

Optimización de la concentración de gases y nutrientes en el sistema de fotobioreactores

Optimization of gas and nutrient concentrations in the photobioreactor system

Autores:**Edmundo Recalde Posso**

Pontificia Universidad Católica del Ecuador,
Ibarra - Ecuador

Luis Roca-Pérez

Universidad de Valencia, España

María Rosa Mosquera-Losada

Universidad de Santiago de Compostela, España

Autor de correspondencia:

Edmundo Recalde Posso
erecalde@pucesi.edu.ec

**Recibido:** 06 - Junio - 2025**Aprobado:** 06 - Noviembre - 2025**Publicación en línea:** 23 - Diciembre - 2025

Cómo citar: Recalde Posso, E., Roca-Pérez, L. y Mosquera-Losada, M.R. (2025). Optimización de la concentración de gases y nutrientes en el sistema de fotobioreactores. *Maskana*, 16(2), 173-185. <https://doi.org/10.18537/mskn.16.02.11>

Optimización de la concentración de gases y nutrientes en el sistema de fotobiorreactores

Optimization of gas and nutrient concentrations in the photobioreactor system

Resumen

La investigación con microalgas ofrece soluciones tecnológicas para capturar gases de efecto invernadero, transformando el CO₂ de emisiones industriales en biomasa microalgal de valor comercial, como bioestimulantes agrícolas. Este proceso combina simultáneamente beneficios ambientales, mediante la reducción de emisiones, con la producción de bioproductos de interés industrial. Para optimizar su crecimiento en fotobiorreactores, es clave determinar los nutrientes y la concentración óptima de CO₂. En pruebas piloto, una dosis de 100 ppm de nitrógeno maximizó el rendimiento (2,95 g m⁻²d⁻¹ en la cosecha 5). Además, se evaluaron tres concentraciones de CO₂ (500, 1000 y 1500 ppm), suministradas mediante gases de combustión generados por diésel, sin diferencias significativas en la producción de biomasa. La microalga *Scenedesmus*, enriquecida con Nitrofoska (1 ml L⁻¹), mostró que altas concentraciones de CO₂ no afectan su rendimiento. Así, los gases capturados se convierten en biomasa microalgal, útil como bioestimulante, demostrando una solución sostenible para emisiones industriales.

Palabras clave: Gases de combustión, captura de gases, *Scenedesmus* sp., nutrientes, microalgas.

Abstract

Microalgae research provides technological solutions for capturing greenhouse gases by converting industrial CO₂ emissions into commercially valuable microalgal biomass, such as agricultural biostimulants. This process simultaneously combines environmental benefits through emission reduction with the production of industrially relevant bioproducts. To optimize their growth in photobioreactors, determining optimal nutrient levels and CO₂ concentration is critical. In pilot tests, a nitrogen dosage of 100 ppm maximized yield (2.95 g m⁻²d⁻¹ at harvest 5). Additionally, three CO₂ concentrations (500, 1000, and 1500 ppm) were evaluated, supplied via diesel-generated combustion gases, with no significant differences in biomass production observed. The microalga *Scenedesmus*, enriched with Nitrofoska (1 ml L⁻¹), demonstrated that high CO₂ concentrations did not impair its performance. Thus, captured gases are converted into microalgal biomass, suitable as a biostimulant, proving a sustainable solution for industrial emissions.

Keywords: Combustion gases, gas capture, *Scenedesmus* sp., nutrients, microalgae.

1. Introducción

Las microalgas se consideran entre los primeros organismos vivos que aparecieron en la tierra, y fueron las responsables de absorber el CO₂ atmosférico y transformarlo en glucosa y oxígeno. Pueden producir carbohidratos, lípidos, proteínas, pigmentos, vitaminas y otros productos químicos de valor agregado. Estos organismos tienen una tasa de crecimiento rápida y una alta productividad de lípidos (Lu et al., 2020).

Las microalgas constituyen en la actualidad una opción para la producción de biomasa con múltiples usos que puede ser usada como suplemento animal, producción de biocombustibles, y separación de componentes tanto para alimentación humana o usos específicos en la industria. Por ejemplo, los lípidos de las microalgas se pueden utilizar como materia prima para la producción de biodiesel, los carbohidratos como fuente de carbono en la industria de fermentación, los ácidos grasos de cadena larga se utilizarían como complementos alimenticios saludables, mientras que las proteínas y pigmentos se usarían para tratar enfermedades (Chew et al., 2017).

La clave en la producción de biomasa microalgal se encuentra en la optimización de las condiciones de crecimiento (Blair et al., 2014), entre los parámetros de control clave en el desarrollo se encuentra la iluminación, pH y temperatura (Chegukrishnamurthi et al., 2020), además los nutrientes bien de uso agrícola o procedentes de subproductos animales. El cultivo de microalgas en laboratorio se ha desarrollado de forma importante en las últimas décadas. Así existen estudios validando el uso de medios de cultivo preparados en laboratorio con el fin de incrementar la producción de especies de microalgas que tienen un elevado coste en Ecuador como el Chu-10 modificado (Sharma et al., 2011). Lee y Zhang (2016) estudiaron varios factores físico-químicos que influyen en el crecimiento microalgal como el nitrógeno y el dióxido de carbono, la intensidad de la luz y la temperatura.

