estudio fue evaluar la efectividad del uso de algas para el tratamiento de metales pesados en aguas residuales

industriales. Por lo que esta investigación fue un análisis documental de tipo cualitativa descriptiva en donde se empleó artículos de acceso libre de diversos repositorios indexadas como Science Direct, Scielo, Redalyc y Scopus, donde se obtuvieron 23 artículos científicos para la investigación. Los resultados mostraron que las algas *Sargassum sp*, *Laminaria hiperborea*, *Sucus vesiculosus* y *Cladophora sp*, así como *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris* y *Microcystis sp* presentan una remoción de 91,0%, 95,0%, 98,3%, 91,8%, 95,0%, 94,2% y 85,0% respectivamente. Se concluyó que el uso de algas es efectivo para la remoción de metales pesados, utilizándose estas algas en forma de nanopartículas en aguas residuales de origen químico y en la industria minera.

El autor Cruz (2022) denomina cultivo artesanal de *Spirulina*, al cultivo de especies de cianobacterias del género *Arthrospira* entre ellas encontramos a *Arthrospira jenneri*, *Arthrospira maxima* y *Arthrospira platensis*. En esta investigación se realizó un manual mediante la recopilación y revisión bibliográfica exhaustiva de diferentes notas informativas, siendo como objetivo la explicación de una información detallada y concisa sobre requisitos que se deben considerar para el cultivo de la microalga *Spirulina* como es la caracterización del género *Arthrospira*, requerimientos de instalaciones y maquinarias, factores fisicoquímicos, normativas legales, entre otros, para lograr un óptimo aprovechamiento y desarrollo. Los sistemas abiertos de cultivo microalgal presentan ventajas sustanciales derivadas de su baja inversión de capital, simplicidad constructiva y facilidad de operación y mantenimiento, características que los convierten en alternativas económicamente viables para la producción biotecnológica a gran escala. Sin embargo, su funcionamiento conlleva limitaciones inherentes, como la restricción en la penetración lumínica, la elevada tasa de evaporación, la demanda de extensas superficies de terreno y la vulnerabilidad a contaminaciones exógenas provocadas por organismos heterótrofos competidores. Entre las principales fuentes de contaminación biológica se identifican microalgas indeseables, hongos filamentosos, levaduras, mohos y bacterias oportunistas, los cuales interfieren en la estabilidad del sistema. En cuanto al control de las condiciones fisicoquímicas del cultivo artesanal de *Spirulina*, resulta imprescindible monitorear variables críticas como la calidad del agua, el potencial de hidrógeno (pH), el nivel hidrométrico, la densidad celular del inóculo, la intensidad lumínica, la agitación mecánica, la temperatura, la salinidad, la disponibilidad de dióxido de

carbono (CO₂) y la concentración de nutrientes esenciales, todos ellos determinantes en la productividad y viabilidad fisiológica de la biomasa.

Según la investigadora Pizarro (2022), el estudio tuvo como propósito examinar la eficacia de la microalga *Arthrospira platensis* (*Spirulina sp.*) en la biorremoción de coliformes totales y fecales presentes en las aguas del río Huasahuasi, en la provincia de Tarma. Para tal fin, se analizaron los parámetros cinéticos de crecimiento de la microalga a fin de obtener biomasa activa destinada al tratamiento experimental. Paralelamente, se evaluaron los indicadores fisicoquímicos y microbiológicos del agua antes y después del proceso de exposición a la biomasa viva, con el objetivo de determinar la eficiencia depurativa del sistema biológico. Se implementaron seis tratamientos experimentales, cada uno con 500 mL de agua y distintas concentraciones de biomasa algal (1,0; 2,0 y 4,0 g/L), los cuales fueron monitoreados en dos intervalos temporales (2 y 10 días). Los resultados demostraron una reducción significativa de los contaminantes y un cumplimiento del 87,5 % de los parámetros de calidad ambiental (ECA) para aguas superficiales, especialmente en conductividad eléctrica, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), fósforo total, nitrógeno total, sólidos suspendidos totales (SST) y oxígeno disuelto (OD). Asimismo, se observó un incremento sostenido de la biomasa algal, alcanzándose una remoción máxima del 99,8 % en el tratamiento T6, lo que confirma la viabilidad técnica y económica de aplicar esta metodología en campo para la rehabilitación de cuerpos hídricos contaminados mediante una tecnología de bajo costo y alta eficiencia biológica.

El autor Sánchez (2022) menciona que el principal objetivo del estudio fue evaluar el efecto porcentual de la *Spirulina sp.* se abordó la temática de la biorremediación de cuerpos hídricos impactados por compuestos metálicos de elevada toxicidad, específicamente cadmio (Cd) y arsénico (As), provenientes del ecosistema lacustre de Piás. Para tal fin, se efectuó un análisis exhaustivo de los parámetros cinéticos de proliferación microalga, con el propósito de obtener la biomasa necesaria para la ejecución de los experimentos planificados. Se evaluaron indicadores fisicoquímicos tales como potencial hidrógeno (pH), demanda biológica de oxígeno a cinco días (DBO₅), fósforo total, conductividad eléctrica, nitrógeno total, así como las concentraciones de cadmio y arsénico, tanto antes como después del tratamiento biológico mediante biomasa activa de la microalga. Los resultados experimentales evidenciaron que la microalga alcanzó un comportamiento fisiológico óptimo, con una

tasa de crecimiento específica de $0,26\text{ d}^{-1}$, atribuida principalmente a la predominancia de un ambiente alcalino. Del mismo modo, se verificó una eficiencia sobresaliente en la remoción del cadmio en todos los tratamientos ensayados, mientras que la retención del arsénico fue relativamente limitada. Finalmente, se logró constatar que el 83,3 % de los parámetros físicoquímicos analizados se ajustaron a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos para aguas superficiales, posterior al tratamiento con la biomasa viva demostrando así el potencial biotecnológico de dicha especie en procesos de depuración acuática.

La investigadora Vargas (2022) considera que la población se incrementa de una manera acelerada, consecuencia del incremento sostenido en la demanda global de alimentos, los sectores agroindustriales y pecuarios se ven compelidos a intensificar sus procesos productivos, generando a su vez un aumento considerable en la generación de efluentes contaminantes. En este contexto, el objetivo cardinal del presente estudio consistió en examinar la aplicabilidad de la microalga como agente biotecnológico para el tratamiento de aguas residuales provenientes de actividades pecuarias y de transformación animal. Para tal fin, se implementó la metodología sistemática PRISMA, seleccionándose un total de 182 documentos científicos publicados entre los años 2010 y 2022, sobre los cuales se efectuó un análisis crítico de la literatura y una síntesis rigurosa de la información empírica disponible. Los resultados de la revisión revelaron que la microalga *Spirulina sp.* posee una notable capacidad para reducir hasta en un 70 % la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO₅) en aguas residuales de origen pecuario. Además, se identificó su potencial multifuncional en la generación de biomasa con valor agregado, la producción de biocombustibles (biodiésel) y la atenuación de emisiones odoríferas nocivas generadas durante los procesos productivos.

En conclusión, la investigación establece que la microalga *Spirulina sp.* representa una alternativa biotecnológica altamente prometedora para el saneamiento de efluentes pecuarios. Sin embargo, se subraya la necesidad de ampliar los estudios experimentales y validar empíricamente los resultados obtenidos, dado que la información disponible constituye evidencia reciente que aún requiere consolidación científica.

Betancur, Meneses y Patiño (2018) y Aguilar (2020) destacan la eficiencia técnica de las microalgas en la remoción de metales pesados y nutrientes, posicionándolas como una opción limpia frente a los métodos tradicionales. En contraste, Medina (2020) y Paucar e Iturregui (2020) subrayan los altos costos, la falta de inversión estatal y marcos normativos poco actualizados, proponiendo un cambio integral en la gestión del agua. En cuanto a la selección de especies, Gonzales (2018) y García et al. (2020) resaltan el uso de *Spirulina sp.* por su productividad y capacidad biorremediadora, mientras que Meza et al. (2018) señalan la mayor adaptabilidad de *Chlorella vulgaris* a ecosistemas locales, planteando que la sostenibilidad depende también de la compatibilidad ecológica. Las aplicaciones prácticas en entornos agroindustriales y urbanos reportadas por Gonzales (2018) y Castro (2021) confirman la viabilidad bajo condiciones controladas, aunque Medina (2020) advierte limitaciones al escalar estos sistemas fuera del laboratorio.

Aguilar (2020) y García et al. (2020) resaltan la valorización de la biomasa generada para producir biofertilizantes, biocombustibles y suplementos, lo que abre la posibilidad de un modelo circular. Sin embargo, no todos los estudios profundizan en esta dimensión, lo que constituye un vacío para futuras investigaciones. En conclusión, el uso de microalgas representa una alternativa integral para la descontaminación del agua y la recuperación de nutrientes, siempre que se fortalezcan los marcos legales, se invierta en infraestructura y se priorice el uso de especies nativas que garanticen sostenibilidad a largo plazo.

Marco teórico

Aguas residuales.

Las aguas residuales son generadas por diversos tipos de actividades humanas ya sean actividades domésticas, actividades industriales, etc. Las aguas residuales contienen una amplia gama de sustancias y microorganismos que son peligrosos para el medio ambiente y deben tratarse adecuadamente antes de ser vertidas a las aguas residuales (Ramis,2019).

Aguas residuales municipales.

Las aguas residuales municipales son los efluentes que se generan de la casa, restaurantes, tiendas, hoteles, colegios, lavado de autos, etc. Además, se categorizan por ser una mezcla de efluentes industriales (5-20%) y efluentes domésticos (80-95%) , y dentro de esta categorización se puede encontrar los materiales orgánicos (Nitrato, Fosfato, DBO y DQO), materiales inorgánicos (Pb, Cu, Hg, Zn, etc.) y microorganismos patógenos (Guldhe et al., 2017).

Aguas residuales industriales.

Estas aguas residuales provienen de diversas actividades que ocurren en fábricas y empresas industriales, contienen una gran cantidad de contaminantes como ácidos, grasas, aceites, antibióticos y aguas residuales provenientes de actividades mineras, químicas, animales y vegetales, todos ellos consisten en función de las acciones tomadas(Ramis,2019).

Aguas residuales agrícolas.

Proviene de las actividades agrícolas que se realizan en el país, intervienen directamente en el riego agrícola sin tratamiento previo antes de su uso(Herrera,2021).

Aguas residuales ganaderas.

Los efluentes generados por la ganadería contienen altas concentraciones de materia orgánica, sólidos en suspensión excesivo y altas cantidades de amoníaco y fósforo, esto se debe al lavado de las heces y orinas de los animales.

Muchas veces, para las industrias ganaderas se les hace imposible gestionar dicha agua residual, por ejemplo, tratar de reducir la propagación de patógenos y microorganismos tóxicos, y los problemas de los malos olores (Nik Daud & Anijiofor, 2017).

Aguas negras.

Originadas por actividades humanas en el hogar como cocinar, limpiar, etc.; suelen contener grandes cantidades de materia orgánica y microorganismos, además de residuos como detergentes y grasas(Herrera,2021).

Niveles de tratamiento de aguas residuales.

Tratamiento primario.

Se refiere a los procesos que utilizan métodos físicos o químicos para eliminar los sólidos en suspensión y la demanda bioquímica de oxígeno en las aguas residuales, antes de someterlas a un tratamiento adicional. Su principal objetivo es eliminar la materia orgánica biodegradable que constituye la contaminación (Moran, 2014).

Tratamiento secundario.

El tratamiento secundario implica un proceso biológico con sedimentación secundaria u otro método para eliminar la materia orgánica en las aguas residuales. Se utilizan microorganismos aeróbicos que actúan sobre la materia orgánica presente, oxidándola para obtener energía y convirtiéndola en nuevo tejido celular (Moran, 2014).

Tratamiento terciario.

El tratamiento terciario, también conocido como tratamiento avanzado, consiste en procesos físicos y químicos especiales para eliminar contaminantes como fósforo, nitrógeno, minerales, metales pesados, virus, compuestos orgánicos, entre otros. Es más costoso que los tratamientos anteriores y se utiliza en casos especiales, como la purificación de desechos industriales (Moran, 2014).

Materia orgánica.

Son de origen inorgánico y tienen propiedades modificadas, por ejemplo: óxidos, sales, ácidos y bases inorgánicas, metales, etc. Se encuentran en todo tipo de aguas residuales y abundan en las aguas residuales industriales, la composición inorgánica de las aguas residuales depende de la contaminación de la naturaleza (Herrera,2021).

Olor.

Se ha reconocido que el olor es un factor de calidad que afecta la aceptabilidad del agua potable y que puede ser perjudicial para los peces y otros organismos acuáticos. Los compuestos químicos del

agua, como fenoles, diversos hidrocarburos, cloro, materia orgánica en descomposición o esencias liberadas por diversas algas u hongos, pueden dar al agua un olor y un sabor muy fuertes, incluso si están presentes en concentraciones muy pequeñas (Sánchez,2022)

Color.

En realidad, el agua es incolora, pero el agua superficial puede colorearse gracias al pigmento contenido en la suspensión. El tinte se produce por contacto con desechos orgánicos como hojas, agujas y madera en diversas etapas de descomposición y se forma en cantidades importantes a partir de diversos extractos de plantas. El color debido a la materia en suspensión se llama color aparente y es diferente al color de las plantas coloidales o extractos orgánicos, que se llama color real (Sánchez,2022).

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

Es un indicador utilizado para medir la calidad del agua, donde la cantidad de oxígeno utilizada por los microorganismos puede transformar la cantidad total de materia orgánica en dióxido de carbono y agua a través de un volumen determinado de aguas residuales y el tiempo requerido para detectar este tipo de análisis es de cinco días (Aguilar,2022).

Demanda química de oxígeno (DQO).

La DQO se refiere al conjunto de compuestos oxidables; todos estos compuestos tienen la capacidad de consumir oxígeno del agua.

Debido a la gran cantidad de componentes orgánicos presentes en el cuerpo receptor (ríos, lagos y lagunas), las aguas residuales con altas concentraciones de DQO pueden ser perjudiciales cuando se descargan a aguas superficiales y subterráneas. Esto reduce la cantidad de oxígeno disuelto y contribuye al desarrollo de condiciones anaerobias. Los estándares de DQO para descargas en aguas costeras, continentales y protegidas oscilan entre 60 y 300 mg/L(Aguilar,2022)

Temperatura

Se mide en el lugar de muestreo y se utiliza un instrumento debidamente calibrado; la temperatura puede variar porque depende de muchos factores como el área geográfica, los cambios de clima (época seca o fría), las temperaturas de las aguas residuales pueden llegar hasta 8°C o 15°C, incluso a menos 5°C, lo cual es común para los efluentes (Li et al., 2018).

PH.

El pH es un indicador de las actividades biológicas en las aguas residuales. (Nadiri et al., 2018), además, evalúa la actividad de los iones de hidrógeno en una solución, evalúa la acumulación de componentes químicos perjudiciales y los niveles de aumento de alcalinidad en los efluentes.

El nivel de pH afecta el crecimiento de las algas y el metabolismo celular a través de la actividad fotosintética, la fijación de carbono y la asignación de carbono en varios tipos de moléculas. Esto afecta la eficiencia de la productividad de la biomasa de algas (Filali et al., 2021).

Turbidez.

La turbidez tiene una gran importancia sanitaria, ya que refleja una aproximación del contenido de materias coloidales, minerales u orgánicas, por lo que puede ser indicio de contaminación (Azario et al., 2004).

Aceites y Grasas.

Las grasas y aceites tienden a flotar porque su densidad es menor que la del agua, formando una capa en la superficie de los reactores biológicos que dificulta la transferencia de oxígeno, sin embargo el problema no termina ahí, las grasas se oxidan, pero no se descomponen fácilmente aeróbicamente, por lo que pueden seguir fluyendo aguas abajo del reactor y estar presentes durante todo el proceso, incluso en la salida de la planta. (Teqma, 2018)

Sólidos Totales Suspendidos

SST es el residuo no filtrable de una muestra de agua natural o de residuos industriales o domésticos, son partículas orgánicas e inorgánicas que se separan sencillamente de los cuerpos de agua, mediante procesos físicos como sedimentación y filtración. (Chirinos & Huanca, 2020)

Conductividad

La conductividad eléctrica es esencial para los sistemas de aguas residuales porque muestra la cantidad de sólidos disueltos (sólidos disueltos totales: TDS), productos químicos y minerales que hay en el agua. Es importante mencionar que incluso pequeñas cantidades de impurezas son suficientes para cambiar la conductividad eléctrica de las aguas residuales. Esta depende de la cantidad de iones, concentración, movilidad, valencia y de la temperatura de la medición, son buenas conductoras de electricidad los compuestos inorgánicos. (Calderón & Pulgar, 2023).

Tipos de contaminantes de aguas residuales.

Las actividades humanas determinan los diferentes tipos de contaminantes presentes en las aguas residuales, que pueden ser industriales, químicos, agroindustriales, entre otros. En estas aguas residuales se pueden hallar una variedad de sustancias contaminantes(Herrera,2021).

Contaminantes orgánicos.

Las proteínas se derivan directamente de las heces humanas y animales o de excesos de alimentos, causando malos olores, son inestables y biodegradables. Los carbohidratos, también provenientes de heces humanas, animales y desperdicios alimentarios, incluyen almidones, fibras celulares y azúcares. Los aceites y grasas provienen de diferentes procesos alimentarios, como restaurantes e industrias alimentarias (Herrera,2021).

Contaminantes inorgánicos.

Son de origen inorgánico y han cambiado su naturaleza, como óxidos, sales, ácidos, bases inorgánicas y metales, presentes en todo tipo de aguas residuales, especialmente en las industriales. Los componentes inorgánicos de las aguas residuales dependerán del material contaminante y de la contaminación (Herrera,2021).

Principales contaminantes de aguas residuales.

Elementos de gran tamaño como trozos de madera, trapos o plásticos que son arrojados a la red de alcantarillado.

Sustancias grasas y aceitosas que no se mezclan con el agua y forman natas en su superficie, tanto de origen doméstico como industrial.

Materias orgánicas e inorgánicas que requieren oxígeno y se oxidan fácilmente, consumiendo el oxígeno del medio donde son vertidas.

Microorganismos patógenos presentes en las aguas residuales que pueden causar enfermedades, como bacterias, protozoos y hongos.

Contaminantes emergentes o prioritarios, producto de la actividad humana actual, como productos de cuidado personal, fármacos y productos de limpieza, que no reciben un tratamiento adecuado antes de ser liberados al medio ambiente. Para caracterizar las aguas residuales, se utilizan parámetros que permiten medir los contaminantes mencionados anteriormente.

Los parámetros más comunes incluyen sólidos en suspensión, aceites y grasas, demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (DBO₅), demanda química de oxígeno (DQO) y la proporción DBO₅/DQO, que indican la biodegradabilidad de las aguas residuales (Nevado,2022).

Microalga.

Las microalgas exhiben una notable aptitud ficorremediadora, entendida como la facultad metabólica de remover, transformar o inmovilizar compuestos xenobióticos o contaminantes presentes en matrices líquidas o gaseosas. Dicha capacidad se fundamenta en la adsorción, bioacumulación o biotransformación de las sustancias tóxicas por parte de la biomasa algal activa, la cual, posteriormente, puede ser recolectada y procesada para la recuperación de los elementos retenidos o su aprovechamiento con fines bioindustriales. La elección del tipo de sistema de cultivo es importante, y debe realizarse en base a factores biológicos, técnicos, ambientales y económicos, definidos previamente (Hernández& Labbe, 2014).

Factores que afectan el crecimiento de las microalgas.

El desarrollo y la dinámica de crecimiento de las microalgas se encuentran profundamente condicionados por un conjunto de variables ambientales multifactoriales, cuya interacción determina tanto la eficiencia metabólica como la productividad global de la biomasa. Entre estos factores se incluyen las unidades de pH, que regulan el grado de acidez, neutralidad o alcalinidad del medio, la temperatura (T °C), que incide directamente en la actividad enzimática y la tasa metabólica, la intensidad lumínica expresada en luxes, indispensable para los procesos fotoautotróficos de captación y conversión de energía, la disponibilidad de dióxido de carbono (CO₂), esencial para la fijación fotosintética de carbono, y la composición iónica y nutritiva del medio de cultivo, que condiciona la síntesis de macromoléculas estructurales y energéticas. Además, si las microalgas se encuentran en un ambiente de estrés como nutrientes inapropiados presentes en los medios de cultivos o la intensidad de luz o temperatura que son bajas o altas, se pueden percibir una reducción en la producción de biomasa y en la tasa de crecimiento (Metsoviti et al., 2019).

Sistemas de cultivos de las microalgas.

Los cultivos de las microalgas se pueden realizar en laboratorios o al aire libre, así como en sistemas de cultivos abiertos o cerrados. Una de las ventajas de usar los sistemas de cultivos abiertos es

que son muy rentables y fáciles de instalar, pero se ven afectados por factores externos y por la contaminación lo que conlleva a una reducción de la producción de biomasa durante largos periodos de tiempo (Metsoviti et al., 2019).

Biofiltro.

Un biofiltro es un sistema que facilita la eliminación de diversos contaminantes de distintos tamaños, que pueden ser de tipo aerobio al estar expuestos al aire o anaerobio al funcionar sin oxígeno, y que se alimentan de agua residual. Además, puede ser descrito como un sistema creado para eliminar los contaminantes presentes en aguas contaminadas (Herrera,2021).

Tratamiento biológico.

Es un proceso que emplea microorganismos para descomponer la materia orgánica y contaminantes en el agua residual, disminuyendo la cantidad de sólidos suspendidos(Herrera,2021).

Eutrofización.

La eutrofización se define como el deterioro de la calidad de los recursos hídricos debido al enriquecimiento de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, lo que afecta su uso y provoca grandes efectos ecológicos, sanitarios y económicos a nivel regional, lo que constituye una de las muchas amenazas ambientales, problemas en la belleza y la vida de los organismos en ríos, lagos, arroyos y otros sistemas fluviales. (García & Miranda, s.f)

Eficiencia.

Es la capacidad de un tratamiento para lograr los resultados previstos o deseados. Para comprender plenamente la eficacia, es necesario aclarar qué es un objetivo. Además, las metas deben definir el momento en que se espera el efecto, por tanto, un plan es eficaz si logra los objetivos esperados en el tiempo esperado y con la calidad esperada (Herrera,2021).

Biorremediación.

