

# Application of *Scenedesmus* sp. in Dairy Effluents for BOD and COD Reduction in Cajamarca, Peru

Brandon Sanchez-Vasquez <sup>1</sup>; Yerson Gallardo-Villanueva <sup>1</sup>; Marco Sanchez-Peña <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, [n00239369@upn.pe](mailto:n00239369@upn.pe), [n00259784@upn.pe](mailto:n00259784@upn.pe), [marco.sanchez@upn.pe](mailto:marco.sanchez@upn.pe)

**Abstract**– Cajamarca, Peru's leading milk-producing region accounting for nearly 20% of national production, stands out for its favorable geography and tradition of industrial livestock farming. The use of microalgae to reduce pollutants is essential for treating dairy industry effluents, especially regarding critical parameters such as Biochemical Oxygen Demand (BOD<sub>5</sub>) and Chemical Oxygen Demand (COD). This study analyzed the efficacy of *Scenedesmus* sp. in a bioreactor, using treatments with different proportions of microalgae over a 21-day period under controlled laboratory conditions. Treatment 1 (T1) yielded significant results in contaminant remediation, achieving a 30.20% reduction in Chemical Oxygen Demand (COD), from 1011 mg/L to 707.33 mg/L; and a 30.15% decrease in Biochemical Oxygen Demand (BOD), from 606.67 mg/L to 424.33 mg/L. Furthermore, it was observed that the use of *Scenedesmus* sp. allows for the utilization of the microalgae's photosynthetic capacity, generating oxygen and contributing to environmental balance. The simplicity of the bioreactor design used and the relatively low costs associated with microalgae cultivation make this technology a sustainable solution. The findings highlight the potential of *Scenedesmus* sp. as a sustainable, cost-effective, and efficient solution. However, further research is essential to optimize its application in industrial settings, improve its efficiency in various scenarios, and evaluate its long-term performance in larger-scale systems.

**Keywords**– *Scenedesmus* sp., Treatment, Biochemical oxygen demand (BOD), Chemical oxygen demand (COD).

# Aplicación de *Scenedesmus sp.* en Efluentes Lácteos para Reducción de DBO, DQO en Cajamarca- Perú

Brandon Sanchez-Vasquez <sup>1</sup>; Yerson Gallardo-Villanueva <sup>1</sup>; Marco Sanchez-Peña <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, [n00239369@upn.pe](mailto:n00239369@upn.pe), [n00259784@upn.pe](mailto:n00259784@upn.pe), [marco.sanchez@upn.pe](mailto:marco.sanchez@upn.pe)

**Resumen**– Cajamarca, principal región productora de leche del Perú con cerca del 20% de la producción nacional, destaca por su favorable geografía y tradición ganadera industrial. La utilización de microalgas en la reducción de contaminantes es fundamental para el tratamiento de efluentes de la industria láctea, especialmente en parámetros críticos como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO). Este estudio analizó la eficacia de *Scenedesmus sp.* en un biorreactor, empleando tratamientos con diferentes proporciones de microalgas durante un periodo de 21 días bajo condiciones controladas de laboratorio. El tratamiento 1 (T1) arrojó resultados significativos en la remediación de contaminantes logrando una reducción del 30.20% en la Demanda Química de Oxígeno (DQO), pasando de 1011 mg/L a 707.33 mg/L; y una disminución del 30.15% en la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), de 606.67 mg/L a 424.33 mg/L. Además, se observó que el uso de *Scenedesmus sp.* permite aprovechar la capacidad fotosintética de las microalgas, generando oxígeno y contribuyendo al equilibrio ambiental. La simplicidad del diseño del biorreactor utilizado y los costos relativamente bajos asociados al cultivo de microalgas convierten esta tecnología en una solución sostenible. Los hallazgos destacan el potencial de *Scenedesmus sp.* como una solución sostenible, económica y eficaz. No obstante, es indispensable continuar investigando para optimizar su aplicación en contextos industriales, mejorar su eficiencia en distintos escenarios y evaluar su desempeño a largo plazo en sistemas de mayor escala.

**Palabras clave**– *Scenedesmus sp.*, Tratamiento, Demanda bioquímica de oxígeno (DBO), Demanda química de oxígeno (DQO).