Si bien las necesidades de nitrógeno para *Scenedesmus* están bien establecidas, fue necesario determinar una dosis de referencia eficiente para el sistema específico utilizado. Además, se considera como principal cuello de botella para la escalabilidad industrial el suministro eficiente y económico de carbono. La captura de gases de combustión y su posterior inyección en cultivos de microalgas se establece como una de las tecnologías más prometedoras para una captura de carbono de bajo coste energético (Young et al., 2019). Sin embargo, la composición compleja de estos gases, que pueden contener otros compuestos además de CO₂, presenta un desafío para el desarrollo de las cepas microalgales.

Si se conocen las necesidades nutricionales de las microalgas, podemos ir reemplazando dichos medios comerciales por otros que sean más económicos y ecológicos. Estudios con aguas residuales permiten usar medios nutritivos que de otra manera podrían contaminar otros efluentes. Especies de microalgas como *Scenedesmus* y *Chlorella* se han adaptado a condiciones muy extremas como las aguas residuales de tenerías (Nagi et al., 2020).

A pesar del consenso sobre la importancia del nitrógeno, existen vacíos en cuanto a la dosis óptima para sistemas de cultivo en biofilm o láminas fotobioreactoras, donde la dinámica de nutrientes difiere significativamente de los cultivos suspendidos. La mayoría de los estudios se centran en maximizar la acumulación de lípidos o en la remediación de aguas residuales, pero son escasos los trabajos que abordan de manera integrada y bajo condiciones semicontinuas las dosis óptimas de nitrógeno y el enriquecimiento con CO₂ derivado directamente de gases de combustión reales. Comprenderlo permitirá diseñar sistemas viables a escala industrial, donde la eficiencia en el uso de recursos (fertilizantes y CO₂) determina la sostenibilidad económica y ambiental del proceso.

Este estudio tiene como objetivo principal evaluar la viabilidad técnica de utilizar gases de combustión como fuente de carbono para el cultivo de *Scenedesmus* sp. en un sistema de fotobiorreactores de lámina, determinando:

(1) el efecto de diferentes concentraciones de CO₂ (500-1500 ppm) sobre la productividad y parámetros fisicoquímicos del medio, y (2) una dosis de nitrógeno de referencia que optimice la producción de biomasa dentro de este sistema integrado de captura de emisiones.

2. Materiales y métodos

Los ensayos se realizaron en las instalaciones de la PUCE Ibarra (Provincia de Imbabura – Ecuador) en un invernadero de estructura metálica con policarbonato. Se utilizaron 16 fotobiorreactores laminares para la producción de microalgas en cuyo interior circulan gases de combustión. Los paneles tienen una dimensión de 1,3 m de alto por 0,90 m de ancho construidos en poliestireno expandido con cuatro cavidades, sobre esta lámina se colocó polietileno de alta densidad (sarán) como soporte para el material textil. Una bomba de recirculación instalada en cada fotobiorreactor permite que la solución nutritiva se distribuya por toda la lámina (Optimización de la Patente ES2347515A1). Se desarrollaron dos experimentos independientes bajo condiciones de invernadero. Cada tratamiento constó de cuatro réplicas (unidades fotobiorreactoras independientes). Los experimentos se detallan a continuación.

2.1. Optimización de dosis de nutrientes (Experimento 1)

Para la optimización de las dosis de nutriente en el sistema de biorreactores se propagó inicialmente el cultivo de *Scenedesmus* sp en los paneles con una sola dosis de nutriente de Nitrofoska (1 ml L⁻¹). Transcurridos 12 días de la siembra se procede a añadir las dosis de nutriente Nitrofoska requeridas para el ensayo en concentración de Nitrógeno de D1: 100 mgL⁻¹; D2: 200 mgL⁻¹; D3: 300 mgL⁻¹; y D4: 400 mgL⁻¹. El ensayo se implementó bajo un modelo en bloques al azar con 4 réplicas. El único tratamiento en donde se añade solución nutritiva extra es en D1 con el fin de mantener una solución estable de 100 mgL⁻¹ de N durante todo el ensayo y esto

debido a que transcurrida la cosecha los niveles de nitratos disminuyen. Se mantiene inyección constante de aire a cada unidad fotobiorreactora. El tiempo de duración del ensayo fue de 70 días con 7 cosechas con espaciamientos de 7 días. La variable respuesta principal fue producción de biomasa (materia seca, g m⁻² d⁻¹).

2.2. Optimización de concentración de gases (Experimento 2)

La variable independiente fue la concentración de CO₂ en 16 unidades fotobiorreactoras. La microalga utilizada fue *Scenedesmus* sp y se utilizó una solución nutritiva de Nitrofoska (1 ml L⁻¹). Las concentraciones de CO₂ ensayadas fueron C1 = ambiente (~400 ppm), C2 = 500 ppm, C3 = 1000 ppm, C4 = 1500 ppm, se utilizó un diseño de bloques completamente al azar distribuido en 4 bloques. El ingreso de gases de combustión al sistema se realizó durante 12 horas seguidas (6h hasta 18h) y 12 horas sin suministro (18h hasta 6h). La temperatura en la fase del ensayo se mantuvo en un promedio de 20,87°C (máxima de 26,50°C y mínima de 16,13°C) Las concentraciones de CO₂ seleccionadas (500–1500 ppm) se alinean con rangos estudiados recientemente para optimizar la captura y asimilación de carbono en microalgas, donde incluso concentraciones superiores han mostrado ser viables sin inhibir el crecimiento (Yang et al., 2024).