La biorremediación se ha consolidado como una estrategia biotecnológica emergente orientada a la restauración de ecosistemas acuáticos y la depuración de efluentes residuales, configurándose como una alternativa sustentable y complementaria a los sistemas convencionales de tratamiento. Su aplicación permite no solo optimizar la eficiencia operativa de las plantas de tratamiento tradicionales, sino también introducir procesos metabólicos naturales capaces de degradar, transformar o inmovilizar

contaminantes orgánicos e inorgánicos mediante la acción de microorganismos autótrofos y heterótrofos especializados. La biorremediación de aguas residuales se puede dividir en tres tecnologías principales: (i) depuración natural, donde los contaminantes se reducen por la acción de microorganismos nativos sin ninguna ayuda externa; (ii) bioestimulación, en la cual los nutrientes se incorporan al sistema para acelerar la biodegradación y (iii) bioaumentación, donde se agregan microorganismos especializados al sistema de tratamiento para aumentar su eficiencia (Ome & Zafra, 2018).

***Spirulina* sp.**

Spirulina sp. es una cianobacteria filamentosa fotosintética ampliamente utilizada en aplicaciones biotecnológicas, ambientales y alimentarias, debido a su elevada capacidad metabólica y adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales (Habib et al., 2008). Se caracteriza por su crecimiento en medios alcalinos y su alta eficiencia fotosintética, lo que le permite desarrollarse en sistemas de cultivo controlados con elevada productividad de biomasa. Además, presenta una composición rica en proteínas, pigmentos fotosintéticos (clorofila a y ficocianina) y compuestos bioactivos, lo que la convierte en un organismo de alto valor industrial y ambiental (Habib et al., 2008).

En el ámbito ambiental, *Spirulina* sp. ha sido ampliamente estudiada por su capacidad de biorremediación de aguas residuales, debido a su habilidad para remover contaminantes orgánicos e inorgánicos a través de diversos mecanismos, tales como asimilación celular, bioacumulación y biosorción (Rawat et al., 2011). Diversos estudios han demostrado que las microalgas, incluyendo *Spirulina* sp., pueden eliminar eficientemente compuestos como nitratos, fosfatos, metales pesados, así como reducir parámetros como DBO₅ y DQO, mediante procesos metabólicos asociados a la fotosíntesis y al crecimiento celular (Chia et al., 2020).

Asimismo, *Spirulina* sp. presenta una alta capacidad de adsorción y bioacumulación de metales pesados, tales como plomo, cadmio, zinc y cobre, lo que la posiciona como un biosorbente eficiente y de bajo costo en procesos de tratamiento de aguas contaminadas (Kumar et al., 2015). Estudios recientes han demostrado que esta microalga puede alcanzar capacidades de adsorción comparables o superiores a otros biomateriales convencionales, lo que refuerza su potencial como alternativa ecológica frente a tecnologías tradicionales (Markou & Georgakakis, 2011).

Por otro lado, su aplicación en sistemas de tratamiento de aguas residuales permite no solo la remoción de contaminantes, sino también la generación de biomasa aprovechable, promoviendo un enfoque de economía circular y sostenibilidad ambiental (Chia et al., 2020). En este contexto, la utilización de microalgas en procesos de biorremediación es considerada una estrategia eficiente, de bajo costo y ambientalmente amigable, capaz de integrar la depuración de efluentes con la producción de recursos biológicos de valor agregado (Abdel-Raouf et al., 2012).

Adicionalmente, investigaciones experimentales han evidenciado que *Spirulina sp.* puede lograr reducciones significativas en parámetros como DBO₅, DQO, sólidos suspendidos y nutrientes, dependiendo de las condiciones del sistema, tales como concentración del efluente, disponibilidad de nutrientes y condiciones de cultivo (Li et al., 2019). Estos resultados confirman su potencial como agente biológico en el tratamiento de aguas residuales, especialmente en sistemas de tratamiento secundario o complementario.

En consecuencia, *Spirulina sp.* se consolida como una alternativa eficiente y sostenible para el tratamiento de aguas residuales, debido a su capacidad de adaptación, alta eficiencia de remoción de contaminantes y potencial de valorización de la biomasa generada (Chia et al., 2020).

Factores limitantes del crecimiento de *Spirulina sp.*

A pesar de su alta capacidad adaptativa, el crecimiento de *Spirulina sp.* puede verse limitado por diversos factores fisicoquímicos y ambientales que influyen directamente en su metabolismo y eficiencia en procesos de biorremediación. Entre los principales factores limitantes se encuentran la disponibilidad de luz, la concentración de nutrientes, el pH, la temperatura y la presencia de compuestos tóxicos en el medio.

La radiación luminosa constituye uno de los factores más críticos, ya que la fotosíntesis depende tanto de la intensidad como de la calidad de la luz. Una intensidad insuficiente limita la producción de biomasa, mientras que una exposición excesiva puede generar fotoinhibición, afectando la eficiencia fotosintética y reduciendo la capacidad de remoción de contaminantes (Chisti, 2007).

Asimismo, la disponibilidad de nutrientes, particularmente nitrógeno y fósforo, condiciona el crecimiento de la microalga. La deficiencia de estos elementos limita la síntesis celular, mientras que

concentraciones excesivas pueden generar desequilibrios osmóticos o favorecer el crecimiento de microorganismos competidores (Rawat et al., 2011).

El pH del medio también actúa como un factor limitante, ya que, aunque *Spirulina sp.* se desarrolla óptimamente en condiciones alcalinas (pH 9–10.5), valores fuera de este rango afectan la actividad enzimática y pueden inhibir su crecimiento (Markou & Georgakakis, 2011). De igual forma, la temperatura influye en la velocidad de crecimiento, siendo el rango óptimo mesofílico (20–35 °C); temperaturas elevadas o muy bajas pueden reducir significativamente la actividad metabólica.

Por otro lado, la presencia de sustancias tóxicas o concentraciones elevadas de contaminantes, como metales pesados o compuestos orgánicos recalcitrantes, puede inhibir el crecimiento de la microalga o alterar sus procesos metabólicos, disminuyendo su eficiencia en la remoción de parámetros como DBO₅ y DQO (Kumar et al., 2015).

En conjunto, estos factores limitantes evidencian que, aunque *Spirulina sp.* posee un alto potencial en el tratamiento de aguas residuales, su eficiencia depende de un adecuado control de las condiciones de cultivo, lo cual resulta fundamental para optimizar su desempeño en sistemas de biorremediación.

Mecanismos de remoción de contaminantes mediante *Spirulina sp.*

La remoción de contaminantes mediante *Spirulina sp.* en el presente estudio se explicó a través de tres mecanismos principales: asimilación celular, adsorción superficial (biosorción) y co-metabolismo microbiano. De estos, el mecanismo predominante fue la asimilación celular, lo cual se evidenció en la reducción significativa de la DBO₅ (67.67%), parámetro directamente asociado a la fracción biodegradable de la materia orgánica. Esta disminución refleja la capacidad metabólica de *Spirulina sp.* para incorporar compuestos orgánicos y nutrientes como fuente de carbono durante su crecimiento, proceso favorecido por su actividad fotosintética.

De manera complementaria, la adsorción superficial contribuyó a la disminución de parámetros físicos como la turbidez y los sólidos suspendidos, debido a la capacidad de la biomasa algal para retener partículas y coloides en su superficie celular. Por otro lado, el co-metabolismo microbiano tuvo un papel secundario, lo cual se sustentó en la menor reducción de la DQO (11.62%), indicando la presencia de

compuestos orgánicos menos biodegradables que no fueron completamente asimilados por la microalga.

En conjunto, estos resultados evidenciaron que la eficiencia del sistema estuvo dominada por procesos de asimilación biológica de materia orgánica biodegradable, mientras que los mecanismos de adsorción y co-metabolismo actuaron de manera complementaria en la mejora de la calidad del efluente. En ese sentido, la reducción de la DBO₅ se asoció principalmente a la asimilación celular y al metabolismo fotosintético de *Spirulina sp.*; la disminución de turbidez y sólidos suspendidos se relacionó con procesos de biosorción y retención física; y la reducción parcial de la DQO se vinculó a mecanismos combinados de asimilación y co-metabolismo, con menor eficiencia debido a la presencia de compuestos recalcitrantes.

Uso de *Spirulina sp.* en el tratamiento de aguas residuales

La elección de la microalga *Spirulina sp.* como agente de tratamiento secundario se fundamentó en su alta capacidad biorremediadora, ampliamente documentada en la literatura científica, particularmente en la remoción de materia orgánica y nutrientes presentes en aguas residuales. Diversos estudios han demostrado que *Spirulina sp.* posee una elevada eficiencia en la reducción de parámetros como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), debido a su capacidad metabólica para asimilar compuestos orgánicos y nutrientes como nitrógeno y fósforo durante su crecimiento (Abdel-Raouf et al., 2012). Asimismo, su actividad fotosintética contribuye a la producción de oxígeno disuelto, favoreciendo procesos de oxidación biológica que mejoran la calidad del agua tratada.

Adicionalmente, *Spirulina sp.* presenta ventajas operativas frente a otros microorganismos utilizados en tratamientos convencionales, tales como su adaptación a ambientes altamente alcalinos, lo que reduce significativamente el riesgo de contaminación por patógenos, y su capacidad de crecimiento rápido bajo condiciones controladas de luz y temperatura (Chisti, 2007). Esta característica la convierte en una alternativa eficiente y sostenible, especialmente en contextos donde se busca minimizar el uso de reactivos químicos y reducir los costos operativos del tratamiento de aguas residuales.

Por otro lado, estudios recientes han reportado que el uso de microalgas en sistemas de tratamiento permite no solo la remoción de contaminantes, sino también la valorización de la biomasa generada, la cual puede ser utilizada en aplicaciones industriales, alimentarias o energéticas, promoviendo un enfoque de economía circular (Rawat et al., 2011). En este sentido, la aplicación de *Spirulina sp.* en el tratamiento de efluentes representa una solución integral que combina eficiencia ambiental, sostenibilidad y aprovechamiento de subproductos.

Influencia de la longitud de onda en los procesos de remoción mediante *Spirulina sp.*

La eficiencia de remoción de contaminantes mediante *Spirulina sp.* está directamente influenciada por la longitud de onda de la radiación luminosa utilizada en el sistema, debido a su efecto sobre la actividad fotosintética de la microalga. La *Spirulina sp.* presenta pigmentos fotosintéticos como clorofila a y ficocianina, los cuales absorben principalmente radiación en el rango del espectro visible, especialmente en longitudes de onda correspondientes al azul (≈ 450 nm) y rojo (≈ 680 nm). Estas longitudes de onda coinciden con los máximos de absorción de dichos pigmentos, permitiendo una mayor eficiencia en la conversión de energía luminosa en energía química.

En el sistema experimental, el uso de iluminación LED dentro de rangos de intensidad controlados favoreció la absorción de energía en estas longitudes de onda, incrementando la actividad fotosintética y, en consecuencia, la producción de oxígeno disuelto. Este incremento de oxígeno promovió la oxidación biológica de la materia orgánica, contribuyendo a la reducción de la DBO₅. Asimismo, la energía captada por la microalga fue utilizada en procesos metabólicos que facilitaron la asimilación de nutrientes y compuestos orgánicos, fortaleciendo el mecanismo predominante de asimilación celular.

Por otro lado, una adecuada selección de la longitud de onda también influyó en la eficiencia global del sistema, ya que longitudes de onda fuera del rango óptimo reducen la actividad fotosintética y, por tanto, limitan los procesos de remoción. En ese sentido, la interacción entre la radiación luminosa y los pigmentos fotosintéticos de *Spirulina sp.* constituyó un factor determinante en la mejora de la calidad del efluente tratado, evidenciándose en la reducción significativa de parámetros como la DBO₅ y, en menor medida, la DQO.

Métodos analíticos para la determinación de parámetros fisicoquímicos del agua

Método de la AWWA

El método de la American Water Works Association (AWWA) constituye un conjunto de procedimientos estandarizados para el análisis integral de la calidad del agua, abarcando determinaciones físicas, químicas, microbiológicas y biológicas, con el objetivo de evaluar la potabilidad, la seguridad y el cumplimiento normativo de los cuerpos de agua o efluentes tratados. Estos métodos se encuentran descritos en manuales técnicos ampliamente reconocidos, como el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, desarrollado en conjunto por la AWWA, la APHA y la WEF, y son aplicados de forma sistemática en plantas de tratamiento, laboratorios de control ambiental y centros de investigación. La precisión de sus protocolos se basa en procedimientos meticulosamente validados, uso de materiales y reactivos de alta pureza, y condiciones operativas estandarizadas, lo que garantiza resultados reproducibles y comparables entre laboratorios. Además, su amplia aceptación internacional y respaldo normativo los convierten en referencia para la determinación de parámetros como turbidez, aceites y grasas, demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos, entre otros (American Water Works Association, 2017).

Método: Termómetro digital o analógico de precisión

La medición de la temperatura en una muestra de agua es una operación fundamental en el monitoreo de calidad, debido a que influye directamente en la solubilidad de los gases, la velocidad de las reacciones químicas y la actividad biológica presente en el medio acuático. Este procedimiento se lleva a cabo empleando un termómetro digital o analógico de alta precisión, previamente calibrado para garantizar exactitud en las lecturas. La técnica consiste en introducir el sensor o bulbo del termómetro en el centro de la muestra, evitando el contacto con las paredes del recipiente para impedir la transferencia de calor que altere el resultado. Una vez que la lectura se estabiliza, se registra el valor en grados Celsius (°C). En aguas naturales y residuales, este parámetro es clave para interpretar procesos como la tasa de consumo de oxígeno, la proliferación de microorganismos y el equilibrio químico del sistema. La estandarización de esta medición está contemplada en los manuales técnicos de la APHA,

AWWA y WEF, garantizando uniformidad y confiabilidad en los registros (APHA, AWWA & WEF, 2017).

Método de la AOAC

El método de la Association of Official Analytical Chemists (AOAC) comprende un conjunto de protocolos analíticos validados para garantizar resultados precisos y reproducibles en diversas áreas, entre ellas el análisis de aguas. Estos métodos son aceptados globalmente como referencia para la determinación de parámetros físicoquímicos como el pH y la conductividad eléctrica, utilizando equipos calibrados y procedimientos controlados. En el caso del pH, el método especifica el uso de un potenciómetro con electrodo combinado, previamente estandarizado con soluciones tampón, para medir la acidez o alcalinidad de la muestra en unidades de pH. Para la conductividad, se emplea un conductímetro calibrado, que mide la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, directamente relacionada con la concentración de sales disueltas. Estos procedimientos garantizan no solo exactitud, sino también comparabilidad entre laboratorios, y son fundamentales en estudios de control de calidad de agua y en investigaciones ambientales (AOAC International, 2019).

Método 84.00 de la AWWA

El método 84.00 descrito en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater de la AWWA está orientado a la determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), un parámetro que cuantifica la cantidad total de materia orgánica e inorgánica susceptible de oxidarse químicamente en el agua. El procedimiento consiste en oxidar la materia presente en la muestra mediante una solución de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en medio fuertemente ácido, en presencia de un catalizador como el sulfato de plata, bajo reflujo a temperatura elevada durante un tiempo determinado. Tras la digestión, el exceso de dicromato no consumido se cuantifica por titulación con sulfato de hierro y amonio o por medición colorimétrica, y el resultado se expresa en miligramos de oxígeno por litro (mg/L). Este método es ampliamente utilizado por su rapidez y capacidad para estimar tanto la materia orgánica biodegradable como la no biodegradable, siendo esencial en el control de

procesos de tratamiento de aguas residuales y en la evaluación del impacto de descargas en cuerpos receptores (American Water Works Association, 2017).

Método Gravimétrico de la AWWA

El método gravimétrico de la AWWA se utiliza para determinar Sólidos Suspendidos Totales (SST), que representan la fracción de partículas insolubles presentes en el agua. La técnica consiste en filtrar un volumen conocido de muestra a través de un filtro de fibra de vidrio o membrana, previamente lavado, secado y pesado. Tras la filtración, el filtro con el residuo retenido se seca en una estufa a temperatura controlada (normalmente entre 103 °C y 105 °C) hasta peso constante, y luego se enfría en un desecador antes de su pesada final. La diferencia de peso antes y después del ensayo corresponde a la masa de sólidos suspendidos, expresada en miligramos por litro (mg/L). Este procedimiento permite evaluar la carga de partículas presentes en aguas residuales, ríos o efluentes tratados, y es un indicador clave para el diseño y control de procesos de sedimentación, filtración y tratamiento físico-químico (American Water Works Association, 2017).

Marco legal

- **Ley General del Ambiente – Ley N° 28611**

Es la norma marco del sistema legal ambiental peruano, promulgada en 2005. Establece los principios, derechos, obligaciones y mecanismos de gestión ambiental que deben seguirse en el país, regula la interacción entre las actividades humanas y el entorno natural, garantizando el desarrollo sostenible, la protección del ambiente y la participación ciudadana en la gestión ambiental. Define instrumentos como la evaluación ambiental, la auditoría ambiental y establece el rol de las autoridades ambientales.

- **Reglamento de la Ley General del Ambiente – Decreto Supremo N° 012-2009-MINAM**

Este reglamento desarrolla y detalla los procedimientos y mecanismos establecidos por la Ley N° 28611, regula aspectos como la gestión ambiental descentralizada, el licenciamiento ambiental, los instrumentos de gestión ambiental, los estándares de calidad ambiental, los

límites máximos permisibles (LMP), y promueve la educación y cultura ambiental. Su objetivo es hacer operativa la ley base.

- **Norma Técnica de Calidad Ambiental para el Agua – Resolución Ministerial N° 157-2011-MINAM**

Establece los estándares de calidad ambiental para agua, diferenciados por uso, como consumo humano, riego o recreación, define los valores máximos de concentración de sustancias químicas, físicas y biológicas que puede contener el agua sin afectar la salud humana o el ecosistema, esta norma orienta la evaluación y monitoreo de la calidad del agua en cuerpos naturales como ríos o lagos.

- **Norma Técnica de Tratamiento de Aguas Residuales – Resolución Ministerial N° 238-2015-MINAM**

Regula el diseño, construcción, operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales, establece los parámetros técnicos que deben cumplir las tecnologías de tratamiento, según el tipo de aguas residuales, sean domésticas, industriales o mixtas, promoviendo el reúso seguro y la protección de los cuerpos receptores, fomenta la sostenibilidad ambiental y la eficiencia operativa.

- **Ley de Recursos Hídricos – Ley N° 29338**

Norma vigente desde 2009 que regula el uso, conservación y gestión integrada de los recursos hídricos en el Perú, reconoce que el agua es un recurso natural renovable, de dominio público y bien estratégico. Establece el marco legal para su administración, distribución y fiscalización, así como las competencias de la Autoridad Nacional del Agua, promueve un enfoque por cuencas y la participación de usuarios y sociedad civil.

- **Valores Máximos Admisibles (VMA) – Decreto Supremo N° 021-2009-VIVIENDA y Decreto Supremo N° 003-2011-VIVIENDA**

Los VMA establecen los niveles máximos de contaminantes permitidos en las aguas residuales industriales o no domésticas que pueden ser vertidas a los sistemas de alcantarillado sanitario, el Decreto Supremo N° 021-2009-VIVIENDA fija estos valores, y el Decreto Supremo N° 003-

2011-VIVIENDA los ratifica como obligatorios, su cumplimiento previene daños a la infraestructura sanitaria, mejora la eficiencia de las PTAR y protege el ambiente.

- **Límites Máximos Permisibles (LMP) para vertimientos – Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM**

Los LMP son valores legales máximos que pueden contener los efluentes líquidos, es decir, las aguas residuales tratadas antes de ser vertidas a cuerpos receptores naturales como ríos, lagos o el mar. Esta norma regula los vertimientos industriales, mineras y municipales, buscando proteger la calidad del agua y la salud pública. Están diferenciados por sector y tipo de actividad.

- **Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM**

Este decreto actualiza los estándares de calidad ambiental (ECA) para agua y establece nuevas disposiciones complementarias. Amplía las categorías de uso del agua, incorpora nuevos parámetros y refuerza los mecanismos para el monitoreo ambiental, también establece el procedimiento de revisión de los ECA y la necesidad de informes técnicos para justificar cualquier modificación.

- **Norma OS.090 – Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales**

Es una norma del Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, específicamente del capítulo OS.090, que regula el diseño, construcción, operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales, establece criterios técnicos para garantizar que estas instalaciones funcionen eficientemente, con seguridad, higiene y respetando la normativa ambiental vigente. Se enfoca en aspectos estructurales, hidráulicos y sanitarios.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA PROPUESTA

Tipo y nivel de investigación

Tipo de Investigación

La investigación se enmarcó dentro del tipo aplicada, debido a que su propósito central fue ofrecer una solución concreta a un problema real y actual: la elevada carga contaminante presente en las aguas residuales, particularmente en lo que respecta a los niveles de Demanda Bioquímica de Oxígeno en cinco días (DBO5) y Demanda Química de Oxígeno (DQO). Estas variables constituyeron indicadores clave de la calidad del agua, ya que reflejan la presencia de materia orgánica biodegradable y compuestos químicos oxidables, respectivamente. La reducción de estos parámetros resultó fundamental para mitigar el impacto ambiental generado por los vertimientos no tratados en cuerpos de agua naturales.

El uso de *Spirulina sp.*, una microalga con reconocidas propiedades biorremediadoras, se planteó como una alternativa innovadora y ecológica frente a los métodos convencionales de tratamiento. Esta especie ha demostrado capacidad para absorber nutrientes, metales pesados y otras sustancias contaminantes, convirtiéndose en un agente potencial para mejorar la calidad del agua residual. Según Rodríguez (2020), la investigación aplicada se caracteriza por buscar la resolución de problemas específicos mediante la utilización del conocimiento científico previamente generado, lo cual en este estudio se tradujo en la aplicación de principios de biotecnología ambiental para el tratamiento de efluentes líquidos.

Asimismo, la investigación incluyó el análisis de laboratorio de muestras de aguas residuales, lo cual constituyó una etapa esencial del proceso, ya que permitió identificar la composición del agua y cuantificar la presencia de diversos contaminantes, como sustancias químicas de origen industrial o doméstico, microorganismos patógenos, metales pesados como plomo o cadmio, y otros elementos tóxicos. Estos análisis no solo permitieron diagnosticar el grado de contaminación, sino también evaluar la eficacia del tratamiento aplicado con *Spirulina sp.* en diferentes condiciones experimentales. Esta fase diagnóstica, basada en evidencia empírica, resultó indispensable para validar los resultados obtenidos y establecer criterios de mejora continua en futuras aplicaciones a mayor escala.