## I. INTRODUCCIÓN

La industria láctea en Cajamarca ubicada al norte del Perú constituye una de las principales actividades económicas de la región, pero también representa una fuente importante de contaminación ambiental debido a la generación de aguas residuales con alta carga orgánica. Estos efluentes, particularmente ricos en compuestos como la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), son usualmente vertidos sin un tratamiento adecuado, lo que afecta de manera directa la calidad de los cuerpos hídricos superficiales. Esta situación se agrava por la escasa implementación de tecnologías de tratamiento eficientes y sostenibles, así como por la débil fiscalización ambiental. Según el informe del Ministerio del Ambiente de Perú, solo el 50.47% de las aguas residuales en la región de Cajamarca son tratadas adecuadamente, lo que deja una gran cantidad de efluentes sin tratar que contaminan ríos y fuentes de agua potable [1].

En este contexto, el uso de microalgas como *Scenedesmus sp.* ofrece una alternativa prometedora. Estas microalgas, al ser fotosintéticas, metabolizan los contaminantes presentes en las aguas residuales, reduciendo parámetros críticos y generando

biomasa como subproducto. Estudios previos han demostrado su capacidad para Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), y su biomasa puede aprovecharse en la producción de biocombustibles y otros bioproductos, promoviendo la economía circular [2].

El problema central abordado en esta investigación es la necesidad de encontrar alternativas de tratamiento más eficientes y sostenibles que las tecnologías tradicionales utilizadas en las plantas procesadoras de lácteos en Cajamarca. Entre estas alternativas, destaca el uso de la microalga *Scenedesmus sp.*, conocida por su alta eficiencia en la remoción de nutrientes y contaminantes orgánicos presentes en las aguas residuales lácteas [3]. Durante este proceso, la microalga realiza fotosíntesis, utilizando luz y dióxido de carbono para su crecimiento y multiplicación, permitiendo así la absorción y eliminación de contaminantes en el cuerpo de agua [4]. Además, el crecimiento de *Scenedesmus sp.* ha demostrado adaptabilidad a un amplio rango de temperaturas ambientales, presentando tolerancia y mantenimiento del crecimiento incluso bajo condiciones de temperatura elevada, lo que respalda su viabilidad para aplicaciones prácticas en el tratamiento de aguas residuales [5]. Por lo que es esta investigación tuvo como objetivo evaluar la efectividad de la microalga *Scenedesmus sp.* en la reducción de DBO, DQO en efluentes lácteos de Cajamarca- Perú.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación del medio de propagación para el alga *scenedesmus sp.*

La preparación de las algas *Scenedesmus sp.* se realizó en un recipiente transparente de 5 litros. Se utilizó un sistema de aireación con bomba de aire y difusor de piedra porosa para garantizar una oxigenación homogénea, mientras que la iluminación fue proporcionada por un único foco LED con un fotoperiodo de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad. La temperatura se mantuvo entre 22 y 25°C como indica el autor Chokshi [3], y se realizó un monitoreo constante de pH, temperatura y conductividad eléctrica con un multiparámetro para asegurar condiciones óptimas de crecimiento antes de su uso en los biorreactores experimentales ver figura 1. Las condiciones de cultivo de *Scenedesmus sp.* se establecieron tomando como referencia el estudio de Zapata et al. [6], quienes reportan un crecimiento adecuado de la microalga bajo condiciones controladas de 25 ± 1 °C, fotoperiodo 12:12 h (luz/oscuridad) y aireación continua, empleando una concentración de 0,69 g/L de NaNO<sub>3</sub> como fuente de nitrógeno. Si bien dichos autores utilizaron un medio Allen & Arnon suplementado, en el presente estudio se empleó el medio F/2 de Guillard, el cual proporcionó un aporte balanceado de

nutrientes, asegurando un adecuado desarrollo de *Scenedesmus sp.* para evaluar su eficiencia en la reducción de DBO y DQO en efluentes lácteos.

**Diseño del biorreactor.**  
Se diseñó 11 biorreactores idénticos de 1 litro de capacidad, fabricados con material transparente para permitir la máxima penetración de luz. Para la aireación se utilizó una bomba de aire modelo ACO-003, cuyas especificaciones técnicas son las siguientes: voltaje de 240V / 60Hz, frecuencia de operación de 35W, potencia de 0.027 MPa, presión de salida de 65 L/min, con un conector de 8 mm de salida principal y un divisor de 6 salidas (6 OUTLETS). El equipo tiene unas dimensiones de 210 x 110 x 151 mm.