Las variables respuesta secundarias para ambos experimentos fueron: pH, conductividad eléctrica, concentración de nitratos (solo para experimento 1), sólidos disueltos totales, sales, absorbancia a 750 nm, y consumo de agua.

2.3. Determinaciones analíticas

Para la medición de los niveles de CO₂ en las unidades fotobiorreactoras se utilizó un equipo marca ALNOR modelo COMPUFLOW 8610 con un rango de 0 a 5000 ppm con una resolución de lectura de $\pm 3\%$. La toma de datos se realizó en cada cavidad creada de la unidad (subpanel), para esto se acopló una unión a cada manguera flexible de tal manera que al momento de realizar la lectura se separa, se coloca el equipo y se une inmediatamente la unión, este proceso toma menos de 1 minuto. La concentración de CO₂ en las unidades fotobiorreactoras se midió diariamente.

Para determinar el pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y sales en la solución nutritiva se empleó un dispositivo conjunto marca HORIBA modelo F-74BW. Se tomó una muestra de 50 ml del tanque en donde se encuentra la solución nutritiva a través de una manguera de retorno acoplada a la unidad fotobiorreactora, una vez tomada la medición con el equipo de estas variables se retornó la muestra, la mediación se realizó diariamente durante todo el ciclo evaluado.

La absorbancia (750 nm) en la solución nutritiva se determinó diariamente mediante el empleo del equipo Thermo Spectronic Modelo Genesys 20.

La medición de nitratos en la solución nutritiva se realizó pasando un día con el equipo HORIBA Modelo LAQUATWIN B-743. Se realizaron mediciones del contenido de nitrato en el medio de cultivo antes de realizar la cosecha de algas y posterior a la aplicación de la solución nutritiva, esto con el fin de mantener concentraciones estables durante todas las fases del cultivo (100 ppm N, 1 mL-1 de Nitrofoska). La medición del contenido de nitratos fue considerada como indicador para aplicación nutritiva en caso de requerir. Se realizaron 6 cosechas con espaciamientos de 7 días y con un tiempo total de 60 días.

El consumo de agua se midió diariamente en cada unidad fotobiorreactora, para ello se aforó el tanque de solución nutritiva al inicio del día, al finalizar la tarde se añadió agua hasta la línea de

aforo. Para la medición del consumo de agua se consideró las horas del día (desde 6h hasta 18h) y las horas de la noche (desde 18h05 hasta 6h00).

Se ajustó el suministro de CO₂ hacia las unidades fotobiorreactoras con el fin de cumplir con las concentraciones establecidas en el ensayo, (C2: 527 \pm 15, C3: 1001 \pm 32 y C4: 1504 \pm 26ppm) de esta manera se encuentran dentro de los rangos establecidos de los tratamientos a analizar (C2: 500 ppm, C3:1000 ppm y C4: 1500 ppm). El tratamiento que no se inyecta gases de combustión (C1), en las mediciones previas tiene una concentración de 406 \pm 27 ppm de CO₂; si bien, fuera del invernadero (en el ambiente) es de 349 \pm 14 ppm de CO₂, este incremento se debe a que dentro del invernadero existe una ligera concentración de gases por el ambiente creado.

Las microalgas se recolectaron de la lámina textil por raspado previo a la suspensión del suministro de la solución nutritiva, inmediatamente se retomó el ciclo de suministro de la solución nutritiva. Una muestra de 40 ml de la cosecha se centrifugó con el fin de disminuir el agua contenida en el medio, posteriormente se deshidrató a 40°C hasta mantener peso constante. Para el ensayo de concentraciones de nutrientes se realizaron 7 cosechas continuas y para la concentración de gases de combustión se evaluaron 6 cosechas. Se estableció un espacio de 15 días tras la siembra de microalgas para mantener un crecimiento estable en la unidad fotobiorreactora y en lo posterior se colectó cada 7 días.

2.4. Análisis estadístico

El análisis de los datos se realizó con el software estadístico R (versión 4.3.1). Los datos de cada experimento se analizaron por separado. Para todas las variables de respuesta (producción de biomasa, pH, conductividad eléctrica, nitratos, etc.), se verificaron previamente los supuestos de normalidad y homocedasticidad (homogeneidad de varianzas).

Dado que las mediciones entre cosechas sucesivas no son completamente independientes, se optó por un enfoque conservador analizando cada cosecha por separado. Para cada una de ellas, se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía y

en caso de detectar diferencias significativas ($p < 0.05$), se procedió a una comparación múltiple de medias mediante la prueba de Tukey.

3. Resultados

3.1. Experimento 1: Optimización de la dosis de nitrógeno

En este apartado se muestran el efecto de la aplicación de 4 dosis de nutrientes sobre distintos parámetros. Como se puede observar (Figura 1) los tratamientos, en los que aplicaron distintas dosis de nutrientes, no afectaron a la concentración de CO₂, lo cual revela que una mayor dosis de nutrientes no conlleva un mayor consumo de CO₂. El promedio obtenido durante todo el ensayo para cada dosis de nutriente fue de D1: 358.9 ± 12.58 ppm; D2: 358.8 ± 12.61 ppm; D3: 359.04 ± 12.77 ppm y D4: 359.04 ± 12.78 ppm de CO₂.

