

Efecto de los ciclos luz-oscuridad con modulación sinusoidal sobre el cultivo de *Scenedesmus obtusiusculus* AT-UAM

Yareni López¹, Jair Lorenzo¹, Miriam Montalvo¹, Luis Sánchez¹, León Sánchez², Juan Cabello^{3*}

¹ Estudiante de la Licenciatura en Ingeniería Química, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Iztapalapa, C.P. 09310, Ciudad de México.

² Departamento de Procesos y Tecnología, Universidad Autónoma Metropolitana-Cuajimalpa, Av. Vasco de Quiroga 4871, Cuajimalpa de Morelos, C.P. 05384, Ciudad de México.

^{3*} Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Iztapalapa, 09310, Ciudad de México.

Correo electrónico: jjcr@xanum.uam.mx

Resumen

Este trabajo presenta la implementación de un dispositivo diseñado a partir de una tarjeta ESP32 programada en Arduino para controlar un sistema de iluminación LED aplicado en el cultivo de la microalga *Scenedesmus obtusiusculus* AT-UAM, en un fotobiorreactor air-lift de 5 L. El dispositivo permitió simular ciclos sinusoidales de luz-oscuridad (L-O), en el orden de horas hasta segundos, en condiciones de laboratorio, reproduciendo dinámicas similares a las que se exponen de manera natural en sistemas a la intemperie. Se evaluó el efecto de un ciclo sinusoidal de L-O (12:12 h) sobre la producción de oxígeno y la productividad de biomasa, considerando una intensidad máxima de $365 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, así como el efecto de cambios en escalón de la intensidad de luz sobre la tasa aparente de producción de oxígeno. Esta estrategia permitió determinar en el orden de minutos las tasas de producción de oxígeno de un cultivo microalgal aclimatado a un ciclo sinusoidal de L-O, obteniendo un valor máximo de $52 \text{ mgO}_2 \text{ g}_b^{-1} \text{ h}^{-1}$ a $365 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y a una concentración de biomasa de 0.5 g L^{-1} , en comparación con el obtenido en iluminación continua ($93.8 \text{ mgO}_2 \text{ g}_b^{-1} \text{ h}^{-1}$), se muestra la importancia de considerar el efecto de aclimatación respecto a las condiciones de iluminación. Debido a la complejidad de evaluar la actividad fotosintética de la microalga en ciclos externos, este estudio constituye una alternativa importante para generar información que facilite el desarrollo de modelos matemáticos orientados al diseño y escalamiento de fotobiorreactores que operan a la intemperie.

Palabras Claves: Fotobiorreactor, sinusoidal, luz-oscuridad, *Scenedesmus*

Abstract

This work presents the implementation of a device based on an ESP32 board programmed with Arduino to control an LED lighting system applied to the cultivation of the microalga *Scenedesmus obtusiusculus* AT-UAM, in a 5 L air-lift photobioreactor. The device enabled the simulation of sinusoidal light-dark (L-D) cycles, ranging from hours to seconds, like those naturally occurring in outdoor photobioreactor systems. The effect of a sinusoidal L-D cycle (12:12 h) on oxygen production and biomass productivity was evaluated, considering a maximum light intensity of $365 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, as well as the effect of step changes in light intensity on the apparent oxygen production rate. This strategy allowed the determination, within minutes, of oxygen production rates in a microalgal culture acclimated to a sinusoidal L-D cycle, reaching a maximum value of $52 \text{ mgO}_2 \text{ g}_b^{-1} \text{ h}^{-1}$ at $365 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and a biomass concentration of 0.5 g L^{-1} . In comparison with continuous illumination ($93.8 \text{ mgO}_2 \text{ g}_b^{-1} \text{ h}^{-1}$), the results highlight the importance of considering acclimation effects under different lighting conditions. Due to the complexity of evaluating the photosynthetic activity of microalgae under external cycles, this study offers an important alternative for generating data that supports the development of mathematical models aimed at designing and scaling up outdoor-operating photobioreactors.

Key Words: Photobioreactor, sinusoidal, light-dark, *Scenedesmus*

Introducción

En la actualidad, las microalgas han adquirido relevancia por su capacidad de aprovechar la energía solar mediante fotosíntesis para producir biomasa, utilizada como materia prima en la obtención de lípidos, pigmentos y diversos productos de valor agregado (Saccardo et al., 2025). Además, las microalgas poseen la capacidad de fijar CO₂ durante su crecimiento, lo que contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero, así como la eliminación de contaminantes de aguas residuales (Saccardo et al., 2025).

