

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



REMOCIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS EN UN EFLUENTE LÁCTEO
APLICANDO LA MICROALGA *Scenedesmus* sp. EN CAJAMARCA

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

WILLIAM JAROLD BAUTISTA GALLEGOS

Asesores:

Mchlgo. MSc. LUIS ALBERTO SÁNCHEZ ROMERO

Blgo. MSc. MARCO ALFREDO SÁNCHEZ PEÑA

Tingo maría – Perú

2022



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
Tingo María – Perú

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 025-2022-FRNR-UNAS

Los que suscriben, miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 18 de mayo de 2022 a horas 04:20 p. m. a través de la Sala Virtual de Conferencias Microsoft Teams de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la Tesis titulada:

“REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN EFLUENTES LÁCTEOS POR LA MICROALGA *Scenedesmus sp* – CAJAMARCA 2020”

Presentado por la Bachiller: **BAUTISTA GALLEGOS, William Jarold**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENO”**

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título correspondiente.

Tingo María, 20 de junio de 2022

Ing. M. Sc. **FRANKLIN DIONISIO MONTALVO**
PRESIDENTE

Ing. M. Sc. **SANDRA LORENA ZAVALA GUERRERO**
MIEMBRO

Ing. M. Sc. **ABBY SOLANGE DA CRUZ RODRIGUEZ**
MIEMBRO

Ing. M. Sc. **LUIS ALBERTO SANCHEZ ROMERO**
ASESOR





UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
REPOSITORIO INSTITUCIONAL DIGITAL
(RIDUNAS)

Correo: repositorio@unas.edu.pe



“Año de la unidad, la paz y el desarrollo”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 176 - 2023 - CS-RIDUNAS

El Coordinador de la Oficina de Repositorio Institucional Digital de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El trabajo de investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Facultad:

Facultad de Recursos Naturales Renovables

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de investigación	
-------	---	--------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
REMOCIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS EN UN EFLUENTE LÁCTEO APLICANDO LA MICROALGA <i>Scenedesmus</i> sp. EN CAJAMARCA	WILLIAM JAROLD BAUTISTA GALLEGOS	18% Dieciocho

Tingo María, 03 de julio de 2023


Mg. Ing. García Villegas, Christian
Coordinador del Repositorio Institucional
Digital (RIDUNAS)

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



REMOCIÓN DE CONTAMINANTES ORGÁNICOS EN UN EFLUENTE LÁCTEO
APLICANDO LA MICROALGA *Scenedesmus* sp. EN CAJAMARCA

Autor	: William Jarold Bautista Gallegos
Asesores	: Mclgo. MSc. Luis Alberto Sánchez Romero : Blgo. MSc. Marco Alfredo Sánchez Peña
Programa de investigación	: Ciencia y Tecnologías Ambientales
Línea de investigación	: Tratamiento de aguas
Eje temático	: Reducción de contaminantes del agua
Lugar de ejecución	: Cajamarca
Duración	: 6 meses
Financiamiento	: Monto S/. 5 475,50 FEDU : --- Propio : S/. 5475,50 Otros : ---

Tingo María – Perú. 2022

DEDICATORIA

A mis madres Rosalyn Gallegos, Flor Flores y Victoria Zapata, por apoyarme en todo momento y jamás perder las esperanzas en mí; por siempre estar motivándome a seguir adelante, es por ello que son y siempre serán mi gran inspiración y motivo para seguir logrando mis objetivos.

A mis padres Luis Rebaza y Juan Bautista por sus grandes consejos que siempre recordaré y atesoraré con todo mi corazón, aunque ya no estén aquí conmigo.

A mi hermanita Rosalinda Gallegos, por estar siempre animándome, brindándome todo su amor y apoyo, y ser mi gran motivo para continuar avanzando.

A mi prima Brijih Gallegos, mi tío José Gallegos y mi tía Magaly Gallegos, por apoyarme y aconsejarme siempre.

A mi tío Juan José Bautista, por aconsejarme, estar siempre presente en cada circunstancia y brindarme todo su apoyo y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

A mi amado Padre Celestial por brindarme salud, cuidar de mi familia, darme la fuerza necesaria para seguir adelante sobre todo ante la situación actual, además de otorgarme su compasión, bondad e inmenso amor.

A mi madre por el sacrificio que hizo para brindarme una buena educación.

A mis abuelitos por inculcarme valores, cuidar de mí y aconsejarme para ser una mejor persona.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por aceptarme; a la facultad de Recursos Naturales Renovables y en especial a la escuela profesional de Ingeniería Ambiental por brindarme su apoyo en todo este tiempo.

Al Dr. Bcnlgo. Mcblgo. Cesar Samuel López López, por su gran apoyo, constante orientación y por siempre guiarme en todo el proceso.

Al Mcblgo. MSc. Luis Alberto Sánchez Romero, por su asesoramiento eficaz, por su gran apoyo, y que siempre estuvo dispuesto a compartir sus conocimientos para que el presente trabajo se lleve a cabo de la mejor manera.

Al Blgo. MSc. Marco Alfredo Sánchez Peña, por su asesoramiento eficaz y continuo, su gran apoyo y compartir sus conocimientos los cuales permitieron que el presente trabajo se realice de una manera correcta.

A los miembros del jurado de tesis quienes con su amplia experiencia, aportaron con sus conocimientos para que el trabajo se realice de manera adecuada.

Al Ing. MSc. Franklin Dionisio Montalvo quien con su gran orientación permitió que el presente trabajo se realice de manera eficaz acorde a las normas de redacción establecidas por la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general.....	3
1.2. Objetivos específicos	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Estado del arte.....	4
2.2. Marco teórico.....	9
2.2.1. Aguas residuales	9
2.2.2. Límites máximos permisibles de efluentes de aguas residuales tratados	11
2.2.3. Etapas del tratamiento de aguas residuales.....	12
2.2.4. Microalgas	12
2.2.5. Scenedesmus sp.	14
III. MATERIALES Y MÉTODOS	17
3.3. Lugar de ejecución.....	17
3.3.1. Ubicación política	17
3.3.2. Accesibilidad	17
3.3.3. Condiciones ambientales	18
3.3.4. Hidrología	18
3.4. Material y métodos	18
3.4.1. Materiales y equipos	18
3.4.2. Metodología.....	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.3. Caracterización del agua residual	28
4.4. Aplicación de tratamientos	29
4.4.1. Tratamiento T1	29
4.4.2. Tratamiento T2	30

4.4.3. Tratamiento T3	31
4.5. Porcentaje de remoción.....	32
4.6. Relación entre cantidad de microalgas Scenedesmus sp., y los parámetros de calidad de agua residual.....	36
4.7. Comprobación de la hipótesis de investigación.....	39
V. CONCLUSIONES	44
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	45
VII. REFERENCIAS.....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Parámetros cuantitativos que determinan la calidad del agua.	9
2. Límites de los estándares de calidad ambiental en conservación del ambiente acuático.	11
3. Condiciones para el cultivo de <i>Scenedesmus</i> sp. (Turpin).	16
4. Ubicación de la zona de estudio y ejecución.	17
5. Límites de los distritos de Baños del Inca y de Cajamarca.	18
6. Técnicas de investigación que fueron empleadas en función de los objetivos propuestos.	20
7. Niveles máximos y mínimos de la variable independiente.	26
8. Variables.	26
9. Indicadores.	27
10. Resultados de la caracterización del agua residual.	28
11. Resultados obtenidos del cálculo de los parámetros iniciales para cada tratamiento.	33
12. Resultados del análisis de normalidad de datos para los resultados de porcentaje de remoción.	37
13. Resultados del análisis de correlación de Pearson.	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Scenedesmus obliquus visto al microscopio a 100X.	15
2. Mapa de ubicación del área de estudio.	17
3. Procedimiento experimental.	23
4. Diagrama del diseño experimental aplicado.	24
5. Resultados de la caracterización del agua residual.	29
6. Resultados del tratamiento T1.	29
7. Resultados del tratamiento T2.	30
8. Resultados del tratamiento T3.	31
9. Resultados para los tratamientos control (100% microalgas).	32
10. Resultados de los porcentajes de remoción de DBO5, DQO, SST y Aceites y Grasas por cada tratamiento.	35
11. Porcentajes de remoción de DBO5 y DQO.	38
12. Porcentajes de remoción de SST y Aceites y Grasas.	39
13. Porcentajes de remoción promedio de contaminantes por tratamiento.	40

DEDICATORIA

A mis madres Rosalyn Gallegos, Flor Flores y Victoria Zapata, por apoyarme en todo momento y jamás perder las esperanzas en mí; por siempre estar motivándome a seguir adelante, es por ello que son y siempre serán mi gran inspiración y motivo para seguir logrando mis objetivos.

A mis padres Luis Rebaza y Juan Bautista por sus grandes consejos que siempre recordaré y atesoraré con todo mi corazón, aunque ya no estén aquí conmigo.

A mi hermanita Rosalinda Gallegos, por estar siempre animándome, brindándome todo su amor y apoyo, y ser mi gran motivo para continuar avanzando.

A mi prima Brijih Gallegos, mi tío José Gallegos y mi tía Magaly Gallegos, por apoyarme y aconsejarme siempre.

A mi tío Juan José Bautista, por aconsejarme, estar siempre presente en cada circunstancia y brindarme todo su apoyo y comprensión.

AGRADECIMIENTOS

A mi amado Padre Celestial por brindarme salud, cuidar de mi familia, darme la fuerza necesaria para seguir adelante sobre todo ante la situación actual, además de otorgarme su compasión, bondad e inmenso amor.

A mi madre por el sacrificio que hizo para brindarme una buena educación.

A mis abuelitos por inculcarme valores, cuidar de mí y aconsejarme para ser una mejor persona.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por aceptarme; a la facultad de Recursos Naturales Renovables y en especial a la escuela profesional de Ingeniería Ambiental por brindarme su apoyo en todo este tiempo.

Al Dr. Bcnlgo. Mcblgo. Cesar Samuel López López, por su gran apoyo, constante orientación y por siempre guiarme en todo el proceso.

Al Mcblgo. MSc. Luis Alberto Sánchez Romero, por su asesoramiento eficaz, por su gran apoyo, y que siempre estuvo dispuesto a compartir sus conocimientos para que el presente trabajo se lleve a cabo de la mejor manera.

Al Blgo. MSc. Marco Alfredo Sánchez Peña, por su asesoramiento eficaz y continuo, su gran apoyo y compartir sus conocimientos los cuales permitieron que el presente trabajo se realice de una manera correcta.

A los miembros del jurado de tesis quienes con su amplia experiencia, aportaron con sus conocimientos para que el trabajo se realice de manera adecuada.

Al Ing. MSc. Franklin Dionisio Montalvo quien con su gran orientación permitió que el presente trabajo se realice de manera eficaz acorde a las normas de redacción establecidas por la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Objetivo general.....	10
1.2. Objetivos específicos	10
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	11
2.1. Estado del arte.....	11
2.2. Marco teórico.....	16
2.2.1. Aguas residuales	16
2.2.2. Límites máximos permisibles de efluentes de aguas residuales tratados	18
2.2.3. Etapas del tratamiento de aguas residuales.....	19
2.2.4. Microalgas	20
2.2.5. Scenedesmus sp.	22
III. MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.3. Lugar de ejecución.....	24
3.3.1. Ubicación política	24
3.3.2. Accesibilidad	25
3.3.3. Condiciones ambientales	25
3.3.4. Hidrología	26
3.4. Material y métodos	26
3.4.1. Materiales y equipos	26
3.4.2. Metodología.....	26
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.3. Caracterización del agua residual	35
4.4. Aplicación de tratamientos	36
4.4.1. Tratamiento T1	36
4.4.2. Tratamiento T2	37

4.4.3. Tratamiento T3	38
4.5. Porcentaje de remoción.....	39
4.6. Relación entre cantidad de microalgas <i>Scenedesmus</i> sp., y los parámetros de calidad de agua residual.....	43
4.7. Comprobación de la hipótesis de investigación.....	46
V. CONCLUSIONES	51
VI. PROPUESTAS A FUTURO.....	52
VII. REFERENCIAS.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Parámetros cuantitativos que determinan la calidad del agua.	17
2. Límites de los estándares de calidad ambiental en conservación del ambiente acuático.	18
3. Condiciones para el cultivo de <i>Scenedesmus</i> sp. (Turpin).	23
4. Ubicación de la zona de estudio y ejecución.	24
5. Límites de los distritos de Baños del Inca y de Cajamarca.	25
6. Técnicas de investigación que fueron empleadas en función de los objetivos propuestos.	28
7. Niveles máximos y mínimos de la variable independiente.	33
8. Variables.	33
9. Indicadores.	34
10. Resultados de la caracterización del agua residual.	35
11. Resultados obtenidos del cálculo de los parámetros iniciales para cada tratamiento.	40
12. Resultados del análisis de normalidad de datos para los resultados de porcentaje de remoción.	44
13. Resultados del análisis de correlación de Pearson.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Scenedesmus obliquus visto al microscopio a 100X.	23
2. Mapa de ubicación del área de estudio.	25
3. Procedimiento experimental.	30
4. Diagrama del diseño experimental aplicado.	31
5. Resultados de la caracterización del agua residual.	36
6. Resultados del tratamiento T1.	36
7. Resultados del tratamiento T2.	37
8. Resultados del tratamiento T3.	38
9. Resultados para los tratamientos control (100% microalgas).	39
10. Resultados de los porcentajes de remoción de DBO5, DQO, SST y Aceites y Grasas por cada tratamiento.	42
11. Porcentajes de remoción de DBO5 y DQO.	45
12. Porcentajes de remoción de SST y Aceites y Grasas.	46
13. Porcentajes de remoción promedio de contaminantes por tratamiento.	47

RESUMEN

La investigación tuvo por objetivo determinar los niveles de remoción de contaminantes en un efluente de agua residual de una industria de lácteos aplicando la microalga *Scenedesmus* sp. Para ello se utilizó una muestra de agua residual proveniente de una planta quesera a la que se le aplicaron pruebas de laboratorio para su caracterización (DBO₅, DQO, SST y Aceites y grasas) para luego ser tratada con la microalga *Scenedesmus* sp., mediante un diseño experimental que constó de tres tratamientos con microalgas (T1 = 950 ml, T2 = 900 ml y T3 = 850 ml) con dos réplicas cada uno y dos tratamientos control (100% microalgas). Se realizó un análisis descriptivo de los parámetros DBO₅, DQO, SST y Aceites y grasas luego de nueve días de tratamiento, se determinó los porcentajes de remoción, así como pruebas de correlación para determinar las relaciones entre los tratamientos y los porcentajes de remoción de los contaminantes en el agua residual. Se obtuvo que los porcentajes máximos de remoción de contaminantes fueron DBO₅ = 74,2%, DQO = 68,6%, SST = 26,6% y Aceites y grasas = 98,7%. Las cantidades de microalgas se correlacionan significativamente y muy fuerte con los porcentajes de remoción de forma inversa para DBO₅ y DQO, y positivamente para SST y Aceites y grasas. De forma general se obtuvo que el porcentaje de remoción de contaminantes de las microalgas fue de 52,2%; lo que demostró la eficiencia de las mismas para el tratamiento de aguas efluentes lácteas.

Palabras clave: Aguas efluentes, parámetros fisicoquímicos tratamiento con microalgas, *Scenedesmus* sp., eficiencia de remoción.

ABSTRACT

The objective of the research was to determine the levels of pollutant removal in wastewater effluents from dairy industry by applying the microalgae *Scenedesmus* sp. A sample of wastewater from a cheese plant was used for its characterization (BOD₅, COD, TSS, and oils and fats) and then treated with microalgae *Scenedesmus* sp., using an experimental design consisting of three treatments with microalgae (T1 = 950 ml, T2 = 900 ml, and T3 = 850 ml) with two replicates each, and two control treatments (100% microalgae). A descriptive analysis of the parameters BOD₅, COD, TSS, and oils and fats was performed after nine days of treatment, and the removal percentages were determined, as well as correlation tests to determine the relationships between the treatments and the removal percentages of the pollutants in the wastewater. The maximum pollutant removal percentages were BOD₅ = 74,2%, COD = 68,6% TSS = 26,6%, and Oils and Fats = 98,7%. The amounts of microalgae correlated significantly and very strongly with the removal percentages of pollutant removal by microalgae was 52,2%, which demonstrated the efficiency of microalgae for the treatment of dairy effluent water.

Key words: Effluent water, physicochemical parameters, microalgae treatment, *Scenedesmus* sp., removal efficiency.

I. INTRODUCCIÓN

La producción de residuos es una de las particularidades por el que se define las familias. Básicamente se aprecia que el 23% de la sociedad a nivel mundial quienes viven en países prósperos, se puede decir que consumen un aproximado del 78% de los recursos tal es así que suelen llegar a producir el 82% de los residuos (Cáceres, 2002).

Entre los elementos que causa el aumento de industrialización, acentúa importantemente, el crecimiento poblacional. Aunado a esto, se estima un crecimiento en la demanda de agua del 400% para la producción industrial entre el año 2000 y el 2500 (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la ciencia y la cultura [UNESCO], 2015). Lo que se ve reflejado en un gran crecimiento de las aguas residuales, que en la mayoría de los casos se vierten a los cursos de agua sin un tratamiento previo, provocando cambios significativos en el ciclo biogeoquímico general, con la continua formación del anómalo de la eutrofización. Se encuentra en los primordiales impactos de dicha anomalía, se acentúa la propagación de algas, la baja del oxígeno disuelto en agua, la falta de crecimiento en la fauna y la aparición de cianotoxinas (Salgueiro, 2018).

Se estima que el volumen de descargas domésticas causadas por América del Norte, Europa y América Latina sea de un aproximado entre 70, 63 y 47 km³ por año, respectivamente (UNESCO, 2015). En Latinoamérica, menos del 20% del agua residual recibe un tratamiento adecuado, mientras que, en Perú, el 70,9% de las mismas (530 millones de m³/año) no son tratadas (Ávila, 2015).

Perú produce cerca de 2 217 946 m³/día de aguas residuales vertidas a la red de alcantarillado de las EPS Saneamiento, las mismas que apenas el 32% es tratada (Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, 2014, p.16).

Se han sugerido varios enfoques para reducir el potencial contaminante de estas aguas como consecuencia de la problemática mencionada. En su mayoría empresas mineras, industrias de alimentos, plantas químicas, entre otras, cuentan plantas de tratamiento *in situ*, por lo que la concentración de contaminantes en el agua tratada está alineada con los reglamentos nacionales y municipales. Estos comprenden tratamientos fisicoquímicos como la filtración, coagulación, floculación, sedimentación y oxidación electroquímica, entre otros. Sin embargo, los tratamientos en mención suelen ser complejos y costosos (Rosales et al., 2018).

Tomando en cuenta esto, surge la necesidad de encontrar medios adecuados para tratar las aguas residuales, los mismo que puedan ser factibles, viables económicamente, y que al

instalar y operar no sean complejos, además que permita generar una biomasa la cual podría ser utilizada en procesos biotecnológicos. En los últimos tiempos ha habido un creciente interés por el uso de microalgas como alternativa para llevar a cabo estos propósitos (Candela, 2016). Las cultivaciones de microalgas se consideran una tecnología medio-compleja en cuanto a desarrollo en escala de plantas piloto, en comparación con otros sistemas de tratamiento del agua (Hernández-Pérez y Labbé, 2014).

Con base en esta premisa, la importancia de la investigación parte de la necesidad de evaluar nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales a partir de microorganismos vivos que se encuentran en los ecosistemas.