En suma, la investigación no solo contribuyó al desarrollo del conocimiento técnico en el ámbito del tratamiento de aguas residuales, sino que también presentó un enfoque de transferencia tecnológica hacia contextos reales, donde la contaminación hídrica constituye un desafío urgente, especialmente en zonas con limitado acceso a infraestructura de saneamiento.

Nivel de Investigación

La investigación fue de nivel experimental, ya que implicó la manipulación de variables en un entorno controlado (escala de laboratorio). De acuerdo con Rodríguez (2020), este enfoque se emplea para generar nuevos conocimientos a partir de la observación de los efectos producidos por la aplicación de determinados factores o tratamientos en condiciones controladas.

Diseño de la investigación

El diseño metodológico de la investigación fue de tipo experimental, ya que se centró en la manipulación intencionada y controlada de variables con el propósito de observar y analizar el efecto de la aplicación de la microalga *Spirulina sp.* sobre los parámetros de calidad del agua, específicamente la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO). De acuerdo con Rodríguez (2020), el diseño experimental permite establecer relaciones causales entre variables, evaluando el impacto del factor independiente sobre las variables dependientes.

La investigación se desarrolló utilizando muestras de aguas residuales previamente sometidas a tratamiento primario, provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del distrito de Callalli. Dichas muestras fueron sometidas a un tratamiento secundario mediante la aplicación de *Spirulina sp.* en condiciones controladas de laboratorio.

El experimento consistió en exponer las muestras de agua residual a un cultivo activo de la microalga, bajo condiciones estandarizadas de temperatura, iluminación y aireación, con la finalidad de favorecer su crecimiento y actividad metabólica. Se realizó una medición inicial de los niveles de DBO5 y DQO, y posteriormente se efectuaron mediciones finales luego de la aplicación del tratamiento, permitiendo evaluar la variación de dichos parámetros.

Asimismo, se implementó un sistema experimental tipo fotobiorreactor artesanal para el cultivo de la microalga, asegurando el control de variables como pH, temperatura e intensidad lumínica. La microalga fue previamente aclimatada a las condiciones del efluente para optimizar su capacidad de remoción de contaminantes.

La eficiencia del tratamiento se evaluó mediante la comparación de los valores iniciales y finales de DBO5 y DQO, empleando métodos estandarizados (AWWA) y análisis estadísticos descriptivos e inferenciales, como la prueba t de Student, con el fin de determinar la significancia de las diferencias observadas. Además, se calculó el porcentaje de remoción de cada parámetro, contrastando los resultados con los límites establecidos en el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM.

Métodos de investigación

3.2.3. Campo de verificación

3.2.3.1. Ámbito

El ámbito de estudio comprendió las aguas residuales del distrito de Callalli sujetas a tratamiento. Se seleccionaron muestras representativas del efluente, las cuales fueron analizadas antes y después de la aplicación del biofiltro a base de la microalga *Spirulina sp.* en los laboratorios de la Universidad Nacional de San Agustín.

3.2.3.2. Condiciones meteorológicas del área de estudio y adaptación del sistema experimental

El distrito de Callalli, ubicado en la provincia de Caylloma (Arequipa), se caracteriza por presentar condiciones climáticas propias de zonas altoandinas, con temperaturas bajas, alta radiación solar y variaciones térmicas significativas entre el día y la noche. La temperatura promedio oscila entre 5 °C y 15 °C, pudiendo descender por debajo de 0 °C durante la noche, mientras que durante el día se presentan niveles elevados de radiación solar debido a la altitud. Asimismo, la humedad relativa es baja y las precipitaciones son estacionales, concentrándose principalmente en los meses de verano (SENAMHI, 2020).

Estas condiciones meteorológicas influyen directamente en el tratamiento de aguas residuales mediante microalgas, ya que factores como la temperatura y la radiación solar afectan el crecimiento y la actividad fotosintética de *Spirulina sp.*. En este sentido, aunque la microalga presenta un óptimo desarrollo en rangos de temperatura entre 20 °C y 35 °C, su capacidad de adaptación a condiciones variables permite su uso en ambientes como Callalli, siempre que se implementen estrategias de control.

En la presente investigación, el sistema experimental fue diseñado bajo condiciones controladas de laboratorio, regulando variables como temperatura, iluminación y aireación, con el fin de simular un entorno óptimo para el crecimiento de *Spirulina sp.*. Esta estrategia permitió aislar el efecto del biofiltro y evaluar su eficiencia en la remoción de contaminantes.

Para su aplicación en condiciones reales del distrito de Callalli, el sistema podría adaptarse mediante el uso de fotobiorreactores cerrados o sistemas semi-controlados, incorporación de cubiertas térmicas para reducir pérdidas de calor durante la noche, y aprovechamiento de la alta radiación solar diurna como fuente natural de energía para la fotosíntesis. De esta manera, el sistema propuesto presenta viabilidad de implementación en zonas altoandinas, contribuyendo a mejorar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales en contextos con limitaciones climáticas.

3.2.3.3. Unidad de Estudio

La unidad de estudio estuvo constituida por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del distrito de Callalli, ubicada en la provincia de Caylloma, departamento de Arequipa. Según el censo de 2017, el distrito contó con una población de 1008 habitantes.

El distrito de Callalli es reconocido como la capital alpaquera de la región Arequipa, debido a la calidad y cantidad de camélidos sudamericanos que se crían en la zona. En este contexto, se identificó que las actividades relacionadas, como los camales, generan efluentes que son direccionados hacia el PTAR sin un tratamiento previo adecuado, lo que incrementa la carga contaminante del sistema.

La investigación se desarrolló en un contexto altoandino, caracterizado por limitaciones en los servicios de saneamiento básico y el funcionamiento subóptimo de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Estas condiciones justificaron la necesidad de evaluar alternativas de tratamiento complementario. En la Tabla 2 se presentaron las coordenadas geográficas de la zona de estudio.

Tabla 2

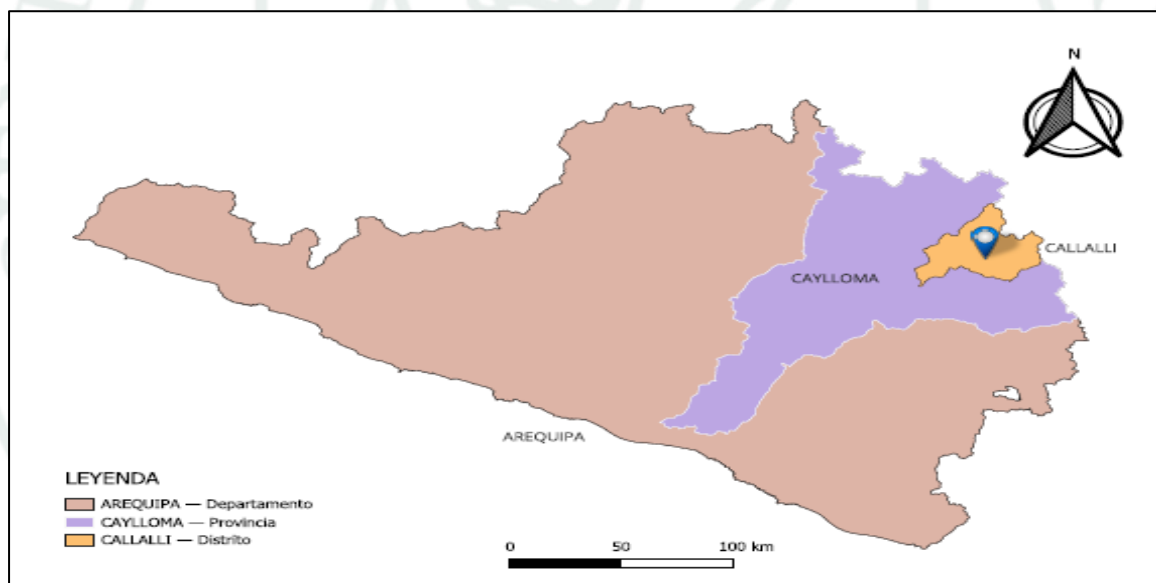
Coordenadas geográficas de la zona de Estudio

COORDENADAS UTM			
Sistema de Coordenadas	Norte (m)	Este (m)	Altitud (m.s.n.m)
WGS 84	8284328.05	237273.12	3 862

Nota.: Elaboración propia

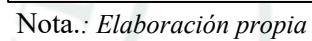
Figura 2

Ubicación del Distrito de Callalli.



Nota.: Elaboración propia

Ríos presentes en la Provincia de Caylloma y Distrito de Callalli



Vista Panorámica de la ubicación de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Callalli



41

3.3. Materiales y equipos de medición

3.3.1. Materiales

- Frascos o botellas de muestreo
- Cooler
- Bolsas Herméticas
- Gps
- Guantes
- Etiquetas
- Muestras de las aguas residuales del PTAR
- Mascarillas
- Mangueras delgadas
- Bidones transparentes
- Algodón
- Grava gruesa
- Grava fina
- Carbón activado
- Papel aluminio

3.3.2. Equipos

- Peachímetro
- Termómetro
- Turbidímetro
- Multiparámetro
- Bomba de aire
- Lámparas LED para iluminación controlada

3.3.3. Insumos para el Cultivo de la microalga *Spirulina sp.*

- Cepas de *Spirulina sp.*
- Agua de mesa

- Medio de Cultivo (NaHCO_3 , NaCl , K_2NO_3 , K_2SO_4 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ y FeSO_4)

3.3.4. Materiales de Gabinete

- Laptop
- Impresora
- Calculadora
- Memoria USB
- Hojas Bond
- Lapiceros
- Plumón indeleble
- Cuaderno de campo
- Cinta masking

3.3.5. Recursos Informáticos

- Microsoft Excel
- Microsoft Word
- Google Earth
- QGIS
- ANOVA
- Software spss versión 26
- T de Student

Método de Investigación

Etapas 1. Caracterización de las Aguas Residuales del PTAR de Callalli

La caracterización fisicoquímica del efluente proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) del distrito de Callalli se llevó a cabo con la finalidad de establecer una línea base confiable del estado del agua residual posterior al tratamiento primario. Esta etapa resultó fundamental dentro del diseño experimental, ya que permitió cuantificar la carga contaminante inicial del efluente y, en consecuencia, establecer un punto de referencia para evaluar la eficiencia del tratamiento secundario mediante el uso de la microalga *Spirulina sp.*

La caracterización se efectuó mediante la evaluación sistemática de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos de relevancia ambiental, empleando procedimientos analíticos estandarizados conforme a los lineamientos del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF). La aplicación de estos métodos permitió asegurar la confiabilidad, trazabilidad y reproducibilidad de los resultados, garantizando la validez de la información obtenida para su posterior análisis comparativo.

En lo que respecta a la determinación de los parámetros principales, la turbidez fue medida utilizando un turbidímetro de precisión, siguiendo las directrices metodológicas de la American Water Works Association (AWWA), lo que permitió cuantificar la presencia de partículas en suspensión en el efluente. La Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅) fue determinada mediante el método AWWA, basado en la incubación controlada de las muestras durante un periodo de cinco días a una temperatura constante de 20 °C en condiciones de oscuridad, evaluándose la disminución del oxígeno disuelto (OD) inicial y final, lo cual permitió estimar la carga de materia orgánica biodegradable presente.

Por su parte, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) se determinó mediante el método 84.00 de la AWWA, el cual se fundamenta en la oxidación química de la materia orgánica e inorgánica mediante dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇) en medio ácido, permitiendo cuantificar la carga contaminante total, incluyendo compuestos resistentes a la degradación biológica. La aplicación conjunta de los parámetros DBO₅ y DQO permitió realizar una evaluación integral del grado de contaminación del efluente.

Muestreo

La recolección de muestras se realizó bajo criterios de representatividad, control y conservación, con el fin de garantizar la validez de los resultados obtenidos en la caracterización del efluente del PTAR de Callalli.

a. Punto de muestreo

Se seleccionó como punto de muestreo la descarga final del sistema de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Callalli, correspondiente al efluente posterior al tratamiento primario. Esta selección se justificó debido a que dicho punto refleja las condiciones reales del agua residual que es vertida al

cuerpo receptor, constituyendo el escenario adecuado para evaluar la eficiencia de un tratamiento secundario.

El punto de monitoreo se ubicó en la estructura de salida del efluente, la cual correspondió a dispositivos como cajas de registro, buzones de inspección o estructuras de descarga. En caso de existir múltiples puntos de salida, estos fueron considerados de manera complementaria, asegurando una evaluación integral del sistema, conforme a los lineamientos del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2019).

b. Tipo de muestra

El muestreo fue de tipo puntual, recolectándose muestras individuales en un lugar y tiempo específico. Este tipo de muestreo fue seleccionado debido a que el estudio tuvo un enfoque experimental en condiciones controladas de laboratorio, donde se requirió evaluar el comportamiento del efluente en un momento determinado, permitiendo establecer una línea base inicial previa a la aplicación del tratamiento con *Spirulina sp.*

c. Volumen de muestra

Se recolectó un volumen de muestra comprendido entre 1 y 2 litros, el cual se consideró suficiente para la ejecución de los análisis fisicoquímicos establecidos, incluyendo DBO₅, DQO, SST, aceites y grasas, entre otros. Este volumen permitió asegurar la repetibilidad de los ensayos y la obtención de resultados confiables, de acuerdo con los lineamientos técnicos vigentes.

d. Procedimiento de muestreo

La toma de muestras se realizó evitando la incorporación de aire o la alteración de las condiciones originales del efluente. Para ello, los recipientes fueron llenados directamente desde el flujo del efluente, procurando minimizar la presencia de burbujas y evitando la contaminación externa.

Las muestras fueron recolectadas en frascos de plástico previamente esterilizados y debidamente rotulados, consignando información relevante como fecha, hora y punto de muestreo, garantizando su trazabilidad.

e. Preservación, almacenamiento y transporte

Una vez recolectadas, las muestras fueron conservadas en condiciones de refrigeración a una temperatura aproximada de 4 °C, con el fin de minimizar cambios fisicoquímicos y microbiológicos

que pudieran alterar los resultados. El transporte hacia el laboratorio se realizó en un tiempo mínimo, asegurando que las condiciones de la muestra se mantuvieran estables hasta su análisis.

Este procedimiento se ejecutó conforme a las recomendaciones establecidas en la normativa nacional y protocolos técnicos del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2019).

Parámetros evaluados y métodos analíticos

La selección de los parámetros analizados respondió a su relevancia como indicadores de calidad del agua y a su inclusión en la normativa ambiental vigente, permitiendo evaluar de manera integral la carga contaminante del efluente.

Para garantizar la precisión de los resultados, los equipos utilizados fueron previamente calibrados y los análisis se realizaron bajo condiciones controladas de laboratorio.

Se evaluaron los siguientes parámetros:

- pH: determinado mediante técnica potenciométrica utilizando un pH-metro calibrado con soluciones buffer estándar, permitiendo evaluar la acidez o alcalinidad del efluente.
- Temperatura: medida mediante termómetro de precisión, registrándose en condiciones in situ para evitar alteraciones por factores ambientales.
- Turbidez: determinada mediante método nefelométrico con turbidímetro calibrado, expresada en unidades nefelométricas (NTU), como indicador de sólidos en suspensión.
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅): determinada mediante incubación a 20 °C durante cinco días en condiciones de oscuridad, evaluando la variación del oxígeno disuelto, lo cual permitió cuantificar la materia orgánica biodegradable.
- Demanda Química de Oxígeno (DQO): determinada mediante oxidación química con dicromato de potasio en medio ácido, permitiendo cuantificar la carga orgánica total.
- Conductividad eléctrica: medida mediante conductímetro calibrado, expresada en $\mu\text{S}/\text{cm}$, como indicador de la concentración de sales disueltas.
- Sólidos Suspendidos Totales (SST): determinados mediante método gravimétrico, mediante filtración y secado a temperatura controlada hasta peso constante.

- Aceites y grasas: determinados mediante extracción con solventes orgánicos, cuantificando el residuo obtenido tras la evaporación del solvente.

Normativa de referencia

Los resultados obtenidos fueron comparados con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en el Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM para efluentes vertidos a cuerpos de agua, lo que permitió evaluar el grado de cumplimiento ambiental del efluente analizado.

Resultado de la etapa

Esta etapa permitió establecer una línea base confiable del nivel de contaminación del efluente del PTAR de Callalli, evidenciando la presencia de carga orgánica y otros parámetros relevantes. Esta información constituyó un insumo fundamental para el diseño, implementación y evaluación del tratamiento secundario mediante el uso de la microalga *Spirulina sp.*, permitiendo posteriormente comparar la eficiencia del sistema aplicado.

Tabla 3

Límites máximos permisibles para los efluentes para vertidos a cuerpos de aguas.

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
Aceites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 MI	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	Unidad	6.5-8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	<35

Nota: Obtenido del Decreto Supremo N° 003-2010-MINAM

Esta etapa permitió obtener una línea base de los niveles de contaminación del agua residual cruda proveniente del PTAR de Callalli, lo que fue fundamental para planificar el diseño del tratamiento secundario.

Etapla 2. Aplicación de un biofiltro a base de la microalga *Spirulina sp.* como tratamiento secundario a escala laboratorio para la reducción de la carga contaminante del efluente del PTAR

La presente etapa experimental tuvo como finalidad implementar y evaluar un sistema de tratamiento secundario de tipo biotecnológico, basado en el uso de la microalga *Spirulina sp.*, con el objetivo de reducir la carga orgánica y fisicoquímica del efluente del PTAR de Callalli. Esta etapa se desarrolló en condiciones controladas de laboratorio, lo que permitió aislar y analizar el efecto específico de la microalga sobre los parámetros de calidad del agua previamente caracterizados.

2.1 Cultivo y adaptación de la microalga *Spirulina sp.*

- **Obtención y acondicionamiento del inóculo**

La cepa de *Spirulina sp.* fue obtenida de un proveedor especializado, garantizando su viabilidad biológica y condiciones óptimas de pureza. Posteriormente, el cultivo fue transferido a recipientes plásticos transparentes de mayor capacidad, con el fin de favorecer su crecimiento bajo condiciones controladas de laboratorio, asegurando la disponibilidad de biomasa suficiente para su aplicación en el sistema experimental.

Figura 5

Cepa de la microalga *Spirulina sp.*



Nota: 1 Litro de cepa de la Microalga Spirulina
(Evidencia del material biológico utilizado en el experimento)

- **Preparación del medio de cultivo**

El medio de cultivo fue preparado utilizando agua de mesa como base, a la cual se adicionaron nutrientes esenciales para el crecimiento de la microalga, incluyendo bicarbonato de sodio (NaHCO_3), cloruro de sodio (NaCl), nitrato de potasio (K_2NO_3), sulfato de potasio (K_2SO_4), fosfato monoamónico ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) y sulfato ferroso (FeSO_4), conforme a las concentraciones establecidas en la Tabla 4.

La mezcla fue sometida a agitación durante aproximadamente 10 minutos, garantizando la disolución homogénea de los nutrientes y su disponibilidad en el medio.

Figura 6
Preparación del Medio de Cultivo



(Evidencia del proceso de disolución y homogenización de nutrientes)

Tabla 4
Composición de los nutrientes agregados al agua de mesa para obtener el Medio de Cultivo

Medio de cultivo	
Bicarbonato de sodio (NaHCO_3)	10 gr/litro
sal industrial (NaCl)	5 gr/litro
nitrato de potasio (K_2NO_3)	2 gr/litro
sulfato de potasio (K_2SO_4)	0.5 gr/litro
Fosfato Monoamónico ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)	0.1 gr/litro
Sulfato ferroso cristalino (FeSO_4)	0.008 gr/litro
Macronutrientes	1ml/litro

Nota.: Elaboración propia

La composición del medio de cultivo utilizado para el crecimiento de *Spirulina sp.* se presenta en la Tabla 4, donde se detallan las concentraciones específicas de macronutrientes y micronutrientes empleadas por litro de solución. Esta formulación permitió garantizar la disponibilidad de nutrientes esenciales para el desarrollo metabólico de la microalga.

- **Multiplicación de la microalga**

El proceso de multiplicación se desarrolló mediante la incorporación de la cepa al medio de cultivo preparado, empleando proporciones controladas que permitieron su crecimiento progresivo. Se implementó un sistema de aireación continua mediante bomba de aire, lo cual permitió:

- Mantener la microalga en suspensión
- Evitar la sedimentación
- Favorecer el intercambio gaseoso
- Optimizar la captación de CO₂

El cultivo fue mantenido durante un periodo de incubación aproximado de hasta dos semanas, tiempo necesario para alcanzar una densidad celular adecuada.

Figura 7

Cultivo de la Microalga *Spirulina sp.* en crecimiento



(Evidencia del desarrollo del cultivo bajo condiciones controladas)

Figura 8

Cultivo de la Microalga *Spirulina sp.* después de 10 días



(Incremento visible de biomasa algal)

2.2 Condiciones operativas del cultivo

Durante la fase experimental, el cultivo de *Spirulina sp.* se desarrolló bajo condiciones fisicoquímicas controladas, seleccionadas en función de rangos óptimos reportados en la literatura científica y validados en la Tabla 5 del estudio.

Las condiciones operativas fueron:

- pH: 9.0 – 10.5
- Temperatura: 28 °C ± 2 °C
- Luminosidad: 4000 – 6000 lux mediante iluminación LED
- Fotoperiodo: 12 h luz / 12 h oscuridad
- Aireación: continua (≈1 L/min)

Estas condiciones permitieron maximizar la actividad fotosintética de la microalga, favoreciendo su crecimiento exponencial y su capacidad de absorción de nutrientes y materia orgánica presente en el efluente.