Fig. 1 Sistema de biorreactores diseñados para el cultivo de *Scenedesmus sp.* en el tratamiento de agua residual láctea.

Los tratamientos consistieron en la combinación de distintas proporciones de *Scenedesmus sp.* y agua residual, tal como se muestra en la tabla 1.

| TABLA I<br>COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA Y DISEÑO EXPERIMENTAL DE TRATAMIENTOS<br>CON <i>Scenedesmus sp.</i> Y AGUA RESIDUAL LÁCTEA. |                                    |                                        |                                          |                                                                                             |                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Tratamiento                                                                                                                    | Volumen<br>de<br>Microalga<br>(mL) | Volumen<br>de Agua<br>Residual<br>(mL) | Proporción<br>Microalga/Agua<br>Residual | Descripción                                                                                 | Número<br>de<br>Réplicas |
| T1                                                                                                                             | 350                                | 150                                    | 70/30                                    | Alta<br>concentración<br>de cultivo de<br>Microalga en<br>un 70%                            | 3                        |
| T2                                                                                                                             | 300                                | 200                                    | 60/40                                    | Concentración<br>intermedia de<br>60% Cultivo<br>de Microalga y<br>40 % de agua<br>residual | 3                        |
| T3                                                                                                                             | 250                                | 250                                    | 50/50                                    | Concentración<br>equilibrada 50<br>%                                                        | 3                        |
| C1                                                                                                                             | 350                                | 0                                      | 100/0                                    | Cultivo de<br>Microalga<br>100%                                                             | 3                        |
| C2                                                                                                                             | 0                                  | 250                                    | 0/100                                    | Agua residual<br>100%                                                                       | 3                        |

**Evaluación de Efectividad.**  
La evaluación de la efectividad de *Scenedesmus sp.* Se midió mediante el monitoreo periódico de DBO5, DQO, PH, temperatura y conductividad eléctrica. El DBO5 fue determinado con el multiparámetro Hach HQ40d, siguiendo el método basado en cubetas de prueba LCK555, el cual emplea reactivos pre-dosificados y un análisis fotométrico para garantizar precisión y seguridad en la medición [7]. La DQO fue medida utilizando los equipos Hach DR200 y DR900, aplicando el método de digestión en reactor aprobado por la USEPA, en el que la muestra es adicionada a viales de digestión Hach, sometida a digestión térmica y posteriormente analizada mediante espectrofotometría [7]. Los parámetros físicoquímicos restantes fueron medidos con el equipo HQ40d, siguiendo los protocolos establecidos por el fabricante.

**Análisis Estadístico.**  
Para la representación de los resultados experimentales y el desarrollo de las discusiones, se trabajó con los valores promedio (media aritmética) de cada tratamiento, obtenidos a partir de sus respectivas réplicas. Cada tratamiento experimental (T1, T2 y T3) fue evaluado por triplicado, y los valores individuales de las réplicas fueron utilizados para calcular la media y la desviación estándar, con el fin de representar el comportamiento general de cada tratamiento.

De este modo, en las tablas, figuras y análisis comparativos, cada tratamiento fue considerado como una única unidad experimental representada por su valor promedio, mientras que la variabilidad entre réplicas fue expresada mediante la desviación estándar. Este enfoque permite reducir la variabilidad experimental y facilita la comparación entre tratamientos, manteniendo el rigor estadístico del estudio.

Posteriormente, se aplicaron procedimientos estándares para evaluar cuantitativamente la eficacia del tratamiento. El porcentaje de remoción de contaminantes fue calculado a partir de las concentraciones iniciales y finales de DBO5 y DQO, utilizando una fórmula de reducción relativa. Para cada tratamiento, se determinó la media y desviación estándar con el fin de estimar la tendencia central y dispersión de los datos. Finalmente, se empleó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor para identificar diferencias significativas entre los tratamientos experimentales (T1, T2 y T3), adoptando un nivel de significancia del 5% ( $p < 0.05$ ). Todos los cálculos estadísticos se realizaron en Microsoft Excel siguiendo criterios aceptados en análisis estadístico aplicado a ciencias ambientales.

**Porcentaje de remoción de contaminantes.**  
El porcentaje de remoción (%R) se utilizó para cuantificar la eficacia del tratamiento en la reducción de DBO y DQO, de acuerdo con la ecuación (1).[8]

$$Remoción(\%) = \left( \frac{C_{inicial} - C_{final}}{C_{inicial}} \right) \times 100 \tag{1}$$

Donde:  
 $C_{inicial}$ : Concentración del parámetro al inicio del experimento (mg/L).