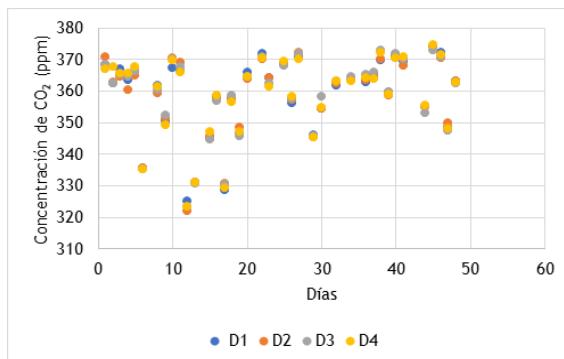


Figura 1. Concentración promedio de CO₂ de los 4 subpaneles de la unidad fotobiorreactora (D1: 100 mgL⁻¹; D2: 200 mgL⁻¹; D3: 300 mgL⁻¹; D4: 400 mgL⁻¹ de N).

Fuente: Elaboración propia (2025).

Concentración de nitratos

En la figura 2 se muestra la evolución del contenido en nitratos en la solución nutritiva para los cuatro tratamientos de nutrientes aplicados. En la dosis D1 se puede apreciar que la aplicación de nutriente en el medio de cultivo permite mantener estable la concentración en torno a

100 ppm N. Por otra parte, en los tratamientos D2, D3 y D4 se puede observar la disminución progresiva del contenido de nitratos sugiriendo saturación inicial y posterior consumo activo.

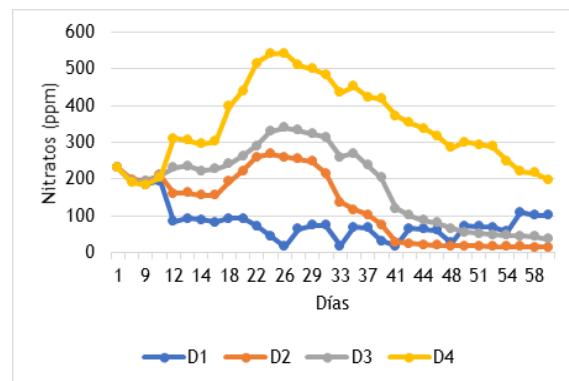


Figura 2. Evolución temporal de la concentración de nitratos para las diferentes dosis de nitrógeno (D1: 100 ppm; D2: 200 ppm; D3: 300 ppm; D4: 400 ppm de N).

Fuente: Elaboración propia (2025).

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) en las cosechas se mantiene diferenciada en cada tratamiento y esto debido a las concentraciones distintas de nutriente (Tabla 1). A medida que transcurre el tiempo la CE disminuye gradualmente para las dosis D2, D3 y D4, no siendo así para D1 en donde la CE se incrementa. Se observa por tanto que inicialmente la CE tiene una relación directa y positiva con la dosis de nutriente aplicada. El tratamiento D1 recibe Nitrofoska con el fin de mantener una concentración de 100 mgL⁻¹ de N (Tabla 1). En general la dosis D4 presenta una CE significativamente superior a D2 y D3.

Tabla 1. Conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) por cosecha semanal. Para cada cosecha tratamientos con la misma letra no presentan diferencias significativas (Tukey $p<0,05$).
Fuente: Elaboración propia (2025).

DOSIS	Cosecha 1	Cosecha 2	Cosecha 3	Cosecha 4	Cosecha 5	Cosecha 6	Cosecha 7
D1	516.10d	395.09c	503.14c	628.76b	787.25ab	874.00a	1083.12a
D2	950.02c	824.43b	637.14bc	518.46b	574.29b	556.01b	663.07c
D3	1353.51b	1161.55b	931.57b	727.50b	695.13ab	639.14b	713.07bc
D4	1774.28a	1636.88a	1350.53a	1163.72a	997.15a	819.54a	773.43b

Producción de microalgas

En relación a la producción de materia seca se observa (Tabla 2) que los valores más elevados en todas las cosechas se encuentran en el tratamiento de 100 mgL⁻¹ de N (D1), en este tratamiento en la cosecha 5 existe la mayor producción (2.95 gm-2d-1). En las cosechas de las semanas 1 y 2 no se encuentran diferencias significativas entre las dosis empleadas. Sin embargo, la dosis D1, en las cosechas 3, 4 y 5, presenta una producción significativamente superior que el resto de tratamientos. La mejor producción por una parte y el menor coste asociado a la dosis más baja nos lleva a concluir que este es el tratamiento idóneo. De tal manera que el rendimiento durante las 7

cosechas evaluadas evidenció valores elevados para las dosis 1 mientras que, para el resto de dosis los valores fueron menores. El máximo rendimiento fue para la dosis D1 en la semana 5 de la cosecha.

Si bien en las dosis D2, D3 y D4 presenta concentraciones de nutrientes superiores a D1 esto no beneficia en la producción de materia seca, a tal punto que el rendimiento es estadísticamente igual para estos tratamientos y con una disminución gradual en las cosechas posteriores. Nuestros resultados muestran que la menor dosis aplicada da lugar a una mayor producción con lo cual para optimización el coste de producción hay que utilizar la dosis más baja.