A lo largo del tiempo, se han desarrollado dos principales sistemas para el cultivo de microalgas: los sistemas abiertos, como los estanques tipo circuito y los sistemas cerrados o fotobiorreactores, los cuales permiten un mayor control sobre las condiciones de cultivo (Terry, 1986). Estos últimos representan una opción viable para la producción a gran escala, al contrarrestar los principales problemas asociados al control de variables en los sistemas abiertos. Sin embargo, la elección del tipo de sistema depende de la aplicación y el producto que se desea obtener. Los fotobiorreactores (FBR) están diseñados para favorecer el crecimiento microalgal bajo condiciones controladas de luz, temperatura, pH y mezclado (Kwon et al., 2012). Existe una amplia variedad de diseños y configuraciones, entre los que destacan los sistemas tubulares, de placa plana y las columnas de burbujeo, debido a su alta productividad de biomasa y actividad fotosintética. No obstante, es importante considerar que los sistemas cerrados implican un elevado costo de inversión y mantenimiento.

Optimizar el rendimiento en fotobiorreactores, requiere comprender y evaluar el efecto de variables como la temperatura, el pH, la intensidad de luz, los ciclos luz-oscuridad (L-O) y las condiciones de mezclado. En cultivos a condiciones externas uno de los factores más importante es la exposición de la microalga a ciclos naturales de L-O, que influyen en su eficiencia fotosintética (Kwon et al., 2012). No obstante, resulta complejo evaluar la actividad fotosintética en estos ciclos, aunque este tipo de estudios es esencial para generar información que favorezca el diseño y escalamiento de fotobiorreactores.

Los estudios realizados por Fernández et al. (2018) presentan un sistema de iluminación que simula las condiciones de ciclo L-O

mediante un sistema de LED y fuente de luz controlado por un trazador de curvas programable (TG4001), para evaluar el efecto de luz intermitente sobre la respuesta fotosintética. En el cultivo de *Scenedemus obliquus* realizado por Bertuccio et al. (2014) se trabajó con un fotobiorreactor a escala laboratorio simulando los ciclos L-O bajo irradiación estacional mediante una lámpara LED sintonizable, mostrando los efectos sobre el crecimiento y productividad de biomasa en las diferentes estaciones del año. Para el estudio de cinéticas de crecimiento, Jacobi et al. (2012) desarrollaron un sistema de iluminación de LED avanzado, instalado con dos carcasas alrededor de un biorreactor de tanque agitado. Estos estudios indican que simular los ciclos L-O en condiciones controladas de laboratorio es una estrategia clave para obtener información que permita un mejor diseño y escalamiento de fotobiorreactores que operan a la intemperie. Es importante señalar que, para evaluar los cambios en la intensidad de luz, se requieren experimentaciones de corta duración que eviten efectos asociados al crecimiento de biomasa. En este sentido, experimentos dinámicos de cambios en escalón, pulso y oscilaciones han adquirido relevancia por su amplia aplicabilidad, ya que permiten obtener información del cultivo de manera más rápida en comparación con los métodos tradicionales, los cuáles requieren varios días de evaluación (Spadiut et al., 2013).

El objetivo de este trabajo fue evaluar experimentos dinámicos para estimar la tasa aparente de producción de oxígeno de la microalga *Scenedesmus obtusiusculus* AT-UAM aclimatada a una exposición sinusoidal de iluminación mediante un sistema generador de funciones que simula ciclos L-O 12-12 h.

Materiales y Métodos

Inóculo

Se realizó el mantenimiento de la microalga *Scenedesmus obtusiusculus* AT-UAM (Sánchez, 2013) en un reactor de vidrio de 1 L con agitación magnética, sistema de aireación mediante un difusor de aire e iluminación continua a 60 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figura 1). Posteriormente, el cultivo se propagó en un fotobiorreactor tipo columna de burbujeo (air-lift) con una concentración inicial de biomasa de 0.01 g L⁻¹ empleando medio mineral BG-11 (Tabla 1)



Figura 1. Sistema para la propagación de la microalga; reactor de vidrio de 1 L con difusor de aire, parrilla de calentamiento y bomba de aire.