$C_{final}$ : Concentración del parámetro al final del experimento (mg/L).

Este indicador permite una evaluación comparativa entre los tratamientos aplicados.

Cálculo de la media y desviación estándar.

Para cada tratamiento, se calculó la media aritmética de los valores registrados durante el experimento, con el fin de representar el comportamiento promedio de los datos. La desviación estándar (DE) fue utilizada para estimar la dispersión de los datos respecto a la media, aplicando las siguientes ecuaciones.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (2)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

Donde:

$X_i$ : Valor individual.

$n$ : Número total de observaciones.

$\bar{X}$ : Media de los valores.

Para determinar la significancia estadística de la remoción, se aplicó una prueba t de Student para muestras relacionadas, obteniendo el valor p (p-value) mediante la ecuación (4)

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d/\sqrt{n}} \quad (4)$$

Donde:

$\bar{d}$ : Es la media de las diferencias entre los pares de datos antes y después del tratamiento,  $s_d$  es la desviación estándar de dichas diferencias, y  $n$  es el número de muestras.

Este análisis permitió establecer el grado de eficacia de *Scenedesmus sp.* como agente biorremediador, cuantificando su impacto mediante indicadores estadísticos y el porcentaje de remoción obtenido en cada caso.

### III. RESULTADOS

La Tabla 2 muestra la evolución de las concentraciones de Demanda Química de Oxígeno (DQO) durante un periodo de 21 días para los tratamientos con distintas proporciones de *Scenedesmus sp.* En todos los tratamientos se observa una disminución general en los niveles de DQO, lo cual evidencia la capacidad de la microalga para remover materia orgánica presente en aguas residuales lácteas. Sin embargo, el grado de remoción varió según la proporción de microalgas utilizada.

En el Tratamiento 1 (T1), con una proporción de 70% microalgas y 30% agua residual, se registró una reducción consistente en las tres réplicas, con valores finales que representan remociones significativas. Esta eficacia se refleja también en la Tabla 3, donde se observa un porcentaje de remoción promedio del 30.20%. La media de concentración fue de 859.17 mg/L, con una desviación estándar de 198.38 mg/L, lo que indica una variabilidad moderada entre réplicas.

El Tratamiento 2 (T2), con una proporción de 60/40, alcanzó el mayor porcentaje de remoción (35.24%), a pesar de mostrar una mayor dispersión en los datos (DE = 199.71 mg/L). Esto sugiere que, aunque la eficiencia de remoción fue alta, hubo mayor variabilidad entre las réplicas, posiblemente influenciada por factores operacionales o micro ambientales dentro del sistema de tratamiento.

En contraste, el Tratamiento 3 (T3), con partes iguales de microalga y efluente (50/50), mostró el menor rendimiento, con un porcentaje de remoción promedio de 11.98%. La media final fue de 973 mg/L, y aunque su desviación estándar (68.19 mg/L) fue la más baja entre los tres tratamientos, esto refleja que la baja eficiencia fue consistente en todas las réplicas.

En la Tabla 3, se muestra un valor p de 0.0335, lo cual indica que existen diferencias estadísticamente significativas ( $p < 0.05$ ) entre los tratamientos en cuanto a su eficiencia en la remoción de DQO.

TABLA II  
CONCENTRACIONES DE DQO (mg/L) EN LOS TRATAMIENTOS CON  
*Scenedesmus sp.* EN DIFERENTES INTERVALOS DE TIEMPO.

| Intervalo (Días) | Control 1 | Control 2 | T1 (mg/L) | T2 (mg/L) | T3 (mg/L) |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 01               | 20        | 11680     | 1011      | 1013.33   | 1035      |
| 21               | 152       | 4150      | 707.33    | 654.33    | 911       |

TABLA III  
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DQO.

|                        | T1     | T2     | T3     |
|------------------------|--------|--------|--------|
| % Remoción             | 30.20% | 35.24% | 11.98% |
| Media de Concentración | 859.17 | 833.83 | 973    |
| Desv. Est.             | 198.38 | 199.71 | 68.19  |
| p-value                | 0.335  |        |        |

La Tabla 4 presenta los valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) obtenidos en los tres tratamientos experimentales (T1, T2 y T3) a lo largo de cuatro intervalos de muestreo. A lo largo de los 21 días de monitoreo, todos los tratamientos evidenciaron una reducción progresiva en los valores de DBO, lo cual indica una actividad biológica efectiva por parte de *Scenedesmus sp.* en la degradación de la materia orgánica biodegradable presente en el efluente lácteo.