Tabla 2. Producción de materia seca (g m⁻²d⁻¹) de *Senedesmus* sp en respuesta a diferentes dosis de nitrógeno (D1: 100 ppm, D2: 200 ppm, D3: 300 ppm, D4: 400 ppm de N) a lo largo de siete cosechas. Dentro de cada cosecha, los valores con letras distintas son significativamente diferentes (prueba de Tukey, $p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia (2025).

Dosis	Cosecha 1	Cosecha 2	Cosecha 3	Cosecha 4	Cosecha 5	Cosecha 6	Cosecha 7
D1	1.37 ^a	1.84 ^a	2.17 ^a	2.67 ^a	2.95 ^a	2.28 ^a	1.64 ^a
D2	1.22 ^a	1.35 ^a	1.12 ^b	1.50 ^{ab}	1.21 ^b	1.21 ^{ab}	0.94 ^a
D3	1.11 ^a	1.07 ^a	1.00 ^b	0.95 ^b	0.90 ^b	1.21 ^{ab}	1.13 ^a
D4	1.32 ^a	1.28 ^a	0.97 ^b	0.87 ^b	0.89 ^b	0.85 ^b	0.95 ^a

D1: 100 ppm; D2: 200 ppm; D3: 300 ppm; D4: 400 ppm de N

3.2. Experimento 2: Optimización de la concentración de CO₂

En este apartado se estudia el efecto de los tratamientos, con diferentes concentraciones de CO₂, sobre los parámetros analizados.

pH

Los valores de pH en los diferentes tratamientos se encuentran en un rango entre 8.1 y 8.4

durante la fase de crecimiento. Sin embargo, en las fases posteriores este rango es mucho mayor fluctuando enormemente entre los días de medida. En relación al efecto de los tratamientos, encontramos que generalmente el tratamiento de CO₂ de 1000 ppm muestra los valores de pH más bajos en comparación con el tratamiento control y el de 1500 ppm en las fases 3, 4, 5 y 6, siendo el tratamiento de 500 ppm el que habitualmente presenta unos niveles de pH mayores en comparación con el de 1000 ppm de CO₂.

Conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales

La conductividad eléctrica y la concentración de sólidos totales en la solución nutritiva mostraron un comportamiento similar en todos los tratamientos en cuanto a la tendencia temporal global y tras la cosecha, así como en la respuesta a la mayoría de los tratamientos. Estos dos parámetros muestran un claro incremento a medida que transcurren las diferentes cosechas, comenzando con unos valores de CE próximos a 500 $\mu\text{S cm}^{-1}$ y finalizando con unos valores de casi 800 $\mu\text{S cm}^{-1}$ o superiores a mil en función de si medimos antes o después de la última cosecha respectivamente, lo que es indicativo de una relación directa entre la concentración de nutrientes y la conductividad eléctrica, descrita previamente. Tras la cosecha se adiciona solución nutritiva con lo cual se incrementa la conductividad eléctrica, este parámetro desciende con el tiempo debido a que las microalgas durante su desarrollo absorben los nutrientes del medio. No se observaron diferencias significativas entre tratamientos de la CE.

Los tratamientos afectaron significativamente a la conductividad eléctrica y a la concentración de sólidos disueltos totales durante la primera, segunda y tercera cosecha de tal forma que el tratamiento de CO₂ de 1000 ppm (C3) resultó tener valores significativamente más altos que el resto. Sin embargo, en la fase 6 fue el tratamiento de CO₂ de 500 ppm (C2) presentó una CE significativamente mayor al tratamiento con concentración de CO₂ ambiental (C1).

Sales

Los niveles de sales siguen en general un patrón similar a los encontrados para la conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales en relación a su incremento desde el principio al final del ensayo y entre cosechas. La respuesta de los niveles de sales en las fases 1, 2 y 6 también resultaron similares a las variables previamente mencionadas. Sin embargo, y a diferencia de lo ocurrido con la conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales, nos encontramos con que en las cosechas o fases 4 y 5 si obtenemos diferencias significativas entre tratamientos.

Absorbancia

Con este parámetro se pretendió llevar a cabo el seguimiento de la mayor o menor presencia de algas en la solución nutritiva. En la fase de crecimiento se observó una tendencia gradual de incremento del nivel de absorbancia a medida que pasa el tiempo, si bien es cierto el coeficiente de variación es alto esto se puede deber a que las mediciones de absorbancia en la mayoría de los casos son menores a 0.03 y cualquier variación mínima afecta drásticamente en su variabilidad.

Consumo de agua

El consumo de agua está relacionado con la temperatura en el interior del invernadero, de ahí las fluctuaciones tanto en el día como en la noche, notándose menores variaciones de consumo de agua por la noche entre tratamientos (Tabla 3).

En la Tabla 3 se muestra el consumo total de agua tanto en el día como noche en los tratamientos aplicados. No se observaron diferencias significativas entre los tratamientos en el día y noche. De esta manera se puede decir que la variación en la concentración de gases de combustión no incide en el consumo de agua del sistema de recirculación.

Tabla 3. Consumo promedio de agua durante el ensayo ($\text{L h}^{-1} \text{m}^{-2}$) entre tratamientos.

Fuente: Elaboración propia (2025).