Tabla 1. Composición del medio BG11

Medio de cultivo BG-11	
Compuesto	Concentración (g L ⁻¹)
NaNO ₃	1.5
K ₂ HPO ₄ • 2H ₂ O	0.04
MgSO ₄ • 7H ₂ O	0.075
EDTA disódico de magnesio	0.01
CaCl ₂ • 2H ₂ O	0.036
C ₆ H ₈ O ₇	0.006
Citrato de amonio férrico	0.006
Na ₂ CO ₃	0.02
Metales traza A5+Co	1 mL
Metales traza A5+Co	
Compuesto	Masa (g)
H ₃ BO ₃	2.86
MnCl ₂ • 4H ₂ O	1.81
ZnSO ₄ • 7H ₂ O	0.222
NaMoO ₄ • 2 H ₂ O	0.39
CuSO ₄ • 5H ₂ O	0.079
Co(NO ₃) ₂ • 6H ₂ O	0.0494
Agua destilada	1.0 L
H ₃ BO ₃	2.86

Fotobiorreactor air-lift instrumentado

Se operó en modo lote un fotobiorreactor air-lift instrumentado construido en material de acrílico con dimensiones de 104 cm de altura, 0.3 cm de espesor, 8 cm de diámetro externo y volumen de 5 L (Figura 2). Se encuentra dividido principalmente en tres secciones: anular para la captación de fotones, concéntrica con separación de 1.2 cm de la anular y la zona de desgasificación que permite la liberación de oxígeno. En la parte inferior se suministró de forma continua aire mezclado con CO₂ para generar una distribución homogénea de la fase gaseosa para el crecimiento de la microalga. El pH se midió con un sensor electroquímico (Cole Palmer) y la concentración de oxígeno disuelto mediante un sensor polarográfico (Vernier Go Direct). Las señales de cada uno de los sensores se obtuvieron mediante una tarjeta de adquisición de datos (National Instrument) conectada a una computadora mediante el software NI LabVIEW (2009) para el registro de datos. Además, se diseñó y construyó un dispositivo para exponer la superficie del fotobiorreactor a un comportamiento sinusoidal de iluminación de L-O, que simula de manera periódica un ciclo natural 12-12 h. Para ello, se empleó una tarjeta ESP32 programada en Arduino mediante una función de tipo seno, generando variaciones hasta una intensidad máxima de 365 μmol m⁻² s⁻¹ para controlar un sistema de iluminación de LED (Figura 2.A). Sin embargo, es importante mencionar que el dispositivo se encuentra diseñado con la capacidad de generar ciclos L-O en el orden de horas hasta segundos, como se representa en la Figura 2.B.

Determinación de biomasa y nitratos

Se utilizó el método de peso seco para conocer la concentración de biomasa cada 24 h. Se filtró una alícuota de 10 ml con una membrana de nylon de 0.4 μm. El filtrado reservado se utilizó para la determinación de nitratos, utilizando una membrana de acetocelulosa de 0.2 μm y medición por espectrofotometría siguiendo el método descrito en Sánchez (2013).

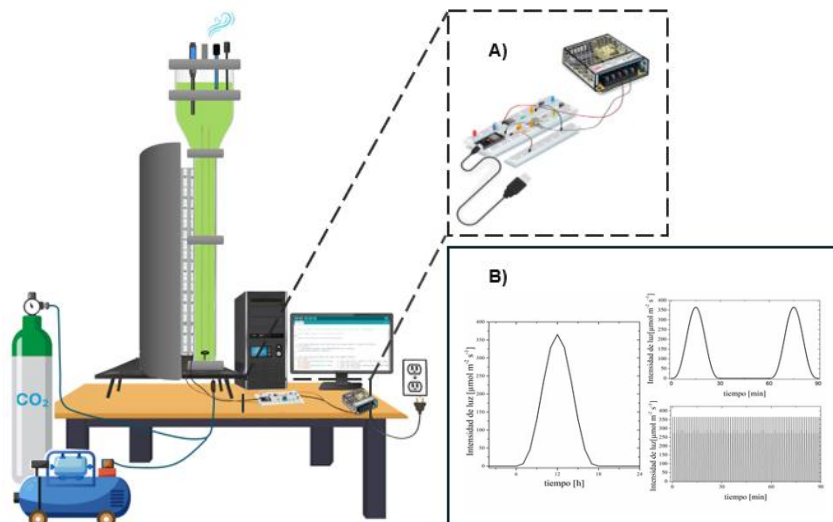


Figura 2. Fotobiorreactor air-lift instrumentado para el cultivo de *Scenedesmus obtusiusculus* AT-UAM. **A)** Tarjeta ESP32 **B)** Ciclos L-O generadores mediante la función sinusoidal: 12-12 h, 30-30 min, 30-30 s.