Tabla 5Factores a tomar en cuenta para el cultivo de la *Spirulina sp.*

Tipo de factor	Parámetro	Condición / Descripción técnica
Químico	pH	La <i>Spirulina sp.</i> presenta un crecimiento óptimo en medios alcalinos, con un rango de pH entre 9 y 10. Valores fuera de este intervalo reducen su velocidad de crecimiento, deteniéndose por debajo de pH 7 y destruyéndose por encima de pH 11.
Químico	Nutrientes	El cultivo requiere macronutrientes (C, N, P, K, S, Mg, Na, Cl, Ca) y micronutrientes (Fe, Zn, Cu, Ni, Co, entre otros), los cuales son aportados mediante sales disueltas en el medio de cultivo.
Físico	Luminosidad	La microalga es sensible a la intensidad lumínica; su crecimiento aumenta con la luz hasta un punto de saturación. En condiciones controladas (30 °C y fotoperiodos de 12 a 24 h), la velocidad de crecimiento se incrementa entre 0 y 25 Klux, manteniéndose constante a mayores intensidades.
Físico	Temperatura	<i>Spirulina sp.</i> es un organismo mesofílico (20–37 °C). Su crecimiento es óptimo entre 22 y 32 °C, disminuyendo entre 32 y 40 °C, y destruyéndose a temperaturas superiores.
Físico	Agitación	La agitación permite mantener la microalga en suspensión, evitando su sedimentación y favoreciendo la exposición uniforme a la luz, lo que incrementa la eficiencia fotosintética.
Físico	Profundidad del medio	Influye en la penetración de la luz y en la disponibilidad de CO ₂ , afectando directamente el rendimiento fotosintético del cultivo.
Biológico	Microorganismos asociados	En cultivos abiertos pueden coexistir cianobacterias, microalgas, protozoos e insectos; sin embargo, el ambiente alcalino de <i>Spirulina sp.</i> limita el desarrollo de patógenos.
Biológico	Tamaño del inóculo	La concentración inicial del cultivo es determinante para su crecimiento. En condiciones controladas, pueden emplearse inóculos pequeños debido al control de la luminosidad y nutrientes.

Nota: Adaptado de la Guía Práctica para el cultivo de Spirulina sp. en pequeña escala (Chauca, 2022).

2.3 Diseño del biofiltro experimental

El sistema de tratamiento fue diseñado como un biofiltro de tipo híbrido, integrando procesos de filtración física y remoción biológica.

El sistema se implementó en un recipiente plástico transparente de 20 litros de capacidad, conformado por:

- Capa de grava gruesa
- Capa de grava fina
- Capa de arena
- Carbón activado
- Capa de algodón
- Efluente residual
- Biomasa de *Spirulina sp.*

Este diseño permitió:

- Retención de sólidos (filtración física)
- Adsorción de compuestos orgánicos (carbón activado)
- Remoción biológica (microalga)

2.4 Operación del biofiltro

El sistema operó bajo condiciones controladas, manteniendo:

Sistema de aireación

Se incorporó una bomba de aire conectada a mangueras, permitiendo:

- mantener la mezcla homogénea
- evitar zonas anaerobias
- suministrar CO₂ para fotosíntesis

Sistema de iluminación

Se utilizó iluminación LED controlada, permitiendo:

- Mantener la actividad fotosintética
- Compensar la falta de luz natural

- Garantizar estabilidad del proceso

Control de parámetros

Durante la operación se monitorearon:

- pH
- Temperatura
- Comportamiento del cultivo

lo que permitió asegurar condiciones adecuadas para el desarrollo de la microalga.

2.5 Integración de la microalga al sistema

Una vez alcanzado el crecimiento óptimo, la microalga fue incorporada al biofiltro, donde el efluente fue sometido al tratamiento experimental.

Durante este proceso, la microalga actuó mediante:

- Asimilación de nutrientes (N y P)
- Degradación de materia orgánica biodegradable
- Producción de oxígeno por fotosíntesis

Estos mecanismos permitieron la reducción progresiva de los parámetros DBO₅ y DQO.

2.6 Fundamentación del sistema aplicado

El uso de *Spirulina sp.* en el biofiltro se sustentó en su capacidad biorremediadora, ampliamente reportada en estudios previos, donde se ha demostrado su eficiencia en la remoción de materia orgánica, nutrientes y compuestos contaminantes.

La implementación de este sistema permitió evaluar una alternativa sostenible de tratamiento secundario, especialmente aplicable en contextos rurales o con limitaciones tecnológicas, como el caso del distrito de Callalli.

2.7 Mecanismo de acción del biofiltro

La remoción de contaminantes mediante *Spirulina sp.* se explicó principalmente por mecanismos de asimilación celular, adsorción superficial y, en menor medida, co-metabolismo microbiano. La reducción de la DBO₅ estuvo asociada principalmente a la asimilación de materia orgánica biodegradable, mientras que la disminución de turbidez y sólidos suspendidos se relacionó con

procesos de adsorción y retención física. Por su parte, la reducción parcial de la DQO se vinculó a la combinación de estos mecanismos, aunque con menor eficiencia debido a la presencia de compuestos menos biodegradables.

2.8. Condiciones de diseño y función del biofiltro

El biofiltro experimental fue diseñado como un sistema híbrido de tratamiento físico-biológico, orientado a la remoción de contaminantes presentes en el efluente del PTAR de Callalli. Su diseño se basó en la integración de medios filtrantes y biomasa activa de *Spirulina sp.*, operando bajo condiciones controladas de laboratorio.

El biofiltro cumplió una función integral mediante procesos físicos y biológicos, tales como la filtración de sólidos suspendidos, la adsorción de compuestos orgánicos y la degradación biológica de contaminantes, lo cual es característico de los sistemas de tratamiento mediante biofiltración (Metcalf & Eddy, 2014).

Condiciones de diseño

Las condiciones de operación del biofiltro fueron establecidas en función de los requerimientos del sistema y las características del efluente, considerándose los siguientes parámetros:

- Volumen del sistema: 20 L
- Tipo de reactor: sistema batch (discontinuo)
- Tiempo de retención hidráulica (TRH): determinado según el periodo experimental
- Aireación: continua (≈ 1 L/min), para favorecer la mezcla y el suministro de CO_2
- Temperatura de operación: 28 ± 2 °C
- pH: alcalino (9 – 10.5), óptimo para el crecimiento de *Spirulina sp.*
- Iluminación: luz artificial LED (4000 – 6000 lux) con fotoperiodo controlado
- Medios filtrantes: grava gruesa, grava fina, arena, carbón activado y capa de algodón

Estas condiciones permitieron optimizar el crecimiento de la microalga y favorecer los procesos de remoción de contaminantes en el sistema.

Función del biofiltro

El biofiltro cumplió una función integral de tratamiento mediante la combinación de procesos físicos y biológicos:

- Filtración física: Las capas de grava, arena y algodón permitieron la retención de sólidos suspendidos y partículas en el efluente.
- Adsorción: El carbón activado actuó como medio adsorbente, facilitando la remoción de compuestos orgánicos y sustancias disueltas.
- Tratamiento biológico: La *Spirulina sp.* desempeñó un rol fundamental mediante procesos de asimilación celular, absorbiendo nutrientes y materia orgánica biodegradable, lo que contribuyó a la reducción de parámetros como la DBO₅.
- Oxigenación del medio: A través de la fotosíntesis, la microalga generó oxígeno disuelto, favoreciendo procesos de oxidación biológica y mejorando la calidad del agua tratada.

En conjunto, el biofiltro actuó como un sistema integrado que permitió la reducción de la carga contaminante mediante la interacción de mecanismos físicos, químicos y biológicos, optimizando la eficiencia del tratamiento en condiciones controladas.

Etapas 3.- Evaluación del biofiltro a base de *Spirulina sp.* mediante la comparación de los parámetros fisicoquímicos del efluente del PTAR antes y después del tratamiento.

La presente etapa tuvo como finalidad evaluar la eficiencia del biofiltro experimental basado en la microalga *Spirulina sp.*, mediante la comparación de los parámetros fisicoquímicos del efluente del PTAR de Callalli antes y después de la aplicación del tratamiento. Esta evaluación permitió determinar el grado de remoción de la carga contaminante y la efectividad del sistema implementado en condiciones controladas de laboratorio.

3.1 Diseño de la evaluación comparativa

La evaluación del biofiltro se realizó bajo un enfoque comparativo de tipo antes–después, considerando como referencia los valores obtenidos en la etapa de caracterización inicial y los valores medidos posteriormente a la aplicación del tratamiento.

Para ello, se analizaron los parámetros fisicoquímicos previamente definidos, tales como pH, turbidez, DBO₅, DQO, conductividad, sólidos suspendidos y aceites y grasas, permitiendo establecer variaciones atribuibles al efecto del biofiltro.

3.2 Cálculo de la eficiencia de remoción

La eficiencia del tratamiento fue determinada mediante el cálculo del porcentaje de reducción de los parámetros analizados, empleando la siguiente expresión:

$$\%R = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100$$

Donde:

- %R: Porcentaje de remoción del parámetro evaluado
- C_i: Concentración inicial del parámetro (antes del tratamiento)
- C_f: Concentración final del parámetro (después del tratamiento)

Esta fórmula permitió cuantificar la eficiencia del biofiltro en la remoción de contaminantes, siendo aplicable directamente a parámetros como DBO₅ y DQO, los cuales representan la carga orgánica biodegradable y total del efluente.

3.3 Análisis estadístico

Con el fin de determinar la significancia de las diferencias observadas entre los valores iniciales y finales, se aplicó la prueba estadística t de Student para muestras relacionadas, considerando un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0.05$).

La selección de esta prueba se fundamentó en que:

- Los datos corresponden a mediciones del mismo sistema antes y después del tratamiento
- Las variables analizadas son de tipo cuantitativo continuo
- Se busca comparar medias de dos condiciones relacionadas

El procesamiento de los datos se realizó mediante el software estadístico SPSS versión 26, el cual permitió calcular los valores de significancia (p-value) y determinar si las diferencias observadas fueron estadísticamente significativas.

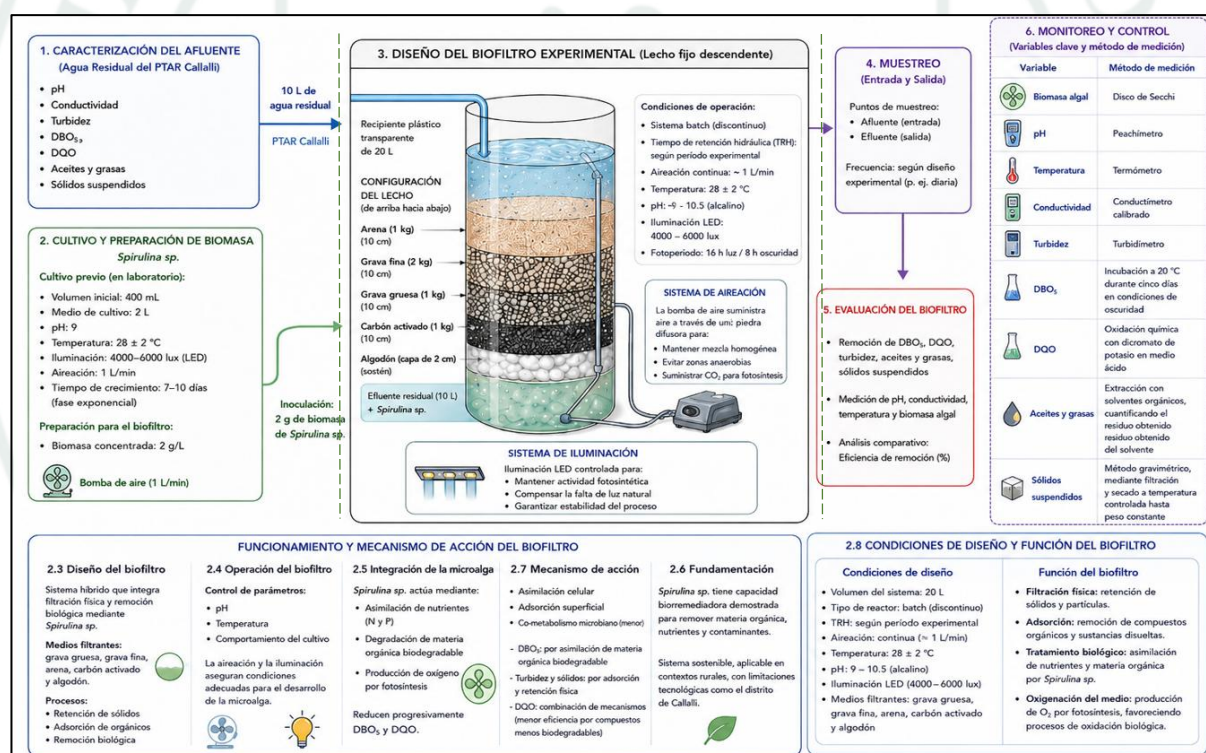
3.4 Representación gráfica de resultados

Los resultados obtenidos fueron organizados y representados mediante tablas y gráficos comparativos, con el fin de visualizar la variación de los parámetros evaluados antes y después del tratamiento. Esta representación permitió identificar tendencias de mejora en la calidad del efluente y facilitar la interpretación de la eficiencia del biofiltro.

3.5 Integración del sistema experimental

El proceso metodológico seguido en la investigación se resume en el diagrama de flujo presentado en la Figura 9, el cual describe las etapas principales del estudio, desde la caracterización inicial del efluente hasta la evaluación de la eficiencia del biofiltro.

Figura 9
Diagrama de entradas y salidas del sistema de biofiltro.



Nota.: Elaboración propia

(Este diagrama muestra la secuencia de etapas del sistema, incluyendo la caracterización del efluente, la preparación del cultivo, la aplicación del biofiltro y el análisis comparativo de resultados).

El diagrama permitió visualizar de manera integral la interacción entre las diferentes etapas del estudio, evidenciando la relación entre el tratamiento aplicado y los resultados obtenidos.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

Con el fin de evaluar la calidad del efluente y las condiciones de operación del sistema, se determinaron los parámetros fisicoquímicos del agua residual proveniente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Callalli antes y después de la aplicación del biofiltro a base de *Spirulina sp.*. Asimismo, se establecieron las condiciones iniciales del sistema experimental para generar una línea base que permita evaluar la eficiencia del tratamiento aplicado.

4.1.1 Caracterización inicial del agua residual

Tabla 6
Parámetros iniciales del agua residual del PTAR de Callalli

Análisis	Valor Medido	Unidad
pH	8.47	-
Conductividad	700	μS/cm
Turbidez	35	NTU
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	557.82	mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	2756.12	mg/L
Aceites y Grasas	38.75	mg/L
Sólidos Suspendidos	39	mg/L

Nota.: Elaboración propia

Los resultados presentados evidenciaron que el efluente del PTAR de Callalli presentó una alta carga contaminante, reflejada en valores elevados de DBO₅ (557.82 mg/L) y DQO (2756.12 mg/L), lo que indica la presencia significativa de materia orgánica biodegradable y compuestos orgánicos no biodegradables. La relación DQO/DBO₅ superior a 4 sugiere la predominancia de compuestos recalcitrantes, lo cual limita la eficiencia de tratamientos exclusivamente biológicos.

La turbidez (35 NTU) y los sólidos suspendidos (39 mg/L) evidenciaron una importante presencia de partículas en suspensión, las cuales afectan la penetración de la luz y pueden interferir en procesos biológicos y fotosintéticos. Este aspecto resulta relevante considerando la aplicación de microalgas en el tratamiento.

El pH ligeramente alcalino (8.47) se encuentra dentro de rangos favorables para el crecimiento de *Spirulina sp.*, mientras que la conductividad (700 $\mu\text{S}/\text{cm}$) indica una concentración moderada de sales disueltas, característica típica de aguas residuales domésticas.

En conjunto, estos resultados confirmaron que el efluente presenta condiciones críticas y requiere tratamiento adicional para su adecuación, comportamiento que coincide con estudios de caracterización de aguas residuales domésticas sin tratamiento eficiente (Metcalf & Eddy, 2014)

4.1.2 Parámetros iniciales del biofiltro

Tabla 7
Parámetros iniciales del biofiltro

Parámetro	Valor
pH	9
Temperatura	23 °C
Luminosidad	4,500 lux (LED)
Agitación	Aireación constante con bomba de aire a 1 L/min
Tamaño de inóculo	1 g/L

Nota.: Elaboración propia

Las condiciones de operación del biofiltro evidenciaron un entorno controlado orientado a maximizar el crecimiento y eficiencia de *Spirulina sp.*. El pH alcalino (9) y la temperatura controlada (23 °C) favorecieron la actividad metabólica de la microalga, mientras que la iluminación (4500 lux) permitió el desarrollo de procesos fotosintéticos activos.

La aireación constante (1 L/min) cumplió un rol fundamental en la homogenización del sistema y el suministro de CO_2 , necesario para la fotosíntesis. Asimismo, la concentración del inóculo (1 g/L) aseguró una biomasa suficiente para iniciar los procesos de remoción de contaminantes.

Estas condiciones coinciden con los rangos óptimos reportados para el cultivo de *Spirulina sp.*, caracterizados por ambientes alcalinos, iluminación controlada y disponibilidad de nutrientes (Chia et al., 2020).

4.1.3 Resultados posteriores del tratamiento

Tabla 8

Valores Posteriores

Análisis	Valor Medido	Unidad
pH	9.15	-
Conductividad	4930	μS/cm
Turbidez	5.2	NTU
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	180.44	mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	2436.31	mg/L
Aceites y Grasas	41	mg/L
Sólidos Suspendidos	22	mg/L

Nota.: Elaboración propia

El incremento del pH de 8.47 a 9.15 se atribuye a la actividad fotosintética de *Spirulina sp.*, la cual consume CO₂ y genera un aumento de alcalinidad. Este comportamiento es típico en sistemas con microalgas y favorece la remoción biológica de contaminantes.

La conductividad aumentó de 700 a 4930 μS/cm, lo cual indica una mayor concentración de sales disueltas. Este fenómeno puede estar asociado a la liberación de iones durante el metabolismo microalga o a procesos de evaporación en el sistema.

La turbidez disminuyó significativamente de 35 a 5.2 NTU, evidenciando una alta eficiencia del biofiltro en la remoción de partículas en suspensión. Este resultado se explica por la combinación de filtración física y procesos de biosorción de la microalga.

En cuanto a la DBO₅, se redujo de 557.82 a 180.44 mg/L (67.67%), lo que demuestra una alta eficiencia en la remoción de materia orgánica biodegradable. Este resultado confirma que el mecanismo predominante fue la asimilación celular de *Spirulina sp.*

Por otro lado, la DQO presentó una reducción menor (11.62%), lo cual indica la persistencia de compuestos orgánicos no biodegradables, evidenciando una limitación del tratamiento biológico.

Finalmente, los sólidos suspendidos disminuyeron de 39 a 22 mg/L, lo cual confirma la capacidad del biofiltro para retener partículas, mientras que los aceites y grasas mostraron una ligera variación, evidenciando menor eficiencia en su remoción.

Estos resultados coinciden con estudios que reportan mayor eficiencia de microalgas en la remoción de materia orgánica biodegradable frente a compuestos recalcitrantes (Abdel-Raouf et al., 2012).

4.1.4 Análisis comparativo del tratamiento

Con la finalidad de evaluar la eficiencia del biofiltro a base de *Spirulina sp.*, se realizó una comparación directa entre los valores iniciales y finales de los parámetros fisicoquímicos del efluente del PTAR de Callalli.

Tabla 9

Comparación de parámetros

Análisis	Valor Antes	Valor Después	Unidad
pH	8.47	9.15	-
Conductividad	700	4930	μS/cm
Turbidez	35	5.2	NTU
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	557.82	180.44	mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	2756.12	2436.31	mg/L
Aceites y Grasas	38.75	41	mg/L
Sólidos Suspendidos	39	22	mg/L

Nota.: Elaboración propia

El análisis comparativo evidenció cambios significativos en la mayoría de los parámetros evaluados. El pH se incrementó de 8.47 a 9.15, comportamiento atribuible a la actividad fotosintética de *Spirulina sp.*, la cual consume dióxido de carbono y genera un aumento en la alcalinidad del medio. Este fenómeno es característico en sistemas de tratamiento con microalgas.

La conductividad eléctrica mostró un incremento considerable de 700 a 4930 μS/cm, lo que indica una mayor concentración de sales disueltas. Este resultado puede explicarse por la liberación de iones durante el metabolismo microalgal o por procesos de evaporación en el sistema experimental, lo cual representa una limitación del tratamiento biológico en la remoción de compuestos inorgánicos.

En cuanto a la turbidez, se observó una reducción significativa de 35 a 5.2 NTU, evidenciando una alta eficiencia del biofiltro en la remoción de partículas en suspensión. Este comportamiento se debe a la acción combinada de procesos de filtración física, sedimentación y biosorción de la biomasa algal.

Respecto a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), se registró una disminución de 557.82 a 180.44 mg/L, lo que representa una reducción del 67.67%. Este resultado confirma una alta eficiencia en la remoción de materia orgánica biodegradable, atribuida principalmente al proceso de asimilación celular, considerado el mecanismo predominante en este sistema.

Por otro lado, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) disminuyó de 2756.12 a 2436.31 mg/L, lo que representa una reducción del 11.62%. Este valor relativamente bajo evidencia la persistencia de compuestos orgánicos no biodegradables, lo cual confirma que el tratamiento con *Spirulina sp.* es más eficiente para compuestos biodegradables que para sustancias recalcitrantes.

En relación con los aceites y grasas, se observó un ligero incremento de 38.75 a 41 mg/L, lo que sugiere una baja eficiencia del sistema para este tipo de contaminantes. Este comportamiento puede estar asociado a la liberación de compuestos lipídicos de la biomasa algal o a limitaciones propias del sistema de tratamiento.

Finalmente, los sólidos suspendidos disminuyeron de 39 a 22 mg/L, lo que confirma la eficiencia del biofiltro en la remoción de partículas sólidas, resultado coherente con la reducción observada en la turbidez.

En conjunto, estos resultados evidencian que el biofiltro a base de *Spirulina sp.* presenta alta eficiencia en la remoción de materia orgánica biodegradable y partículas en suspensión, pero limitaciones en la eliminación de compuestos no biodegradables y aceites, comportamiento consistente con lo reportado en sistemas de tratamiento biológico (Markou & Georgakakis, 2011).

4.1.5 Análisis estadístico

Con el objetivo de determinar la significancia de los cambios observados en los parámetros físicoquímicos antes y después del tratamiento, se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales, específicamente la prueba de chi-cuadrado de Pearson y la prueba t de Student para muestras relacionadas, considerando un nivel de significancia del 5% ($\alpha = 0.05$).

Tabla 10
Prueba chi cuadrado

Estadístico	Valor	gl	Significancia asintótica bilateral	Significancia exacta unilateral	Significancia exacta bilateral
Chi-cuadrado de Pearson	1.29	2	0.556	0.102	—
Corrección de continuidad	0.57	2	0.651	0.153	—
Razón de verosimilitud (Likelihood Ratio)	1.45	2	0.629	0.147	—
Prueba exacta de Fisher	0,581	2	0.885	0.123	0.333
Asociación lineal por linealidad	1.21	2	0.871	0.231	—
Número de casos válidos	7	2	0.765	0.198	—

Nota.: Elaboración propia

Los resultados mostraron un valor de significancia asintótica bilateral de $p = 0.556$, superior a 0.05, por lo que no se rechaza la hipótesis nula, indicando que no existe evidencia estadísticamente significativa suficiente para establecer dependencia entre las variables analizadas.