En el día	C1	C2	C3	C4
Media	0.106	0.093	0.093	0.094
En la noche	C1	C2	C3	C4
Media	0.129	0.124	0.125	0.121

C1= ambiente, C2= 500 ppm CO₂, C3= 1000 ppm CO₂, C4= 1500 ppm CO₂

Producción

La Tabla 4 presenta los resultados de producción de materia seca ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$) en el volumen cosechado para cada tratamiento. Los resultados del ANOVA no muestran diferencias significativas en el contenido en materia seca entre las distintas dosis de CO₂ aplicadas por cada cosecha realizada.

Tabla 4. Producción en Materia seca en g m⁻²d⁻¹. Para cada cosecha los tratamientos sin letras indican que no presentan diferencias significativas (Tukey, p<0.05).

Fuente: Elaboración propia (2025).

Concentración CO ₂	Cosecha 1	Cosecha 2	Cosecha 3	Cosecha 4	Cosecha 5	Cosecha 6	Cosecha 7
C1	2.64	3.64	3.71	4.33	4.44	2.94	1.64 ^a
C2	2.42	2.79	4.25	4.33	4.77	2.91	0.94 ^a
C3	2.29	2.66	4.08	4.72	4.92	3.12	1.13 ^a
C4	2.24	3.43	3.90	4.89	4.69	3.10	0.95 ^a

C1= ambiente, C2= 500 ppm CO₂, C3= 1000 ppm CO₂, C4= 1500 ppm CO₂

La producción de materia seca en todas las cosechas realizadas no muestra diferencias significativas entre los tratamientos (Tukey, p<0.05) lo cual pone de relieve que el incremento de la concentración de CO₂ no mejora ni empeora la producción en las cosechas desarrolladas durante el experimento.

En las cosechas 3, 4 y 5 se puede observar un incremento en la producción, esto se debe a que la lámina de la unidad fotobiorreactora forma una película microalgal compacta lográndose llegar a la máxima producción. En especial en la cosecha 5 el valor para las concentraciones C1, C2 y C3 es el mayor comparando con el resto de cosechas. En la sexta cosecha existe un decremento en el rendimiento de materia seca, esto puede deberse a que la solución nutritiva tiene una elevada conductividad eléctrica (sobre los 1000 µscm⁻¹) lo cual puede provocar que disminuya el crecimiento de *Scenedesmus* sp. Los resultados obtenidos son ratificados por Huang et al (2016)

en ensayos sobre la influencia del CO₂ en el crecimiento celular de Chlorella en un biofilm, observado que el aumento de CO₂ en la cámara de cultivo no significa un incremento en la tasa de crecimiento de esta especie. Por otra parte, en ensayos realizados por Zhao et al (2015) la biomasa de Chlorella fue inversa al incremento de concentración de CO₂.

pH en las cosechas realizadas

En la Tabla 5 se aprecia que existen diferencias altamente significativas (p<0.01) en relación al pH en todas las cosechas realizadas con excepción de la cosecha 3 en donde las diferencias son significativas al 0,1%.

El comportamiento del pH en las tres primeras cosechas se mantiene ligeramente estable, posterior a los cuales existe un incremento en su valor, disminuyendo en la última cosecha, este decremento coincide con el registrado en la materia seca.

Tabla 5. Variación del pH por cosecha y concentración de CO₂. Para cada cosecha si los tratamientos tienen la misma letra no presentan diferencias significativas (Tukey p<0.05).

Fuente: Elaboración propia (2025).

Concentración CO ₂	Cosecha 1	Cosecha 2	Cosecha 3	Cosecha 4	Cosecha 5	Cosecha 6	Cosecha 7
C1	7.70 ^{ab}	7.85 ^a	7.69 ^a	7.88 ^a	7.93 ^{ab}	7.80 ^b	1.64 ^a
C2	7.77 ^a	7.74 ^a	7.64 ^{ab}	7.90 ^a	8.04 ^a	7.92 ^a	0.94 ^a
C3	7.65 ^b	7.75 ^a	7.66 ^{a,b}	7.70 ^b	7.82 ^b	7.78 ^b	1.13 ^a
C4	7.66 ^b	7.60 ^b	7.60 ^b	7.81 ^{ab}	7.97 ^a	7.77 ^b	0.95 ^a

C1= ambiente, C2= 500 ppm CO₂, C3= 1000 ppm CO₂, C4= 1500 ppm CO₂

4. Discusión

Los resultados de este estudio proporcionan información valiosa para la optimización de la concentración de nutrientes y CO₂ en el cultivo de *Scenedesmus* sp. en sistemas de fotobiorreactores. Los hallazgos resaltan la compleja interacción entre la dosificación de nutrientes, el enriquecimiento con CO₂ y la producción de biomasa, lo cual tiene implicaciones significativas para el cultivo de microalgas a gran escala.

4.1. Concentración de nutrientes y producción de biomasa

El estudio demostró que la dosis más baja de nitrógeno (D1: 100 mg L⁻¹) produjo la mayor cantidad de biomasa, superando significativamente a las dosis más altas (D2-D4). Esta observación coincide con investigaciones previas que indican que concentraciones excesivas de nutrientes pueden inhibir el crecimiento de microalgas (Kumar y Bera, 2020). La disminución gradual en los niveles de nitratos en los tratamientos D2-D4 sugiere que las dosis más altas de nitrógeno podrían no ser utilizadas eficientemente por *Scenedesmus*, posiblemente debido a la saturación de nutrientes o al estrés osmótico causado por el aumento en la conductividad eléctrica (CE). La correlación directa entre la CE y la concentración de nutrientes respalda esta idea, ya que los valores más altos de CE se registraron en D4, coincidiendo con los rendimientos más bajos de biomasa. Estos resultados enfatizan la importancia de equilibrar la disponibilidad de nutrientes para evitar condiciones de crecimiento subóptimas.