La industria láctea es uno de los mayores productores de aguas residuales. Esto genera entre 3 739 y 11 217 millones de m³ de residuos al año, es decir, 1 a 3 veces el volumen de leche procesada, y por lo tanto se considera una importante fuente de efluentes industriales en varios países. El problema crece cuando esta agua vertida no recibe un tratamiento y es simplemente arrojada a ríos, tierra, campos y otros ambientes acuáticos, lo cual representa mundialmente para la salud y la higiene un grave problema (Tikariha y Sahu, 2014).

En la actualidad, nuestro país no aplica o cuenta con Tratamientos Biológicos Terciarios (TBTs) de buen efecto y a un costo bajo, por este motivo un elevado porcentaje de las aguas residuales no son sometidas a algún tipo de tratamiento.

Para que el tratamiento de aguas residuales con microalgas sea efectivo depende de un buen crecimiento de las mismas. Como ventaja se ve que las microalgas eliminan el exceso de nutrientes y a la vez acumula una biomasa con un alto valor, que sirve de materia prima para la producir energía a mejores costos (Ñaupari y Rojas, 2017).

De acuerdo a lo planteado anteriormente, la justificación de la realización de este estudio partió de efectuar un aporte teórico-práctico en la comprensión del uso de métodos biológicos. Específicamente el efecto del uso de las microalgas *Scenedesmus* sp., como sistema biológico más recomendado para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea con alta carga de materia orgánica, en función de encontrar una solución nueva y única, puesto que no existe referencias del estudio de este microorganismo en el tratamiento de efluentes lácteos, lo cual representaría un aporte científico significativo para el área.

Los tratamientos biológicos son rentables económica y operativamente, amigables con el medio ambiente y altamente eficaces. Con el uso de los mismos, es posible minimizar el riesgo ambiental en ríos, lagos y aguas costeras, cumpliendo con las normas de descarga de efluentes.

De acuerdo a esto, la evaluación del uso de la microalga *Scenedesmus* sp., desde la perspectiva práctica, podrá hacer posible la realidad de remediar el impacto de fenómenos como la eutrofización y preservar el recurso hídrico, el cual es una fuente vital para la vida de animales y seres humanos, siendo importante destacar que su funcionalidad y viabilidad económica deberá ser probada de manera experimental bajo un escenario controlado que permita evidenciar resultados comprobables.

Presentado lo anterior, nace la interrogante: ¿Cuál es el porcentaje de remoción de contaminantes orgánicos en un efluente lácteo aplicando la microalga *Scenedesmus* sp.?

Entre los problemas específicos de la investigación, se consideran los siguientes: ¿Cuáles son las concentraciones de DQO, DBO₅, sólidos suspendidos totales, aceites y grasas presentes en el agua residual a tratar?, y ¿Cuál será el porcentaje de remoción de DQO, DBO₅, sólidos suspendidos totales, aceites y grasas obtenido en el agua tras el tratamiento con la microalga *Scenedesmus* sp.?

Planteándose la hipótesis a probar: Al aplicar las algas *Scenedesmus* sp., se logrará un porcentaje de remoción de contaminantes orgánicos en un 50%.

1.1. **Objetivo general**

Determinar los niveles de remoción de contaminantes en el efluente de agua residual de una industria de lácteos aplicando la microalga *Scenedesmus* sp.

1.2. **Objetivos específicos**

Determinar las concentraciones iniciales de DBO₅, DQO, sólidos suspendidos totales, aceites y grasas en el efluente de una industria láctea.

Calcular el porcentaje de remoción de DQO, DBO₅, sólidos suspendidos totales, aceites y grasas obtenido en las aguas tras el tratamiento con las microalgas *Scenedesmus* sp.

Determinar cuál de los tres tratamientos fue más eficiente en la remoción de contaminantes orgánicos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Estado del arte

A nivel internacional se destacan este tipo de estudios, ya que el problema del tratamiento de aguas residuales tiene relevancia a nivel mundial. Las investigaciones consultadas se describen, a continuación:

(Ortiz-Villota et al., 2018), publicaron una investigación titulada “La biorremediación con microalgas (*Spirulina máxima*, *Spirulina platensis* y *Chlorella vulgaris*) como alternativa para tratar la eutrofización de la laguna de Ubaque, Colombia”, cuyo objetivo del tratamiento con estas tres microalgas. Se empleó el método del "Compuesto Central Factorial 22" mediante el programa Design-Expert para analizar los impactos de la biorremediación. Las cepas de microalgas se adaptaron a las condiciones de la laguna y se cultivaron según las especificaciones del diseño experimental. El objetivo principal del experimento fue la biorremediación mediante el uso de microalgas es una alternativa viable a los métodos convencionales para eliminar los nutrientes NO_3^- , NO_2^- y PO_4^{3-} . La mejor cepa para este proyecto fue *Chlorella vulgaris* (Cv), que demostró una mayor adaptabilidad al estado de la laguna y se demostró una mayor eliminación de los nutrientes siendo NO_3^- un 87%, para NO_2^- un 89% y para PO_4^{3-} un 69% de remoción. En base a esto, se sugiere que en el proceso de biorremediación, se cultive la cepa Cv a una concentración volumen/volumen (V/V) de 12,89% durante un tiempo de retención de 3,13 días. De esta manera, se podrán obtener resultados de remoción eficientes y efectivos.

(Vacca et al., 2017), en un artículo científico, titulado “Uso de la microalga *Chlorella* sp. viva en suspensión en la decoloración del agua residual de una empresa textil”, el cual tuvo como objetivo la evaluación de la capacidad de la microalga *Chlorella* sp., viva en cesación para remoción de color del efluente de una entidad textil de Colombia. Metodología experimental es por la que optó, para así cultivar la microalga *Chlorella* sp. en un biorreactor de 2,5 litros de capacidad efectiva, utilizando fertilizantes comerciales como medio nutriente en el aireado continuo a temperatura de laboratorio con 12 horas de fotoperiodo claro y oscuro. Posteriormente, el efluente se purificó con diferentes concentraciones de microalgas correspondientes a 0,10; 0,20 y 0,30 en absorción con los controles adecuados. Los resultados de este experimento mostraron que el crecimiento máximo de la microalga *Chlorella* sp. Finalmente obtuvo una remoción de contaminantes en el bioensayo de 0,30 en absorbancia el

cual eliminó el 97,2% del colorante actual y al mismo tiempo redujo el 94,6% de DQO, 95,4% de DBO₅, 99,8% del nitrógeno total y el fósforo en un 78,3%.

(González-Camejo et al., 2017), En su artículo científico titulado "Experimentos a corto y largo plazo sobre el efecto del sulfuro en el cultivo de microalgas en el tratamiento de aguas residuales terciarias", el objetivo de esta investigación fue realizar experimentos para examinar el impacto del sulfuro en las microalgas utilizando cultivos mixtos en biorreactores de membrana anaeróbica con una alta carga de nutrientes. Se planteó la hipótesis de que las microalgas podrían consumir los nutrientes presentes en las aguas residuales sin requerir una fuente de carbono orgánico adicional.

Durante los experimentos de breve duración, se evidenció una disminución en la tasa de producción de oxígeno (OPR) a medida que la concentración de sulfuro aumentaba. Por ejemplo, se constató que una concentración de 5 mg SL-1 reducía la OPR en un 43%, mientras que una concentración de 50 mg SL-1 prácticamente detenía el crecimiento de las microalgas. Además, los experimentos a largo plazo revelaron que la presencia de sulfuro en los efluentes tenía efectos inhibidores cuando las concentraciones excedían los 20 mg SL-1 en el cultivo, mientras que no se observaron efectos significativos a concentraciones inferiores a 5 mg SL-1..

De este modo, se pudo constatar que tanto las microalgas *Scenedesmus* como *Chlorella* presentaron una viabilidad superior al 87% en los ensayos realizados. No obstante, al agregar sulfuro al cultivo de microalgas *Chlorella*, se observó una mayor capacidad de absorción de concentraciones elevadas de fósforo, lo que le brindó una ventaja competitiva en comparación con la microalga *Scenedesmus*.

(León, 2017), En su trabajo de investigación de grado titulado "Análisis de un biorreactor EGSB para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria láctea", propuso un enfoque para el tratamiento de aguas residuales altamente concentradas en lactosuero. Esto motivado a que éste forma parte de aguas residuales agroindustriales que son vertidas en efluentes naturales y causan un aumento de la carga orgánica. Luego de caracterizar el lactosuero resultante de una empresa, se llevó a cabo la adaptación de un inóculo proveniente de los lodos anaerobios de la planta de tratamiento de aguas residuales de dicha empresa y se estandarizó en un biorreactor por lote de 10 L de capacidad alimentando durante 90 días, en donde la carga orgánica se fue incrementando gradualmente del 30% al 50%, alcanzando una remoción de DBO₅ mayor al 85%. Tomando en cuenta estos resultados se procedió a inocular el biorreactor EGSB con 1 L de lodo y fue evaluado durante 140 días. Durante la evaluación se tomó en cuenta los parámetros de control de ph, temperatura, factor de alcalinidad, DBO₅, de

afluente y efluente y el nivel de porcentaje de remoción. Para conocer el nivel de porcentaje de remoción de DBO₅ se dividió en tres etapas (arranque, estabilización, estable), alcanzando la etapa estable en el día 80 con una eficiencia del 92% y una concentración de DBO₅ del efluente de 4,039 mg O₂/L.

(Morales, 2016), desarrollo una investigación para su grado de doctor, de título “Tratamiento de aguas residuales con microalgas en reactores abiertos”, El objetivo de este estudio fue desarrollar un proceso para eliminar el nitrógeno, fósforo y materia orgánica presentes en aguas residuales, utilizando un grupo de microalgas y bacterias, con el fin de producir biomasa que tenga valor económico, sea sostenible y respetuosa con el medio ambiente. El método utilizado fue de tipo experimental y constó de cuatro etapas. En la primera etapa se calculó la productividad máxima de los sistemas de cultivo abierto, considerando factores como la velocidad de dilución en los reactores, su estabilidad y capacidad máxima. En la segunda etapa se utilizó agua residual proveniente del tratamiento secundario, asegurando que se obtuviera el porcentaje adecuado para cultivar las microalgas y lograr así la purificación. Se llevaron a cabo análisis para determinar la relación entre el volumen total del efluente y la producción máxima de biomasa. La especie de microalga utilizada en el estudio fue *Scenedesmus* sp., y se realizaron análisis para caracterizar la biomasa y calcular los coeficientes de utilidad y eficiencia fotosintética. Los resultados revelaron que los cultivos de microalgas lograron su máxima producción de biomasa en condiciones de alta intensidad lumínica y temperaturas moderadas. La velocidad de crecimiento óptima se encontró en el rango de 0,3 a 0,4 días, particularmente en el caso del reactor inclinado. Por último, se encontró que el uso de esta microalga en los reactores inclinados logró eliminar el 80% de los contaminantes presentes en el agua.

A nivel nacional, se lograron encontrar diversos estudios que hacen referencia al uso de microalgas para el tratamiento de aguas residuales y los resultados obtenidos al aplicar este método son para mejorar la calidad de las aguas dispersadas por una empresa.

(Mendoza, 2019), En su estudio de posgrado titulado "Efecto de la intensidad de luz y pH en la eliminación de materia orgánica (DBO₅) de los efluentes de remojo de curtiembre utilizando la microalga *Chlorella vulgaris* en un entorno de laboratorio", se examinó el impacto de la intensidad de luz y el pH en la reducción de materia orgánica (DBO₅) en los efluentes generados en el proceso de remojo de curtiembre. El enfoque se llevó a cabo en un entorno de laboratorio utilizando la microalga *Chlorella vulgaris*, Mendoza (2019) se enfocó en examinar cómo la cantidad de luz, el tiempo de exposición y el pH afectan el proceso de extracción de material orgánico biodegradable, específicamente medido como DBO₅, en los efluentes

generados por Ribera Curtiembre Junior SAC. Para ello, se utilizó la microalga *Chlorella vulgaris* en fotobiorreactores. El enfoque del estudio fue experimental, con una descripción detallada de los métodos utilizados para analizar el DBO5. Se construyeron seis reactores de polietileno con capacidad de 3 L, y se realizaron simulaciones en condiciones similares a las reales, así como análisis de la cinética de crecimiento del cultivo. Se evaluaron diferentes volúmenes de solución de microalgas y efluente, junto con las medidas mencionadas anteriormente.

Los resultados de la investigación indicaron que la remoción de DBO5 depende del pH y de la intensidad de la luz. Se encontró que una intensidad luminosa de 8,100 Lx resultó en fotoinhibición. Además, con un pH de 8.9 y diferentes intensidades luminosas de 3,150; 5,100 y 8,100 Lx, se logró remover el 78%, 88% y 68% del DBO5, respectivamente. Por otro lado, utilizando un pH de 7.2 y una intensidad luminosa de 5,100 Lx, se logró una remoción de hasta el 91% del DBO5, lo que respalda la efectividad del método utilizado.

(Manzur, 2018), En su tesis de grado titulada "Efecto del petróleo crudo en el crecimiento de dos especies de microalgas amazónicas, *Chlorella sp.* y *Scenedesmus sp.*", se planteó el objetivo de examinar el crecimiento de estas dos variedades de algas en presencia de petróleo crudo. Se empleó un enfoque descriptivo y un diseño experimental para analizar el desarrollo de las microalgas, la acumulación de lípidos totales (a través del método gravimétrico) y el perfil de ácidos grasos, utilizando dos concentraciones de petróleo crudo (1:9 v/v y 1:18 v/v). Los resultados indicaron que tanto *Chlorella sp.* como *Scenedesmus sp.* alcanzaron su máximo crecimiento cuando se cultivaron con una concentración de petróleo crudo de 1:18 v/v en comparación con el grupo de control. En cuanto al contenido de lípidos totales, se observó un porcentaje más elevado en la primera extracción (tratamiento 1) para ambas especies (15.53% y 13.07%), mientras que en el tratamiento dos se obtuvieron valores más bajos (12.40% y 10.73%). En relación al perfil de ácidos grasos, se encontró que ambas especies presentaron altos porcentajes de Ácido Palmítico en el caso de *Chlorella sp.* y Ácido Elaídico en el caso de *Scenedesmus sp.*

(Patiño, 2016), En su tesis de pregrado, con el título "Remediación biológica del efluente de la producción de aceite de oliva utilizando *Scenedesmus Obliquus* en un sistema de fotobiorreactor tipo panel", se estableció como objetivo principal investigar la capacidad de biorremediación del efluente generado en la producción de aceite de oliva utilizando *Scenedesmus Obliquus* en un fotobiorreactor tipo panel. Dentro de las condiciones utilizadas para la determinación fue empacar la microalga *Scenedesmus Obliquus* en el mismo sistema y

panel antes mencionado con una temperatura de 25°C, es así que también se determinó la resistencia del microorganismo empleados diversas diluciones siendo 2,5%, 5%, 25%, 50% y 100% respectivamente de cultivo con el efluente, a medida que avanzó su experimento vio que aumentó la resistencia a la dilución con el 50% del efluente, y esto fue así incluso después de los 15 días evaluados, con una media de crecimiento de 4 373 333 N° organismo/ml ya presentes. Posteriormente, en la biorremediación llega a implementar un sistema con 4 fotobiorreactores de vidrio del mismo tipo panel con las medidas de 37 cm, 28 cm y 6 cm de alto, largo y ancho respectivamente, el cual mantiene un 0,25 L/min de flujo constante, a 12 horas de luz/12 horas de oscuridad con 2 fluorescentes de 30 watts y teniendo un 4,9 de pH inicial, logrado hasta los 10 días de evaluación un aumento de 6 320 000 N° organismo/ml de *Scenedesmus obliquus*, luego hasta los 18 días de evaluados un crecimiento estacionario de 4 960 000 N° organismos/ml. En la evaluación de la biorremediación, se determinó el porcentaje de remoción de varios parámetros físico-químicos. Los resultados mostraron una remoción del 58% de SST, 79% de sulfatos, 75% de fenoles, 88% de cloruros, 44% de DBO5 y 64% de DQO. Después de 12 días, se logró alcanzar un pH de 8.4.

(Castañeda y Castillo, 2016), En su tesis titulada "Influencia de la iluminación, pH y tiempo en la eliminación de sulfuros, sólidos suspendidos, demanda química y biológica de oxígeno de los efluentes de Ribera en Curtiembres utilizando microalgas en un fotobiorreactor a escala de laboratorio" (Castañeda y Castillo, 2016), se realizó un estudio en la Universidad Nacional de Trujillo, Perú, para investigar las variables clave en el proceso de separación de sulfuros, sólidos suspendidos, DBO5 y DQO. Se reconoce la importancia de la intensidad de luz, pH y tiempo en este proceso. El enfoque metodológico experimental incluyó la recolección del efluente, la identificación de la microalga *Scenedesmus sp.*, la determinación de la biomasa y la evaluación de los efectos de nutrientes, iluminación y pH. Los resultados demostraron que la iluminancia óptima alcanzada fue de 5,700 lx, mientras que el rango adecuado de pH se encontró entre 9.5 y 10.5. Basándose en estos hallazgos, se implementó un sistema de fotobiorreactores del tipo BCR, con una alimentación de aire de 4 L/min durante 24 horas, utilizando una proporción de microalga-nutriente de 5:1. Como resultado, se logró una eliminación de hasta el 93% en DBO5 y DQO, así como una reducción del 74% en sólidos suspendidos totales (SST) y del 98% en sulfuros.

(Sánchez, 2016), en su tesis de pregrado titulada "Evaluación del crecimiento y capacidad ficorremediadora de la microalga *Scenedesmus sp.* cultivada en las aguas residuales de la Universidad Nacional de Ucayali", el objetivo que se trazó fue el de determinar la capacidad ficorremediadora de la microalga *Scenedesmus sp.*, en el lugar antes mencionado. Se

realizaron experimentos de cultivo de microalgas utilizando cuatro dosis diferentes: 0 L, 5 L, 8 L y 10 L de microalgas. Se llevaron a cabo tres repeticiones y se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) en bandejas de 30 L de aguas residuales durante un período de 28 días. Para evaluar la eficiencia, se utilizó el software ANOVA. Se analizaron características físicas como temperatura, color y pH, mediante mediciones tomadas tanto a las 8:00 am como a las 3:00 pm. Asimismo, se evaluaron aspectos químicos como los niveles de nitratos y fósforo total, DBO5, DQO, y coliformes termotolerantes como parámetro microbiológico. Los resultados mostraron que las dosis adecuadas de microalgas fueron de 5 L y 8 L, lo que significa que una menor cantidad de microalgas resultó en una mejor remediación, logrando una eficiencia total del 70% utilizando la microalga *Scenedesmus* sp. Se observó una eficacia significativa en el día 17 de la tercera semana del experimento de 28 días. En cuanto a los parámetros físicos óptimos, se determinó un pH promedio de 8.22 y una temperatura promedio de 26 °C. Los parámetros químicos mostraron una eficiencia del 90% para DQO, 90% para DBO5, 60% para fósforo total y 75% para nitratos. Para el parámetro microbiológico de coliformes termotolerantes, se obtuvo una eficiencia del 80%.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Aguas residuales

Según el artículo 131 del Decreto Supremo N°001-2010-AG (2010), que aprueba el Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos, se define a las aguas residuales como aquellas que han sido alteradas en sus características originales debido a actividades humanas y que deben ser descargadas en un cuerpo de agua natural o reutilizadas, pero requieren un tratamiento previo debido a su calidad. (p. 40).