Condiciones de operación y experimentos dinámicos

El fotobiorreactor air-lift se operó en modo lote con 4.25 L de medio mineral BG-11, 0.75 L de inóculo de *S. obtusiusculus* y una iluminación sinusoidal con intensidad máxima de 365 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. La concentración de CO₂ fue 1 % y se suministró con aire a un flujo de 2 L min⁻¹. Durante el crecimiento de la microalga se realizaron experimentos dinámicos para determinar la evolución de O₂ a diferentes intensidades de luz y en dos concentraciones de biomasa (0.5 y 1.0 g L⁻¹). Los experimentos dinámicos se iniciaron, después de un periodo de 12 horas de oscuridad, con una intensidad de 103, 157, 225, 300 y 365 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para periodos de 35 minutos cada uno. En estas condiciones sinusoidales, las variables respuesta (pH, temperatura y concentración de oxígeno disuelto) alcanzaron estados pseudo-estacionarios y se determinó la tasa de producción de O₂ por unidad de biomasa para cada intensidad de luz (Cabello et al., 2014).

Tasas de producción de oxígeno

A partir de un balance macroscópico de oxígeno en la fase líquida se pueden determinar las tasas de producción de oxígeno para cada cambio escalón mediante la siguiente expresión, como se reporta en Cabello et al. (2014).

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = -k_L a \left(C_{O_2} - \frac{P_{O_2}}{H} \right) + R_{O_2} \quad (1)$$

Donde C_{O_2} representa la concentración de oxígeno disuelto en la fase líquida (promedio de los últimos 5 minutos, en cada estado pseudo-estacionario), R_{O_2} la tasa aparente de producción de oxígeno para cada intensidad de luz, P_{O_2} la presión parcial de oxígeno en la fase gaseosa, y H el coeficiente de Henry. El coeficiente volumétrico de transferencia de masa ($k_L a$) se estimó previamente dando un valor de 27 h⁻¹, utilizando la correlación propuesta por Akita et al. (1974) para columnas de burbujeo.

Resultados y discusión

La Figura 3 muestra el crecimiento de biomasa y el consumo de nitratos bajo un comportamiento de ciclo L-O, mostrando las fases de crecimiento y adaptación: lag, exponencial y estacionaria. Asimismo, se comparan estos resultados con los obtenidos bajo iluminación continua en las mismas condiciones de operación y el mismo sistema, mostrando que en iluminación continua el crecimiento para una concentración de biomasa de 0.1 a 2.0 g L⁻¹ es en 12 días en comparación con el ciclo L-O de 17 días, debido a los periodos de oscuridad (12 h) y el comportamiento sinusoidal generado por la fuente de iluminación. Después de alcanzar una concentración de biomasa de 1 g L⁻¹, en ambos casos, la causa que limita el crecimiento de microalgas es la atenuación de luz debido al traslape entre las células, evitando una distribución homogénea de luz

dentro del fotobiorreactor (Cabello et al., 2014). De esta manera, el crecimiento de la microalga (después de 10 días) expuesta a una iluminación sinusoidal de L-O fue más lento y casi dos veces menor, en comparación

con iluminación continua, debido a los tiempos de exposición de luz de forma sinusoidal, los cuales, en este trabajo, buscan simular y proporcionar información más real del crecimiento de biomasa a la intemperie.