En el Tratamiento 1 (T1), se observó un descenso de 607.67 mg/L en el intervalo 01-05 a 424.33 mg/L en el intervalo 21- 26, lo que representa una remoción total de 30.15% según la Tabla 5. La media de concentración de DBO fue 515.50 mg/L, con una desviación estándar de 119.16 mg/L, lo que demuestra una buena consistencia entre los intervalos muestreados.

El Tratamiento 2 (T2), con una proporción ligeramente menor de microalga, presentó una remoción promedio de 21.28%, con una media de 488.83 mg/L y desviación estándar de 115.16 mg/L, lo cual sugiere una estabilidad mayor entre las mediciones, aunque con menor eficiencia en comparación a T1.

Por otro lado, el Tratamiento 3 (T3) se presentó una disminución del DBO 612 mg/L a 449 mg/L se ve reflejado en la Tabla 5. Su media fue 530.50 mg/L, con una desviación estándar baja (90.34 mg/L), lo que indica que la ineficacia fue consistente.

El valor de p-value obtenido fue de 0.802, por lo que no se identificaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ( $p > 0.05$ ). Si bien el tratamiento T3 presentó menor variabilidad entre réplicas, este comportamiento indica una mayor consistencia de los resultados, lo cual no implica necesariamente una mayor eficiencia en la remoción de la DBO, tal como se observa en la Tabla 5.

La tabla VI muestra los valores físicos y químicos iniciales y finales de los tratamientos y controles.

TABLA IV  
CONCENTRACIONES DE DBO (mg/L) EN LOS TRATAMIENTOS CON  
*Scenedesmus sp.* EN DIFERENTES INTERVALOS DE TIEMPO.

| Intervalo<br>(Días) | Control 1 | Control 2 | T1-R1<br>(mg/L) | T2-R1<br>(mg/L) | T3-R1<br>(mg/L) |
|---------------------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 01-05               | 581       | 619       | 606.67          | 592             | 612             |
| 07-12               | 576       | 618       | 543.33          | 07-12           | 576             |
| 14-19               | 559       | 615       | 454.67          | 14-19           | 559             |
| 21-26               | 549       | 614       | 424.33          | 21-26           | 549             |

TABLA V  
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DBO.

|                        | T1     | T2     | T3     |
|------------------------|--------|--------|--------|
| % Remoción             | 30.15% | 21.28% | 21.24% |
| Media de Concentración | 515.50 | 488.83 | 530.50 |
| Desv. Est.             | 119.16 | 115.16 | 90.34  |

TABLA VI  
MEDICIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y QUÍMICOS

| Parámetros            | C1   | C1   | C2   | C2   | T1   | T1   | T2   | T2   | T3   | T3   |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                       | Ini  | Fin  | Ini  | Fin  | Ini  | Fin  | Ini  | Fin  | Ini  | Fin  |
| Ph                    | 8.21 | 8.05 | 3.87 | 3.73 | 3.92 | 6.14 | 3.86 | 6.02 | 3.87 | 5.45 |
| Temperatura (C°)      | 21.9 | 22.5 | 21.2 | 21.8 | 21.2 | 21.0 | 21.0 | 20.6 | 21.0 | 20.4 |
| Conductividad (mS/cm) | 0.91 | 1.38 | 4.52 | 5.22 | 2.20 | 4.36 | 2.55 | 3.24 | 2.90 | 2.86 |

Control: C1, C2, C2, Réplicas; Tratamiento: T1, T2, T3, Réplicas; Valor Inicial: Ini; Valor Final: Fin.

#### IV. DISCUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que *Scenedesmus sp.* tiene la capacidad de reducir la materia orgánica presente en aguas residuales lácteas, reflejada en la disminución de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO). En el caso de la DQO, los tratamientos T1 y T2 alcanzaron remociones de 30.20

% y 35.24 %, respectivamente, mientras que T3 presentó una menor eficiencia (11.98 %). Aunque no se observaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ( $p = 0.802$ ), se evidenció una tendencia clara: a mayor proporción de microalga, mayor remoción de materia orgánica. Este comportamiento coincide con estudios donde *Scenedesmus sp.* fue cultivada en aguas residuales y logró reducir la DQO bajo distintas condiciones ambientales [9][10].