Conocer la naturaleza del agua residual es fundamental para realizar proyectos para su tratamiento. Para seleccionar los parámetros que nos permitirán caracterizar las aguas residuales, el criterio más importante es su origen. Las aguas urbanas por lo general poseen componentes sólidos, aceites, materia orgánica, fácilmente biodegradable, por lo que no presenta sustancias peligrosas (Fernández et al., 2004). A diferencia, las aguas de origen industrial pueden incluir compuestos tóxicos y otras materias orgánicas, En cada actividad industrial pueden manifestarse componentes característicos, como sustancias tóxicas, iones metálicos, productos químicos, hidrocarburos, detergentes y pesticidas, por mencionar algunos ejemplos, aceites y grasas, entre otros (Hernández, 2015).

La calidad del agua y su tratamiento se evalúan mediante parámetros físicos, químicos y biológicos. Estos conceptos y sus implicaciones se presentan de manera resumida en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros cuantitativos que determinan la calidad del agua.

Tipo de calidad	Parámetros	Conceptos e implicaciones
Física	Temperatura	La temperatura desempeña un papel fundamental en la modificación de las reacciones químicas de la materia orgánica, al mismo tiempo que regula diversos procesos biológicos.
	Sólidos suspendidos totales	Los sólidos suspendidos totales se refieren a los componentes que son retenidos por un filtro convencional hecho de fibra de vidrio. Para obtenerlos, se seca una muestra de agua a una temperatura de 103 a 105 °C. La conductividad eléctrica (CE) de una muestra de agua es un indicador ampliamente utilizado para determinar la concentración total de solutos presentes en dicha muestra. Por lo general, la mayoría de las aguas tienen una CE inferior a 1 dS/m (deciSiemens por metro). Por lo tanto, cuando se trabaja con la salinidad, esta unidad resulta ser la más adecuada.
	Conductividad eléctrica	
Tipo de calidad	Parámetros	Conceptos e implicaciones
Física	Conductividad eléctrica	Dentro del marco del nuevo Sistema Internacional (SI), la unidad utilizada para expresar la conductividad eléctrica (CE) es el Siemen por metro (S/m). Se establece que 1 S/m equivale a 10 mho/cm. Es importante tener en cuenta que la conductividad eléctrica de una solución salina acuosa aumenta a medida que la temperatura se eleva en cada grado Celsius. Por lo tanto, para garantizar mediciones precisas, es necesario ajustar la CE a una temperatura estándar de 25 °C, ya sea utilizando tablas de corrección o mediante un sistema interno incorporado en el dispositivo para medir la conductividad.

pH	<p>El pH de la generalidad de las aguas se sitúa entre 4 y 9, siendo comúnmente ligeramente alcalinas debido a la presencia de carbonatos y bicarbonatos.</p>
Demanda bioquímica de oxígeno	<p>El pH refleja la concentración de iones hidronio en una solución, lo cual está vinculado a los iones hidroxilo y la alcalinidad del entorno</p> <p>La demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) se refiere a la cantidad de oxígeno requerida para descomponer la materia orgánica en una muestra durante un período de tiempo específico y a una temperatura determinada. La muestra, o una dilución de la misma, se incuba en condiciones de oscuridad a aproximadamente 20 °C durante 5 días. Se registra la concentración de oxígeno antes y después de la incubación, y el consumo de oxígeno durante ese período representa la demanda bioquímica de oxígeno en 5 días.</p>
Calidad química	<p>La demanda química de oxígeno se refiere a la cantidad de materia orgánica que puede ser oxidada mediante un agente químico fuerte, con un valor equivalente al oxígeno. En palabras sencillas, representa la cantidad de oxígeno necesaria para que el agua descomponga completamente tanto la materia orgánica como la inorgánica que contiene.</p>
Demanda química de oxígeno (DQO)	
Aceites y grasas	<p>Los aceites y grasas de consistencia viscosa suelen estar presentes en representación de fluidos o saponificados debido a la labor de purificadores. Para separarlos, se utiliza el método de filtración después de acidificar la muestra líquida. Los jabones metálicos se descomponen mediante la acidificación. El aumento de peso en botella de estirpe después de evaporar el aditivo de mezcla indica la cantidad de aceites y grasas que se encuentran en la muestra.</p>

Fuente: (W. M. López, 2019). Elaboración propia.

2.2.2. Límites máximos permisibles de efluentes de aguas residuales tratados

El grado de tratamiento requerido para las aguas residuales se determina en función de los límites de descarga establecidos para el efluente. El Decreto Supremo 003-2010-MINAM establece los límites máximos permitidos (LMP) para los efluentes provenientes de plantas de tratamiento de aguas domésticas o municipales, mientras que el Decreto Supremo

N° 004-2017-MINAM diferencia entre diferentes tipos de efluentes y establece sus límites máximos permitidos. En la Tabla 2 se resumen algunos valores de parámetros de clasificación de aguas residuales, específicamente para aquellos efluentes que se descargan en cuerpos de agua como ríos, lagunas, lagos y ecosistemas marino-costeros, según el último decreto mencionado.

Tabla 2. Límites de los estándares de calidad ambiental en conservación del ambiente acuático.

Parámetros	Unidad de medida	E1: Lagunas y lagos	E2: Ríos		E3: Ecosistemas costeros y marinos	
			Costa y Sierra	Selva	Estuarios	Marinos
FÍSICOS-QUÍMICOS						
Aceites y grasas (MEH)	mg/L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	5	10	10	15	10
Fósforo total	mg/L	0,035	0,05	0,05	0,124	0,062
Nitratos (NO ₃ ⁻) (c)	mg/L	13	13	13	200	200
Nitrógeno total	mg/L	0,315	**	**	**	**
Oxígeno disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥5	≥5	≥5	≥4	≥4
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,5 a 9,0	6,8 a 8,5	6,8 a 8,5
Sólidos suspendidos totales	mg/L	≤25	≤100	≤400	≤100	≤30
Sulfuros	mg/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002

Nota: El símbolo ** dentro de la tabla significa que el parámetro no aplica para esta subcategoría. Fuente: (MINAM, 2017).

2.2.3. Etapas del tratamiento de aguas residuales

En trato a este asunto, podemos identificar cuatro métodos empleados para el tratamiento de aguas residuales domésticas, los cuales se detallan a continuación:

a) Pre-tratamiento

El objetivo del pretratamiento de agua es eliminar los materiales, cuerpos gruesos y arenosos que impiden el funcionamiento adecuado de la estación de purificación y, en consecuencia, la eficiencia general del tratamiento (Fernández et al., 2004).

b) Tratamiento primario

Los efluentes se tratan habitualmente, porque de esta manera permite eliminar sólidos suspendidos, así como los materiales flotantes que imponen los límites, ya sea en términos de descarga en un medio receptor como el de llevar los efluentes a un tratamiento secundario, para así neutralizar o por el otro lado de homogenizar. Este proceso suele dividirse en desbastado, tamizado, dilaceración y desengrasado, coagulación o floculación (Yanguas, 2017).

c) Tratamiento secundario

El objetivo principal de este proceso es la eliminación de la materia orgánica biodegradable. Para lograrlo, se crea un ambiente propicio para el crecimiento de microorganismos que se alimentan de dicha materia orgánica, lo que resulta en su transformación en formas insolubles y de fácil eliminación. El tratamiento secundario incluye diversas técnicas biológicas convencionales, como tanques de estabilización, tanques de aireación, percolación, lodos activos y digestores anaeróbicos. (Ramalho, 1996).

Existe una amplia diversidad de microorganismos involucrados en este proceso, que incluyen bacterias aerobias y anaerobias, así como algas multicelulares fotosintéticas, algas unicelulares y organismos microscópicos (Yanguas, 2017).

2.2.4. Microalgas

Se afirma que las microalgas son organismos unicelulares capaces de realizar la fotosíntesis. Por lo que se incluye también a las cianobacterias (que es conocida desde tiempos como las algas verdeazuladas) del mismo modo con las algas eucariotas (que se remota a tiempos antiguos como las algas verdes, rojas y doradas). En general, se reconoce a las microalgas como organismos fotoautótrofos, lo que implica que obtienen energía directamente de la luz solar y se desarrollan a partir de compuestos inorgánicos. Además, se destaca que

algunas especies tienen la capacidad de utilizar la materia orgánica como fuente de energía o carbono para su crecimiento. (Ruiz, 2011).

En términos generales, las circunstancias ideales para el desarrollo inmejorable de las microalgas son variables según la variedad. No obstante, hay algunos aspectos que se pueden describir de manera general como son:

a) Luz

El crecimiento de estos cuerpos fotosintéticos dependientes de un origen de luminosidad apropiada. Inclusive cuando no hay nutrientes, la tasa de fotosíntesis puede aumentar, lo cual se refleja en un incremento en la intensidad de la luz. Sin embargo, más allá de cierto punto, se produce la fotoinhibición, lo cual tiene resultados negativos para la célula. (Hernández-Pérez y Labbé, 2014).

b) pH

Cada especie de microalga tiene un rango de pH en el cual puede prosperar, y esto depende de las especies químicas que las microalgas sean más propensas a asimilar. En la mayoría de los cultivos de microalgas, el pH se encuentra entre 7 y 9 unidades, siendo entre 8.2 y 8.7 unidades el rango óptimo.

Durante el proceso de fotosíntesis que implica la captura de CO₂, el pH del entorno experimenta un aumento progresivo debido a la acumulación de OH⁻. Este aumento puede favorecer la eliminación del nitrógeno en forma de amoníaco hacia la atmósfera y la precipitación de ortofosfatos para la eliminación de fósforo. Existen diversas técnicas disponibles para regular el pH, entre las cuales se encuentran la aireación, la inyección controlada de dióxido de carbono (CO₂) y la adición de ácidos o bases. (Malgas, 2013).

c) Temperatura

La producción de algas se incrementará de manera proporcional a medida que la temperatura aumente, siempre y cuando esta se encuentre dentro del rango óptimo para cada especie en particular. Sin embargo, una vez que la temperatura supera dicho rango, se observa un aumento en la respiración y la fotorrespiración, lo que resulta en una disminución de la productividad general. Entre las especies su temperatura óptima suele

variar, pero en general oscila entre 28 °C y 35 °C (Park et al., 2011, como se citó en Hernández-Pérez y Labbé, 2014).

d) Nutrientes

Después del carbono, se puede afirmar que el nitrógeno es el nutriente más crucial para las microalgas, y puede ser asimilado en forma de nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). Por otro lado, el fósforo también desempeña un rol fundamental en numerosas técnicas citológicas, así tal cual la síntesis de ácidos nucleicos y la entrega de brío. No obstante, la concentración de fósforo en las microalgas suele ser inferior al 1%, lo que dificulta su disponibilidad en el medio de cultivo y restringe su crecimiento. En los medios de cultivo, el fósforo se incorpora comúnmente en forma de HPO_4^{2-} o H_2PO_4^- . (Hernández-Pérez y Labbé, 2014).

e) Oxígeno disuelto

De esta manera, es posible identificar la actividad fotosintética en el cultivo de microalgas. No obstante, cuando los niveles de saturación superan el 200%, se produce una reducción en la producción de las microalgas. (Hernández-Pérez y Labbé, 2014).

f) Agitación

La agitación tiene varios beneficios, ya que no solo mejora la eficiencia en el transporte, sino que también evita la sedimentación de las algas y su adherencia a las superficies del reactor se ven influenciadas por la agitación. Asimismo, la agitación ayuda a homogeneizar el pH, lo cual garantiza una distribución adecuada de los gases y la luz. Mediante una agitación adecuada, las algas experimentan ciclos de mezclado rápido, lo que implica una transición casi instantánea de una zona oscura a una iluminada en cuestión de milisegundos. (W. M. López, 2019).

2.2.5. *Scenedesmus* sp.

Scenedesmus sp. (Turpin) Kützing 1833 es una de las microalgas es una de las microalgas utilizadas en el saneamiento de aguas residuales por biorremediación. Este microorganismo pertenece al reino Protista, a la clase Chlorophyceae y a la familia Scenedesmaceae. El organismo muestra una estructura curvada llamada cenobio, compuesta por 4 células lineales o ligeramente dispuestas de manera alternada. Estas células son rectas, anchas

y fusiformes, con ápices puntiagudos. Las dimensiones celulares se encuentran en el rango de 13,6 a 18,9 micrómetros de largo y de 4,7 a 7,3 micrómetros de ancho. (Amézquita, 2018).

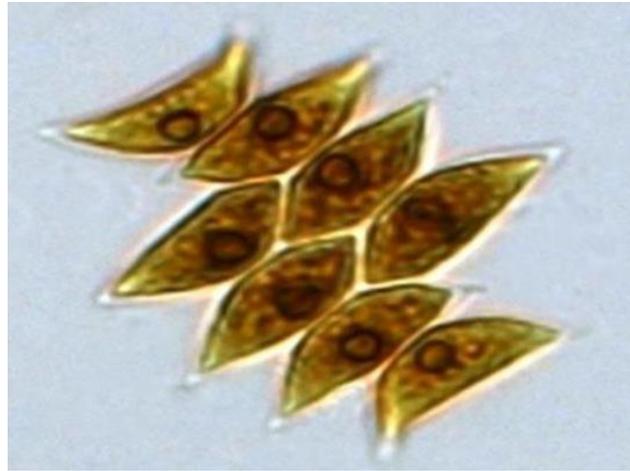


Figura 1. *Scenedesmus obliquus* visto al microscopio a 100X.

Nota. Adaptado de *Algae: An introduction to Phycology* (p. 498) por Van Den et al., 1996, Cambridge University Press.

Se ha comprobado en diferentes investigaciones que esta microalga es altamente efectiva en la eliminación de carbono orgánico total, con una tasa de remoción del 74%. Además, ha demostrado una eficiencia del 55% en la remoción de fósforo en un lapso de 216 horas. En cuanto a la eliminación de coliformes totales en muestras contaminadas, ha logrado una remoción de hasta el 99%. Además, ha demostrado la capacidad de reducir los niveles de cloruros en un 91%. También se ha determinado que puede remover el nitrógeno al 50%, los lípidos al 12,8% y los carbohidratos al 27,4% en una muestra diluida de aguas residuales (con una pureza del 50%) (Amézquita, 2018).

Los escenarios para la siembra de esta microalga en cuanto a temperatura ideal para su crecimiento, la concentración de macronutrientes y otros datos encontrados se sintetizan en la Tabla 3.

Tabla 3. Escenarios para el cultivo de *Scenedesmus* sp. (Turpin).

Condiciones	Parámetro
Temperatura	23 a 32 °C.
pH	5,5 a 8. Óptimo de 6,8.
Fotoperiodo	14 h de luminosidad. Saturable de 200 a 400 μW/m.
Concentración de micronutrientes	Carbono > 50%

	NO ₃ ⁻ de 2 a 5 μM
	PO ₄ ⁻³ < 0,1 μM
	SO ₄ ⁻² 2 μM
	Mg 1 μM
	K 1 μM
	Ca 0,1 μM
	FeCl ₃ en forma de complejo quelado con EDTA 1 μM
	Los micronutrientes son requeridos en concentraciones mínimas ya que si se excede podrían ser tóxicos
	Mn, Zn, Co, y Cu a concentraciones 5, 1, 0,1 y 0,01 μM respectivamente.
Producción de biomasa	217,5 mg L ⁻¹ d ⁻¹ .
El crecimiento en agua esterilizada	10,18 x 10 ⁶ células ml ⁻¹ .

Fuente: (Amézquita, 2018). Elaboración propia.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.3. Lugar de ejecución

3.3.1. Ubicación política

Bajo la concepción del alcance del trabajo, la ubicación de la zona de estudio se dio en el distrito de Baños del Inca y la ejecución del mismo en el distrito de Cajamarca, ambos pertenecientes a la provincia de Cajamarca, departamento de Cajamarca en las siguientes coordenadas según el sistema UTM 17 S – Datum WGS 84.

Tabla 4. Ubicación de la zona de estudio y ejecución.

Lugar	Este	Norte	Altitud (m.s.n.m)
Baños del Inca	780621	9207805	2667
Cajamarca	776575	9209197	2687

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Accesibilidad

El acceso se realiza a través de la ruta nacional PE-3N desde la ciudad de Cajamarca hasta la ciudad de Baños del Inca, recorriendo toda la avenida Atahualpa: por otra parte sus accesos vecinales son por Llacanora (CA-1494), Shaullo grande Shaullo chico y Huayrapongo (CA-1495), así como desde Otuzco por Tartar grande (CA-1105) y Tartar chico (CA-1103). Por lo que se identifica a Cajamarca con el prefijo “CA” (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2016).

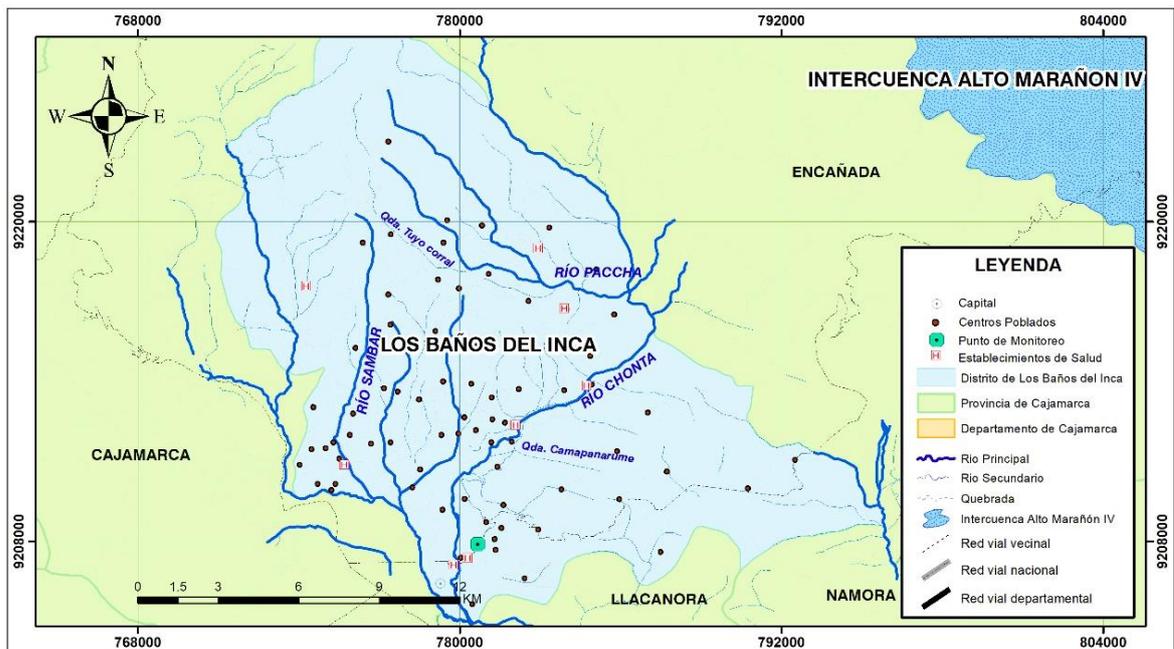


Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio.

Tabla 5. Límites de los distritos de Baños del Inca y de Cajamarca.

Distrito	Norte	Sur	Este	Oeste
Baños del Inca	La Encañada	Llacanora y Namora	Encañada	Cajamarca
Cajamarca	Chetilla	Baños del Inca	Baños del Inca	Chetilla

Fuente: Provias Nacional, Geodir. Elaboración propia.