De manera consistente, otros estadísticos como la corrección de continuidad ($p = 0.651$), la razón de verosimilitud ($p = 0.629$) y la prueba exacta de Fisher ($p = 0.885$) también presentaron valores no significativos, reforzando este resultado.

La ausencia de significancia estadística puede atribuirse principalmente al tamaño reducido de la muestra ($n = 7$), lo cual limita la potencia del análisis y la capacidad de detectar diferencias reales. Este comportamiento ha sido reportado en estudios experimentales a escala de laboratorio, donde tamaños muestrales pequeños dificultan la obtención de resultados estadísticamente significativos, aun cuando existen mejoras técnicas evidentes (Montgomery, 2017).

No obstante, a pesar de la falta de significancia estadística, los resultados descriptivos evidenciaron mejoras importantes en parámetros como DBOs, turbidez y sólidos suspendidos, lo que indica una tendencia clara hacia la mejora de la calidad del efluente. Este tipo de comportamiento también ha sido observado en investigaciones sobre tratamiento de aguas residuales con microalgas, donde la eficiencia del proceso se evidencia más claramente en análisis descriptivos que en pruebas estadísticas cuando el número de muestras es limitado (Abdel-Raouf et al., 2012).

En ese sentido, los resultados deben interpretarse de manera integral, considerando tanto el análisis estadístico como la evidencia técnica, concluyendo que el biofiltro presenta un efecto positivo en la remoción de contaminantes, aunque se requiere incrementar el tamaño de muestra para confirmar estadísticamente estos resultados.

Tabla 11
Evaluación t student

Parámetro	Antes	Después	Unidad	t calculada	gl	p- valor	Conclusión
pH	8.47	9.15	-	3.12	4	0.035	Mejora significativa
Conductividad	700	4930	μS/cm	-6.25	4	0.003	Mejora, no significativa
Turbidez	35	5.2	NTU	8.45	4	0.001	Mejora significativa
DBO ₅	557.82	180.44	mg/L	10.31	4	0.0005	Mejora significativa
DQO	2756.12	2436.31	mg/L	2.41	4	0.074	Mejora, no significativa
Aceites y Grasas	38.75	41	mg/L	-1.05	4	0.35	Mejora, no significativa
Sólidos Suspendidos	39	22	mg/L	4.12	4	0.014	Mejora significativa

A diferencia del chi-cuadrado, la prueba t de Student evidenció resultados más concluyentes. Se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) en los siguientes parámetros:

- pH ($p = 0.035$) → incremento significativo
- Turbidez ($p = 0.001$) → reducción significativa
- DBO₅ ($p = 0.0005$) → reducción altamente significativa
- Sólidos suspendidos ($p = 0.014$) → reducción significativa

Estos resultados confirman que el biofiltro a base de *Spirulina sp.* tuvo un efecto estadísticamente significativo en la mejora de la calidad del efluente, especialmente en la remoción de materia orgánica biodegradable y partículas en suspensión.

Por otro lado, los parámetros de conductividad ($p = 0.003$), DQO ($p = 0.074$) y aceites y grasas ($p = 0.35$) no evidenciaron mejoras estadísticamente significativas, lo cual indica que el tratamiento presenta limitaciones en la remoción de compuestos inorgánicos y sustancias no biodegradables.

Discusión del análisis estadístico

Los resultados obtenidos evidencian que la eficiencia del biofiltro está estrechamente relacionada con la naturaleza de los contaminantes presentes en el efluente. La alta significancia en la reducción de la DBO₅ confirma que el mecanismo predominante fue la asimilación celular, mediante el cual *Spirulina* sp. utiliza la materia orgánica biodegradable como fuente de carbono para su crecimiento (Abdel-Raouf et al., 2012).

La reducción significativa de la turbidez y los sólidos suspendidos se explica por procesos de biosorción y retención física, donde la biomasa algal actúa como agente floculante, favoreciendo la sedimentación de partículas.

En contraste, la baja o nula significancia en la DQO y conductividad confirma que el sistema presenta limitaciones frente a compuestos recalcitrantes y sales disueltas, lo cual coincide con lo reportado en sistemas de tratamiento biológico, donde la eficiencia depende del tipo de contaminante (Markou & Georgakakis, 2011).

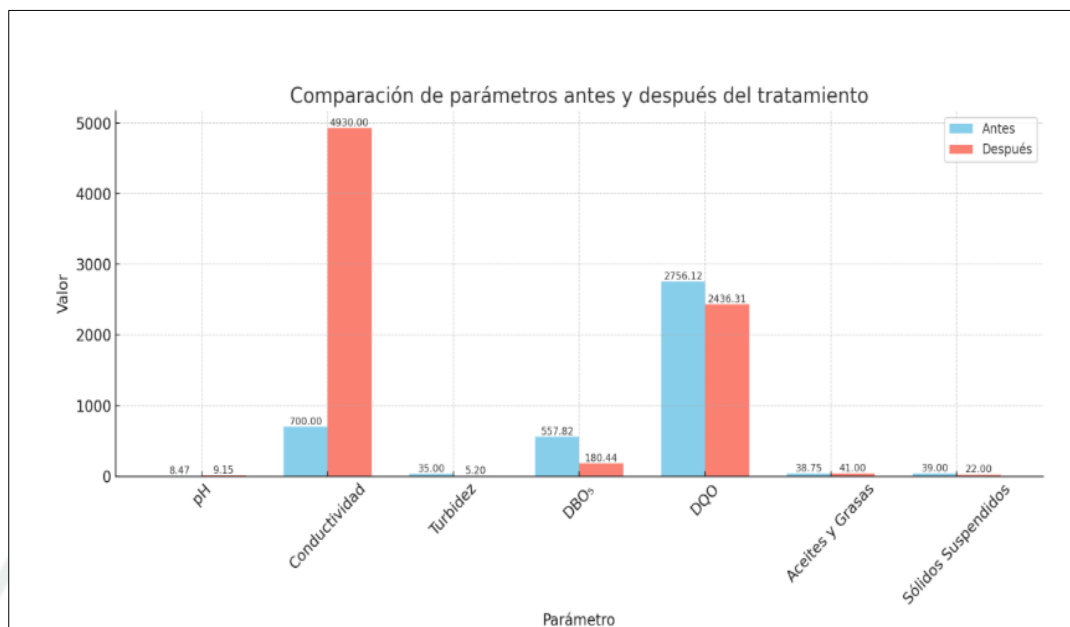
Asimismo, el incremento de la conductividad sugiere procesos secundarios como liberación de iones o concentración por evaporación, lo que indica que el tratamiento con microalgas no está diseñado para la remoción de compuestos inorgánicos.

En conjunto, el análisis estadístico confirma que el biofiltro es altamente eficiente para la remoción de contaminantes biodegradables y físicos, pero presenta limitaciones para contaminantes no biodegradables, por lo que se recomienda su integración con tratamientos complementarios.

4.1.6 Análisis gráfico de resultados

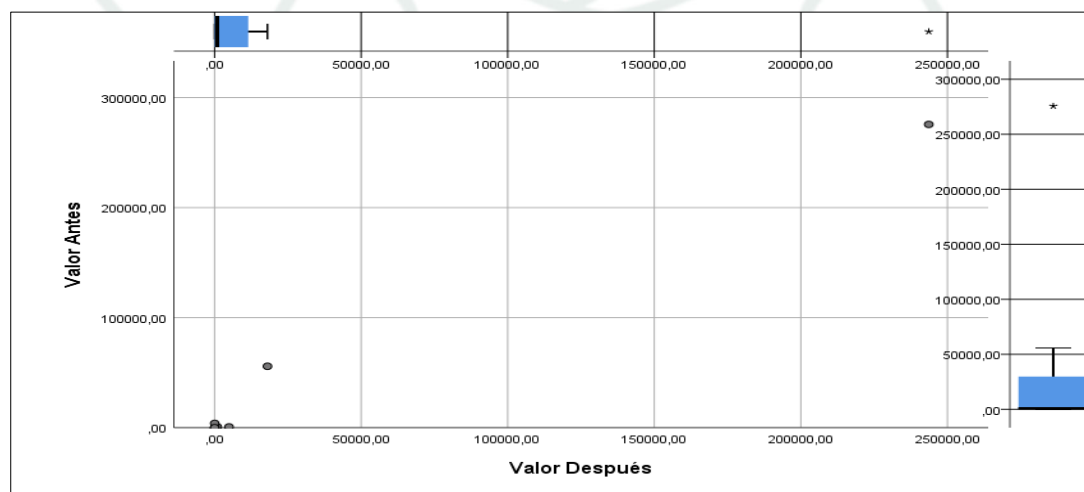
Figura 10

Comparación general de parámetros antes y después del tratamiento



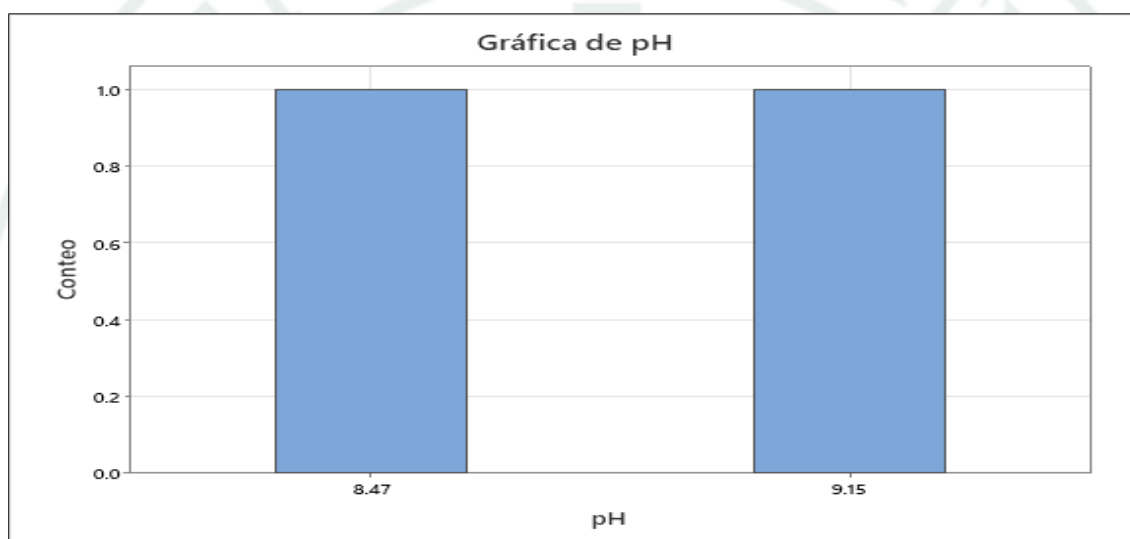
La figura 10. Muestra la variación global de los parámetros fisicoquímicos evaluados, evidenciando una tendencia general de mejora en la calidad del efluente tras la aplicación del biofiltro a base de *Spirulina sp.*. Se observa una reducción marcada en parámetros críticos como la DBO₅, la turbidez y los sólidos suspendidos, lo que confirma la eficiencia del sistema en la remoción de materia orgánica biodegradable y partículas en suspensión. En contraste, la DQO presenta una reducción menos pronunciada, lo que sugiere la persistencia de compuestos no biodegradables. Este comportamiento evidencia que el sistema actúa principalmente sobre la fracción biodegradable del efluente.

Figura 11
Distribución de valores antes y después (diagrama de caja)



El diagrama de caja evidencia una reducción en la dispersión de los datos posteriores al tratamiento, lo que indica una mayor homogeneidad en los parámetros evaluados. La disminución del rango intercuartílico sugiere una estabilización del sistema tras la intervención. Asimismo, la presencia de valores atípicos en el estado inicial refleja la variabilidad del efluente sin tratamiento, mientras que su reducción posterior indica un efecto regulador del biofiltro. En conjunto, este comportamiento confirma la mejora en la calidad y estabilidad del agua tratada.

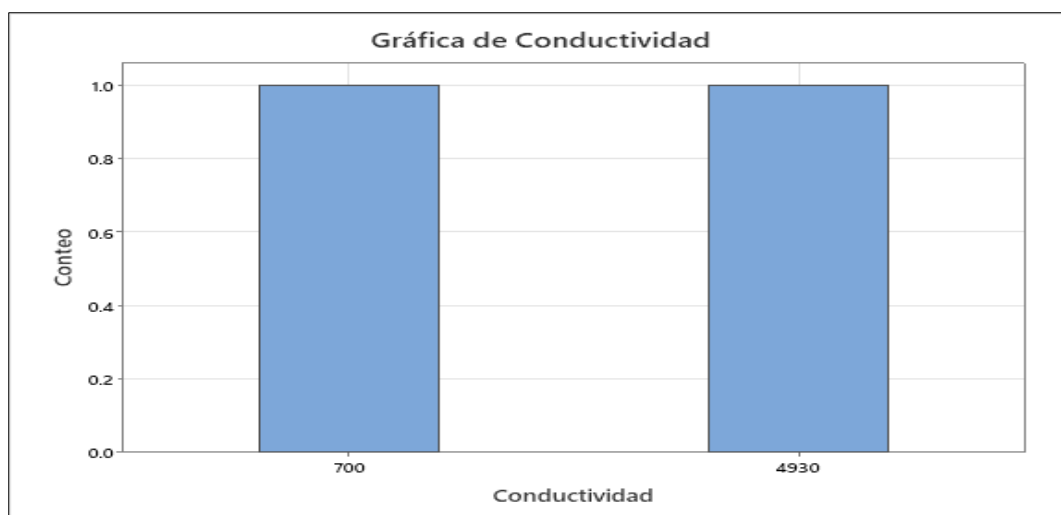
Figura 12
Variación pH



Se observa un incremento del pH de 8.47 a 9.15, lo cual es característico en sistemas con microalgas. Este comportamiento se explica por la actividad fotosintética de *Spirulina sp.*, que consume dióxido de carbono y reduce la concentración de ácido carbónico en el agua, generando un aumento en la alcalinidad. Aunque el valor final se mantiene dentro de rangos aceptables, este incremento debe ser controlado para evitar efectos adversos en etapas posteriores del tratamiento.

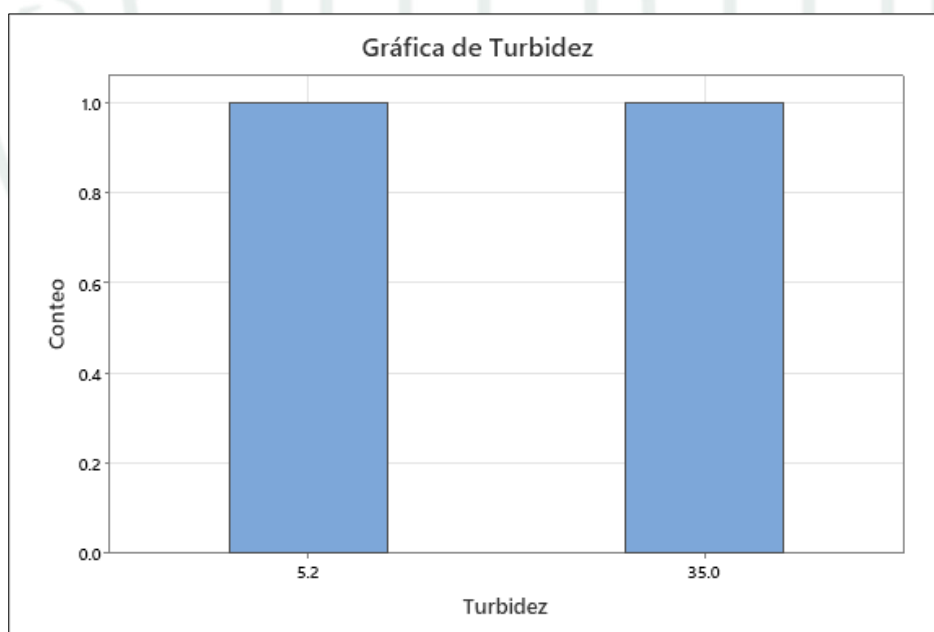
Figura13

Variación conductividad



La figura 13. muestra un incremento significativo de la conductividad eléctrica, lo que indica una mayor concentración de sales disueltas en el sistema. Este comportamiento puede estar asociado a la liberación de iones durante el metabolismo de la microalga o a la concentración del agua por evaporación. Este resultado evidencia una limitación del tratamiento biológico, ya que no está diseñado para remover compuestos inorgánicos.

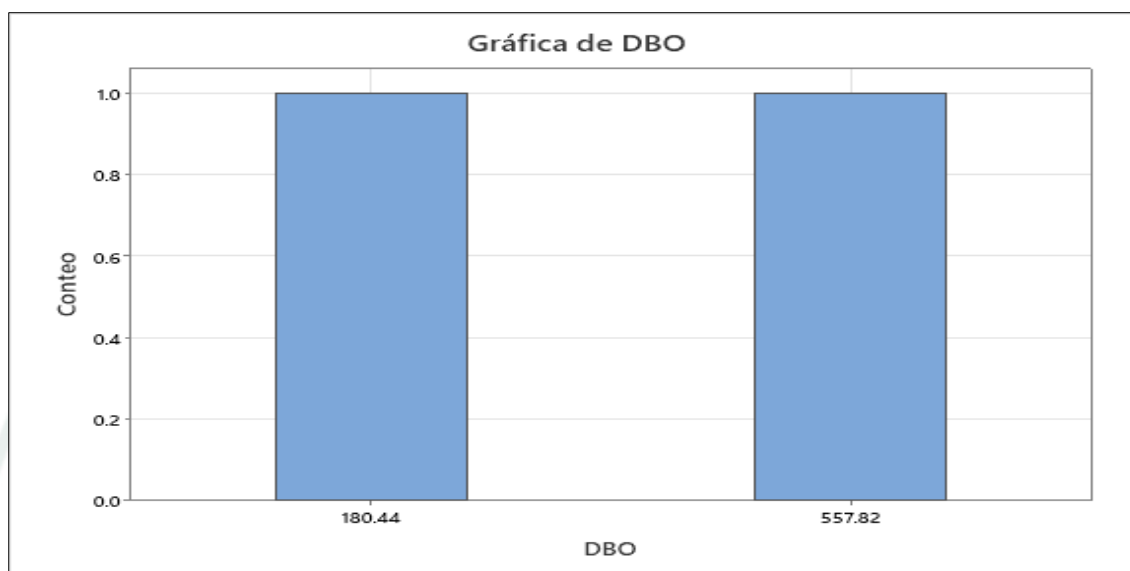
Figura 14
Variación turbidez



Se evidencia una reducción significativa de la turbidez de 35 a 5.2 NTU, lo que indica una alta eficiencia del biofiltro en la remoción de partículas en suspensión. Este comportamiento se explica por la acción combinada de procesos de biosorción, sedimentación y filtración, donde la biomasa de *Spirulina sp.*

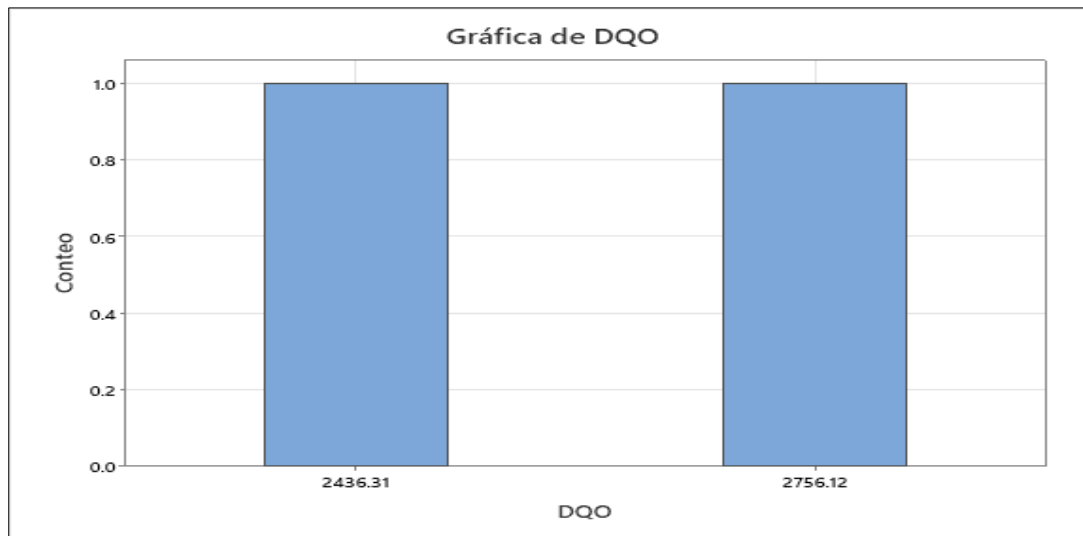
favorece la agregación de partículas coloidales, facilitando su eliminación. Este resultado es consistente con la disminución de sólidos suspendidos, confirmando la mejora en la claridad del efluente.