4.2. Enriquecimiento con CO₂ y rendimiento del sistema

Contrario a lo esperado, el enriquecimiento con CO₂ (500–1500 ppm) no mejoró significativamente la producción de biomasa. Este hallazgo contrasta con estudios que reportan un aumento en las tasas de crecimiento de *Scenedesmus* bajo condiciones elevadas

de CO₂ (Shayesteh et al., 2021). Sin embargo, la estabilidad en la producción de biomasa en todos los tratamientos de CO₂ sugiere que *Scenedesmus* podría tener una amplia tolerancia a diferentes concentraciones de CO₂, como lo señalaron Huang et al. (2016). Estos hallazgos coinciden con estudios recientes que emplean gases de combustión en fotobiorreactores, donde concentraciones elevadas de CO₂ (1000–1500 ppm) no siempre incrementan la biomasa, pero garantizan una captura eficiente del carbono (Nad' et al., 2023). La reducción del pH observada en niveles más altos de CO₂ (1000–1500 ppm) no afectó negativamente el crecimiento, lo que indica que las microalgas pueden adaptarse a una acidificación moderada del medio de cultivo. Esta adaptabilidad es ventajosa para aplicaciones industriales donde se utiliza gas de combustión (con niveles variables de CO₂) como fuente de carbono.

4.3. Parámetros fisicoquímicos

La estabilidad en la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales y el consumo de agua en todos los tratamientos de CO₂ resalta la robustez del sistema de fotobiorreactores. La ausencia de diferencias significativas en estos parámetros sugiere que el enriquecimiento con CO₂ no altera el equilibrio fisicoquímico del medio de cultivo. Sin embargo, las fluctuaciones en el pH posteriores a la cosecha destacan la necesidad de un monitoreo continuo para mantener condiciones óptimas de crecimiento, especialmente en sistemas a gran escala donde la estabilidad del pH es crucial para una productividad constante.

4.4. Implicaciones industriales

El mejor rendimiento del tratamiento con baja concentración de nitrógeno (D1) tiene beneficios económicos y ambientales directos, ya que reduce tanto los costos de fertilizantes como el riesgo de contaminación por escorrentía de nutrientes. Además, la capacidad del sistema para operar eficientemente con CO₂ derivado

de gases de combustión se alinea con prácticas sostenibles, ofreciendo un doble beneficio: la captura de carbono y la producción de biomasa (Young et al., 2019). Estos resultados respaldan la viabilidad de utilizar *Scenedesmus* para la producción de biofertilizantes, contribuyendo a una agricultura más sostenible al reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos (Osorio, J. et al,2023).

4.5. Limitaciones y futuras investigaciones

Si bien este estudio sienta las bases para optimizar el cultivo de *Scenedesmus*, se requiere más investigación para explorar los efectos a

largo plazo del enriquecimiento con CO₂ en el metabolismo y el contenido de lípidos/proteínas de las microalgas. Además de la integración de aguas residuales como fuente de nutrientes para mejorar la sostenibilidad y la escalabilidad del sistema de fotobiorreactores bajo diferentes condiciones ambientales. Pese a haberse realizado el estudio bajo condiciones controladas es importante considerar el entorno real de una industria en donde las fluctuaciones térmicas, la variabilidad de los gases de combustión y el desarrollo de otras especies microalgales puede afectar la reproducibilidad de los resultados en escalas mayores.

5. Conclusiones

Las algas unicelulares en la actualidad se están utilizando para un sinnúmero de aplicaciones y cada vez más su producción pasa de ensayos piloto con el fin de optimizar su producción a nivel industrial dado que el aumento de la demanda de los productos derivados de las microalgas, especialmente por sus componentes funcionales.

La producción de *Scenedesmus* en un sistema de fotobiorreactores fue superior para la menor dosis de Nitrofoska (100 mg L⁻¹ de N) frente a los tratamientos de mayor concentración (200, 300 y 400 mgL⁻¹ de N), lo cual podría estar relacionado con el aumento de la conductividad eléctrica de la solución nutritiva. La conductividad eléctrica y el consumo de agua no mostraron diferencias entre los tratamientos con diferentes dosis de CO₂.

Las concentraciones de CO₂ más elevadas (1000 y 1500 ppm) disminuyeron el pH de la solución nutritiva, sin que este hecho provoque diferencias en la producción de *Scenedesmus* entre los tratamientos. El sistema implementado permitió captar gases de combustión a una concentración máxima de 1500 ppm de CO₂ sin disminuir la producción de biomasa.

La producción de biomasa de *Scenedesmus* optimizada en este estudio, utilizando bajas dosis de nitrógeno (100 mg L⁻¹) y enriquecida con gases de combustión de diésel a concentraciones de hasta 1500 ppm de CO₂, establece las bases para generar una materia prima sostenible y de bajo coste. Futuras investigaciones deben caracterizar el perfil bioquímico de esta biomasa (ej., contenido de fitohormonas, aminoácidos, polisacáridos) y realizar ensayos agronómicos para validar su eficacia y potencial aplicación comercial como bioestimulante.