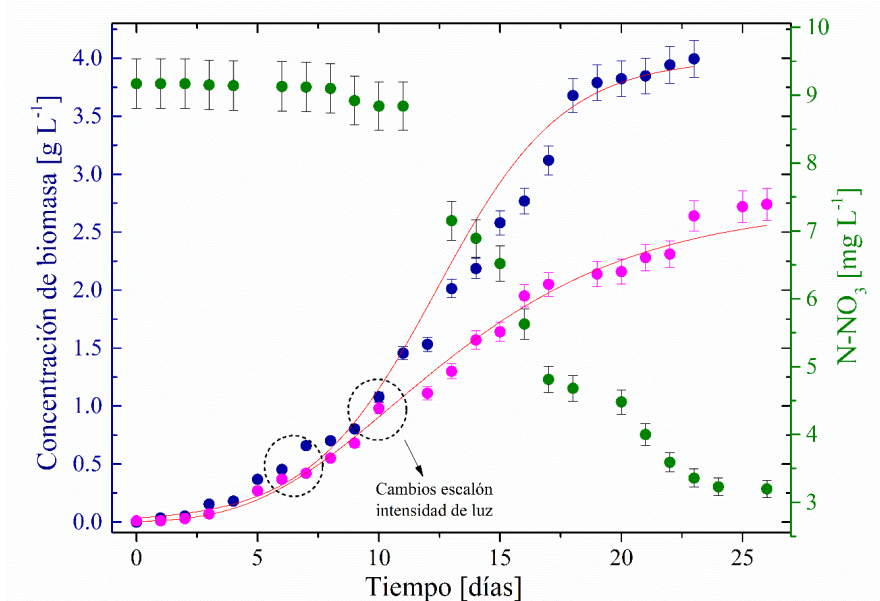


Figura 3. Curvas de crecimiento *S. obtusiusculus* AT-UAM. (●) nitratos y crecimiento de biomasa: (●) ciclo L-O, (●) luz continua

En la Figura 3, el efecto de la iluminación sinusoidal de ciclos L-O sobre la actividad fotosintética no se distingue debido a las distintas escalas de tiempo en que ocurren los mecanismos, químicos (reacciones fotoquímicas), biológicos (fotosistemas, fijación de CO_2 y crecimiento) y físicos (captación de luz, transporte de gases y de nutrientes) que van del orden de segundos, minutos a horas. Por ello, en la Figura 4 (A, B, C) se presenta la evolución temporal del pH, temperatura, y oxígeno disuelto (DO) durante 24 (Figura 4. A, B) y 48 h (Figura 4.C), correspondientes a las tres fases de crecimiento de la microalga (Figura 3), bajo condiciones de iluminación sinusoidal. En la figura 4.A se observan ligeros cambios (temperatura, oxígeno disuelto, pH) que corresponden a un periodo de adaptación de la microalga al sistema experimental. En la Figura 4.B se observan valores con mínimos

y máximos de la concentración de oxígeno disuelto, temperatura y pH, que corresponden a la actividad de fotosíntesis inducida por el sistema de iluminación sinusoidal para un ciclo de 12:12 h. También se observa (Figura 4.B, círculo punteado) un periodo de tiempo donde se realizaron los experimentos de escalón para distintas intensidades de luz, con el objetivo de evaluar en tiempos cortos la tasa de producción de oxígeno para distintas intensidades de luz, como se presenta en Cabello et al., 2014. En la Figura 4.C, el incremento en la temperatura hasta 28°C se asoció principalmente al calor generado por las variaciones en la intensidad de luz. En cuanto al oxígeno disuelto, se observó una disminución hasta 6.0 mg L^{-1} durante el periodo de oscuridad debido a la respiración celular, mientras que en iluminación se presentó un aumento hasta 8.0 mg L^{-1} debido al proceso de fotosíntesis.