3.3.3. Condiciones ambientales

Durante el día en la ciudad de Cajamarca así como en sus alrededores el clima suele ser seco, templado y soleado, y por la noche es refrigerado; es así que, la temperatura media anual: por un lado la máxima media es de 21 °C y la contraparte una mínima media de 6 °C.

Normalmente las lluvias fuertes se presentan en los meses de diciembre a marzo. Durante el año se presentan dos estaciones por las lluvias: Las secas que corresponde al otoño y al invierno, lo que quiere decir que templado por el día y refrigerado por la noche, por lo general en los meses de mayo a setiembre, mientras que en tiempos de lluvias se considera verano costero en julio y agosto (Municipalidad Provincial de Cajamarca, 2022).

3.3.4. Hidrología

Según los programas para prevenir, asimismo, métodos de contención ante los sucesos o eventos naturales de la ciudad de Los Baños del Inca (Instituto Nacional de Defensa Civil, 2005), se puede apreciar que en cuanto a componente hidrológicos se refiere, se menciona a:

3.3.4.1. Río Mashcón

Está contenido por los ríos Shultín y Porcón. Siendo su cauce principal el cual recorre una longitud de 21,05 km con dirección de Oeste a Este para posterior cambiar de Norte a Sur en el distrito de Cajamarca.

3.3.4.2. Río Chonta

Presenta una dirección de Norte a Sur, tiene como conectores a los ríos Yanatotora y Azufre, es así que su cauce principal llega a recorrer una longitud de 36,22 km.

3.4. Material y métodos

3.4.1. Materiales y equipos

3.4.1.1. Materiales

Ficha de registro, tijeras, material volumétrico, kit de muestreo, cinta aislante, bolsas, jarra de plástico graduada, balde de 20 L, luces led color blanco, madera, equipo de protección personal, reactivo de ácido sulfúrico (H_2SO_4), software ArcGIS 10.8.1, software Statgraphics 17-X64, software Mendeley Reference Manager 2.73.0, software Microsoft Office Excel, Word y PowerPoint.

3.4.1.2. Equipos

Laptop Dell Inspiron core i7 7 700 HQ, Cámara Digital Cybershot DSC W800, Termómetro acuático, pHmetros, Balanza, Bomba de filtración al vacío, Bomba ecológica de aire EcoPlus, Válvula de control de palanca para acuario (12 mangueras de flujo de aire), Tubo flexible para acuario Deep Jungle, Transformador, GPS.

3.4.2. Metodología

Dado que la unidad de análisis estuvo conformada por la muestra de un efluente lácteo a la que se le realizó prueba antes y después de la utilización de la microalga

Scenedesmus sp., el universo estuvo conformado por los efluentes lácteos con contenido DQO y DBO₅, generados en una planta de alimentos lácteos. Las muestras de efluentes lácteos que fueron empleadas en este estudio para el tratamiento de un efluente, fueron provenientes de una planta quesera, para lo cual se tomó el siguiente material orgánico: Inicialmente se tomaron 12 muestras contenidas en envases los cuales fueron proporcionados por el laboratorio.

3.4.2.1. Tipo de investigación

Tipo de investigación es: Aplicada.

Nivel: Descriptivo.

Diseño: Experimental.

Enfoque: Cuantitativo.

Por lo que es importante resaltar que, al momento de realizar la toma de la muestra, se consideraron los siguientes factores:

Se recolectaron en envases de polietileno limpios y secos, por tanto las muestras luego fueron sometidas a análisis físico-químicos.

Se Registró el valor de la temperatura *in situ*.

Si el análisis no se llevó a cabo en las próximas 2 horas, se consideró que la muestra fue refrigerada a 4 °C.

En este sentido, el presente trabajo se enmarcó en una investigación descriptivo y experimental, ya que se buscó describir los pasos a seguir para valorar el uso de las microalgas *Scenedesmus* sp., en la remoción de contaminantes presentes en efluentes lácteos.

Asimismo, para la presente investigación se consideró un diseño factorial (una de las clasificaciones del diseño experimental) debido a la manipulación que se tiene de dos o más variables independientes, las cuales incorporan desde dos a más niveles de presencia en cada una de estas (Hernández et al., 2014).

En cuanto a las técnicas de investigación, se hizo uso de técnicas cuantitativas como son muestreo y medición. Por lo que, en principio, se procedió a la recolecta de parámetros fisicoquímicos del efluente en función de conocer el perfil del mismo previo al tratamiento. Posteriormente, se estudiaron las condiciones necesarias para el crecimiento óptimo de las microalgas y finalmente se evaluó el porcentaje de remoción de contaminantes del efluente a tratar. Se empleó las *Scenedesmus* sp., porque bibliográficamente son las más usadas para el tratamiento, además fue la cepa que se logró obtener de un laboratorio puro y especializado. En la tabla 6, se indican las técnicas que fueron consideradas en la medición de cada una de las variables.

Tabla 6. Técnicas de investigación que fueron empleadas en función de los objetivos propuestos.

Objetivo	Parámetro	Técnica
Medir la concentración de DQO y DBO ₅ presentes en las aguas residuales a tratar.	DQO DBO ₅ Oxígeno disuelto	Los efluentes lácteos fueron recolectados mediante una toma de muestra representativa en envases de polietileno previamente limpios y secos. En cuyo proceso se registró el valor inicial <i>in situ</i> de temperatura del aire, haciendo uso de los materiales de protección personal adecuados (guantes, lentes, tapaboca, etc.), tomando la precaución de evitar la contaminación de la muestra por entes externos al sistema. Las técnicas de análisis estuvieron basadas en SMEWW-APHA-AWWA-WET Part 5220, 23rd Ed.2017 y Part 5210 B(COD y BOD respectivamente).
Objetivo	Parámetro	Técnica
Establecer las condiciones adecuadas de Temperatura y luz para el crecimiento óptimo de la microalga <i>Scenedesmus sp.</i> , a escala laboratorio.	Temperatura Intensidad lumínica	El estudio del cultivo de las microalgas está en base al método presentado por Merino para medios nutritivos (Merino, 1999, como se citó en Vásquez et al., 2020). Las variaciones de temperatura ambiental fueron monitoreadas diariamente para poder establecer alguna relación con el número de células presentes en los cultivos. Por su parte, la intensidad lumínica fue registrada cada 03 horas durante el día (Guizado, 2014).

Se utilizaron métodos como la tasa de crecimiento y el tiempo de duplicación diaria (TD) para favorecer el desarrollo óptimo de la microalga.

Las muestras se colectaron y depositaron, utilizando guantes y mascarilla, en los envases de prueba y fueron llevados directamente a laboratorio. Se tomó la previsión de no derramarla y mantener el sellado del envase, hasta su tratamiento en el laboratorio, siguiendo Las técnicas y directrices de seguridad del procedimiento de monitoreo de zonas donde se realiza el tratamiento de las aguas residuales. (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2013).

Objetivo	Parámetro	Técnica
Calcular el porcentaje de remoción de DQO y DBO ₅ obtenido en las aguas tras el tratamiento con las microalgas <i>Scenedesmus</i> sp.	DQO	Las técnicas de análisis estuvieron basadas tanto en el SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 D, 23rd Ed.2017: Chemical Oxygen Demand (COD). Closed Reflux, Chlorometric Method y SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B 23rd Ed. 2017: Biochemical Oxygen Demand (BOD), 5.day BOD Test. Las pruebas fueron enviadas.
	DBO ₅	
	Oxígeno disuelto	

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, los procedimientos contemplados en la presente investigación como se muestra en la Figura x, se llevaron a cabo en función de acondicionar el sistema a emplear en el lugar de la realización del proyecto. Antes de iniciar con las actividades de campo y posteriormente, recolectar las muestras. Se verificó el cumplimiento con las condiciones de temperatura e iluminación adecuada.

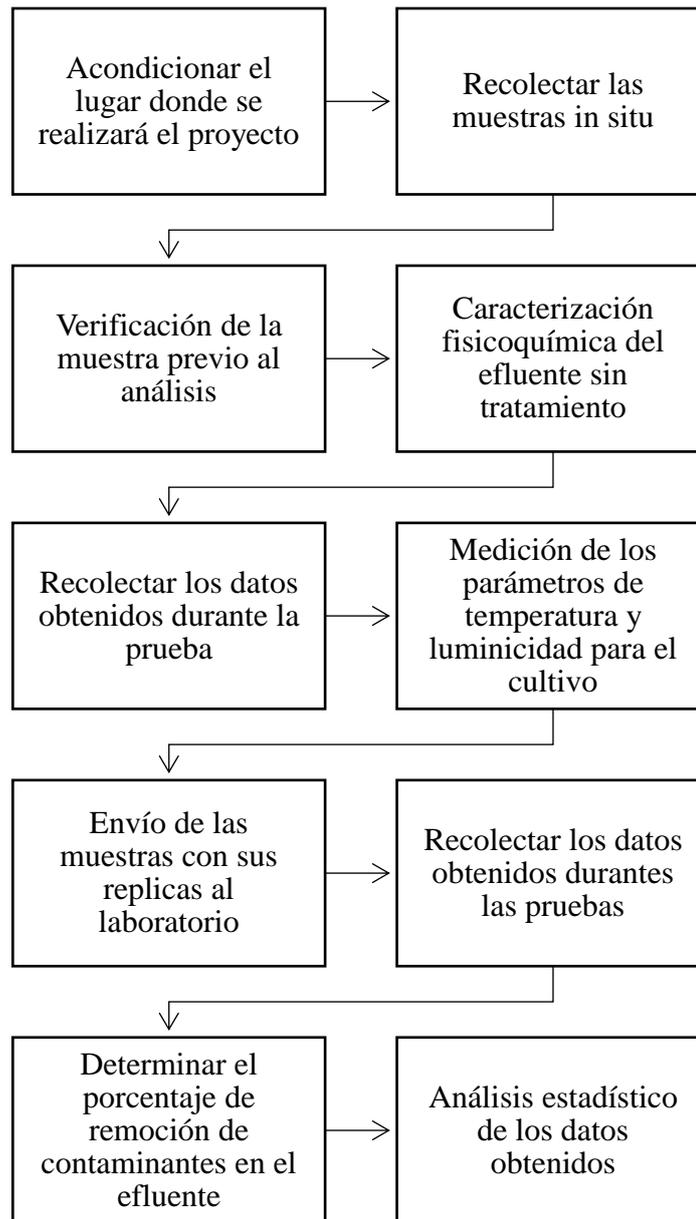


Figura 3. Procedimiento experimental.

3.4.2.2. Diseño del sistema experimental

El diseño de los experimentos que se abordó estuvo enmarcado en una estructura de 2 réplicas de 3 tratamientos con 2 controles, para obtener entonces un total de 8 muestras siguiendo el siguiente esquema:

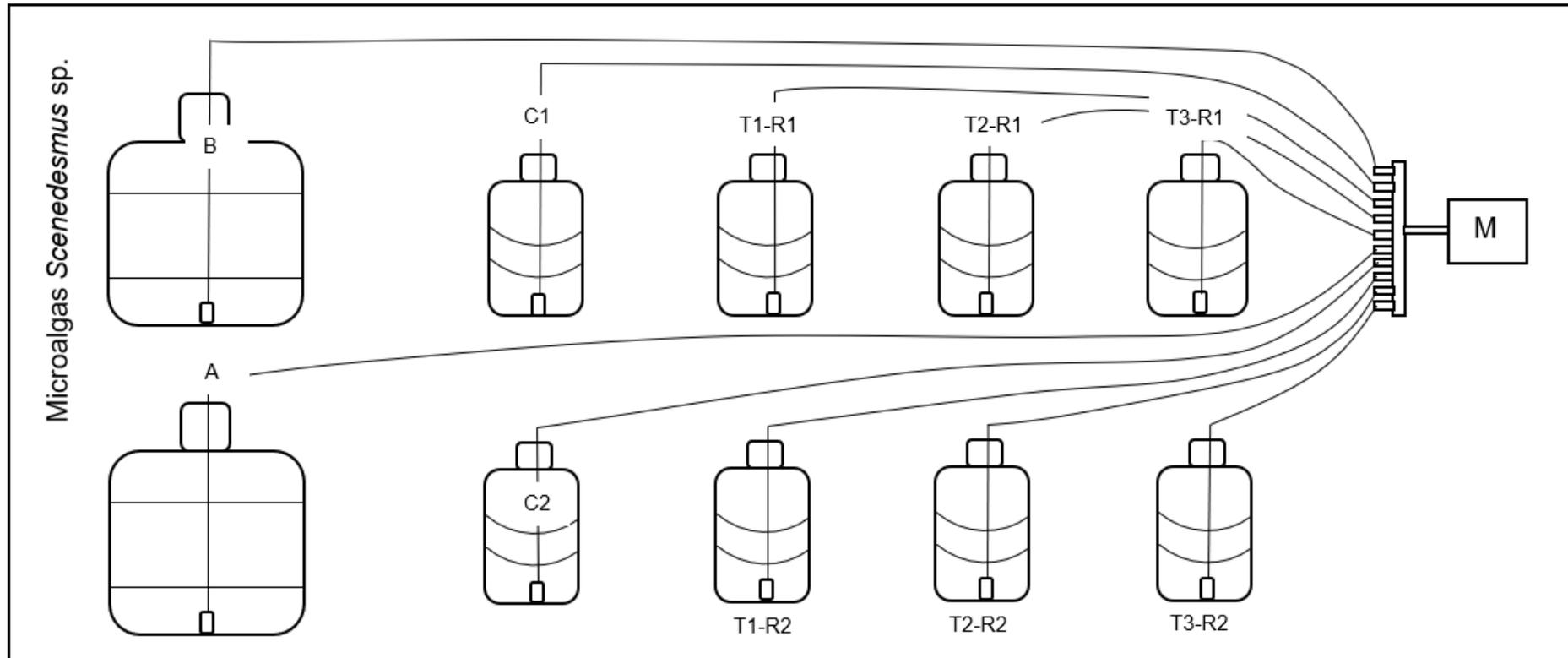


Figura 4. Diagrama del diseño experimental aplicado.

Donde: M = motor (el cual estuvo conectado a una válvula con varios grifos, C = Control (los cuales fueron extraídos de la fuente principal de microalgas *Scenedesmus sp.* Para su posterior control, T = Tratamientos y finalmente R = Réplicas de cada tratamiento, A y B = Envases con cultivo de microalgas.

El proceso consistió en instalar un área o espacio que cumpla con las condiciones necesarias y óptimas para llevar a cabo el desarrollo del proyecto, teniendo todo lo necesario se procedió a implementar por partes cada sector del mismo. El primer paso fue contar una bomba de aire que desplazó su contenido a través de tubos flexibles para acuario de 0,16 pulgadas apoyado de una válvula de control de 0,157 x 0,236 pulgadas a palanca donde al final del recorrido se contempló con una piedra difusora de aire de forma cilíndrica de 4 x 2 x 2 de la misma medición que las antes mencionadas.

Teniendo todo el sistema se procedió a realizar lo siguiente:

- De los recipientes A y B se procedió a extraer 1L de cultivo para llenar los envases C1 y C2 respectivamente para su posterior análisis en laboratorio.
- De A se extrajeron diferentes cantidades como 950 ml, 900 ml, y 850 ml de microalgas para luego ser depositadas en T1-R1, T2-R1 y T3-R1.
- Lo mismo sucedió para T1-R2, T2-R2, T3-R2.
- Posteriormente, se contempló a 1 L cada envase de los 3 tratamientos con sus dos réplicas con efluente procedente de la planta de lácteos.

Constantemente se estuvo monitoreando el color, la temperatura y algún cambio inesperado en el proceso de tratamiento, para al final de 9 días se selló cada recipiente y fueron llevado inmediatamente al laboratorio para su análisis final.

En la tabla 7, se muestran los niveles establecidos para la variable independiente. Para los valores de pH se tomó como punto central el valor de las condiciones naturales de las microalgas y los valores mínimos y máximos fueron establecidos con dos (02) unidades de diferencia del mismo, para el caso de la iluminación en que las microalgas realizan los procesos de fotosíntesis y crecimiento celular se encuentra entre 400 y 700 nm, con una iluminancia óptima de 11 klux (Valencia, 2018), por lo que se tomó ese valor como punto central y 5 unidades de diferencia para sus valores máximo y mínimo. Para la concentración de nutrientes, se empleó el medio de cultivo acorde a lo señalado en el (Tabla 8), de acuerdo al autor antes citado, las condiciones de cultivo iniciales deben ser de 40 ml de cultivo de *Scenedesmus* sp., en 120 ml de medio, este fue el valor central y se tomaron valores medios por arriba y por debajo de concentración de nutrientes.

Tabla 7. Niveles máximos y mínimos de la variable independiente.

Indicadores	Niveles	
	-1	+1
Temperatura	23 °C	32 °C
Concentración de nutrientes	60 ml	180 ml
Intensidad luminosa	6 klux	616 klux

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.3. Variables

Tabla 8. Variables.

Variables	Definición
Independiente: Microalgas	Las microalgas son generalmente autótrofos, u organismos que obtienen su energía del sol y crecen a partir de materia orgánica. Pero también, es necesario indicar que algunas especies de microalgas pueden crecer utilizando material orgánico como fuente de energía o de carbono (Malgas, 2013).
Dependiente: Análisis físico - químico	Es el procedimiento que permite en laboratorio identificar y evaluar el DBO ₅ , DQO, Sólidos suspendidos totales así como los Aceites y Grasas, entre otros; sin embargo para el presente trabajo se establecieron solo los que se mencionaron líneas atrás.

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.4. Indicadores

Tabla 9. Indicadores.

Variabes	Indicadores
Independiente: Microalgas	Temperatura
	Concentración de micronutrientes (%)
	Intensidad luminosa (cd)
Dependiente: Análisis físico - químico	DQO
	DBO ₅
	SST
	Aceites y Grasas

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2.5. Ajuste estadístico

Para el análisis estadístico se tomaron los datos obtenidos del experimento y se aplicó una prueba de Kolmogórov-Smirnov para determinar si la distribución es normal o no, para aplicar pruebas estadísticas paramétricas o no paramétricas. Para la prueba de correlación, si la distribución es normal, se utiliza la prueba de Pearson y si la distribución es no normal se aplica la prueba de Rho de Spearman. Esto con la finalidad de conocer como los parámetros como pH, concentración de micronutrientes e intensidad luminosa influyen en las pruebas de DBO₅ y DQO.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3. Caracterización del agua residual

Los resultados obtenidos de la caracterización del agua residual proveniente de una planta de alimentos lácteos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados de la caracterización del agua residual.

Parámetro	Unidad	M-1	M-2	M-3	Promedio
DBO ₅	mg O ₂ /L	47219.3	49336.7	48662.9	48406,3 ± 1081,8
DQO	mg O ₂ /L	76176.5	75207.0	73914.3	75099.3 ± 1134.9
SST	mg /L	8440	8660	8520.0	8540.0 ± 111.4
Aceites y Grasas	mg /L	383	401	371.0	385.0 ± 15.1

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Tabla 10, todos los parámetros iniciales del agua residual utilizada exceden los límites permisibles acorde a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua según el Decreto Supremos N° 004-2017-MINAM, para su disposición final en cuerpos de agua. En el caso de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), el límite establecido es de un máximo de 15 mg O₂/L para la conservación de ecosistemas marinos tipo estuarios, la Demanda Química de Oxígeno (DQO) tiene un límite máximo de 50 mg O₂/L en el caso de aguas superficiales, los Sólidos Suspendidos Totales (SST) se establecen en un máximo de 400 mg/L para el vertido en ríos.

Los aceites y grasas un máximo de 5 mg/L para el vertido en cualquier cuerpo de agua.