Respecto a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), todos los tratamientos mostraron una reducción progresiva, siendo T1 el tratamiento con mayor remoción (30.15 %), seguido de T2 (21.28 %) y T3 (21.24 %). Estos resultados coinciden con trabajos experimentales donde la presencia de microalgas en efluentes reales favoreció la disminución de DBO al consumir compuestos orgánicos biodegradables como fuente de carbono y energía [11]. No obstante, en cultivos mixotróficos, donde se adicionan fuentes orgánicas externas, se han reportado remociones más altas de materia orgánica porque la microalga puede utilizar simultáneamente carbono orgánico y la energía de la luz para crecer y metabolizar contaminantes [11].

En relación con la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), todos los tratamientos mostraron una disminución progresiva. T1 obtuvo la mayor remoción (30.15 %), seguido por T2 (21.28 %) y T3 (21.24 %), aunque sin diferencias significativas ( $p = 0.802$ ). Este resultado contrasta con lo obtenido por Gupta y Pawar, quienes lograron una remoción del 91 % bajo condiciones mixotróficas [11]. Este tipo de cultivo, al incluir fuentes orgánicas de carbono, acelera el metabolismo microalgal, como también lo concluye Wang et al. [12]. En cuanto a los factores ambientales, la temperatura se mantuvo constante entre 20.5–21.5 °C durante la experimentación, lo que indica que no fue un factor determinante para las variaciones observadas en DQO o DBO. Estudios experimentales han demostrado que temperaturas más elevadas (por ejemplo, alrededor de 30 °C) pueden acelerar el metabolismo microalgal y mejorar la remoción de compuestos orgánicos y nutrientes en aguas residuales [13].

La luz y el fotoperíodo son fundamentales, ya que proporcionan la energía necesaria para la fotosíntesis, que permite a las microalgas fijar carbono y producir la energía que sustenta la asimilación de materia orgánica. Investigaciones con diferentes regímenes de luz han mostrado que una mayor duración de la iluminación y una adecuada intensidad lumínica aumentan la eficiencia de remoción de materia orgánica y nutrientes por *Scenedesmus*, porque la fotosíntesis ocurre más activamente con más horas de luz disponibles [14]. Esto explica por qué, a pesar de condiciones ambientales moderadas, tratamientos con mayor biomasa microalgal presentaron mejores resultados de remoción.

Respecto a la evolución del pH, se observó un incremento progresivo en todos los tratamientos con *Scenedesmus sp.*, pasando de valores iniciales ácidos ( $\approx 3.86$ – $3.96$ ) a valores finales entre 4.62 y 6.21. Este comportamiento se explica principalmente por el efecto de la mezcla del cultivo microalgal

y del medio f/2 Guillard, con pH cercano a la neutralidad o ligeramente alcalino, con el agua residual láctea de carácter ácido. La incorporación del cultivo algal al efluente genera un sistema con un nuevo equilibrio ácido-base, donde el pH final resulta de la interacción entre estos componentes, tendiendo hacia valores menos ácidos conforme aumenta la proporción de cultivo añadido.

Este comportamiento ha sido reportado en estudios donde la inoculación directa de cultivos microalgales en aguas residuales provoca un aumento inmediato del pH, atribuible a la diferencia entre el pH del cultivo y el del efluente, así como al efecto amortiguador del medio de cultivo utilizado para el crecimiento de las microalgas [15]. Beltrán-Rocha et al. demostraron que, al introducir biomasa microalgas cultivada previamente en efluentes reales, el pH del sistema se incrementa de forma natural debido a la mezcla de matrices con diferentes condiciones químicas iniciales [15].

Asimismo, los resultados evidencian que la proporción microalga/agua residual influyó directamente en el incremento del pH. El tratamiento T1 (70/30), con mayor volumen de cultivo microalgal y medio f/2, presentó valores finales de pH más cercanos a la neutralidad, mientras que el tratamiento T3 (50/50), con mayor proporción de agua residual ácida, mostró una elevación de pH más limitada. Este patrón concuerda con lo reportado por Yu et al., quienes señalan que el pH final en sistemas microalgales depende fuertemente de la composición inicial del medio y de la proporción entre biomasa algal y agua residual, incluso antes de considerar efectos metabólicos [16].