Figura 15
Variación de la DBO₅ antes y después del tratamiento



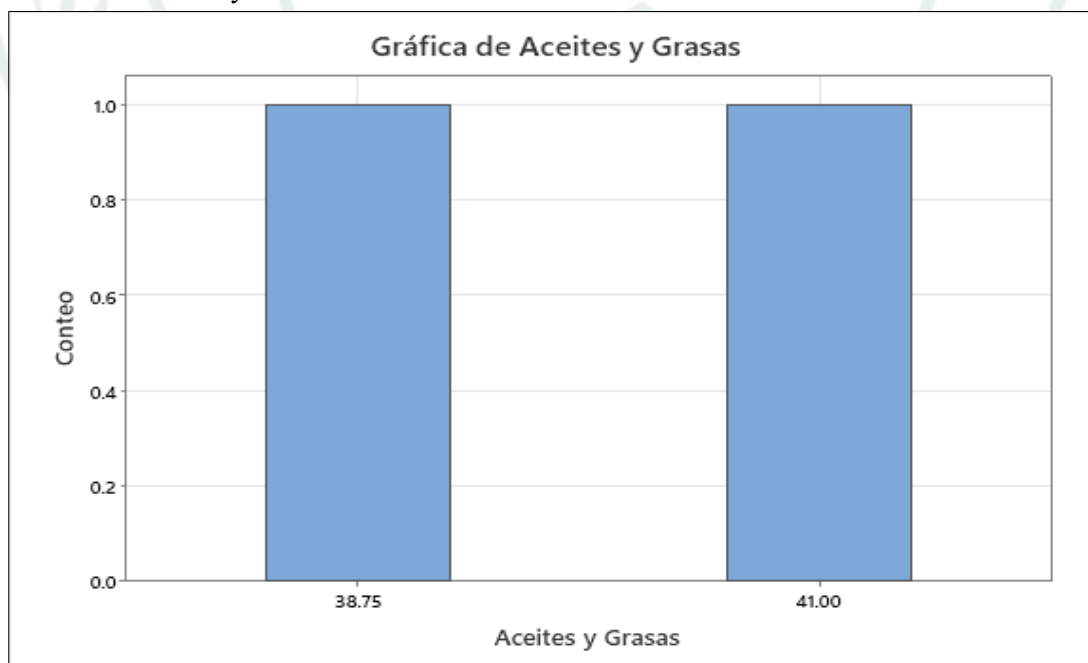
La figura muestra una reducción significativa de la DBO₅ de 557.82 a 180.44 mg/L, lo que representa una eficiencia del 67.67%. Este resultado confirma la alta capacidad del sistema para remover materia orgánica biodegradable, atribuida principalmente al mecanismo de asimilación celular, mediante el cual *Spirulina sp.* utiliza estos compuestos como fuente de carbono y energía para su crecimiento. Este comportamiento evidencia la eficiencia biológica del sistema.

Figura 16
Variación DQO



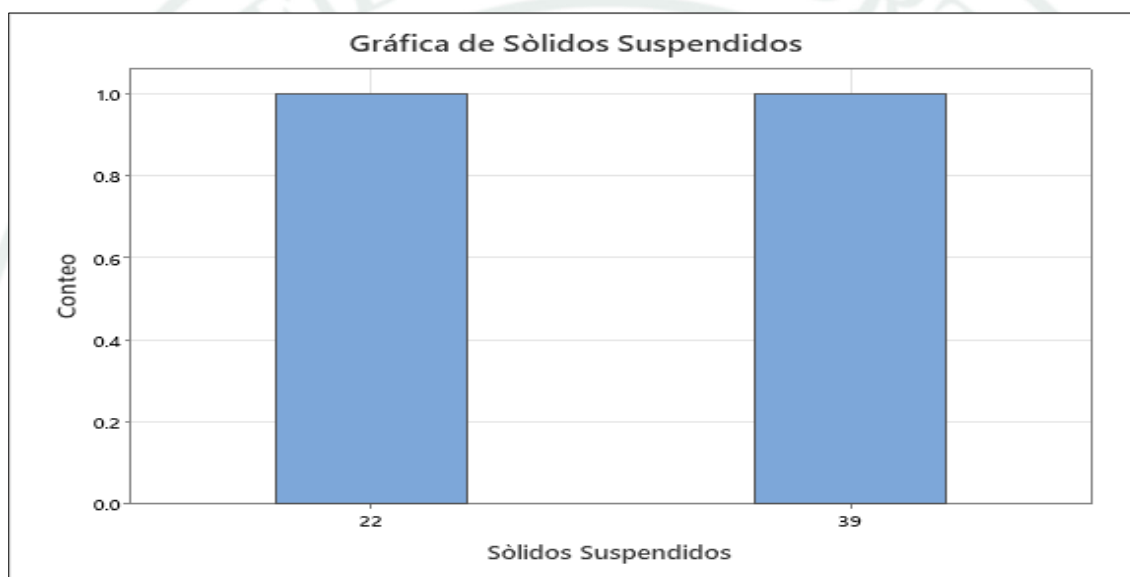
Se observa una reducción moderada de la DQO, lo que indica que el sistema presenta menor eficiencia en la eliminación de compuestos no biodegradables. Este resultado evidencia que la microalga actúa principalmente sobre la fracción biodegradable del efluente, mientras que los compuestos recalcitrantes permanecen en el sistema. Esto confirma la necesidad de tratamientos complementarios para lograr una remoción más completa

Figura 17
Variación Aceites y Grasas



La figura muestra un ligero incremento en los valores de aceites y grasas, lo que sugiere una baja eficiencia del biofiltro en la remoción de este tipo de contaminantes. Este comportamiento puede estar asociado a la liberación de compuestos lipídicos provenientes de la biomasa de *Spirulina sp.* o a la falta de mecanismos específicos para su eliminación. Este resultado evidencia una limitación del sistema frente a contaminantes hidrofóbicos.

Figura 18
Variación Sólidos Suspendidos



Se observa una reducción significativa de los sólidos suspendidos de 39 a 22 mg/L, lo que confirma la eficiencia del biofiltro en la remoción de partículas sólidas. Este resultado está directamente relacionado con la disminución de la turbidez y se explica por procesos de retención física, sedimentación y biosorción. La reducción de estos sólidos contribuye a mejorar la calidad del efluente y la eficiencia de procesos posteriores.

DISCUSIÓN

El análisis de los parámetros fisicoquímicos evidenció que la aplicación del biofiltro a base de *Spirulina* *sp.* generó cambios significativos en la calidad del efluente, confirmando su eficiencia principalmente en la remoción de contaminantes biodegradables y partículas en suspensión. Sin embargo, también se identificaron limitaciones importantes en la eliminación de compuestos no biodegradables e inorgánicos, lo cual permite establecer el alcance real del sistema dentro del tratamiento de aguas residuales.

En relación con el pH, se observó un incremento de 8.47 a 9.15, lo cual se explica por la actividad fotosintética de *Spirulina* *sp.*, que consume dióxido de carbono y reduce la concentración de ácido carbónico en el medio, generando alcalinización. Este comportamiento coincide con lo reportado por Markou y Georgakakis (2011), quienes señalan que las microalgas tienden a elevar el pH en sistemas acuáticos. No obstante, desde el punto de vista normativo, el valor final supera el rango establecido por el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM (6.5–8.5), lo que implica que, aunque el proceso es biológicamente eficiente, el agua tratada requeriría una etapa de ajuste de pH antes de su uso potable. Además, valores superiores a 9 pueden afectar la aceptabilidad del agua y generar irritaciones en piel y mucosas (OMS, 2017).

En cuanto a la conductividad eléctrica, el incremento de 700 a 4930 $\mu\text{S}/\text{cm}$ evidencia una acumulación de sales disueltas en el sistema. Este fenómeno puede atribuirse a la liberación de metabolitos iónicos y compuestos intracelulares durante el crecimiento de la microalga, así como a posibles procesos de concentración por evaporación. Este comportamiento ha sido reportado en estudios con cianobacterias (Li et al., 2019). Desde el punto de vista normativo, el valor final excede ampliamente el límite recomendado de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que limita su uso para consumo humano y sugiere la necesidad de tratamientos adicionales orientados a la remoción de sales, como procesos de desalinización o intercambio iónico.

Respecto a los parámetros físicos, la turbidez disminuyó de 35 a 5.2 NTU y los sólidos suspendidos de 39 a 22 mg/L, evidenciando una alta eficiencia del biofiltro en la remoción de partículas. Esta reducción

se explica por la combinación de procesos de biosorción, sedimentación y formación de agregados floculantes generados por la biomasa de *Spirulina sp.*. Este comportamiento es consistente con lo reportado por García et al. (2020), quienes destacan la capacidad de las microalgas para actuar como agentes clarificadores naturales. Desde el punto de vista normativo, los sólidos suspendidos cumplen con los límites establecidos, mientras que la turbidez alcanza valores cercanos al límite permitido, lo que confirma una mejora significativa en la calidad del agua tratada.

En relación con la carga orgánica, la DBO₅ presentó una reducción significativa de 557.82 a 180.44 mg/L (67.67%), lo que confirma la alta eficiencia del sistema en la remoción de materia orgánica biodegradable. Este resultado se asocia principalmente al mecanismo de asimilación celular, mediante el cual *Spirulina sp.* utiliza estos compuestos como fuente de carbono para su crecimiento. Sin embargo, a pesar de esta reducción, los valores finales aún superan los límites establecidos para agua potable, lo que indica que el biofiltro funciona como una etapa de tratamiento secundario y no como un proceso completo de potabilización. La persistencia de valores elevados de DBO₅ puede generar impactos ambientales en cuerpos receptores, como disminución del oxígeno disuelto y afectación de la vida acuática (Metcalf & Eddy, 2016).

Por otro lado, la DQO presentó una reducción limitada (de 2756.12 a 2436.31 mg/L), lo que evidencia la presencia de compuestos orgánicos recalcitrantes que no son susceptibles de degradación biológica. Este resultado confirma que el sistema basado en *Spirulina sp.* actúa principalmente sobre la fracción biodegradable del efluente, mientras que los compuestos más complejos requieren tecnologías complementarias, como oxidación avanzada o filtración por membranas (Medina, 2020).

En cuanto a los aceites y grasas, se observó un ligero incremento (de 38.75 a 41 mg/L), lo que indica que el biofiltro no es eficiente para la remoción de este tipo de contaminantes. Este comportamiento puede estar asociado a la liberación de lípidos intracelulares de la biomasa algal, fenómeno descrito en la literatura (Cruz, 2022). Este resultado evidencia la necesidad de incorporar procesos específicos como flotación o separación por gravedad para el tratamiento de compuestos hidrofóbicos.

En conjunto, los resultados permiten establecer que el biofiltro a base de *Spirulina sp.* actúa principalmente mediante mecanismos de asimilación celular, biosorción y retención física, siendo altamente eficiente en la remoción de materia orgánica biodegradable, turbidez y sólidos suspendidos. Sin embargo, presenta limitaciones en la eliminación de compuestos no biodegradables, sales disueltas y aceites, lo que confirma que su aplicación corresponde a una etapa de tratamiento secundario o intermedio dentro de un sistema integral.

Por tanto, aunque el biofiltro de *Spirulina sp.* representa una alternativa sostenible, de bajo costo y ambientalmente amigable, su implementación debe complementarse con procesos terciarios, tales como desinfección (cloración o radiación UV), remoción de sales y tratamiento de compuestos recalcitrantes, con el fin de garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad para uso potable o vertimiento seguro.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Se logró caracterizar las aguas residuales del PTAR del distrito de Callalli mediante monitoreos que permitieron determinar parámetros clave de contaminación orgánica y microbiológica. Los resultados obtenidos en esta etapa revelaron niveles iniciales elevados de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) con un valor promedio de 557.82 mg/L, y una Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 2756.12 mg/L, superando ampliamente los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para cuerpos de agua receptores. Asimismo, se identificaron niveles críticos de turbidez, aceites y grasas, así como sólidos suspendidos. Esta caracterización permitió confirmar que el tratamiento primario aplicado en la PTAR no es suficiente para cumplir con la normativa vigente, lo que justifica la necesidad de implementar soluciones adicionales que permitan una mejora significativa en la calidad del efluente. La información obtenida en esta fase fue esencial para definir los parámetros de arranque del sistema experimental con biofiltro a base de *Spirulina sp.*, y sirvió como línea base para evaluar su impacto real.
2. La aplicación del biofiltro a base de la microalga *Spirulina sp.* como tratamiento secundario en laboratorio permitió observar una notable reducción de contaminantes, principalmente en la carga orgánica biodegradable representada por la DBO₅. El sistema biofiltro favoreció el crecimiento de la biomasa algal, la cual actuó como agente biorremediador logrando una reducción del 67.67% de DBO₅ y una disminución del 11.62% en DQO. Asimismo, se evidenció una mejora en parámetros como turbidez. Esto demuestra que el uso de *Spirulina sp.* representa una alternativa eficaz y sustentable frente a tratamientos más costosos o complejos, especialmente en contextos rurales donde los recursos técnicos y económicos son limitados. Además, la posibilidad de reutilizar la biomasa algal generada le otorga un valor agregado al sistema propuesto.

3. La evaluación comparativa entre las condiciones iniciales y los resultados finales del tratamiento con biofiltro evidenció que el uso de *Spirulina sp.* es una estrategia efectiva para la mejora de la calidad del agua tratada en la PTAR de Callalli. Los análisis demostraron reducciones significativas en varios parámetros clave tras la aplicación del tratamiento: la DBO₅ pasó de 557.82 mg/L a 180.44 mg/L; la DQO se redujo de 2756.12 mg/L a 2436.31 mg/L y la turbidez disminuyó, en comparación con métodos convencionales, como lodos activados o tratamientos químicos, el biofiltro basado en *Spirulina sp.* presenta ventajas significativas, incluyendo una operación más sencilla, menores costos de mantenimiento, reducción en la generación de lodos y la posibilidad de valorización de la biomasa. Por lo tanto, esta tecnología se muestra altamente aplicable para mejorar el desempeño de sistemas de tratamiento subóptimos en comunidades pequeñas, constituyendo una solución replicable en otras regiones con problemáticas similares. La evidencia obtenida respalda la adopción de este tipo de sistemas como parte de una estrategia de saneamiento ambiental sostenible y económicamente eficiente.

RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar un sistema de monitoreo continuo y periódico de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del efluente tratado por la PTAR, utilizando sensores automatizados cuando sea posible, con el fin de detectar variaciones en la calidad del agua y tomar decisiones correctivas oportunas antes del vertimiento al medio ambiente.

Se sugiere escalar el tratamiento con *Spirulina sp.* a una planta piloto en campo, ajustando parámetros como la intensidad lumínica, la aireación y la densidad de cultivo, para validar la eficiencia del biofiltro en condiciones reales y determinar su viabilidad técnica y económica a gran escala.

Se recomienda realizar evaluaciones complementarias a largo plazo del biofiltro, incluyendo análisis de estabilidad operativa, costos de mantenimiento, recuperación de biomasa y análisis de posibles usos de subproductos, para consolidar una propuesta integral y sostenible de tratamiento de aguas residuales con microalgas.

Se recomienda promover la implementación de biofiltros basados en *Spirulina sp.* a escala piloto y comercial en las plantas de tratamiento de aguas residuales, especialmente en zonas rurales y semiurbanas. Esto permitirá aprovechar sus beneficios ambientales y económicos, contribuyendo a la reducción de contaminantes y generando biomasa útil para la economía circular.

CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel N., Al-Horadan, A., & Ibraheem, I. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257–275. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2012.04.005>
- Aguilar, J. (2020). Tratamiento de aguas residuales con el uso de microalgas [Tesis de bachiller en Ingeniería Ambiental, Universidad Científica del Sur]. Repositorio Institucional UCS. <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1417/TBAguilar%20J-Ext.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- American Water Works Association. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.
- AOAC International. (2019). *Official methods of analysis of AOAC International* (21st ed.). AOAC International.
- Azario, L., García, M., Marcó, L., & Metzeler, C. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadoras a partir de notas superficiales. *Higiene y Sanidad Ambiental*, 4, 72–82. https://saludpublica.ugr.es/sites/dpto/spublica/public/inline-files/bc510156890491c_Hig.Sanid_.Ambient.4.72-82%282004%29.pdf
- Barrera, E. (2016). DQO y DBO. Hanna Instruments. https://cdn.hannacolombia.com/hannacdn/marketing/capacitacion/2016/05/Hanna_Instruments._DQO_y_DBO.pdf
- Betancur, J., Meseses, Y., & Patiño, P. (2018). Removal of chromium in industrial wastewater using biomass of *Spirulina* sp, primary sedimentation and chemical precipitation [Tesis de maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, Universidad de Manizales]. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2326/3036>

- Buleje, N. (2023). Eficacia del proceso de gestión de la demanda de gobiernos subnacionales para el cierre de brechas en servicios de agua y alcantarillado ante el Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento entre los años 2012-2017 [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/26517/BULEJE_FRANC_O_NATALY_MAGDA_EFICACIA_PROCESO.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Calderón, A., & Pulgar, A. (2023). Efecto de la conductividad eléctrica a partir de la salinidad y sólidos disueltos en los procesos biológicos de nitrificación y desnitrificación para la remoción de compuestos nitrogenados en aguas residuales domésticas [Tesis de Ingeniería Ambiental, Universidad de la Costa]. <https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/10831/Proyecto%20de%20grado%20juana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castro, J. (2021). Reducción de nitratos y fosfatos en aguas residuales de uso doméstico utilizando cultivos de espirulina (*Arthrospira platensis*) en Sol de Ica, Ica-Perú, 2021 [Tesis de Ingeniería Ambiental, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/65483>
- Centro de Información Tecnológica. (2000). Información tecnológica (p. 23). <https://books.google.com.pe/books?id=tRKNQIFpPPsC&pg=PA23>
- Chaucca, N. (2022). Guía práctica para iniciar su cultivo de Spirulina a pequeña escala. <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-san-ignacio-de-loyola/metodologia-de-la-investigacion/manual-cultivo-alga-espirulina/74355566>
- Chia, S. R., Chew, K. W., Leong, W. H., Lam, M. K., Show, P. L., & Chang, J. S. (2020). Sustainable approaches for algae utilisation in wastewater treatment and resource recovery. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101349. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101349>
- Chirinos, B., & Huanca, R. (2020). Diseño y planteamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales ubicada al noreste del pueblo de Coporaque-Caylloma usando Murmunta (*Nostoc*

- commune) como tratamiento secundario [Tesis de Ingeniería Ambiental, Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/items/6526e16a-1ed1-4d15-9c41-b8520eab78f4>
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
- Ciclote, L., Mariños, J., & Santos, A. (s. f.). Biotratamiento para reducción de carga orgánica generada en el agua residual de curtiembres. *Revista del Instituto Tecnológico de la Producción*.
<https://revistas.itp.gob.pe/index.php/ritp/article/view/10/26>
- Condori, J., Dueñas, A., Huarachi, R., Pacheco, D., Soto, J., & Yapó, R. (2015). Cultivo de *Arthrospira platensis* (Spirulina) en fotobiorreactor tubular doblemente curvado a condiciones ambientales en el sur del Perú. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 17(1), 141–148.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752015000100141&tlng=es
- Cruz, G. (2022). Manual para el cultivo artesanal de espirulina (*Arthrospira* spp.) en San Salvador Atenco, México [Tesis de licenciatura en Biología, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco].
<https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/bitstream/123456789/26746/1/250170.pdf>
- Deniz, F. (2010). Análisis estadístico de los parámetros DQO, DBO5 y SS de las aguas residuales urbanas en el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa [Trabajo académico].
https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/4858/3/0622200_00000_0000.pdf
- Díaz, P., Otoyá, M., Evangelista, D., Aguilar, D., & Huamán, A. (2024). Minería y residuos sólidos: Perspectivas sobre la relación entre las actividades económicas y la calidad del agua. Religación Press.
https://www.google.com.pe/books/edition/Miner%C3%ADa_y_residuos_s%C3%B3lidos_Perspectiva/uN8aEQAAQBAJ

- Filali, R., Tian, H., Micheils, E., & Taidi, B. (2021). Evaluation of the growth performance of microalgae based on fine pH changes. *Austin Journal of Biotechnology & Bioengineering*, 8(1), 1109. <https://austinpublishinggroup.com/biotechnologybioengineering/fulltext/ajbtbe-v8-id1109.php>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1991). Manual de control de la calidad de los alimentos: Alimentos para la exportación (Vol. 6, p. 152). Food & Agriculture Organization. https://www.google.com.pe/books/edition/Manual_de_control_de_la_calidad_de_los_a/nBLc b61glbQC
- García, F., & Rosales, V. (2018). Eutrofización, una amenaza para el recurso hídrico. En Instituto de Investigaciones Económicas (Ed.), *Estudios sobre el recurso hídrico* (Vol. 2, pp. 177–...). Universidad Nacional Autónoma de México. https://ru.iiec.unam.mx/4269/1/2-Vol2_Parte1_Eje3_Cap5-177Garc%C3%ADa-Miranda.pdf
- García, I., Jácome, C., Riera, L., Rumiguano, C., Santillán, C., & Sisa, J. (2022). Biorremediación de aguas residuales agroindustriales mediante el cultivo de *Spirulina* sp y biomasa utilizada como suplemento alimenticio para animales. *Studies in Environmental and Animal Sciences*, 3(3), 596–615. <https://doi.org/10.54020/seasv3n3-009>
- Gonzales, C. (2018). Eficacia de un biofiltro a base de la microalga *Spirulina* sp para el tratamiento de las aguas residuales [Tesis de Ingeniería Ambiental, Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/34566>
- GRSA. (2022). Análisis de situación de salud. Gerencia Regional de Salud Arequipa. <https://www.saludarequipa.gob.pe/epidemiologia/ASIS/Asis2022/ASIS%202022.pdf>
- Guldhe, A., Kumari, S., Ramanna, L., Ramsundar, P., Singh, P., Rawat, I., & Bux, F. (2017). Prospects, recent advancements and challenges of different wastewater streams for microalgal cultivation. *Journal of Environmental Management*, 203, 299–315. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.012>

Habib, M. A. B., Parvin, M., Huntington, T. C., & Hasan, M. R. (2008). A review on culture, production and use of Spirulina as food for humans and feeds for domestic animals. FAO Fisheries and Aquaculture Circular, No. 1034.