Lo anterior demuestra que las características del agua residual la hacen no apta para ser depositada en cuerpos de agua y que por lo tanto amerita de un tratamiento previo a su disposición final. El resultado también se puede apreciar en la figura 5.

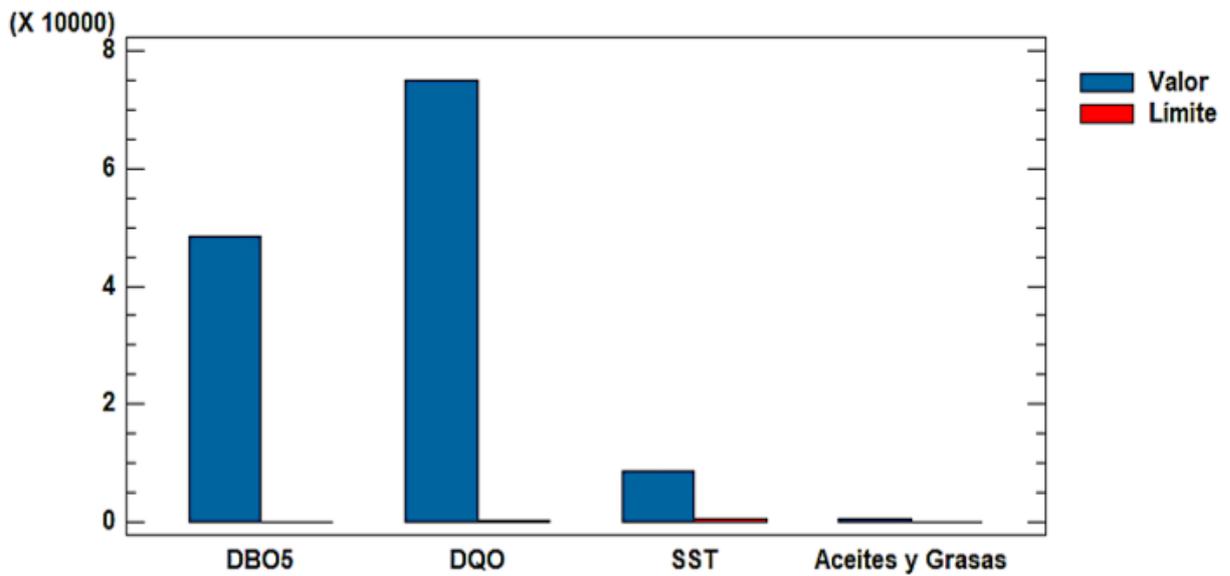


Figura 5. Resultados de la caracterización del agua residual.

4.4. Aplicación de tratamientos

4.4.1. Tratamiento T1

El tratamiento T1, como se estableció en el diseño experimental, constó de la aplicación de 950 ml de la solución con microalgas y 50 ml del agua residual a los dos niveles establecidos para las variables independientes, obteniéndose los resultados que se muestran en la figura 6.

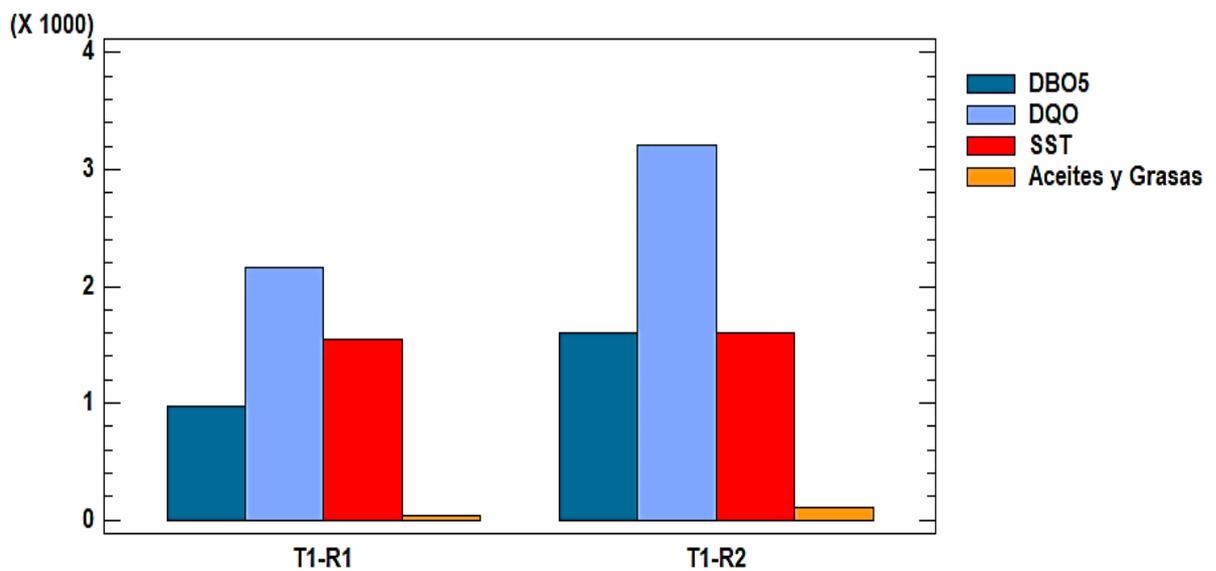


Figura 6. Resultados del tratamiento T1.

Se observa que con el tratamiento T1 se obtuvo una disminución en todos los parámetros de calidad del agua estudiados como variables dependientes, tanto para la R1

que corresponde a los niveles mínimos de las variables independientes (pH, intensidad luminosa y cantidad de nutrientes) como con R2 que corresponde a los niveles máximos.

Con el tratamiento T1-R1 se alcanzó un valor de 976.3 mg O₂/L y con T1-R2 un valor de 1675.8 mg O₂/L. Para el caso de la DQO los valores fueron de 2157.1 y 3203.8 mg O₂/L para T1-R1 y T1-R2, respectivamente.

Los SST mostraron valores de 1540.0 mg/L y 1600.0 mg/L para T1-R1 y T1-R2, respectivamente. Asimismo, los aceites y grasas reportaron valores de 34.3 mg/L y 105.8 mg/L para T1-R1 y T1-R2, respectivamente.

Los resultados indican que el tratamiento T1-R1 reportó los menores valores para cada uno de los parámetros de calidad de agua en comparación con T1-R2, es decir que los niveles más bajos de los factores experimentales fueron los que mejores resultados arrojaron.

4.4.2. Tratamiento T2

En el caso del tratamiento T2, en el cual se utilizaron 900 ml de solución con microalgas *Scenedesmus* sp., y 100 ml de agua residual, los resultados se muestran en la figura 6, donde se observa un comportamiento similar al que reportó el tratamiento T1, con una disminución de los parámetros de calidad del agua y menores valores para R1.

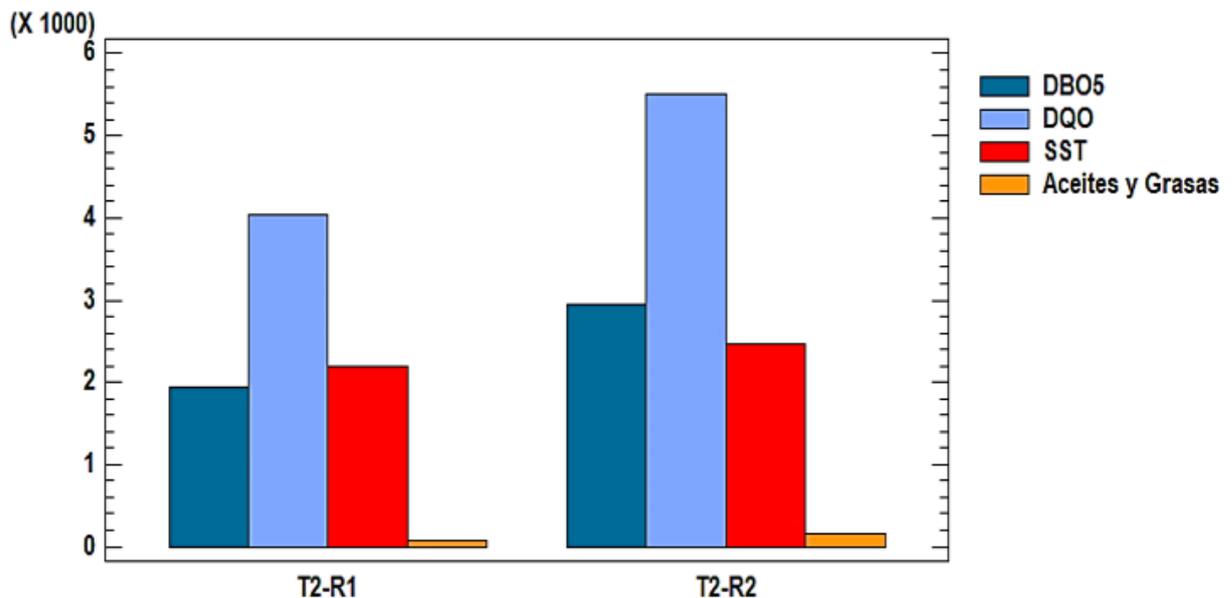


Figura 7. Resultados del tratamiento T2.

Se obtuvo que para la DBO₅ el tratamiento T2-R1 reportó el menor valor de 1 937,0 mg O₂/L en comparación con T2-R2 cuyo valor fue de 2 943,2 mg O₂/L. De forma similar, T2-R1 reportó una DQO de 4 041,1 mg O₂/L que fue menor a lo reportado en el caso de T2-R2 que fue de 5 506,4 mg O₂/L.

Respecto a los SST, los valores obtenidos fueron de 2 200,0 y 2 460,0 mg/L para T2-R1 y T2-R2, respectivamente, con un menor valor en el caso de T2-R1. Por su parte, los aceites y grasas obtuvieron valores de 81,6 mg/L para T2-R1 y 164,2 mg/L para T2-R2.

En todos los parámetros se observaron menores valores para el tratamiento T2-R1, lo que evidencia que los niveles más bajos de las variables independientes son los que aportan los mejores resultados con este tratamiento.

4.4.3. Tratamiento T3

En el tratamiento T3 se utilizaron 850 ml de solución de microalgas *Scenedesmus* sp., y 150 ml de agua residual y se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 8.

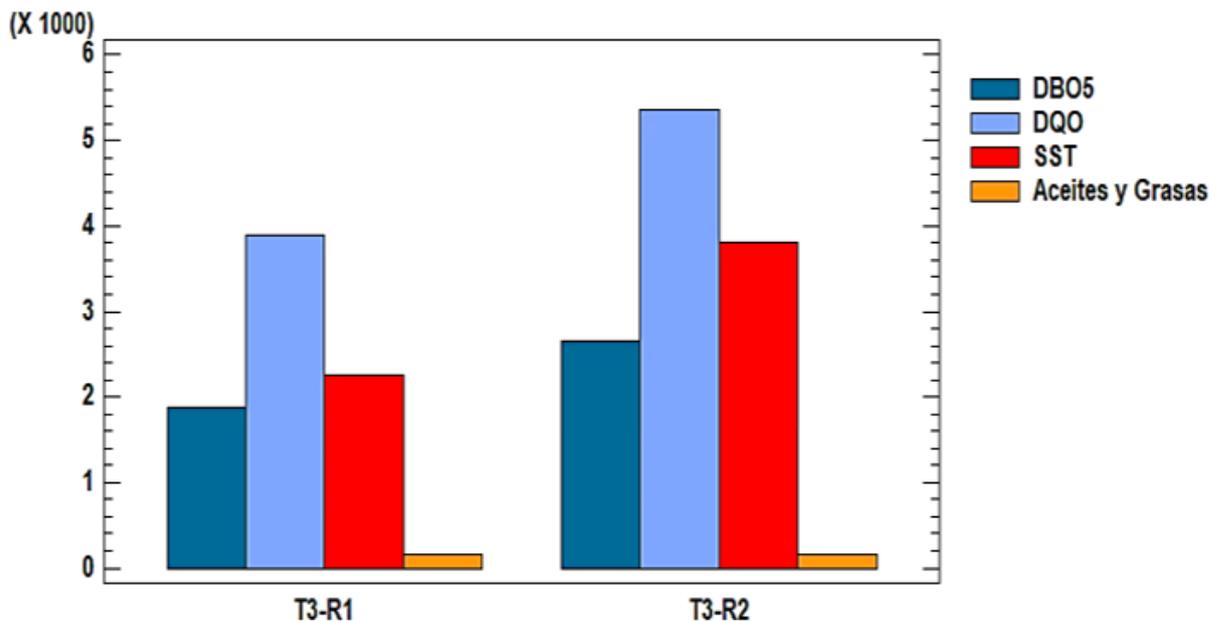


Figura 8. Resultados del tratamiento T3.

El comportamiento de los resultados para T3 fue similar a lo observado en los tratamientos T1 y T2, es decir, los menores valores se observan para el caso de T3-R1. Para la DBO5 los valores obtenidos fueron de 1 888,1 y 2 649,4 mg O₂/L para T3-R1 y T3-R2 respectivamente. Por su parte, la DQO reportó valores de 3 901,5 mg O₂/L para el tratamiento T3-R1 y 5 366,8 mg O₂/L en el caso de T3-R2.

Los resultados para los SST indicaron que T3-R1 reporta valores menores de 2 260,0 mg/L en comparación con los 3 810,0 mg/L obtenidos con T3-R2. De igual forma, al analizar lo obtenido de aceites y grasas, se corroboró una cantidad menor para T3-R1 de 149,7 mg/L al compararla con los 153,4 mg/L reportados para T3-R2.

Con el tratamiento T3 se demuestra, al igual que con los otros, que los valores más bajos de los parámetros medidos como variables dependientes se obtienen a los menores niveles de las variables independientes.

4.5. Porcentaje de remoción

Para el cálculo de los porcentajes de remoción de DBO5, DQO, SST y aceites y grasas, se tomaron en cuenta tanto los parámetros obtenidos del agua residual como los aportados por la propia solución de microalgas (tratamientos control). Lo anterior debido a que al mezclar la solución de microalgas con el agua residual, se tiene una mezcla de parámetros de calidad de agua inicial en cada tratamiento la cual estará en función al promedio ponderado de las concentraciones de cada parámetro. Los valores obtenidos de los tratamientos control con 100% solución de microalgas se muestran en la figura 9.

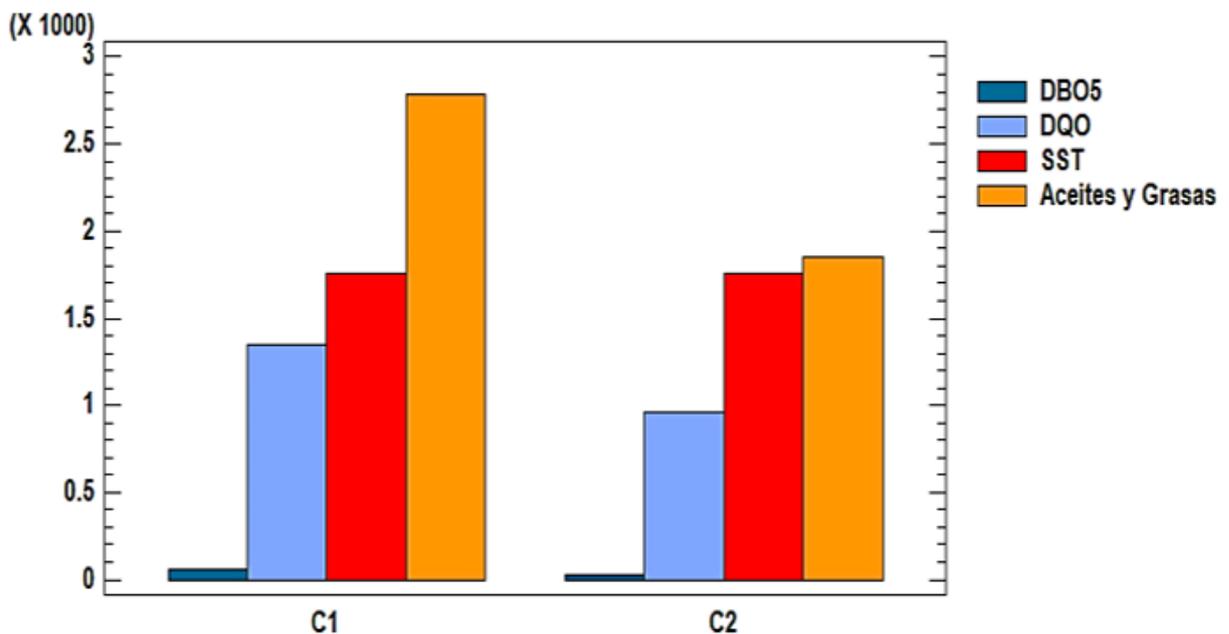


Figura 9. Resultados para los tratamientos control (100% microalgas).

Para ambos grupos control, los valores de DBO5, DQO y SST fueron menores a los reportados para el agua residual, con especial énfasis en las cantidades relativamente bajas de DBO5. Para C1 los valores fueron: DBO5 de 53.9 mg O₂/L, DQO de 1346.8 mg O₂/L y SST de 1760 mg/L, y para C2 se reportó DBO5 de 25.6 mg O₂/L, DQO de 963.2 mg O₂/L y SST de 1760 mg/L. Como se observa, el control C1 que se encontraba a los menores niveles de las variables independientes arrojó mayores valores de los parámetros, con excepción de los SST que no variaron entre tratamientos.

Respecto a los aceites y grasas, los tratamientos control reportaron valores mayores a los del agua residual (2785.1 mg/L para C1 y 1846.1 para C2) lo que

evidencia que la solución de microalgas presenta una mayor cantidad de componentes de aceites y grasas en comparación con el agua residual que se utilizó para la investigación.

Los resultados de los parámetros promedio para cada uno de los tratamientos aplicados, como función de los parámetros obtenidos en el agua residual y en la solución de microalgas *Scenedesmus sp.*, se muestran en el Tabla 11.

Tabla 11. Resultados obtenidos del cálculo de los parámetros iniciales para cada tratamiento.

Tratamiento	Microalgas (ml)	Parámetro	Valor Control	Agua Residual (ml)	Valor Agua Residual	Promedio parámetro
T1-R1	950	DBO ₅ (mg O ₂ /L)	53,9		48 4063	2 471,52
		DQO (mg O ₂ /L)	1 346,8		75 099,3	5 034,425
		SST (mg/L)		50		
		Aceites y Grasas (mg/L)	1 760		8 540	2 099
		DBO ₅ (mg O ₂ /L)	2 785,1		385	2 665,095
		DQO (mg O ₂ /L)	25,6		48 4063	2 444,635
T1-R2	950	SST (mg/L)	963,2		75 099,3	4 670,005
		SST (mg/L)		50		
		Aceites y Grasas (mg/L)	1 760		8 540	2 099
		DBO ₅ (mg O ₂ /L)	1 846,1		385	1 773,045

Tratamiento	Microalgas (ml)	Parámetro	Valor Control	Agua Residual (ml)	Valor Agua Residual	Promedio parámetro
		DBO ₅ (mg O ₂ /L)	53,9		48 4063	4 889,14
		DQO (mg O ₂ /L)	1 346,8		75 099,3	8 722,05
T2-R1	900	SST (mg/L)		100		
		Aceites y Grasas (mg/L)	1 760		8 540	2 438
		DBO ₅ (mg O ₂ /L)	2 785,1		385	2 545,09
		DQO (mg O ₂ /L)	25,6		48 4063	4 863,67
T2-R2	900	SST (mg/L)	963,2	100	75 099,3	8 376,81
		Aceites y Grasas (mg/L)	1 760		8 540	2 438
		DBO ₅ (mg O ₂ /L)	1 846,1		385	1 699,99
		DQO (mg O ₂ /L)	53,9		48 4063	7 306,76
T3-R1	850	SST (mg/L)	1 346,8	150	75 099,3	12 409,675
		Aceites y Grasas (mg/L)	1 760		8 540	2 777
		DQO (mg O ₂ /L)	2 785,1		385	1 626,935

Tratamiento	Microalgas (ml)	Parámetro	Valor Control	Agua Residual (ml)	Valor Agua Residual	Promedio parámetro
		DBO ₅ (mg O ₂ /L)	25,6		48 4063	7 282,705
		DQO (mg O ₂ /L)	963,2		75 099,3	12 083,615
T3-R2	850	SST (mg/L)		150		
		Aceites y Grasas (mg/L)	1 760		8 540	2 777
			1 846,1		385	1 626,935

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Tabla 11, las mezclas de la solución de microalgas y el agua residual, así como las condiciones a las que se sometieron los tratamientos incide en los valores iniciales de los parámetros para cada tratamiento, lo que evidentemente puede influir también en los porcentajes de remoción obtenidos, los cuales se muestran gráficamente en la figura 10.