En conjunto, estos resultados confirman que el aumento del pH observado en esta investigación estuvo dominado por la relación de mezcla entre el cultivo de *Scenedesmus sp.*, el medio f/2 y el agua residual láctea, más que por procesos biológicos específicos, lo cual es consistente con sistemas experimentales que trabajan con efluentes reales y cultivos no neutralizados previamente.

El incremento de la conductividad eléctrica observado en los tratamientos con *Scenedesmus sp.*, particularmente en T1 (70/30), puede atribuirse a la actividad metabólica de la microalga durante el proceso de remoción de materia orgánica. La degradación y asimilación de compuestos orgánicos presentes en el efluente lácteo favorece la liberación de especies iónicas disueltas, tales como bicarbonatos, nitratos y fosfatos, lo que incrementa la conductividad del medio. Este comportamiento ha sido reportado en estudios experimentales donde el cultivo de microalgas en aguas residuales genera un aumento de la conductividad como consecuencia de la mineralización de la materia orgánica y del intercambio iónico entre la biomasa algal y el medio líquido [13][15]. En paralelo, la temperatura se mantuvo estable (~21 °C), dentro del rango óptimo para *Scenedesmus sp.*, como señalan Bernard et al. [17].

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que *Scenedesmus sp.* es capaz de reducir la materia orgánica presente en aguas residuales lácteas bajo condiciones ambientales reales y sin optimización intensiva del sistema. Las eficiencias alcanzadas, aunque moderadas, son coherentes con

estudios experimentales en efluentes agroindustriales reales, donde la complejidad del sustrato y la variabilidad de las condiciones operativas limitan el rendimiento del proceso [18].

Anagnostopoulou et al. reportaron que la eficiencia del tratamiento con microalgas depende en gran medida de la carga orgánica inicial y de la densidad de biomasa algal, lo que coincide con la mayor remoción observada en los tratamientos con mayor proporción de *Scenedesmus sp.* en esta investigación [18]. Asimismo, Van Den Hende et al. destacan que la adaptación de sistemas microalgales a contextos industriales reales requiere considerar variaciones en carga, luz y temperatura, factores que influyen directamente en el desempeño del tratamiento [19]. En este sentido, los resultados obtenidos refuerzan el potencial de *Scenedesmus sp.* como una alternativa sostenible y adaptable para el tratamiento de efluentes lácteos en el contexto local de Cajamarca.

## V. CONCLUSIONES

La investigación desarrollada en Cajamarca durante 2024 demostró que la microalga *Scenedesmus sp.* es efectiva en la reducción de contaminantes orgánicos en efluentes lácteos, destacando su potencial en aplicaciones ambientales sostenibles. En términos de Demanda Química de Oxígeno (DQO), los tratamientos con mayor proporción de microalgas lograron reducciones significativas, alcanzando hasta un 35.24 % en 21 días.

Respecto a la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), la mayor remoción obtenida fue del 30.15 %, evidenciando una respuesta positiva del sistema microalgal ante cargas biodegradables moderadas.

Además, se observó un incremento del pH a lo largo del tratamiento, asociado a la actividad fotosintética de *Scenedesmus sp.*, lo cual refleja una adaptación favorable al entorno y condiciones del efluente.

En conjunto, los resultados posicionan a *Scenedesmus sp.* como una alternativa eficiente, económica y adaptable para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea de Cajamarca. Se recomienda su evaluación en sistemas a mayor escala y bajo diferentes condiciones de operación para validar su aplicabilidad en escenarios reales.

## AGRADECIMIENTO

Los autores expresan su sincero agradecimiento a la Universidad Privada del Norte por el apoyo y las facilidades brindadas para el desarrollo de la presente investigación.

## REFERENCIAS

- [1] Ministerio del Ambiente del Perú, Situación del tratamiento de aguas residuales en las principales regiones del país, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe>. [Accedido: 14-jul-2025].
- [2] J. K. Pittman, A. P. Dean y O. Osundeko, "The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 1, pp. 17–25, 2011. doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.035.
- [3] S. Abinandan y S. Shanthakumar, "Challenges and opportunities in application of microalgae (*Scenedesmus sp.*) for wastewater treatment: a review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 123– 132, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.07.086.