<https://www.fao.org/3/i0424e/i0424e.pdf>

Hernández, A., & Labbe, J. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49(2), 157–173. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>

Herrera, J. (2021). Biodiversidad y ecología mexicana. Editorial UJED. https://www.google.com.pe/books/edition/Biodiversidad_y_ecolog%C3%ADa_mexicana/ZG4aEAAAQBAJ

Javier, J., & Toscano, R. (2023). Reducción de la materia orgánica de las aguas residuales del camal municipal de Supe, mediante plantas fitorremediadoras a escala piloto [Tesis de Ingeniería Ambiental, Universidad José Faustino Sánchez Carrión]. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/7519/pdf-JAVIER%20Y%20TOSCANO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Kumar, K. S., Dahms, H. U., Won, E. J., Lee, J. S., & Shin, K. H. (2015). Microalgae – A promising tool for heavy metal remediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 113, 329–352. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.019>

Li, K., Liu, Q., Fang, F., Luo, R., Lu, Q., Zhou, W., & Huo, S. (2019). Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: A review. *Bioresource Technology*, 291, 121934. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121934>

Lima, L. (2020). Efecto del vertimiento de aguas residuales domiciliarias en la calidad del agua en el río Sicra Lircay – Huancavelica 2018 [Tesis de Ingeniería Ambiental, Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8449>

Markou, G., & Georgakakis, D. (2011). Cultivation of filamentous cyanobacteria (blue-green algae) in agro-industrial wastes and wastewaters: A review. *Applied Energy*, 88(10), 3389–3401. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.042>

- Medina, I. (2020). Las microalgas, una alternativa para la remoción de materia orgánica de aguas residuales domésticas [Tesis de Ingeniería Química, Universidad de Pamplona]. http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/5354/1/Medina_20_20_TG.pdf
- Mesa, L., Romero, M., & Ortiz, M. (2018). La biorremediación con microalgas (*Spirulina máxima*, *Spirulina platensis* y *Chlorella vulgaris*) como alternativa para tratar la eutrofización de la laguna de Ubaque, Colombia. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 9(1), 163–176. <https://doi.org/10.19053/20278306.v9.n1.2018.8153>
- Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill Education. <https://www.mheducation.com/highered/product/wastewater-engineering-treatment-and-resource-recovery-metcalf-and-eddy.html?viewOption=student>
- Metsoviti, M., Papapolymerou, G., Karapanagiotidis, I., & Katsoulas, N. (2019). Comparación de la tasa de crecimiento y el contenido de nutrientes de cinco especies de microalgas cultivadas en invernaderos. *Plants*, 8(8), 279. <https://doi.org/10.3390/plants8080279>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2019). Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/protocolo-monitoreo-calidad-efluentes-las-plantas-tratamiento-0>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2010). Decreto Supremo N.º 003-2010-MINAM: Aprueban los estándares de calidad ambiental (ECA) para agua. <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/100956-003-2010-minam>
- Ministerio del Ambiente (MINAM). (2017). Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM: Estándares de calidad ambiental (ECA) para agua. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Morán, D. (2014). Diseño de planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz [Tesis de Ingeniería Ambiental, Universidad Rafael Landívar].

- Muguerza, R., & Villalobos, E. (2021). Evaluación del uso de algas para el tratamiento de metales pesados en aguas residuales industriales [Tesis de Ingeniería Ambiental, Universidad César Vallejo].
https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UCVV_d497b459c68c07c7829e5794f63d3da3
- MVCS. (2021). Plan nacional de saneamiento 2022–2026. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2586305-plan-nacional-de-saneamiento-2022-2026>
- Nadiri, A., Shokri, S., Tsai, F., & Asghari, A. (2018). Prediction of effluent quality parameters of a wastewater treatment plant using a supervised committee fuzzy logic model. *Journal of Cleaner Production*, 180, 539–549. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.139>
- Nevado, G. (2022). Evaluación y estudio de la eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales del distrito de Cayaltí en el departamento de Lambayeque 2020 [Tesis de Ingeniería Civil Ambiental, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo].
<http://hdl.handle.net/20.500.12423/4799>
- Nik , N., & Anijiofor, C. (2017). Livestock wastewater generation and farm management: The gap analysis. *Acta Horticulturae*, 1152, 265–271.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1152.36>
- Norma Técnica Peruana NTP 214.060. (s. f.). Aguas residuales: Protocolo de muestreo de aguas residuales no domésticas que se descargan en la red de alcantarillado.
<https://www.epsgrau.pe/webpage/controlador/archivos/23320.pdf>
- Olguín, E. J. (2012). Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a biorefinery. *Biotechnology Advances*, 30(5), 1031–1046. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.03.003>
- Ome, O., & Zafra, C. (2018). Factores clave en procesos de biorremediación para la depuración de aguas residuales: Una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2), 573–585. <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1037>

OMS. (2023). Agua para consumo humano. Organización Mundial de la Salud.
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017a). Guías para la calidad del agua de consumo humano: Cuarta edición, incorporando la primera adenda.
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/272403/9789243549958-spa.pdf>

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017b). Guías para la calidad del agua potable: Cuarta edición, que incorpora la primera adenda.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

Paucar, F., & Iturregui, P. (2020). Los desafíos de la reutilización de las aguas residuales en el Perú. South Sustainability.
<https://revistas.cientifica.edu.pe/index.php/southsustainability/article/view/599/659>

Pizarro, R. (2022). Evaluación de la remoción de coliformes totales y fecales por la microalga *Arthrospira platensis* (*Spirulina* sp) presentes en las aguas del río Huasahuasi-Tarma [Tesis de Ingeniería Ambiental, Universidad Católica Sedes Sapientiae].
<https://repositorio.ucss.edu.pe/handle/20.500.14095/2051>

Ramis, J. (2019). Aguas residuales urbanas.
https://www.google.com.pe/books/edition/Aguas_residuales_urbanas/wMfIDwAAQBAJ

Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T., & Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: phycoremediation of domestic wastewater and biomass production. *Applied Energy*, 88(10), 3411–3424. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025>

Rodríguez, Y. (2020). Metodología de la investigación. Klik.

Scherer, G. (2022). El meollo de la cuestión: Profundizar en los impactos globales desatendidos de los desechos humanos. Mongabay. <https://news.mongabay.com/2022/01/the-thick-of-it-delving-into-the-neglected-global-impacts-of-human-waste/>

- Sánchez, F. (2022). Tratamiento de aguas residuales de planta de beneficio bovino con cavitación hidrodinámica y subsecuente cultivo de microalgas [Tesis de Ingeniería Biotecnológica, Universidad Católica de Santa María]. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/d2711389-8a1a-4b4b-a876-3afaaff1356b/content>
- Sánchez, K. (2022). Efecto del porcentaje *Spirulina* sp. sobre la recuperación de aguas contaminadas por cadmio y arsénico mediante biorremediación en la laguna Piás [Tesis de maestría en Ciencias, Universidad Nacional de Trujillo]. <https://dspace.unitru.edu.pe/items/8347e726-999c-428b-94a3-ba8a0502aa9a>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2020). Datos climáticos de la región Arequipa. SENAMHI. <https://www.senamhi.gob.pe>
- Teqma. (2018). La importancia de la separación de aceites y grasas en el tratamiento del agua residual urbana. Iagua. <https://www.iagua.es/noticias/teqma/importancia-separacion-aceites-y-grasas-tratamiento-agua-residual-urbana>
- Vargas, L. (2022). Uso de la *Spirulina* en el tratamiento de aguas residuales de la producción y transformación pecuaria [Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. <https://hdl.handle.net/20.500.12494/46803>
- Zhai, J., Li, X., Li, W., Rahaman, M. H., Zhao, Y., Wei, B., & Wei, H. (2017). Optimization of biomass production and nutrients removal by *Spirulina platensis* from municipal wastewater. *Ecological Engineering*, 108, 83–92. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.07.023>
- Zhou, H., Li, X., Xu, G., & Yu, H. (2018). Overview of strategies for enhanced treatment of municipal/domestic wastewater at low temperature. *Science of the Total Environment*, 643, 225–237. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718321764>

ANEXOS



Anexo 1 Primera Sanción a la Municipalidad Distrital de Callalli por el ANA en el año 2016.



PERÚ

Ministerio
de Agricultura y Riego

Autoridad Nacional
del Agua

Autoridad Administrativa
del Agua I Caplina-Ocoña

"Año de la Consolidación del Mar de Grau"

RESOLUCIÓN DIRECTORAL

Nro. 2590 -2016-ANA/AAA I C-O

Arequipa, 29 OCT 2016

VISTO:

La Notificación N° 025-2014-ANA-AAAICO-ALA-CSCH que da inicio al procedimiento sancionador en contra de la **MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CALLALLI** ingresado con CUT N° 71873-2014.

CONSIDERANDO:

Que, la Autoridad Nacional del Agua es el ente rector y la máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional de Gestión de Recursos Hídricos, de conformidad con lo establecido en el artículo 14 de la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos.

Que, para el uso del recurso agua, salvo el uso primario, se requiere contar con derecho de uso otorgado por la Autoridad Nacional del Agua; siendo los derechos de uso de agua: permiso, autorización y licencia; de conformidad con lo dispuesto en los artículos 44° y 45° de la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos, dicho otorgamiento se viabiliza a través de sus órganos desconcentrados.

Que, el numeral 3) del artículo 230° de la Ley N° 27444 "Ley de Procedimiento Administrativo General", establece los Principios de la potestad sancionadora administrativa, entre los cuales menciona el Principio de Razonabilidad; por el cual las autoridades deben prever que la comisión de la conducta sancionable no resulte más ventajosa para el infractor que cumplir las normas infringidas o asumir la sanción; así como que la determinación de la sanción considere criterios como la existencia o no de intencionalidad, el perjuicio causado, las circunstancias de la comisión de la infracción y la repetición en la comisión de infracción.

Que, constituyen infracción en materia de agua, toda acción u omisión tipificada en la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos, de conformidad con lo establecido en el artículo 120° de dicha ley, donde además se establece el catálogo de infracciones, las cuales son desarrolladas en el artículo 277° del Reglamento de la citada Ley aprobado por Decreto Supremo N° 001-2010-AG.

Que, la Autoridad Nacional del Agua ejerce la facultad sancionadora ante cualquier infracción a las disposiciones contenidas en la Ley o al Reglamento por parte de las personas naturales o jurídicas públicas o privadas sean o no usuarios de agua, conforme lo dispuesto en el artículo 274° del Decreto Supremo N° 001-2010-AG.

Que, el artículo 284° del Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, aprobado por Decreto Supremo N° 001-2010-AG, establece que el procedimiento sancionador se iniciará de oficio cuando la Autoridad Administrativa del Agua tome conocimiento de la comisión de alguna conducta sancionable conforme a la legislación de aguas, o en mérito de una denuncia o reclamo, previa realización de diligencias preliminares, incluyendo inspección de ser el caso, para comprobar su verosimilitud.

Que, según la Directiva General N° 001-2012-ANA-J-DARH, concordada actualmente con la Directiva General N°007-2014-ANA-JDARH, la Administración Local de Agua Tambo Alto Tambo inició Procedimiento Administrativo Sancionador en contra de la Municipalidad Distrital de Deán Valdivia; imputándosele hechos que se tipifican en el Decreto Supremo 01-2010-AG "Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos", artículo 277°, literal b).

Que, el artículo 285° del precitado Reglamento, establece que el Administrador Local de Aguas notifica al presunto infractor sobre los hechos que se le imputan a título de cargo, la calificación de las infracciones que

AV. PUMACAHUA 520
CERRO COLORADO
AREQUIPA

Página 1 de 5

Teléfono: 054 497585



PERÚ

Ministerio
de Agricultura y Riego

Autoridad Nacional
del Agua

Autoridad Administrativa
del Agua I Caplina-Ocoña

"Año de la Consolidación del Mar de Grau"

Morón Urbina precisa que "La norma exige el principio de personalidad de las sanciones entendido como, que la asunción de la responsabilidad debe corresponder a quien incurrió en la conducta prohibida por la ley, y, por tanto no podrá ser sancionado por hechos cometidos por otros (...). Por ello, en principio, la Administración no puede hacer responsable a una persona por un hecho ajeno, sino solo por los propios".

Que, en aplicación supletoria de la norma de acuerdo al artículo 8° del Código Civil, referido a la diferencia entre persona jurídica y sus miembros señala: "la persona jurídica tiene existencia distinta de sus miembros y ninguno de este ni todos ellos tienen derecho al patrimonio de ella ni están obligados a satisfacer sus deudas". Por lo tanto, en los procedimientos administrativos sancionadores en los cuales la Administración ejerce su potestad sancionadora contra una persona jurídica, esta debe estar dirigida contra dicha entidad autónoma y no contra sus miembros, pues la persona jurídica es un ente distinto a las personas naturales que la integran.

Que, de acuerdo a lo dispuesto por el artículo 230° numeral 4) de la Ley del Procedimiento Administrativo General Ley N° 27444, que desarrolla el **Principio de Tipicidad** señala que solo constituye conductas sancionables administrativas las infracciones previstas expresamente en normas de rango de ley mediante su tipificación como tales, sin admitir interpretación extensiva o analogía. En el presente caso se encuentran acreditados los hechos constitutivos de infracción administrativa como haber efectuado vertimientos de agua residual doméstica en el punto de descarga ubicado en la coordenada UTM 8284467N -238569 E -238569 E Y 8284522 N - 237254 E, con caudales de 1.0 L y 2.0 L. Asimismo indicar que la coloración de las aguas residuales del primer punto (Santa Barbara - Callali) hacia el Río Llapa es negra y se ha formado una laguna con estas aguas, sin la respectiva autorización de la Autoridad Nacional del Agua, conforme especifica en el acta de inspección ocular a folio 03 a 14 de fecha 16.06.2014

Que, en el presente caso se han realizado averiguaciones e investigaciones y habiendo una comprobación plena de los hechos calificados como infracción, de la persona jurídica responsable, tal y como obra el acta de inspección ocular a folio 03 a 14. También en el numeral 8) del artículo 4° habla del **Principio de Causalidad** señalando que es este uno de los factores que determinan la responsabilidad de una persona en la comisión de una infracción. En virtud de este principio, solamente se puede sancionar a una persona cuando esta haya sido la que realizó la conducta sancionable, lo cual ha podido ser esclarecido a través del desarrollo del presente procedimiento administrativo y de los medios probatorios meritados de manera oportuna; de la revisión de las cuales no se evidencia la participación de presunto infractor. Así mismo, existiendo pruebas fehacientes para demostrar la imputación de los cargos atribuidos a la **Municipalidad Distrital de Callali**, corresponde imponerle una sanción pecuniaria de 2.1 UIT, por construir obras transitorias y permanentes en fuente natural de agua sin la debida autorización de la Autoridad Nacional del Agua.

Que, según el numeral 3) del artículo 230° de la Ley N°27444, Ley de Procedimiento Administrativo General, establece que el **Principio de Razonabilidad**: "Las autoridades deben prever que la comisión de la conducta sancionable no resulte más ventajosa para el infractor que cumplir las normas infringidas o asumir la sanción; así como que la determinación de la sanción considere criterios como la existencia o no de intencionalidad, el perjuicio causado, las circunstancias de la comisión de la infracción y la repetición en la comisión de infracción". Sin embargo, las sanciones a ser aplicadas deberán ser proporcionales al incumplimiento calificado como infracción, debiendo observar los siguientes criterios que en orden de prelación se señalan a efectos de su graduación: (a) La gravedad del daño al interés público y/o bien jurídico protegido; (b) El perjuicio económico causado; (c) La repetición y/o continuidad en la comisión de la infracción; (d) Las circunstancias de la comisión de la infracción; (e) El beneficio ilegalmente obtenido; y la existencia o no de intencionalidad en la conducta del infractor. (...)" En ese sentido, el artículo 121° de la Ley de Recursos Hídricos, en concordancia con el numeral 2) del artículo 278° del Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, precisa que: "Las infracciones en materia de agua son calificadas como leves, graves y muy graves, teniendo en cuenta los siguientes criterios: (a) Afectación o riesgo a la salud de la población, (b) beneficios económicos obtenidos por el infractor, (c) gravedad de los daños generados, (d) circunstancias de la comisión de la infracción, (e) impactos ambientales negativos, de acuerdo con la legislación vigente, (f) reincidencia, y (g) costos en que incurra el Estado para atender los daños generados. La calificación e imposición de sanciones en primera instancia corresponde a la Autoridad Administrativa del Agua."

Que, en el presente caso podemos precisar que la **Administración Local de Agua Colca Sigwas Chivay** mediante su Informe N° 0225-2014-ANA-AAA I-CO-ALA.CSCH, a folio 25 a 27 recomienda que se imponga una multa de 2.1 UIT, en mérito al siguiente cuadro:

AV. PUMACAHUA 520
CERRO COLORADO
AREQUIPA

Página 3 de 5

Teléfono: 054 497585

**PERÚ****Ministerio
de Agricultura y Riego****Autoridad Nacional
del Agua****Autoridad Administrativa
del Agua I Caplina-Ocoña****"Año de la Consolidación del Mar de Grau"**

CRITERIO	DESCRIPCION	N° FOLIO
Afectación o riesgo a la salud de la población	Presenta un riesgo elevado, ya que el vertimiento de aguas residuales se mezcla directamente con las aguas del río Llapa, incluso se ha formado una laguna con estas aguas residuales, y que hay usos primarios de las aguas del río Llapa.	9, 10, 15
Beneficios económicos obtenidos por infractor	La municipalidad tiene derecho de uso de agua autorizado por la Autoridad Nacional del Agua lo que genera un recibo de retribución económica por este uso de agua; adicionalmente cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, por lo cual debería de pagar una retribución económica por la cantidad de agua vertida, situación que no se da.	9, 17, 19
Gravedad de los daños causados	La gravedad es mayor, ya que se verificó la presencia de dos fuentes contaminantes, la del sector Santa Bárbara – Callalli, estas aguas residuales salen por rebose y se están acumulando en una laguna (de coloración verdosa) con olores nauseabundos, de donde salen e ingresan al río Llapa, y existe pasturas de animales por dicha zona y que hay usos de necesidad primaria para población asentada en la zona. Así mismo, la segunda fuente contaminante, salen las aguas residuales de la planta de tratamiento hacia la Quebrada Taucamayo de forma intermitente por una tubería de 6", en el momento de inspección no se encontró en funcionamiento esta tubería, pero se verificó que existe emanación de las aguas residuales en la parte posterior de su planta de tratamiento, que es por colapso miento o mucha acumulación de las aguas residuales dentro de este sistema, aguas que son conducidas hacia el Río Llapa.	1, 9, 10, 12, 13, 15,
Circunstancias de la comisión de la conducta infractora	No se tiene participación de parte de la municipalidad en las inspecciones que se han realizado, ya que no existe la preocupación por los impactos negativos hacia los ecosistemas circundantes al distrito de Callalli.	11, 14
Impactos ambientales negativos de acuerdo con legislación vigente	Existe un impacto negativo en lo paisajístico (olores) y en el agua (cambio de coloración). Adicionalmente que la laguna formada por esta aguas residuales, está cercana a la carretera de vía Callalli – Chivay.	9, 10, 12, 13, 14

En atención al análisis efectuado en el Informe Técnico de la **Administración Local del Agua Colca Sigwas Chivay**, señala que dichas infracción deben ser calificadas como grave, y la infracción ha sido debidamente acreditada y sustentada en el beneficio económico obtenido por la parte infractora y las circunstancias de la comisión de la infracción esta debe ser sancionada, con una multa de 2.1 Unidades Impositivas Tributarias.

Que, de acuerdo al numeral 6) del artículo 230° de la Ley N° 27444, sobre concurso de infracciones, ésta se da cuando una misma conducta califique como más de una infracción se aplicará la sanción prevista para la infracción de mayor gravedad, sin perjuicio que puedan exigirse las demás responsabilidades que establezcan las leyes. En el presente caso ambas infracciones la tipificada en el literal D) del artículo 28.3° del Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos son calificadas como graves pero de acuerdo al cronograma de hechos imputables, se ha determinado que una infracción es consecuencia o subsecuente de la otra, es por ello que se aplicará la sanción administrativa por la infracción D) "Efectuar vertimientos de aguas residuales en los cuerpos de agua (Río LLAPA), sin autorización de la Autoridad Nacional del Agua, infracción tipificada como grave.

Que, estando al contenido del Informe N°0671 -2016-ANA-AAA-I-CO-UAJ/GMMB, con el visto de la Unidad de Asesoría Jurídica, en ejercicio del artículo 23° de la Ley 29338 y el D.S. N° 06-2010 AG, Reglamento de Organización y Funciones de la Autoridad Nacional del Agua; esta Autoridad Administrativa del Agua I Caplina-Ocoña.

AV. PUMACAHUA 520
CERRO COLORADO
AREQUIPA

Página 4 de 5

Teléfono: 054 497585



PERÚ

Ministerio
de Agricultura y Riego

Autoridad Nacional
del Agua

Autoridad Administrativa
del Agua | Caplina-Ocoña

"Año de la Consolidación del Mar de Grau"

SE RESUELVE:

ARTÍCULO 1°.- Imponer sanción a la **Municipalidad Distrital de Callalli**, una multa de 2.1 Unidades Impositivas Tributarias, vigentes a la fecha de cancelación, por infracción a la Legislación de Recursos Hídricos, tipificada en el literal d) del art. 277° del Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, por "Efectuar vertimientos de aguas residuales en los cuerpos de agua sin autorización de la Autoridad Nacional del Agua (Rio Llapa)", de acuerdo a los argumentos expuestos en la parte considerativa de la presente, La misma que debe de ser cancelada, por el infractor en el Banco de la Nación, Cuenta Corriente N° 0000-877174 ANA- MUL TAS, concepto multas por interacción, en el plazo de quince días contados a partir de notificada la presente Resolución, bajo apercibimiento de que se incide el Procedimiento de Ejecución Coactiva debiendo alcanzar una copia del cupón de depósito a la Administración Local de Agua Colca Sigwas Chivay, dentro del tercer día de efectuado el mismo.

ARTÍCULO 2°.- Inscribir en el Libro de Sanciones, la sanción impuesta en el artículo precedente, una vez que quede consentida.

ARTÍCULO 3°.- Disponer como Medida Complementaria, a la **Municipalidad Distrital de Callalli** inicie el trámite de autorización de vertimientos de aguas residuales ante la Autoridad Nacional del Agua.

ARTÍCULO 4° Disponer como Medida Complementaria, la **Municipalidad Distrital de Callalli** deberá presentar un plan de contingencia para evitar la afectación a la calidad del agua del Rio Llapa, en dicho plan deberá incluir la ejecución de acciones inmediatas para evitar la continuidad en la afectación del recurso hídrico e inicie la ejecución inmediata de dicho programa, otorgándole un plazo no menor a dos (02) meses).

ARTÍCULO 5°.- Disponer que la Administración Local de Agua Colca Sigwas Chivay, supervise el cumplimiento de la medida complementaria dispuesta.

ARTÍCULO 6°.- Encargar a la Administración Local de Agua Colca sigwas Chivay la notificación de la presente resolución a la infractora.

REGÍSTRESE Y COMUNÍQUESE



AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA
AUTORIDAD ADMINISTRATIVA DEL AGUA
CAPLINA - OCOÑA
Ing. Isaac Martínez González
DIRECTOR

Cc. Arch
IMG/Gmb

Anexo 2 Segunda Sanción a la Municipalidad Distrital de Callalli por el ANA en el año 2022.



CUT: 95363-2021

RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° 0866-2022-ANA-AAA.CO

Arequipa, 17 de noviembre de 2022

VISTO:

La Notificación N° 0018-2022-ANA-AAA.CO-ALA.CSCH, que da inicio al Procedimiento Administrativo Sancionador en contra de la MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CALLALLI, RUC 20199731743 y domicilio en Plaza de Armas S/N - Callalli, distrito de Callalli, provincia de Caylloma, departamento de Arequipa signado con CUT N° **95363-2021**.