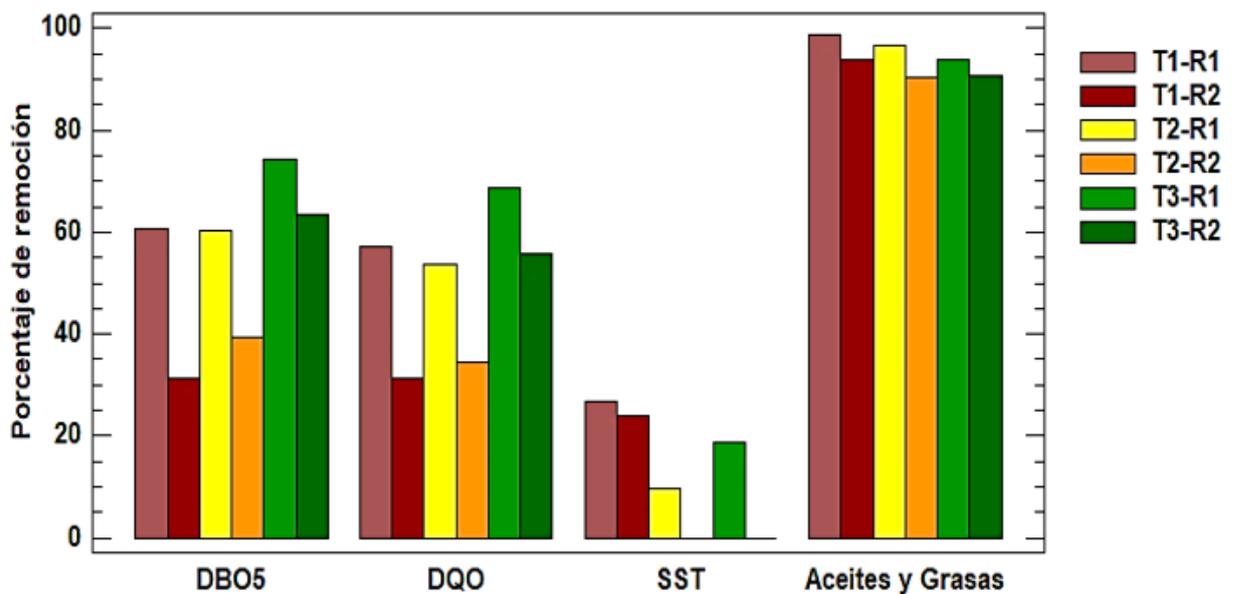


Figura 10. Resultados de los porcentajes de remoción de DBO₅, DQO, SST y Aceites y Grasas por cada tratamiento.

De manera general, en la figura 10 se observa que los mayores porcentajes de remoción correspondieron a los aceites y grasas para todos los tratamientos aplicados, alcanzándose valores en un rango entre 90,3% para T2-R2 y 98,7% en T1-R1. En este parámetro destacaron los tratamientos a los menores niveles de las variables independientes (R1) con un promedio de remoción de 96,4% superando a los tratamientos con mayores niveles de las variables independientes (R2), quienes promediaron 91,6% de remoción.

En contraste, el parámetro con menores porcentajes de remoción fue SST con 13,1% de promedio general. El tratamiento con la mayor remoción de SST fue el T1-R1 con 26,6% y los de menor porcentaje fueron los tratamientos T2-R2 y T3-R2 con valores cercanos a 0,0% de remoción, por lo que se considera que estos fueron ineficientes para remover este parámetro. Los tratamientos aplicados como R1 promediaron mayor remoción de SST con 18,3% en comparación con los tratamientos R2 con 7,9% de remoción.

El comportamiento de DBO5 y DQO presentó una tendencia similar respecto a los tratamientos. El tratamiento con los mayores porcentajes de remoción de DBO5 fue el T3 en sus dos repeticiones, con 74,2% para T3-R1 y 63,4% para T3-R2. Al tratamiento T3 le siguen T1-R1 y T2-R1 con 60,5 y 60,4% respectivamente y los tratamientos con menor porcentaje de remoción fueron el T2-R2 con 39,5% y T1-R2 con 31,4%

En relación al DQO, se observa que los tratamientos con mayor porcentaje de remoción fueron T3-R1 con 68,6%, seguido por T1-R1 cuyo porcentaje de remoción fue de 57,2% y T3-R2 donde se removió el 55,6% del DQO, también destacó el T2-R1 con 53,7%. Los dos tratamientos restantes T2-R2 y T1-R1 reportaron porcentajes de remoción de 34,3 y 31,4%, respectivamente.

4.6. Relación entre cantidad de microalgas *Scenedesmus sp.*, y los parámetros de calidad de agua residual

Para establecer la relación entre los tratamientos como función a las cantidades de microalgas aplicadas y los porcentajes de remoción de DBO5, DQO, SST y Aceites y Grasas, de acuerdo con lo establecido en la metodología, se procedió a determinar si los datos se comportan acorde con una distribución normal. Los resultados se tabulan en el Tabla 12.

Tabla 12. Resultados del análisis de normalidad de datos para los resultados de porcentaje de remoción.

Réplica	Parámetro	Estadístico K-S	P-Valor	Interpretación
R1	DBO ₅	0,38	0,7719	Normal
	DQO	0,30	0,9514	Normal
	SST	0,18	0,9999	Normal
	Aceites y Grasas	0,23	0,9980	Normal
R2	DBO ₅	0,29	0,9606	Normal
	DQO	0,35	0,8666	Normal
	SST	0,38	0,7660	Normal
	Aceites y Grasas	0,36	0,8339	Normal

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados de la prueba de supuesto de normalidad de Kolmogórov-Smirnov, todos los parámetros se comportan de acuerdo con una distribución normal, lo que se indica por el p-valor $> 0,05$. Lo anterior demuestra que se pueden utilizar pruebas estadísticas paramétricas para establecer relaciones entre las variables, en el caso particular entre las cantidades de microalgas utilizadas en los tratamientos y los parámetros de calidad de aguas residuales medidos.

Los valores de coeficiente de correlación R de Pearson determinados para la relación entre las cantidades de microalgas utilizadas en los tratamientos y los porcentajes de remoción de parámetros de calidad de agua se muestran en el Tabla 13.

Tabla 13. Resultados del análisis de correlación de Pearson.

Réplica	Parámetro	R de Pearson	Interpretación
R1	DBO ₅	-0,8629	Relación inversa muy fuerte
	DQO	-0,7316	Relación inversa muy fuerte
	SST	0,4760	Relación directa moderada
	Aceites y Grasas	0,9917	Relación directa casi perfecta
R2	DBO ₅	-0,9612	Relación inversa casi perfecta
	DQO	-0,9157	Relación inversa muy fuerte
	SST	0,8660	Relación directa muy fuerte
	Aceites y Grasas	0,8272	Relación directa muy fuerte

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que los porcentajes de remoción de DBO₅ y DQO se comportan de forma inversa con las cantidades de microalgas aplicadas, es decir, al aumentar la cantidad de microalgas, los porcentajes de remoción disminuyen, lo que se puede observar gráficamente en la figura 11.

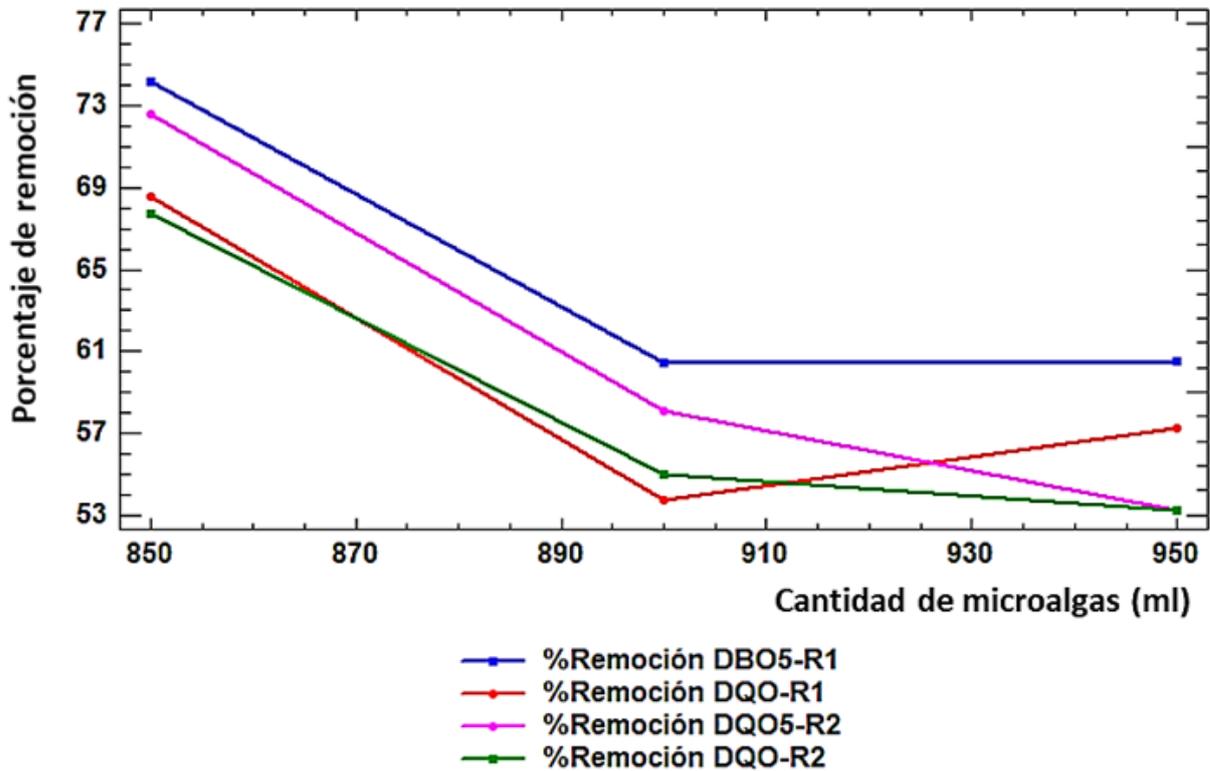


Figura 11. Porcentajes de remoción de DBO₅ y DQO.

Se observa cómo los porcentajes de remoción se comportan de forma inversa con el aumento de la cantidad de microalgas en ml que se utilizó para los tratamientos, lo que demuestra la relación inversa que se obtuvo en el análisis de correlación, la cual fue además interpretada como de muy fuerte a casi perfecta (Hopkins, 2014).

Por el contrario, en el Tabla 13 se observa que en el caso de la remoción de SST y aceites y grasas la relación es directa y va desde moderada (SST para R1) hasta casi perfecta (aceites y grasas en R1). Lo anterior infiere que al aumentar la cantidad de microalgas *Scenedesmus sp.*, (ml) también aumentan los porcentajes de remoción de SST y aceites y grasas, independientemente de las condiciones aplicadas según las réplicas. En la figura 12 se muestra el comportamiento gráfico de estos dos parámetros.

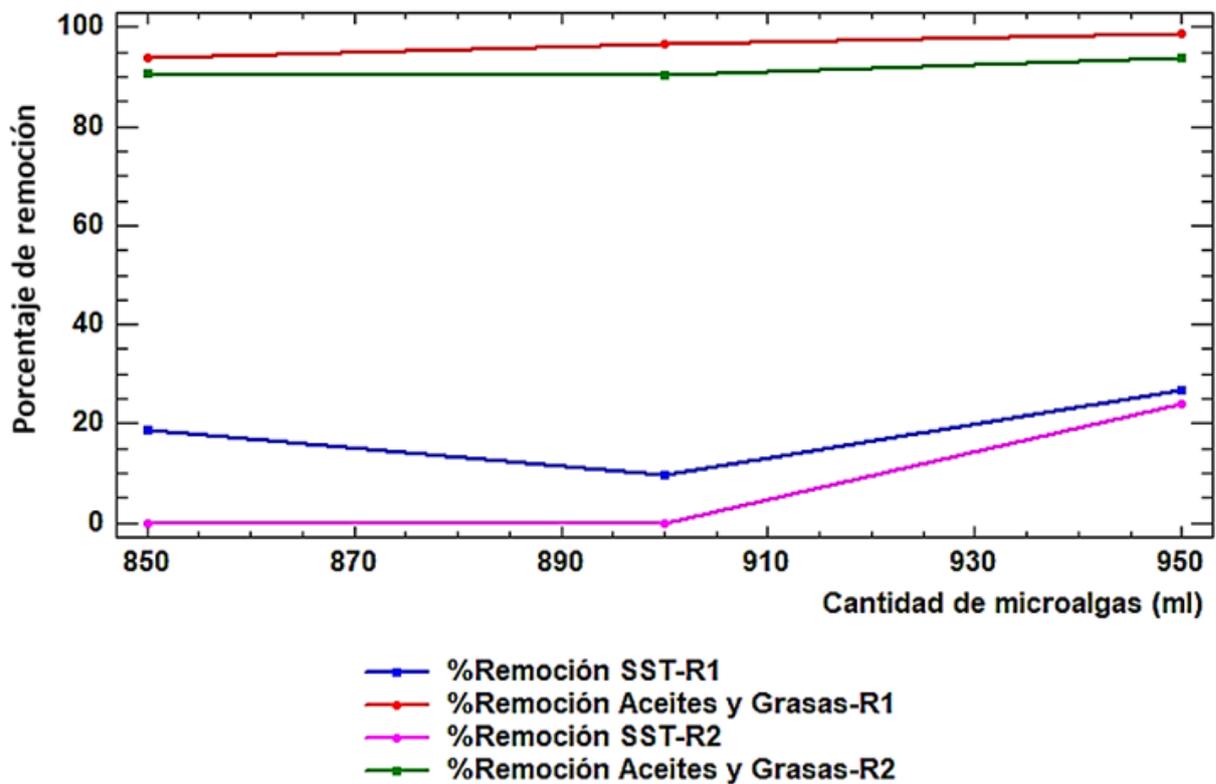


Figura 12. Porcentajes de remoción de SST y Aceites y Grasas.

En la figura 12 se observa cómo el porcentaje de remoción de aceites y grasas sigue una tendencia sostenida al aumento al incrementar la cantidad de microalgas utilizada en los tratamientos, llegando a casi el 100% (98,7%) lo que es indicativo de que los tratamientos aplicados son altamente eficientes para la remoción de este parámetro de calidad de aguas residuales. En relación a los SST los porcentajes de remoción fueron bajos, sin embargo, se observa un aumento de los mismos al aumentar la cantidad de microalgas utilizada por lo que se infiere que, aunque los tratamientos no son tan eficientes para la remoción de este parámetro la misma mejora al aumentar la cantidad de microalgas del tratamiento.

4.7. Comprobación de la hipótesis de investigación

La hipótesis planteada en la investigación fue “Al aplicar las algas *Scenedesmus* sp., se logrará un porcentaje de remoción de contaminantes orgánicos en un 50%” por lo que para la comprobación de la misma se calcularon los porcentajes de remoción de contaminantes promedio por cada tratamiento y los resultados se muestran en la figura 13.

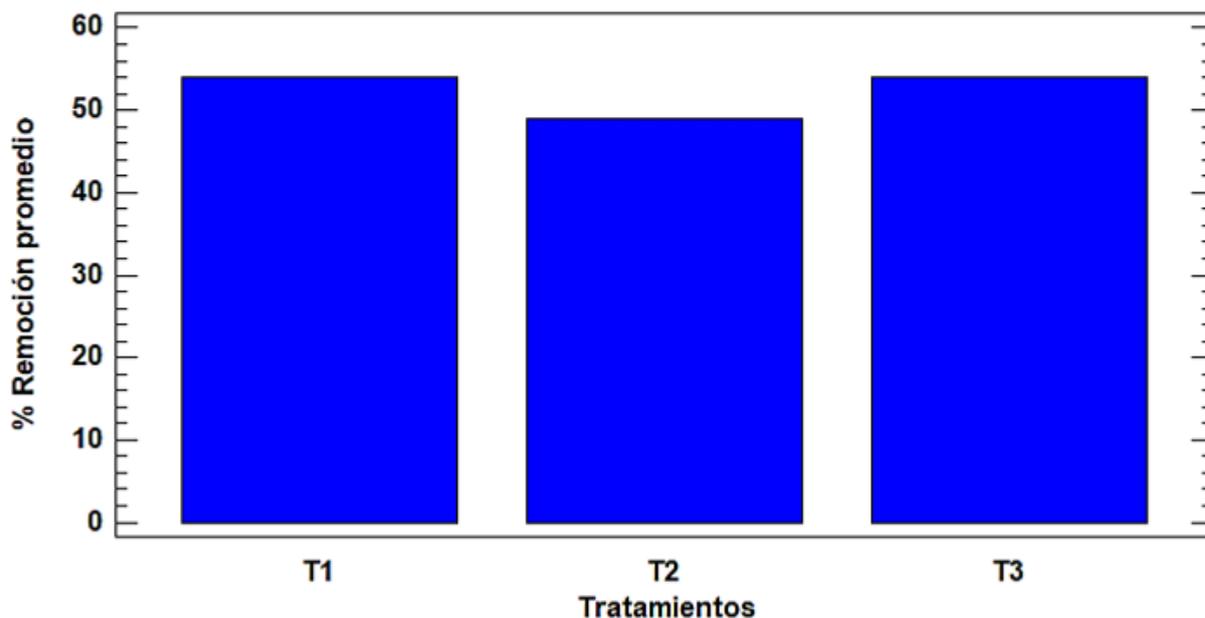


Figura 13. Porcentajes de remoción promedio de contaminantes por tratamiento.

Los tratamientos T1 y T3 superaron en promedio el 50% de remoción de contaminantes en promedio con 53,9 y 54,0%, respectivamente. Por otro lado, el tratamiento T2 obtuvo en promedio 48,7% de remoción de contaminantes, siendo este el único de los tratamientos que no cumplió con la premisa establecida en la hipótesis, aunque su porcentaje de remoción estuvo cerca del 50%. A pesar de que T2 no cumplió con lo establecido en la hipótesis, en promedio general se comprueba que los tratamientos con la microalga *Scenedesmus* sp., lograron remover el 52,2% de los contaminantes determinados en el agua residual, lo que comprueba la hipótesis de investigación planteada.