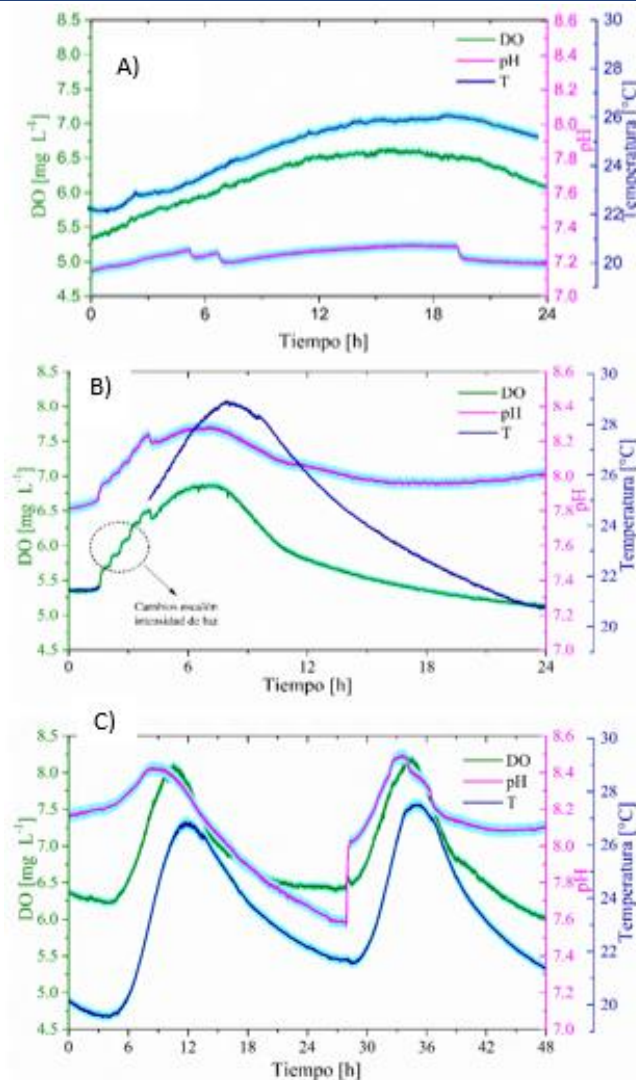


Figura 4. Respuesta de temperatura, pH y oxígeno disuelto (DO) en las distintas fases de crecimiento: **A)** lag **B)** exponencial **C)** estacionaria. Las barras de error con el área de relleno cian indican el error de medición.

La Figura 5 muestra el comportamiento dinámico del oxígeno disuelto (DO) a dos (0.5 y 1.0 g L⁻¹) concentraciones de biomasa y para cada cambio en escalón de la intensidad de luz, de acuerdo con la metodología experimental presentada en este trabajo. Se observa que en ambas concentraciones de biomasa se alcanzan estados pseudo-estacionarios de producción de oxígeno, como resultado de su adaptación a corto plazo en cada intensidad de luz. Con esta información, en la Figura 6 se presentan las tasas de producción de oxígeno en estado pseudo-estacionario, calculadas con la

Ecuación 1, para una concentración de biomasa de 0.5 g L⁻¹, además, se realiza una comparación con los resultados obtenidos bajo luz continua y misma concentración de biomasa en el estudio de Cabello et al. (2014). Los valores ajustaron a una función de tipo exponencial simple, ampliamente utilizada para microorganismos fotosintéticos que se encuentran expuestos a ciclos L-O (Chalker, 1981). Se determinó una constante de saturación (I_k) de $357 \pm 1.21E-4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y una tasa de producción máxima de oxígeno (P_m) de $84.24 \pm 2.75 \text{ mg}_\text{O}_2 \text{ g}_\text{b}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

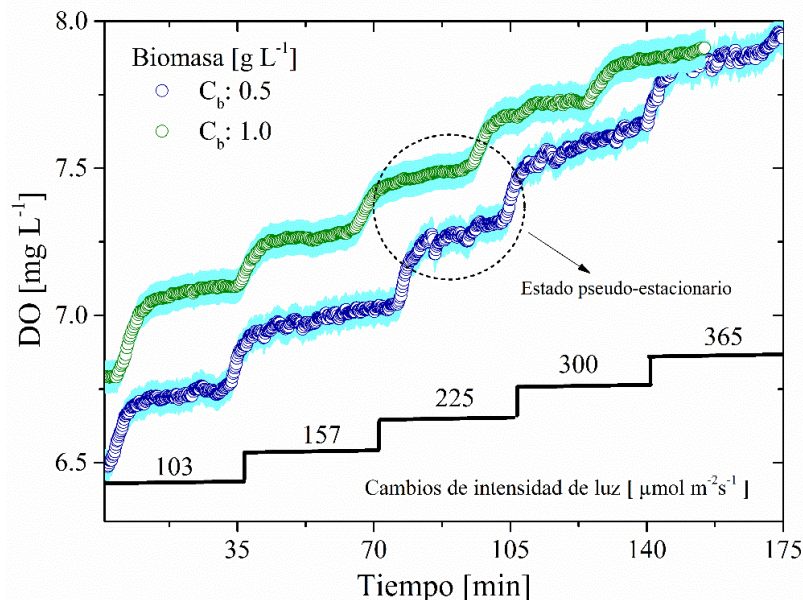


Figura 5. Respuesta dinámica de oxígeno disuelto (DO) de la microalga *S. obtusiusculus* AT-UAM a los cambios en escalón de intensidad de luz, para diferentes concentraciones de biomasa: 0.5 y 1.0 g L⁻¹. Las barras de error con el área de relleno indican el error de medición.