- [4] K. Chokshi, I. Pancha, A. Ghosh y S. Mishra, "Microalgal biomass generation by phycoremediation of dairy industry wastewater: an integrated approach towards sustainable biofuel production," *Bioresour. Technol.*, vol. 221, pp. 455–460, 2016. doi: 10.1016/j.biortech.2016.09.070.
- [5] Y. Garrido et al., "Microalgae *Scenedesmus* sp. as a Potential Inoculum in a CO<sub>2</sub> Capture Device Against Changes in Environmental Temperature," *Processes*, vol. 13, no. 8, art. 2479, Aug. 2025. doi: 10.3390/pr13082479.
- [6] L. M. Zapata et al., "Optimización de condiciones de cultivo de *Scenedesmus obliquus* para maximizar la producción de componentes bioactivos de interés industrial," *Rev. Latinoam. Biotecnol. Amb. Algal.*, vol. 11, no. 1, pp. 15–33, 2020.
- [7] Hach, Prueba de cubetas para DBO5 de 4 a 1650 mg/L de O<sub>2</sub>, España, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.hach.com/cubeta-test-para-dbo5-de-4-a-1650-mg-l-de-o/product?id=26096783173>. [Accedido: 24-mar-2025].
- [8] Hannacolombia.com, "Porcentaje de remoción en el tratamiento de aguas residuales a partir de la DQO," Hanna Colombia, [En línea]. Disponible en: <https://www.hannacolombia.com/blog/post/691/porcentaje-remocion-en-el-tratamiento-aguas-residuales-partir-la-dqo>.
- [9] F. G. Ación, A. L. Gómez, J. M. García, and E. Molina Grima, "Parametric study of a brewery effluent treatment by microalgae *Scenedesmus obliquus*: influence of light and aeration," *Bioresource Technology*, vol. 102, no. 16, pp. 7923–7930, 2011, doi:10.1016/j.biortech.2011.12.109.
- [10] S. Zhang, T.-H. Kim, T. H. Han, and S.-J. Hwang, "Influence of light conditions of a mixture of red and blue light sources on nitrogen and phosphorus removal in advanced wastewater treatment using *Scenedesmus dimorphus*," *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 760–765, 2015, doi:10.1007/s12257-015-0066-4.
- [11] M. Gupta, E. Abawajy, and Q. Wang, "Nutrient removal and carbohydrate production potential of indigenous *Scenedesmus* sp. grown in anaerobically digested brewery wastewater," *Environmental Systems Research*, vol. 9, art. 40, 2020, doi:10.1186/s40068-020-00201-5.
- [12] S. Gupta, R. A. Pandey, and S. B. Pawar, "Microalgal bioremediation of wastewater under mixotrophic conditions," *Frontiers in Chemical Science and Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 499–508, 2016, doi:10.1007/s11705-016-1617-0.
- [13] V. Silvestro, F. Brunetti, and M. B. Morelli, "Effect of temperature on ammonium removal in *Scenedesmus* sp.," *Journal of Applied Phycology*, 2015, doi:10.1007/s10811-015-0656-8.
- [14] S. G. Pérez Bravo et al., "Evaluation of *Scenedesmus dimorphus* under different photoperiods with eutrophicated lagoon water," *Resources*, vol. 12, no. 12, p. 140, 2023, doi:10.3390/resources12120140.
- [15] J. C. Beltrán-Rocha, M. I. Rodríguez-Miranda y R. González-Mendoza, "Effect of natural increase of pH and microalgae cyclical re-cultivation on biomass production and polishing of municipal secondary effluent," *Desalination and Water Treatment*, vol. 317, pp. 1–10, 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100103.
- [16] H. Yu, X. Wang, Y. Zhang y J. Li, "Effects of different pH control strategies on microalgae cultivation and nutrient removal from anaerobic digestion effluent," *Microorganisms*, vol. 10, no. 2, p. 357, 2022, doi: 10.3390/microorganisms10020357.
- [17] K. Quispe Quispe, "Evaluación de la capacidad depuradora con microalgas *Scenedesmus* sp. y *Chlorella* sp. para el tratamiento de aguas residuales domésticas," Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, 2023.
- [18] P. Anagnostopoulou, F. Syropoulou, C. S. Akratos, and A. G. Tekerlekopoulou, "Optimization of microalgae cultivation in agro-industrial wastewater using microplates," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 10, no. 1, p. 106982, 2022.
- [19] S. Van Den Hende, H. Vervaeren, and N. Boon, "Influence of microalgal species and process parameters on nutrient removal from high strength wastewater," *Bioresour. Technol.*, vol. 124, pp. 177–185, 2012.