La discusión de a continuación inicia en la caracterización del agua residual producto de la industria láctea, utilizada como muestra presentó valores de parámetros fisicoquímicos que exceden los límites permisibles para su vertido a cuerpos de agua, según el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM, los cuales fueron $DBO_5 = 48\,406,3$ mg O_2/L , $DQO = 75\,099,3$ mg O_2/L , $SST = 8\,540,0$ mg/L y Aceites y grasas = 385,0 mg/L. Estos resultados difieren de los reportados por (Chacón y Ramírez, 2020), en cuyo trabajo se observa que en el efluente líquido de una industria láctea los contaminantes estudiados presentaron los siguientes valores: $DBO_5 = 3\,000$ mg O_2/L , $DQO = 6\,000$ mg O_2/L , $SST = 36\,000$ mg/L y Aceites y grasas = 11 mg/L. Por su parte, (Landi, 2018) también reportó valores para un efluente líquido de una industria que difieren sustancialmente de los obtenidos en la presente investigación con $DBO_5 = 1\,065,0$ mg O_2/L , $DQO = 2\,147,5$ mg O_2/L , $SST = 3\,134,0$ mg/L y Aceites y grasas = 29,9 mg/L. De igual manera se observaron diferencias con lo obtenido por (Cuvi, 2017) cuyos

valores reportados para un efluente de industria láctea fue de $DBO_5 = 3\ 026,8\ \text{mg O}_2/\text{L}$, $DQO = 16\ 099,3\ \text{mg O}_2/\text{L}$, $SST = 4\ 823,3\ \text{mg/L}$ y Aceites y grasas = $382,6\ \text{mg/L}$.

De lo anterior se deduce que los valores de los contaminantes que se producen en las aguas residuales de las industrias lácteas difieren dependiendo de la misma y de los procesos y tecnologías que en ella se utilicen (Chacón y Ramírez, 2020). Por lo anterior, era de esperarse que no se encontraran coincidencias con trabajos anteriores, sin embargo, en el caso de los Aceites y grasas el valor promedio obtenido fue similar al reportado por (Cuvi, 2017) siendo en ambos casos mayores a los reportados por los otros autores citados.

La eficiencia del uso de microalgas para la remediación y tratamiento de aguas residuales ha sido corroborado en investigaciones previas como la de (Ortiz-Villota et al., 2018) quienes trabajaron con las especies *Spirulina maxima*, *Spirulina platensis* y *Chlorella vulgaris* y demostraron que las mismas son eficientes para la remoción de contaminantes nitrogenados y fosforados del agua, lo que concuerda con la eficiencia obtenida en la presente investigación, aun cuando se utilizó una especie diferentes de microalga, lo que corrobora su potencial en el tratamiento de aguas residuales. Por su parte, (Vacca et al., 2017) al utilizar la microalga *Chlorella sp* en el agua residual de una industria textil alcanzaron remociones de DBO_5 de 94,6% y DQO de 95,4%, las cuales, al ser comparadas con las obtenidas en la presente investigación, son mayores ($DBO_5 = 74,2\%$ y $DQO = 6,6\%$ máximo) sin embargo, estos resultados están condicionados por el tipo de microalga utilizado y las características propias del agua residual, por lo que es comprensible las diferencias.

(Mendoza, 2019) al evaluar la microalga *Chlorella vulgaris* para remover DBO_5 , de efluentes de remojo de curtiembre, reportó porcentajes entre 68 y 91% de remoción, lo que está acorde con el resultado obtenido en la presente investigación con la microalga *Scenedesmus sp* que fue máximo 74,2%, el cual está comprendido dentro del rango establecido por el autor citado. El uso de la microalga *Scenedesmus obliquus* para la remoción de contaminante del agua residual de la producción de aceite de oliva fue llevado a cabo por (Patiño, 2016) quien reportó valores de remoción de $DBO_5 = 44\%$, $DQO = 64\%$ y $SST = 58\%$, los cuales, a excepción de los SST , fueron menores a los valores máximos obtenidos en la presente investigación ($DBO_5 = 74,2\%$, $DQO = 68,6\%$ y $SST = 26,6\%$) aunque en ambos casos se demostró la eficiencia de la microalga, los resultados están condicionados al tipo de efluente tratado.

El empleo de la microalga *Scenedesmus sp* para el tratamiento de aguas residuales también se corroboró en el trabajo de (Castañeda y Castillo, 2016) en efluentes de curtiembres, reportando remociones de DBO_5 y DQO de 93% y SST 74%, lo que indica que la microalga es más eficiente para el tratamiento de aguas residuales de curtiembre que para el caso de las aguas

residuales de la industria láctea que se utilizó en la investigación, sin embargo, ambos resultados destacan la importancia y eficiencia de *Scenedesmus sp* como tratamiento para la remoción de los contaminantes. De igual forma la aplicación de la microalga *Scenedesmus sp* para el tratamiento de aguas residuales fue reportada por (Sánchez, 2016) que obtuvo una eficiencia de remoción de 90% tanto para DBO₅ como DQO, ambos valores mayores a los máximos obtenidos en la presente investigación, aunque se debe aclarar que la composición de las aguas residuales domésticas es diferente a las de la industria láctea, por eso la diferencia, aun cuando se comprobó igualmente la eficiencia de la microalga para remover estos contaminantes.

Respecto a la remoción de Aceites y grasas, se obtuvo un máximo de 98,7% siendo este el parámetro con el mayor porcentaje de remoción, respecto a los otros estudiados. El porcentaje de remoción fue superior al reportado por (López et al., 2016) que fue obtenido al utilizar microalgas para el tratamiento de aguas residuales urbanas, con un porcentaje máximo de 86,6%. De igual manera, (López, 2019) reportó una remoción de Aceites y Grasas máxima de 70,8% al utilizar la microalga *Desmodesmus sp* en aguas residuales de una planta de tratamiento, lo que indica que, en el caso específico de la investigación realizada, la microalga *Scenedesmus sp* demuestra ser más eficiente para remover aceites y grasas de aguas residuales debido al mayor porcentaje obtenido. Un resultado similar al obtenido fue reportado por (Ortiz, 2015) al utilizar *Chlorella vulgaris* para depurar aguas residuales de una industria chocolatera con 94% de remoción de aceites y grasas, lo que infiere que las microalgas son capaces de remover los aceites y grasas en porcentajes mayores a 80%, llegando a ser casi del 100% como se observó en la presente investigación.

La capacidad de la microalga *Scenedesmus sp* para la remoción de Aceites y grasas fue destacada por (Hammed et al., 2016) quienes la ubican entre las más comunes para el tratamiento de aguas residuales aceitosas, sobre todo aquellas que contienen hidrocarburos de tipo alcanos, lo que da mayor sustento a los elevados porcentajes de remoción obtenidos en la presente investigación los cuales superaron el 90% en todos los tratamientos, además se comprobó que la relación entre la cantidad de microalgas utilizada y el porcentaje de remoción de los Aceites y grasas mostró altos coeficientes de correlación con R entre 0,8272 y 0,9917 que demuestran que el uso de una mayor cantidad de microalgas genera una mayor remoción de Aceites y grasas.

De forma general se comprobó que la eficiencia de remoción de la microalga *Scenedesmus sp* aplicada al agua residual de industria láctea utilizada en la investigación fue de 52,2% lo que evidencia que la misma es una potencial alternativa en el tratamiento de dicho efluente, aunque este valor contrasta con el obtenido por (Morales, 2016) al utilizar esta misma

microalga para la remoción de contaminantes de una muestra de agua residual urbana, donde el porcentaje global de remoción fue de 80% aunque el autor señala que la eficiencia de la microalga va a estar en función a la disponibilidad de luz y a la dilución de la misma en el efluente, lo que también fue observado en la presente investigación ya que se corroboró que la cantidad de solución de microalgas utilizada con relación al agua residual se relaciona de manera estadísticamente significativa con la remoción de los contaminantes.

La microalga *Scenedesmus sp* es una microalga muy común en todo tipo de masas de agua dulce, que desempeñan un importante papel como productores primarios y contribuyen a la depuración de las aguas eutróficas (Abdel-Raouf et al., 2012) y ha sido estudiada para la eliminación de contaminantes de aguas residuales y se ha demostrado que la concentración de la misma está relacionada con la eficiencia de remoción y que la misma es mayor cuando se aplica a aguas residuales urbanas reales, en comparación con aguas preparadas artificialmente (Sriram y Seenivasan, 2012). Esta observación coincide con los resultados obtenidos, ya que la cantidad de microalgas en los tratamientos demostraron estar relacionadas con los porcentajes de remoción.

La relación inversa entre la cantidad de microalgas *Scenedesmus sp* utilizada y el porcentaje de remoción de DBO₅ y DQO destacó entre los resultados obtenidos. En el caso de la DBO₅ la misma se puede asociar con la necesidad de las microalgas no solo de CO₂ para la llevar a cabo el proceso fotosintético sino también a la necesidad de nutrientes (Choi y Lee, 2012), por lo que una mayor cantidad del agua residual puede favorecer la remoción de este parámetro y eso en el diseño experimental significa una menor cantidad de microalgas, las cuales tienen mayor cantidad de nutrientes y materia orgánica disponible, lo que evidentemente favoreció a las menores cantidades de microalgas utilizadas. Al ser la DQO un proceso donde también se oxida el oxígeno disuelto para producir CO₂, pero no por procesos biológicos sino químicos (Abdel-Raouf et al., 2012), el comportamiento de la relación entre este parámetro y la cantidad de microalgas se muestra de forma similar al observado en la DBO₅, siendo mayor el porcentaje de remoción en los tratamientos con menor cantidad de microalgas, pero mayor relación entre las aguas residuales y estas.

V. CONCLUSIONES

Se comprobó la hipótesis planteada, al evidenciar la remoción de contaminantes promedio en un 52,2%, superando el 50% supuesto en la misma. Asimismo se demostró que las microalgas fueron eficientes en la remoción de DBO₅ y DQO.

Las concentraciones iniciales para DBO₅ fue 48 406,3 mg O₂/L, DQO 75 099,3 mg O₂/L, SST 8 540,0 mg/L y para Aceites y grasas de 385,0 mg/L.

El uso de la microalga *Scenedesmus* sp., para la remoción de contaminantes orgánicos en un efluente lácteo de acuerdo a los parámetros estudiados dieron porcentajes de remoción máximos de DBO₅ de 74,2%, DQO de 68.6%, SST de 26,5% y Aceites y grasas de 98,7%.

Los tratamientos eficientes fueron el tratamiento 1 y el tratamiento 3 al tener un porcentaje de remoción de 53,9% y 54% respectivamente.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

Aunque se obtuvo una eficiencia de remoción promedio de contaminantes acorde con la hipótesis planteada, se recomienda continuar investigando para mejorar dicha eficiencia, considerando todos los parámetros y factores involucrados y con un diseño experimental que permita la optimización del proceso.

Se constató que el tratamiento del efluente lácteo aplicando la microalga *Scenedesmus* sp., es una alternativa factible para la remoción de contaminantes orgánicos en un efluente lácteo, es así que se recomienda ampliar la investigación para establecer los parámetros óptimos de temperatura, luminosidad, nutrientes y relación microalga/efluente óptimo para su aplicación en condiciones naturales a una mayor escala.

En una segunda investigación se recomienda realizar cálculos de producción de biomasa y de aceites y grasas, con el objetivo de poder generar productos secundarios reutilizables.

Dadas las características del efluente lácteo se recomienda su tratamiento previo a su disposición final, sobre todo si va a ser vertido en un cuerpo de agua, debido a que excede los límites permisibles de contaminantes orgánicos.

VII. REFERENCIAS

- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A. A., & Ibraheem, I. B. M. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257–275. <https://doi.org/10.1016/J.SJBS.2012.04.005>
- Amézquita, E. E. (2018). *Remoción de cadmio bivalente (Cd +2) mediante absorción en un sistema de flujo continuo empacado con biomasa muerta e inmovilizada de Scenedesmus obliquus (Turpin) Kützing 1833 a escala de laboratorio* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/5344/BIamimee.pdf?sequence=1>
- Ávila, J. G. (2015). *Evaluación de la remoción de nitratos y fosfatos a nivel laboratorio por microalgas libres e inmovilizadas para el Tratamiento Terciario de Aguas Residuales Municipales* [Tesis de grado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio URP. https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/urp/899/Avila_JGJ.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cáceres, J. (2002). *Evaluación analítica y optimización de procesos de oxidación avanzada en planta piloto solar Ministerio de Ciencia y Tecnología* [Tesis de grado, Universidad de Almería]. Repositorio Institucional DSpace. https://www.psa.es/es/areas/tsa/docs/Tesis_Julia_Caceres.pdf
- Candela, R. D. (2016). *Las microalgas y el tratamiento de aguas residuales: conceptos y aplicaciones. Una revisión bibliográfica* [Tesis de grado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/12170/91541023.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Castañeda, L. P., & Castillo, J. M. (2016). *Influencia de la iluminancia, ph y tiempo en la remoción de sulfuros, sólidos suspendidos, demanda química y biológica de oxígeno de efluentes de ribera en curtiembres utilizando microalgas en un fotobiorreactor a escala laboratorio* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio DSpace. <https://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/1839/Casta%20C3%20B1eda%20F1lores,%20Lourdes%20Pamela.pdf?sequence=1>
- Chacón, J. A., & Ramírez, L. I. (2020). *Propuesta de planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) para empresa de lácteos a partir de la simulación del software GPS-X* [Tesis de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio DSpace.

- <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/25826/1/Informe%20final%20-%20Propuesta%20de%20planta%20de%20tratamiento%20de%20aguas%20residuales%20%28PTAR%29%20para%20empresa%20de%20l%C3%A1cteos%2C%20a%20partir%20de%20la%20simulaci%C3%B3n%20del%20software%20GPS-X.pdf>
- Choi, H.-J., & Lee, S.-M. (2012). Effects of Microalgae on the Removal of Nutrients from Wastewater: Various Concentrations of *Chlorella vulgaris*. *Environmental Engineering Research*. <https://doi.org/10.4491/eer.2012.17.S1.S3>
- Cuvi, K. E. (2017). *Determinación de la factibilidad de utilizar sistemas de lodos activados para depuración de aguas residuales industriales procedentes de una fábrica de lácteos y una de confites*. Quito DM. [Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/14607/1/UPS%20-%20ST003257.pdf>
- Fernández, J., Beascoechea, E., Muñoz, J., & Fernández, D. (2004). *Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación*. https://fundacionglobalnature.org/wp-content/uploads/2020/01/manual_fitodepuracion.pdf
- González-Camejo, J., Serna-García, R., Viruela, A., Pachés, M., Durán, F., Robles, A., Ruano, M. v, Barat, R., & Seco, A. (2017). *Short and long-term experiments on the effect of sulphide on microalgae cultivation in tertiary sewage treatment*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.126>
- Guizado, C. (2014). *Comparativo de tres fitohormonas en concentraciones de 25, 50 y 75 ppm en el crecimiento poblacional de *Scenedesmus acutus meyen*, para uso como biodiésel* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ucayali]. Repositorio Institucional UNU. <http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/1552/000001970T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Hammed, A. M., Kumar Prajapati, S., Simsek, S., & Simsek, H. (2016). Growth regime and environmental remediation of microalgae. *Algae*, 31(3), 189–204. <https://doi.org/10.4490/algae.2016.31.8.28>
- Hernández, A. (2015). *Abastecimiento y Distribución de Agua* (Ibergarceta Publicaciones S.L., Ed.; 6th ed.).
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación* (McGraw-Hill, Ed.; 5th ed.). www.FreeLibros.com
- Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Scielo*, 49, 157–173. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572014000200001>

- Hopkins, W. (2014). *A new view of statistics*. <https://complementarytraining.net/wp-content/uploads/2013/10/Will-Hopkins-A-New-View-of-Statistics.pdf>
- INDECI. (2005). *Programa de prevención y medidas de mitigación ante desastres de la ciudad de Los Baños del Inca*. http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/estudios_CS/Region_cajamarca/cajamarca/banosdelinca.pdf
- Landi, E. (2018). *Evaluación técnica de la planta de tratamiento de aguas residuales de una industria láctea*. [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19553/4/CD-8950.pdf>
- León, G. (2017). *Evaluación de un biorreactor EGSB para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea* [Tesis doctoral, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas]. Repositorio UNICACH. <https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/421?locale-attribute=es>
- López, I., Vásquez, J., & Álvarez, V. (2016). Remoción biológica de nutrientes en aguas residuales urbanas con fotobiorreactores utilizando microalgas. *Redalyc*, 17, 3569–3580. <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263149506015.pdf>
- López, W. M. (2019). *Evaluación de dos especies de microalgas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes de aguas residuales de la PTAR Taboada del Callao, Perú* [Tesis de grado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio UNFV. <http://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/UNFV/2705/LOPEZ%20PONTE%20WILDER%20MICHEL.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Malgas. (2013). Aplicaciones de las microalgas: estado de la técnica. In *AST Ingeniería S.L.* <http://proyectomalgas.com/wp-content/uploads/2014/04/guiamalgas.pdf>
- Manzur, J. P. (2018). *Influencia del petróleo crudo en el crecimiento de dos microalgas amazónicas *Chlorella sp.* y *Scenedesmus sp.** [Tesis de grado, Universidad Científica del Perú]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.ucp.edu.pe/bitstream/handle/UCP/487/MANZUR-1-Trabajo-Influencia.pdf?sequence=1>
- Mendoza, J. L. (2019). *Influencia de la intensidad de luz y pH en la remoción de materia orgánica (DBO5), de efluentes de remojo de curtiembre, utilizando microalga *Chlorella vulgaris*, a nivel laboratorio* [Tesis de grado, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/UNJFSC/2985/MENDOZA%20BOBADILLA%20JORGE%20LUIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- MINAM. (2010). Aprueba Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas o Municipales. *El Peruano*. https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_003-2010-minam.pdf
- MINAM. (2017). Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecen Disposiciones Complementarias. *El Peruano*. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-004-2017-MINAM.pdf>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2010). Decreto Supremo N° 001-2010-AG. *El Peruano*. <https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/marcolegal/normaslegales/decretossupremos/2010/ds01-2010-ag.pdf>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2016). Decreto Supremo que aprueba la actualización del Clasificador de Rutas del SINAC. *El Peruano*. <https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/documentos/D.S.%20N%C2%B0%2001-2016-MTC.pdf>
- Ministerio de Vivienda, C. y S. (2013). *Protocolo de monitoreo de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/23087/RM-273-2013-VIVIENDA.pdf>
- Morales, M. del M. (2016). *Tratamiento de aguas residuales con microalgas en reactores abiertos* [Tesis de grado, Universidad de Almería]. Repositorio Institucional. <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=r00YhW0Jls%3Ds%3D>
- Municipalidad Provincial de Cajamarca. (2022). *Condiciones Ambientales en Cajamarca*. Entorno de Cajamarca. <https://www.municaj.gob.pe/ciudad>
- Ñaupari, J. L., & Rojas, I. C. (2017). *Remoción de nitrógeno total empleando la microalga Chlamydomona Reinhardtii en el efluente de un camal avícola* [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3780/%C5%85aupari%20Dionicio-Rojas%20Rivera.pdf?sequence=1>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (2014). *Fiscalización Ambiental en aguas residuales*. https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=7827
- Ortiz, A. (2015). *Biodepuración de grasas y aceites de efluentes de industria chocolatera, con la microalga Chlorella vulgaris empacada en un sistema de flujo continuo, Arequipa - 2015* [Tesis de grado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional.