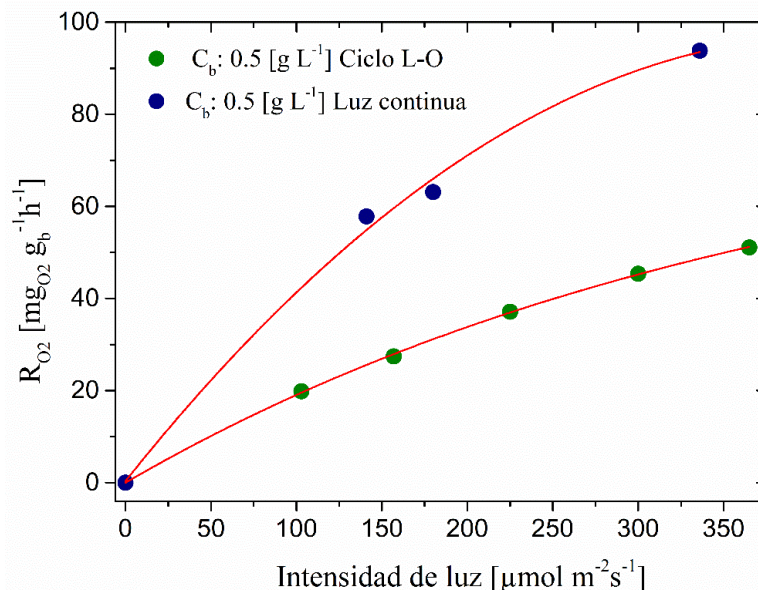


Figura 6. Tasas de producción de oxígeno en estado pseudo-estacionario a diferentes intensidades de luz, para *Scenedesmus obtusiusculus* AT-UAM expuesta a ciclos L-O e iluminación continua.

Con base en los resultados, se aprecia lo relevante de considerar el efecto del ciclo L-O sobre la actividad fotosintética de la microalga para la determinación de parámetros cinéticos y globales de crecimiento. En la Tabla 1 se presentan los valores obtenidos de productividad de biomasa y tasas de producción de oxígeno que consideran el efecto de un ciclo L-O 12-12 h, a su vez, se realiza una comparación con lo reportado en

la literatura para diferentes microalgas que fueron cultivadas en condiciones de iluminación continua. Se observa que la productividad de biomasa en condiciones de ciclo L-O es de 0.11 g L⁻¹ día⁻¹ en comparación con las obtenidas en iluminación continua de 0.44, 0.76 y 0.80 g L⁻¹ día⁻¹ reportadas por Chowdary et al. (2022), Cabello et al. (2014) y Fernández et al. (2006), respectivamente, debido a la saturación intermitente de los

fotosistemas, disminución del pH durante la oscuridad y una atenuación de luz más pronunciada que considera 12 horas de oscuridad y durante el periodo de iluminación. En cuanto a las tasas de producción de oxígeno, experimentos dinámicos realizados con esta microalga por Cabello et al. (2014) reportan una tasa de producción de oxígeno de $96.2 \text{ mg}_{\text{O}_2} \text{ g}_{\text{b}}^{-1} \text{ h}^{-1}$ a una concentración de biomasa de 0.5 g L^{-1} y $336 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en comparación con los obtenidos en este trabajo de $52.3 \text{ mg}_{\text{O}_2} \text{ g}_{\text{b}}^{-1} \text{ h}^{-1}$ a 0.5 g L^{-1} y $365 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Estos resultados evidencian que bajo un comportamiento sinusoidal de ciclo L-O, la iluminación intermitente afecta la actividad fotosintética, en consecuencia, la producción de oxígeno se limita a la fase luminosa, reduciendo el valor promedio de la tasa en comparación con luz continua.