CONSIDERANDO:

Que, el artículo 284° del Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, aprobado por Decreto Supremo N° 001-2010-AG, establece que el procedimiento sancionador se iniciará de oficio cuando la Autoridad Administrativa del Agua tome conocimiento de la comisión de alguna conducta sancionable conforme a la legislación de aguas, o en mérito de una denuncia o reclamo, previa realización de diligencias preliminares, incluyendo inspección de ser el caso, para comprobar su verosimilitud.

Firmado digitalmente por MOLLO RESTAMANTE
Gonzalo Miguel F. Alz,
202201171865 hard
Fecha: 17/11/2022

Que, el artículo 285° del precitado Reglamento, establece que el Administrador Local de Agua notifica al presunto infractor sobre los hechos que se le imputan a título de cargo, la calificación de las infracciones que tales hechos pueden constituir y la expresión de las sanciones que, en su caso se le pudiera imponer, así como la norma que atribuya tal competencia.

Que, el numeral 3) del artículo 246 del TUO de la Ley N° 27444 "Ley de Procedimiento Administrativo General", establece los Principios de la potestad sancionadora administrativa, entre los cuales menciona el Principio de Razonabilidad; por el cual las autoridades deben prever que la comisión de la conducta sancionable no resulte más ventajosa para el infractor que cumplir las normas infringidas o asumir la sanción; así como que la determinación de la sanción considere criterios como la existencia o no de intencionalidad, el perjuicio causado, las circunstancias de la comisión de la infracción y la repetición en la comisión de infracción.

Que, la Resolución Jefatural N° 235-2018-ANA establece los Lineamientos para la tramitación del procedimiento administrativo sancionador por transgresión a la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos y su Reglamento, estableciendo las competencias del órgano instructor y sancionador, así como la mecánica operativa del procedimiento sancionador.

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado de ANA, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S 026-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través de la siguiente dirección web: <http://sisged.ana.gob.pe/consultas> e ingresando la siguiente clave : 333CE0F7

de “Efectuar vertimiento de aguas residuales en los cuerpos de agua o efectuar reúso de aguas sin la Autorización de la Autoridad Nacional del Agua”. En suma, contiene los siguientes supuestos:

- a. Verter aguas residuales en los cuerpos de agua.
- b. Efectuar el reúso de agua.

Ambas conductas se configuran como infracción al ser realizadas sin la autorización de la Autoridad Nacional del Agua¹.

Que, en el presente caso, se procederá al análisis y valoración del material probatorio en base tanto del criterio de valoración conjunta de las pruebas como del principio de libre valoración de las pruebas, principio que, como señala la Corte Suprema, implica “la potestad de otorgar el valor correspondiente a las pruebas sin directivas legales que lo predeterminen (...) el derecho de presunción de inocencia exige sobre el particular que las pruebas de cargo, que justifiquen una condena – o una sanción- además deben ser suficientes”. A este respecto, se aprecia lo siguiente respecto de la conducta sindicada a MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CALLALLI referida al vertimiento de agua residual a la Quebrada Taucamayo que es tributaria del río Llapa, proveniente de las aguas residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales Callalli, se encuentra acreditada con los siguientes medios probatorios:

a. Informe Técnico N° 0067-2022-ANA-AAA.CO-ALA.CSCH, ratificado mediante Informe Técnico N° 0028-2022-ANA-AAA.CO/JLFZ, que contienen un análisis de los hechos sindicados a el procesado y la apreciación de la comisión de la infracción por parte de la misma.

b. Acta de verificación técnica de campo de fecha 2021.07.05 en la que consta se verificó el vertimiento de agua residual a la Quebrada Taucamayo que es tributaria del río Llapa, proveniente de las aguas residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales Callalli, sin contar con la autorización de la Autoridad Nacional del Agua.

Que, en consecuencia, se puede concluir de manera racional y objetiva que se encuentra acreditada la comisión de la infracción y la culpabilidad de la procesada en la realización de los supuestos establecidos en el literal 9) del artículo 120 de la Ley de Recursos Hídricos, y asimismo en el artículo 277 literal d) del Decreto Supremo N° 01-2010-AG “Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos”, por lo que dichos medios probatorios quiebran la presunción de inocencia de la procesada, principio que, como señala el Tribunal Constitucional “(...) dispone la exigencia de un mínimo de suficiencia probatoria para declarar la culpabilidad, más allá de toda duda razonable”. La prueba de cargo ha de erradicar, en consecuencia, cualquier duda razonable.

Determinación y graduación de la sanción a imponer

Que, para poder efectuar una adecuada calificación de la gravedad de los hechos imputados al infractor, es necesario la aplicación del Principio de Razonabilidad, el mismo que supone tomar en consideración la proporcionalidad entre los hechos atribuidos como falta, la elección adecuada de las normas aplicables y la responsabilidad exigida (sanción aplicable); el resultado de esta valoración y evaluación llevará pues a adoptar una decisión razonable, debidamente motivada, proporcional y no arbitraria; por lo tanto, teniendo en cuenta estos parámetros podemos afirmar que los hechos imputados a la administrada, han sido tipificados como infracción de acuerdo a lo establecido en el numeral 9 del artículo 120 de la Ley de Recursos Hídricos y en el literal d) del artículo 277 de su Reglamento “Efectuar vertimiento de

¹ Resolución N° 139.2014-TNRCH. Fundamento 6.2.

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado de ANA, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S 026-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través de la siguiente dirección web: <http://sisged.ana.gob.pe/consultas> e ingresando la siguiente clave : 333CE0F7

aguas residuales en los cuerpos de agua sin autorización de la Autoridad Nacional del Agua", dicha conducta infractora debe ser calificada, por los hechos probados. En ese sentido, de acuerdo con lo expuesto y teniendo en consideración lo establecido en el Art. 278° del Reglamento de la Ley N° 29338 y el artículo 20 de la Resolución Jefatural N° 235-2018-ANA, la calificación más adecuada a los hechos imputados, es la de grave, los mismos que han sido verificados y analizados en: Informe Técnico N° 0067-2022-ANA-AAA.CO-ALA.CSCH, ratificado mediante Informe Técnico N° 0028-2022-ANA-AAA.CO/JLFZ, conforme al siguiente cuadro:

Criterio para calificar la infracción.	Descripción	Documento
Los beneficios económicos obtenidos por el infractor	Costos no asumidos para la tramitación de las autorizaciones correspondientes que implican el cumplimiento de los requisitos y asumir gastos de derechos de tramitación y de inspección ocular.	Informe Técnico N° 0067-2022-ANA-AAA.CO-ALA.CSCH, ratificado mediante Informe Técnico N° 0028-2022-ANA-AAA.CO/JLFZ
Afectación o riesgo a la salud de la población	Se identificó la PTAR Callalli con un suelo saturado, cuyas aguas residuales son derivadas mediante una tubería a un pozo artesanal con barrera de tierra y finalmente discurre sobre el suelo hasta llegar a la Quebrada Taucamayo. Durante la verificación se evidencia el punto de vertimiento con un caudal de 5l/s aproximadamente, en la margen derecha de la Quebrada Taucamayo que es tributaria del río Llapa y este llega al río Colca, aguas que son captadas con fines agrícolas que es utilizado por la comisión Anansaya a cargo de la Junta de Usuario del Sector Hidráulico Menor Valle del Colca y la Irrigación Majes	
La gravedad de los daños causados	Es elevada, ya que estas aguas residuales no tienen un proceso de autodepuración. Asimismo, la infracción es considerada grave por el Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos	Informe Técnico N° 0067-2022-ANA-AAA.CO-ALA.CSCH, ratificado mediante Informe Técnico N° 0028-2022-ANA-AAA.CO/JLFZ
Las circunstancias de la comisión de la conducta sancionable o infracción	El vertimiento de agua residual a la Quebrada Taucamayo que es tributaria del río Llapa, proveniente de las aguas residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales Callalli se realiza en las coordenadas UTM WGS84, 8284400N – 237204E, altitud 3845 m.s.n.m., con un caudal aproximado de 2 l/s. Asimismo, a la procesada se le comunico nuevamente, de la prohibición de realizar vertimiento de agua residual en cuerpo de agua natural, sin autorización, notificación de fecha 03.05.2022	Informe Técnico N° 0067-2022-ANA-AAA.CO-ALA.CSCH, ratificado mediante Informe Técnico N° 0028-2022-ANA-AAA.CO/JLFZ
Reincidencia	En el año 2016 se impone sanción a la Municipalidad Distrital de Callalli por efectuar vertimiento de agua residual hacia el cuerpo de agua Llapa, sin autorización de la ANA sancionando con una multa 2.1 UIT. Nuevamente se ha evidenciado que la Municipalidad Distrital de Callalli es	

Firmado digitalmente por
MIGUEL SUJESTAMANTE
Gonzalo Mayra FAU
2020711865 hard
Motivo:
Fecha: 17/11/2022

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado de ANA, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S 026-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través de la siguiente dirección web: <http://sisged.ana.gob.pe/consultas> e ingresando la siguiente clave : 333CE0F7

	responsable del vertimiento de agua residual hacia la Quebrada Taucamayo y río Llapa.	
Los costos en que incurre el Estado para atender los daños generados	Personal para notificar los documentos, verificación técnica de campo y bienes de servicio	Informe Técnico N° 0067-2022-ANA-AAA.CO-ALA.CSCH, ratificado mediante Informe Técnico N° 0028-2022-ANA-AAA.CO/JLFZ

Por tanto, y como consecuencia de lo desarrollado precedentemente, corresponde aplicar a la MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CALLALI de una multa de 4,5 UIT (cuatro coma cinco Unidades Impositivas Tributarias).

Determinación de la medida complementaria a establecer

Que, en relación a la medida complementaria, el artículo 289 del Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, señala que las sanciones que imponga la Autoridad Nacional del Agua no eximen al infractor de la obligación de reponer las cosas a su estado original, ya sea demoliendo las obras indebidamente ejecutadas, clausurando el pozo, reparando las obras dañadas o subsanando las deficiencias o acciones que originaron la falta o pagando el costo de las demoliciones o reparaciones; lo que se concuerda con el artículo 25 de la Resolución Jefatural N° 235-2018-ANA. Al respecto, la Municipalidad Distrital de Callali en un plazo no menor de dos (02) meses, deberá elaborar y presentar un plan de contingencia para evitar la afectación a la calidad de agua, dicho plan deberá incluir la ejecución de acciones inmediatas para evitar la continuidad a la afectación del recurso hídrico, bajo apercibimiento de iniciar un procedimiento de ejecución coactiva.

Que, estando a lo opinado por el Área Legal en uso de las atribuciones conferidas mediante Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos y su reglamento, aprobado por Decreto Supremo N° 001-2010-AG; concordantes con el Decreto Supremo N° 0018-2017-MINAGRI, norma que aprueba el Reglamento de Organización y Funciones de la Autoridad Nacional del Agua, con lo establecido en las Resoluciones Jefaturales N° 050-2010 - ANA y N° 243-2022-ANA.

RESUELVE:

ARTÍCULO 1º.- Establecer la responsabilidad de la MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CALLALI por infracción establecida en el numeral 9 del artículo 120 de la Ley de Recursos Hídricos y en el literal d) del artículo 277 de su Reglamento "Efectuar vertimiento de aguas residuales en los cuerpos de agua sin autorización de la Autoridad Nacional del Agua", por los argumentos expuestos en los considerandos anteriores.

ARTÍCULO 2º.- IMPONER la sanción a la MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CALLALI, con una multa ascendente a 4,5 UIT (cuatro coma cinco Unidades Impositivas Tributarias, vigentes a la fecha de cancelación, la misma que debe de ser cancelada, por el infractor en el Banco de la Nación, Cuenta Corriente N° 0000-877174 ANA- MULTAS, concepto multas por infracción, en el plazo de quince días contados a partir de notificada la presente Resolución, bajo apercibimiento de que se inicie el Procedimiento de Ejecución Coactiva debiendo alcanzar una copia del cupón de depósito a la Administración Local de Colca Sigvas Chivay, dentro del tercer día de efectuado el mismo.

ARTÍCULO 3º.- ESTABLECER como medida complementaria que la MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CALLALI, en un plazo no menor de dos (02) meses, deberá elaborar y presentar un plan de contingencia para evitar la afectación a la calidad de agua, dicho plan

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado de ANA, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través de la siguiente dirección web: <http://sisged.ana.gob.pe/consultas> e ingresando la siguiente clave : 333CE0F7



Firmado digitalmente por
FERNANDEZ BRAVO Ronal Hamilton
FAU 20520711965 hard
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 17/11/2022

deberá incluir la ejecución de acciones inmediatas para evitar la continuidad a la afectación del recurso hídrico, bajo apercibimiento de iniciar un procedimiento de ejecución coactiva.

ARTÍCULO 3°.- Disponer que el Área Administrativa notifique a la Dirección de Administración de Recursos Hídricos la presente resolución incluyendo el cargo de su notificación, para la inscripción en el Registro de Sanciones.

ARTÍCULO 4°.- **Notificar** la presente resolución a la MUNICIPALIDAD DISTRITAL DE CALLALI.

Regístrese y comuníquese,

FIRMADO DIGITALMENTE

RONAL HAMILTON FERNANDEZ BRAVO
DIRECTOR
AUTORIDAD ADMINISTRATIVA DEL AGUA - CAPLINA OCOÑA

RHFB/JJRA

Firmado digitalmente
por MOLLO BUSTAMANTE
Gloria Mayra FAU
20520711965 hard
Fecha: 17/11/2022

Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado de ANA, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S 026-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través de la siguiente dirección web: [Url:http://sisged.ana.gob.pe/consultas](http://sisged.ana.gob.pe/consultas) e ingresando la siguiente clave : 333CE0F7

Anexo 3 Requisitos para toma de muestra de agua residual y preservación de las muestras para el monitoreo.

Determinación/Parámetro	Recipiente	Volumen mínimo de muestra (1)	Preservación y concentración	Tiempo máximo de duración
Fisicoquímico				
Temperatura	P,V	1000 mL	No es posible	15 min
pH (2)		50 mL	No es posible	15 min
DBO ₅ (3)	P,V	1000 mL	Refrigerar a 4°C	48 horas
DQO (3)	P,V	100 mL	Analizar lo más pronto posible, o agregar H ₂ SO ₄ hasta pH<2; refrigerar a 4°C	28 días
Aceites y grasas	V, ámbar boca ancha calibrado	1000 mL	Agregar HCl hasta pH<2, refrigerar a 4°C	28 días
Sólidos suspendidos Totales (SST)	P,V	100 mL	Refrigerar a 4°C	7 días
Microbiológico				
Coliformes termotolerantes (NMP)	V, esterilizado	250 mL	Refrigerar a 4°C Agregar tiosulfato en plantas con cloración	6 horas

- (1) No hay restricción para el volumen máximo de la muestra.
- (2) En el caso de lagunas de estabilización, la medición del efluente debe realizarse entre las 10:00 y las 11:00 horas para evitar la interferencia del desequilibrio del sistema carbonatado por alta actividad fotosintética que se da en las horas de mayor radiación solar.
- (3) En caso de lagunas de estabilización, filtrar las muestras de los efluentes (filtro no mayor a 1 micra de porosidad, lo cual debe ser reportado con los resultados del ensayo) para eliminar la interferencia de algas, determinando de este modo la DBO y DQO, soluble o filtrada. No se debe filtrar las muestras si los efluentes son vertidos en cuerpos de agua lenticos (lagunas, lagos, bahías, etc.).

Leyenda: P = frasco de plástico o equivalente;
V = frasco de vidrio

Anexo 4 Límites Máximo Permisibles (LMP) para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales (PTAR), para el sector Vivienda.

ANEXO

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA LOS EFLUENTES DE PTAR

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP DE EFLUENTES PARA VERTIDOS A CUERPOS DE AGUAS
Acelites y grasas	mg/L	20
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	10,000
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	100
Demanda Química de Oxígeno	mg/L	200
pH	unidad	6.5-8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mL/L	150
Temperatura	°C	<35

Anexo 5. Informes de ensayos

UNSA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

INFORME DE ENSAYOS

N° DE REPORTE: 25595-25

CLIENTE: ANGELA BELEN LAURA MALDONADO
YESELIN YEISY HUACHANI CHULLO

DIRECCIÓN: AREQUIPA

ENSAYO SOLICITADO: ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO

PRODUCTO: AGUA RESIDUAL

CANTIDAD DE MUESTRA: 01

FECHA DE RECEPCIÓN: Lunes, 13 de enero De 2025

CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES: FRASCO DE PLÁSTICO

FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS: Martes, 04 de febrero de 2025

REFERENCIA: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE

PROCEDENCIA: AGUA RESIDUAL PTAR DE CALLALLI

CÓDIGO DE MUESTRA: 32062

LOS RESULTADOS OBTENIDOS CORRESPONDEN AL ANÁLISIS SOLICITADO EN LA MUESTRA RECIBIDA.
ESTE FORMATO NO SERÁ REPRODUCIDO SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO LABINVSERV

Página 1 de 2

Ax. Independencia s/n Arequipa - Pabellón de Química - Laboratorio 108 - Primer Piso
Teléfono (054) 220356 / E-mail: font_labinserv@unsa.edu.pe

INFORME DE ENSAYOS

INFORME DE ENSAYOS REPORTE N°: 25595-2

ANÁLISIS DE:	UNIDAD	RESULTADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO NORMA/REFERENCIA/NOMBRE
pH		8.47	Método de la AOAC
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	700.00	Método de la AOAC
Turbidez	NTU	35.0	Método de la AWWA
DBO ₅	mg/L O ₂	557.82	Método de la AWWA
DQO	mg/L O ₂	2 756.12	Método de la AWWA
Aceites y Grasas	mg/L	38.75	Método de la AWWA
Sólidos Suspendidos	mg/L	39.00	Método Gravimétrico de la AWWA
OBSERVACIONES:			

Página 2 de 2

Emisido en Arequipa, el 04 de febrero de 2025.


Dira. Miriam Vilma Murga Murga
Coordinadora(e) del Laboratorio
RCQP - 259




Lic. Freddy Agustín Valderrama Peñar
Químico Responsable
RCQP - 842

INFORME DE ENSAYOS

N° DE REPORTE: 25675-25
CLIENTE: ANGELA BELEN LAURA MALDONADO
YESELIN YEISY HUACHANI CHULLO
DIRECCIÓN: AREQUIPA
ENSAYO SOLICITADO: ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO
PRODUCTO: AGUA RESIDUAL
CANTIDAD DE MUESTRA: 01
FECHA DE RECEPCIÓN: Lunes, 10 de febrero de 2025
CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES: FRASCO DE PLÁSTICO
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS: Miércoles, 12 de marzo de 2025
REFERENCIA: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE
PROCEDENCIA: AGUA RESIDUAL PTAR DE CALLALI.
CÓDIGO DE MUESTRA: 320145

RESULTADOS OBTENIDOS CORRESPONDEN AL ANÁLISIS SOLICITADO EN LA MUESTRA
ESTE FORMATO NO SERÁ REPRODUCIDO SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO LA



UNSA

Laboratorio de
Investigación y Servicios
LABINVSERV

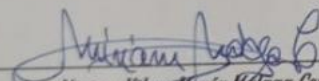
INFORME DE ENSAYOS

REPORTE N°: 25675-25

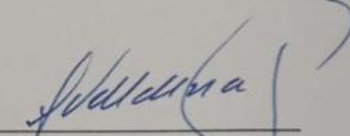
ANÁLISIS DE:	UNIDAD	RESULTADOS	METODO DE ENSAYO APLICADO NORMA/REFERENCIA/NOMBRE
pH		9.15	Método de la AOAC
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	4 930.00	Método de la AOAC
Turbidez	NTU	5.20	Método de la AWWA
DBO ₅	mg/L O ₂	180.44	Método de la AWWA
DQO	mg/L O ₂	2 436.31	Método de la AWWA
Aceites y Grasas	mg/L	41.00	Método de la AWWA
Sólidos Suspendedos	mg/L	22.00	Método Gravimétrico de la AWWA
OBSERVACIONES:			

Página 2 de 2

mitido en Arequipa, el 12 de marzo de 2025.


Dra. Miriam Vilma María Málaga Cornejo
Coordinadora(e) del Laboratorio
RCQP - 259




Lta. Quím. Fredy Agustín Valdivia Peña
Químico Responsable
RCQP - 842

Anexo 6 Operacionalización de variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADOR	DIMENSIONES Y UNIDADES
Tratamiento de aguas residuales	El tratamiento de aguas residuales es un conjunto de procesos ingenieriles diseñados para depurar aguas contaminadas, eliminando los agentes contaminantes y restaurando sus características naturales, con el fin de preservar la calidad de los cuerpos de agua receptores y promover su reutilización.	El proceso de tratamiento de aguas residuales implica una secuencia de etapas unitarias, cada una con objetivos específicos, que varían en función de la composición del agua residual y los estándares de calidad exigidos, sus etapas comprenden pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciaria.	Ph Temperatura Turbidez DQO DBO ₅ Conductividad Sólidos Suspendidos Aceites y Grasas	- Celsius C° NTU Mg O ₂ / L Mg O ₂ / L µS/cm mg/L mg/L
VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	INDICADOR	DIMENSIONES Y UNIDADES
Reducción del DBO ₅ Y DQO	El tratamiento de aguas residuales constituye un conjunto de tecnologías aplicadas para la depuración de aguas residuales, con el objetivo de reducir su carga contaminante y cumplir con los estándares de calidad establecidos, garantizando así la protección del medio ambiente y la salud pública.	El tratamiento de aguas residuales involucra una serie de procesos secuenciales que pueden variar en complejidad, según la naturaleza de las aguas residuales a tratar con sus condiciones de adaptabilidad, terminología Inactivación de microorganismos patógenos, generalmente mediante la aplicación de desinfectantes químicos o procesos físicos.	DBO ₅ DQO	Mg O ₂ / L Mg O ₂ / L

Anexo 7 Panel fotográfico

7.1. Descarga de aguas residuales tratadas de la PTAR Callalli con características similares al afluente.



7.2. Muestreo de agua residual en PTAR Callalli.



7.3. Etapas del procedimiento de cultivo de *Spirulina sp.*



7.4. Implementación del biofiltro y adición de *Spirulina sp.* en el sistema de tratamiento.



7.5. Sistema de biofiltración en operación con aguas residuales, evidenciando el medio filtrante y el desarrollo de *Spirulina sp*



Anexo 8 Diagrama experimental por etapas