- <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/UCSM/3413/42.0120.IB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ortiz-Villota, M. T., Romero-Morales, M. A., & Meza-Rodríguez, L. D. (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>
- Patiño, N. del R. (2016). *Biorremediación del efluente de la producción de aceite de oliva, mediante tratamiento con Scenedesmus obliquus (Turpin) Kützing 1833 en un sistema de fotobioreactor tipo panel* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio Institucional. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/1831>
- Ramalho, R. S. (1996). *Introduction to Wastewater Treatment Processes* (Reverté, Ed.; Second, Vol. 1).
- Rosales, A., Rodríguez, C., & Ballen-Segura, M. (2018). Pollutant Remotion and Growth of *Scenedesmus* sp. on Wastewater from Tannery. A Comparison Between Free and Immobilized Cells. *Ingeniería y Ciencia*, 14. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.14.28.1>
- Ruiz, A. (2011). *Puesta en marcha de un cultivo de microalgas para la eliminación de nutrientes de un agua residual urbana previamente tratada anaeróbicamente* [Tesis de grado, Universidad Politécnica de Valencia]. Repositorio Institucional. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12831/Ruiz%20Martinez%20Ana%20-%20Tesina%20Fin%20Master%20-%202011.pdf?sequence=1>
- Salgueiro, J. L. (2018). *Cultivo de microalgas en aguas residuales y aprovechamiento energético de la biomasa algal* [Tesis de grado, Universidad de Vigo]. Repositorio Institucional. <http://www.investigacion.biblioteca.uvigo.es/xmlui/handle/11093/1158>
- Sánchez, I. V. (2016). *Evaluación del crecimiento y capacidad ficorremediadora de la microalga Scenedesmus sp. cultivada en las aguas residuales de la Universidad Nacional de Ucayali* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ucayali]. Repositorio Institucional UNU. http://repositorio.unu.edu.pe/bitstream/handle/UNU/3273/000002317T_FORESTAL_AC.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Sriram, S., & Seenivasan, R. (2012). Microalgae for nutrient removal Microalgae Cultivation in Wastewater for Nutrient Removal. *J. Algal Biomass Utln*, 2, 9–13.

- <http://storage.unitedwebnetwork.com/files/521/f0b1f8c7b925deebd4570c98852dba20.pdf>
- Tikariha, A., & Sahu, O. (2014). Study of Characteristics and Treatments of Dairy Industry Waste Water. *Journal of Applied & Environmental Microbiology*, 2(1), 16–22. <https://doi.org/10.12691/jaem-2-1-4>
- UNESCO. (2015). *Resumen ejecutivo agua para un mundo sostenible Informe*. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000232272_spa
- Vacca, V. A., Angulo, E. R., Puentes, D. M., Torres, J. G., & Plaza, M. E. (2017). Uso de la microalga *Chlorella* sp. viva en suspensión en la decoloración del agua residual de una empresa textil. *Prospectiva*, 15(1), 93–99. <https://doi.org/10.15665/rp.v15i1.829>
- Valencia, M. F. (2018). *Obtención y caracterización de biomasa partir de Fischerella muscicola para aplicación en biocombustibles* [Tesis de grado, Universidad Internacional SEK]. Repositorio Digital. <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2891/1/Tesis%20Maria%20Fernanda%20Valencia.pdf>
- Van Den, C., Mann, D., & Jahns, H. (1996). *Algae: An introduction to Phycology* (George Thieme Verlag, Ed.; 1st ed.). Cambridge University Press.
- Vásquez, E., Zavaleta, T., Mendoza, S., & Merino, J. F. (2020). Efecto de efluentes municipales en el crecimiento y contenido de lípidos de la microalga *Scenedesmus acutus* en laboratorio. *TAYACAJA*, 3(2). <https://doi.org/10.46908/rict.v3i2.117>
- Yanguas, J. (2017). *Optimización en el proceso de depuración de aguas residuales urbanas* [Tesis de grado, Universidad de la Rioja]. Repositorio Digital UNIR. https://www.unirioja.es/facultades_escuelas/etsii/Trabajo_FinGrado/2016-2017/803-TFG-OfertaConcertada.pdf

ANEXOS

Anexo A. Resultados de las pruebas de laboratorio de caracterización



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL- DA
CON REGISTRO N° LE-084



INFORME DE ENSAYO N° IE 0521361

ENSAYOS			Fisicoquímicos					
Código de la Muestra			M-1	M-2	M-3	-	-	-
Código Laboratorio			0521361-01	0521361-02	0521361-03	-	-	-
Matriz			Residual	Residual	Residual	-	-	-
Descripción			Industrial	Industrial	Industrial	-	-	-
Localización de la Muestra			Baños del Inca	Baños del Inca	Baños del Inca	-	-	-
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Sólidos Suspendidos Totales	mg/L	2.5000	8440.0	8660.0	8520.0	-	-	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg O2/L	2.6000	47219.3	49336.7	48662.9	-	-	-
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg O2/L	8.3000	76176.5	75207.0	73914.3	-	-	-
Aceites y Grasas	mg/L	1.7000	383.0	401.0	371.0	-	-	-

Legenda: LCM: Limite de Cuantificación del Método, valor <LCM significa que la concentración del analito es mínima (trazas)



Anexo B. Resultados finales de las pruebas de laboratorio

ENSAYOS			FISICOQUÍMICOS					
Código de la Muestra			T1-R1	T1-R2	T2-R1	T2-R2	T3-R1	T3-R2
Código Laboratorio			0821581-01	0821581-02	0821581-03	0821581-04	0821581-05	0821581-06
Matriz			Residual	Residual	Residual	Residual	Residual	Residual
Descripción			Industrial	Industrial	Industrial	Industrial	Industrial	Industrial
Localización de la Muestra			Baños del Inca					
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	2.5000	1540.0	1600.0	2200.0	2460.0	2260.0	3810.0
Aceites y Grasas	mg/L	1.7000	34.3	105.8	81.6	164.2	149.7	153.4
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg O2/L	2.6000	976.300	1675.8	1937.0	2943.2	1888.1	2649.4
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg O2/L	8.3000	2157.1	3203.8	4041.1	5506.4	3901.5	5366.8

Leyenda: LCM: Límite de Cuantificación del Método, valor <LCM significa que la concentración del analito es mínima (trazas)

ENSAYOS			FISICOQUÍMICOS					
Código de la Muestra			C1	C2	-	-	-	-
Código Laboratorio			0821581-07	0821581-08	-	-	-	-
Matriz			Residual	Residual	-	-	-	-
Descripción			Industrial	Industrial	-	-	-	-
Localización de la Muestra			Baños del Inca	Baños del Inca	-	-	-	-
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	2.5000	1760.0	1760.0	-	-	-	-
Aceites y Grasas	mg/L	1.7000	53.9	25.6	-	-	-	-
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg O2/L	2.6000	1346.8	963.2	-	-	-	-
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg O2/L	8.3000	2785.1	1846.1	-	-	-	-

Leyenda: LCM: Límite de Cuantificación del Método, valor <LCM significa que la concentración del analito es mínima (trazas)


**LABORATORIO REGIONAL
DEL AGUA**

Cajamarca, 18 de agosto de 2021

Página: 2 de 3

Anexo C. Fotografías



Caracterización del efluente



Muestra para análisis microscópico



Muestras para caracterización



Saliendo con muestras de la planta



Agregando sulfúrico a la muestra



Entregando las muestras en el laboratorio



Esquema inicial recién armado



Cultivo de microalgas



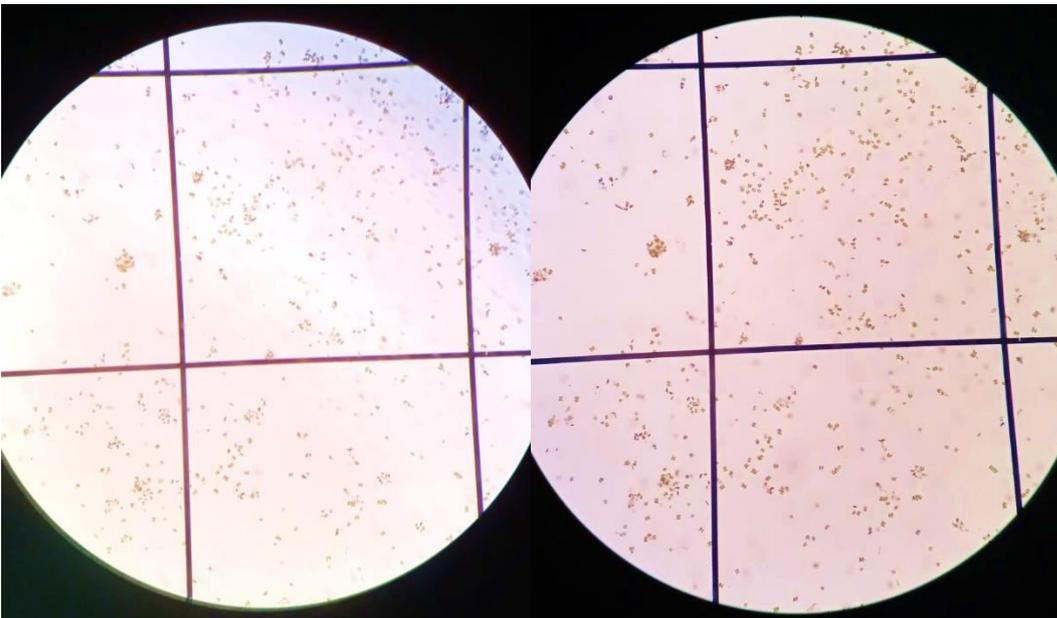
Crecimiento continuo de la población



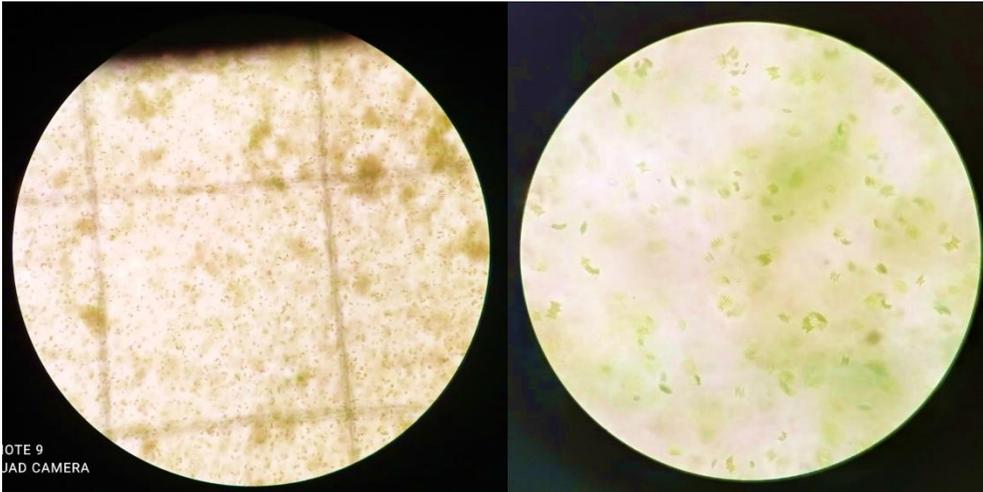
Controles: A = Control 1 y B = Control 2



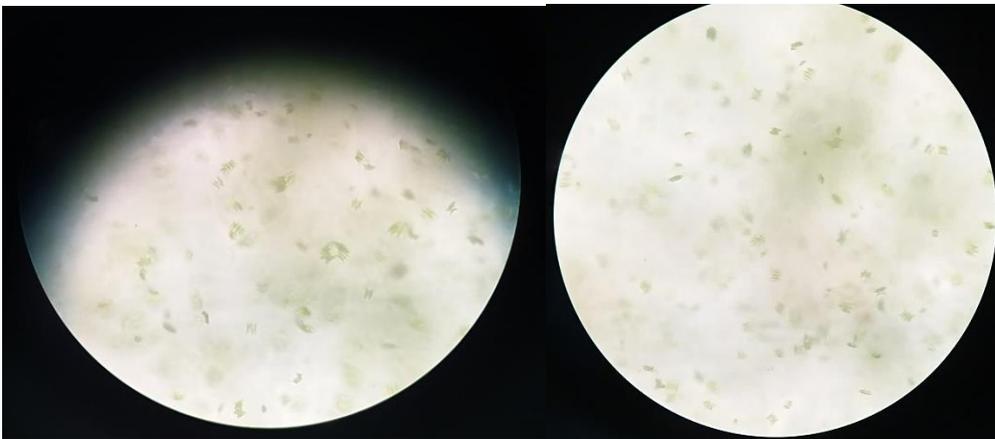
Muestras para análisis de microalgas



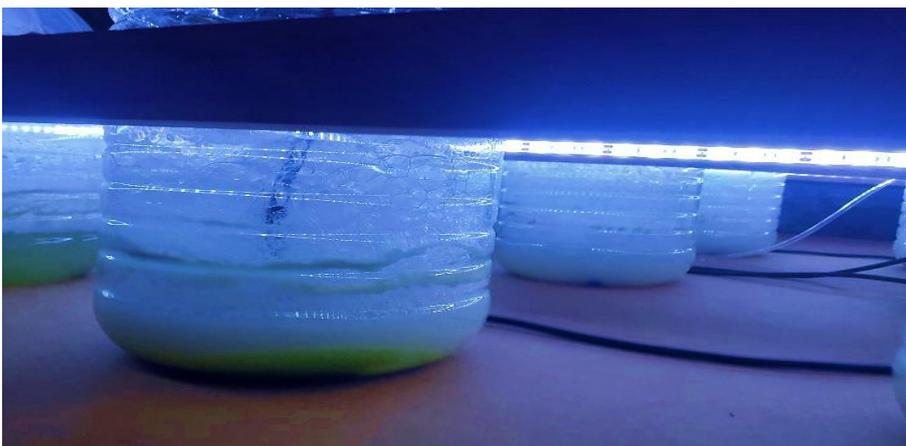
Microfotografías tomadas 1



Microfotografías tomadas 2



Microfotografías tomadas 3



Muestra del efluente antes de tratamiento



Controles y tratamientos

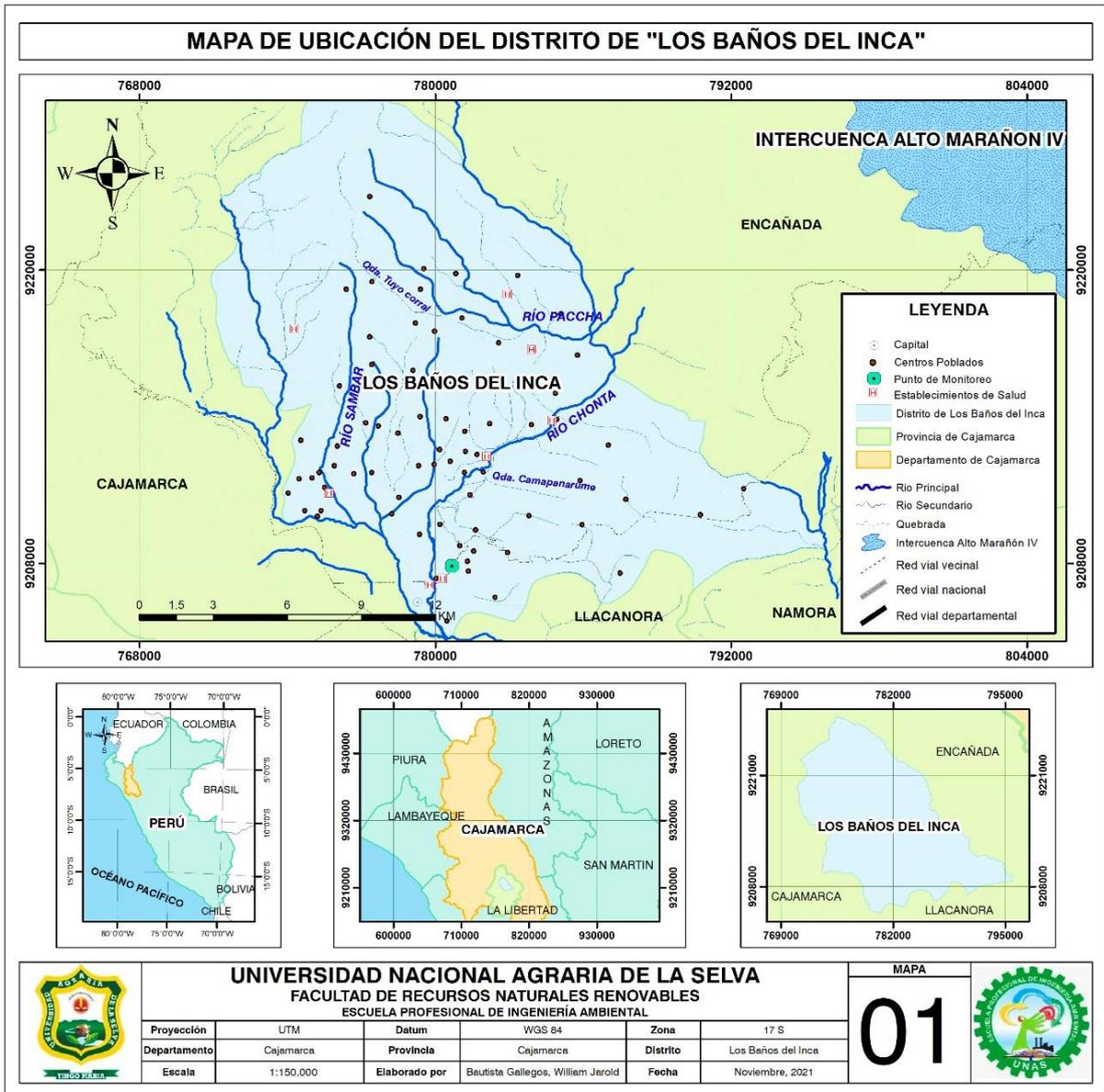


Resultado después del tratamiento



Envasado para llevar a análisis

Anexo D. Mapa de ubicación del área de estudio



Anexo E. Glosario

Aceites y grasas: Incluye grasas, aceites y otros componentes relacionados que se encuentran en el agua, generalmente aguas residuales (Eljaiek-Urzola et al., 2019).

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Es una medida del oxígeno disuelto consumido por los microorganismos durante la oxidación de sustancia reducidas en aguas y en residuos (Abdel-Raouf et al., 2012).

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Se define como la cantidad de equivalentes de oxígeno consumidos en la oxidación química de la materia orgánica (Abdel-Raouf et al., 2012)

Efluente: Es la corriente líquida que se vierte desde una planta de tratamiento de aguas residuales o la descarga de una unidad de proceso u operación (Raghunath et al., 2016)

Efluente lácteo: Aguas residuales que contienen altas cargas de componentes orgánicos putrescibles entre los que se encuentran DBO, DQO, sólidos disueltos, sólidos en suspensión, cloruros sulfatos, aceites y grasas (Choi & Lee, 2012)

Microalga: Son organismos microscópicos que se encuentran tanto en el agua de mar como en el agua dulce (Valencia, 2018)

***Scenedesmus* sp.:** Microalga de agua dulce perteneciente a la división *Chlorophyta*, Clase *Chlorophyceae*, Orden *Chlorococcales*, familia *Scenedesmaceae* que se encuentra solitaria o en parejas formado cenobios (Andrade et al., 2009))

Sólidos Suspendidos Totales (SST): Se definen como sólidos en el agua que pueden ser atrapados por un filtro (Guizado, 2014)

Tratamiento de aguas residuales: Es el proceso y la tecnología que se utiliza para eliminar la mayoría de los contaminantes que se encuentran en las aguas residuales para garantizar un medio ambiente sano y buena salud pública (Rosales et al., 2018)