Conclusiones

El dispositivo empleado para la iluminación del cultivo logró reproducir de manera adecuada el ciclo externo de L-O, lo que permitió evaluar la actividad fotosintética de la microalga en condiciones internas de laboratorio. Los resultados evidenciaron que la aclimatación de la microalga a un ciclo L-O influye de manera significativa en su crecimiento y productividad de biomasa, en comparación con lo observado bajo iluminación continua. La estrategia dinámica de cambios en escalón en la intensidad de luz permitió determinar en tiempos cortos, las tasas de producción de oxígeno que consideraron el efecto de una aclimatación a un ciclo sinusoidal de L-O. Debido a la complejidad de evaluar la actividad fotosintética de la microalga en ciclos externos, este estudio constituye una alternativa importante para generar información que facilite el desarrollo de modelos matemáticos orientados al diseño y escalamiento de fotobiorreactores que operan a la intemperie.

Agradecimientos

A la Dra. Marcia Morales de la UAM-C por proporcionar la cepa que se utilizó en este trabajo de investigación.

A la coordinación de la Licenciatura en Ingeniería Química de la UAM-Iztapalapa por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Referencias

- Akita, K., & Yoshida, F. (1974). Bubble size, interfacial area, and liquid-phase mass transfer coefficient in bubble columns. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 13(1), 84-91.
- Bertucco, A., Beraldi, M., & Sforza, E. (2014). Continuous microalgal cultivation in a laboratory-scale photobioreactor under seasonal day–night irradiation: experiments and simulation. *Bioprocess and biosystems engineering*, 37(8), 1535-1542. <https://doi.org/10.1007/s00449-014-1125-5>
- Cabello, J., Morales, M., & Revah, S. (2014). Dynamic photosynthetic response of the microalga *Scenedesmus obtusiusculus* to light intensity perturbations. *Chemical Engineering Journal*, 252, 104-111. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.04.073>
- Chalker, B. E. (1981). Simulating light-saturation curves for photosynthesis and calcification by reef-building corals. *Marine Biology*, 63(2), 135-141. <https://doi.org/10.1007/BF00406821>
- Chowdhary, A. K., Kishi, M., & Toda, T. (2022). Enhanced growth of *Chromochloris zofingiensis* through the transition of nutritional modes. *Algal Research*, 65, 102723. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102723>
- Fernández-Sevilla, J. M., Brindley, C., Jiménez-Ruiz, N., & Acién, F. G. (2018). A simple equation to quantify the effect of frequency of light/dark cycles on the photosynthetic response of microalgae under intermittent light. *Algal research*, 35, 479-487. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.09.026>
- Jacobi, A., Steinweg, C., Sastre, R. R., & Posten, C. (2012). Advanced photobioreactor LED illumination system: scale-down approach to study microalgal growth kinetics. *Engineering in Life Sciences*, 12(6), 621-630. <https://doi.org/10.1002/elsc.201200004>
- Kwon, J. H., Rögner, M., & Rexroth, S. (2012). Direct approach for bioprocess optimization in a continuous flat-bed photobioreactor system. *Journal of biotechnology*, 162(1), 156-162. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2012.06.031>

Artículos

López, M. G. M., Sánchez, E. D. R., López, J. C., Fernández, F. A., Sevilla, J. F., Rivas, J., ... & Grima, E. M. (2006). Comparative analysis of the outdoor culture of *Haematococcus pluvialis* in tubular and bubble column photobioreactors. *Journal of biotechnology*, 123(3), 329-342.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2005.11.010>

Saccardo, A., Wolf, J., Hankamer, B., & Bezzo, F. (2025). Scaling-up information from high-throughput pulsed light data to predict microalgae growth dynamics in photobioreactors. *Algal Research*, 104073.
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2025.104073>

Sánchez García L. (2013). Cultivo a la intemperie de *Scenedesmus obtusiusculus* en un fotobiorreactor solar "air-lift". Tesis Maestría, Universidad Autónoma Metropolitana. México, CDMX.

Spadiut, O., Rittmann, S., Dietzsch, C., & Herwig, C. (2013). Dynamic process conditions in bioprocess development. *Engineering in Life Sciences*, 13(1), 88-101.
<https://doi.org/10.1002/elsc.201200026>

Terry, K. L. (1986). Photosynthesis in modulated light: quantitative dependence of photosynthetic enhancement on flashing rate. *Biotechnology and Bioengineering*, 28(7), 988-995.
<https://doi.org/10.1002/bit.260280709>