Este estudio demuestra que dosis bajas de nitrógeno y un enriquecimiento moderado con CO₂ son óptimos para la producción de biomasa de *Scenedesmus*. Estos hallazgos contribuyen al desarrollo de sistemas de cultivo de microalgas rentables y respetuosos con el medio ambiente para aplicaciones industriales. Futuros estudios podrían explorar la integración de tecnologías complementarias, como celdas de combustible microbianas (Sharma et al., 2023), para acoplar la captura de CO₂ con generación de energía, optimizando así la sostenibilidad económica y ambiental del sistema.

6. Referencias bibliográficas

- Blair, M. F., Kokabian, B., y Gude, V. G. (2014). Light and growth medium effect on Chlorella vulgaris biomass production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(1), 665-674. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.11.005>
- Chegukrishnamurthi, M., Shahabazuddin, M., Sreevathsan, S., Sarada, R., y Narayan, S. (2020). Ozonation as non-thermal option for bacterial load reduction of Chlorella biomass cultivated in airlift photobioreactor 1230. *Journal of Cleaner Production*, 276(123029). doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123029>
- Chew, K. W., Yap, J. Y., Show, P. L., Suan, N. H., Juan, J. C., Ling, T. C., . . . Chang, J. S. (2017). Microalgae biorefinery: High value products perspectives. *Bioresource Technology*, 229, 53-62. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.006>
- Huang, Y., Xiong, W., Liao, Q., Fu, Q., Xia, A., Zhu, X., & Sun, Y. (2016). Comparison of Chlorella vulgaris biomass productivity cultivated in biofilm and suspension from the aspect of light transmission and microalgae affinity to carbon dioxide. *Bioresource Technology*, 122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.099>
- Kumar, A., & Bera, S. (2020). Revisiting nitrogen utilization in algae: A review on the process of regulation and assimilation. *Bioresource Technology Reports*, 12. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100584>
- Lee, E., & Zhang, Q. (2016). Integrated co-limitation kinetic model for microalgae growth in anaerobically digested municipal sludge centrate. *Algal Research*, 8, 15-24. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.05.019>
- Lu, W., Alam, A., Liu, S., Xu, J., & Parra, R. (2020). Critical processes and variables in microalgae biomass production coupled with bioremediation of nutrients and CO₂. *Science of The Total Environment*, 716(135247), <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135247>
- Marín, C., Estrada, J., Delgado, J., Zapata, P., y Peñuela, M., (2024). Cyanobacteria and microalgae as potential sources of biofertilizers: a review. *Actualidades Biológicas*, 46(120), e4606. <https://doi.org/10.17533/udea.acbi/v46n120a06>
- Nad' , M., Brummer, V., Lošák, P., Máša, V., Sukačová, K., Tatarová, D., Pernica, M., y Procházková, M. (2023). Waste-to-energy plants flue gas CO₂ mitigation using a novel tubular photobioreactor while producing Chlorella algae. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135721. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135721>
- Nagi, M., He, M., Li, D., Gebreluel, T., Cheng, B., y Wang, C. (2020). Utilization of tannery wastewater for biofuel production: New insights on microalgae growth and biomass production. *Sci Rep 10*, 1530 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-57120-4>
- Osorio, J., Valenzuela, H., Pizaña, J., Ramírez, D., Meléndez, E., López, M., Castañeda, M.D., Coronado, K., Gomes, R., Sosa, J., Melchor, E., Iqbal, H., Parra, R., y Martínez, M. (2023). Microalgae-Based Biotechnology as Alternative Biofertilizers for Soil Enhancement and Carbon Footprint Reduction: Advantages and Implications. *Mar Drugs*, 21(2), 93. <https://doi.org/10.3390/md21020093>
- Sharma, R., Singh, G., y Sharma, V. (2011). Comparison of different media formulations on growth, morphology and Chlorophyll content of green alga, Chlorella vulgaris. *International Journal of Pharma and Bio Sciences*, 2(2), 509-516
- Sharma, A., Sarkar, P., Chhabra, M., Kumar, A., Kumar, A., Kothadia, H., y Mallick, A. (2023). Carbon capture from petrol-engine flue gas: Reviving algae-based sequestration with integrated microbial fuel cells. *Chemical*

Engineering Journal, 476, 146578. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146578>

Shayesteh, H., Vadiveloo, A., Bahri, P. y Moheimani, N. (2021). Can CO₂ addition improve the tertiary treatment of anaerobically digested abattoir effluent (ADAE) by *Scenedesmus sp.* (*Chlorophyta*)? *Algal Research*. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102379>

Yang, Y., Tang, S. y Chen, J. P. (2024). Carbon capture and utilization by algae with high concentration CO₂ or bicarbonate as carbon source. *Science of The Total Environment*, 918, 170325. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170325>

Young, Y., Kumar, A., Eui, M., Seok, W. y Jun, S. (2019). Microalgae Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS): An emerging sustainable bioprocess for reduced CO₂ emission and biofuel production. *Bioresource Technology Reports*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100270>.

Zhao, Zhao, B., Su, Y., Zhang, Y. y Cui, G. (2015). Carbon dioxide fixation and biomass production from combustion flue gas using energy microalgae. *Energy*, 89, 347-357. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.123>