

Evaluación de distintas intensidades de luz para la producción de microalgas

Evaluation of different light intensities for microalgae production

Kevin Omar Oña Limones^{1,2} & Geovanna Parra Riofrío^{1,2,3*}

¹Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, 090601 Guayaquil, Ecuador.

²Laboratorio de Acuacultura, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, 090601 Guayaquil, Ecuador.

³Departamento de Acuicultura, Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte, Larrondo 1281, Coquimbo, Chile

Recibido julio 2025, aceptado septiembre 2025, en línea 03 diciembre 2025

Resumen

El cultivo de microalgas bajo diferentes intensidades lumínicas impacta en procesos como la obtención de compuestos químicos, la generación de biocombustibles y la producción de alimentos, constituyendo una alternativa tecnológica con gran potencial para sectores productivos como la acuicultura. El objetivo del estudio fue estimar el efecto de distintas intensidades de luz en el cultivo de microalgas en un fotobioreactor. Se evaluaron los parámetros poblacionales, la tasa de crecimiento y la productividad en el cultivo de la microalga *Chaetoceros sp.* en un fotobioreactor, empleando tres réplicas para cada tratamiento: 4 000 (C), 10 000 (T1) y 20 000 (T2) lux. Las condiciones de cultivo se mantuvieron constantes con pH=8, salinidad de 35 %, oxígeno disuelto de 8,5 mg/L y temperatura de 24 °C. Los resultados mostraron diferencias significativas entre el control (C) y los tratamientos T1 y T2 ($p<0,05$). En cuanto a la productividad, no se observaron diferencias significativas entre C y los tratamientos, aunque sí se evidenciaron entre T1 y T2, siendo la productividad de T1 1,31 veces superior a la de T2. Este estudio concluyó que la variación en las intensidades de luz tuvo un impacto significativo en el cultivo de *Chaetoceros sp.*, mostrando un crecimiento de la microalga a medida que se incrementaba la intensidad lumínica, siendo T2 (20 000 lux), el que presentó el mayor crecimiento. Los resultados sugieren que el manejo adecuado de la luz puede mejorar la disponibilidad de biomasa en menor tiempo, reduciendo así los costos de producción y asegurando un suministro más eficiente de alimento vivo en criaderos de organismos acuáticos.

Palabras clave: Intensidad de luz, microalga, tasa de crecimiento, productividad, fotobioreactor.

Abstract

The cultivation of microalgae under different light intensities impacts processes such as obtaining chemical compounds, generating biofuels, and producing food. This constitutes a technological alternative with great potential for productive sectors like aquaculture. The objective of the study was to estimate the effect of different light intensities on the cultivation of microalgae in a photobioreactor. Population parameters, growth rate, and productivity were evaluated in the cultivation of the microalgae *Chaetoceros sp.* in a photobioreactor, using three replicates for each treatment: 4,000 (C), 10,000 (T1), and 20,000 (T2) lux. The cultivation conditions were kept constant with pH=8, salinity of 35 %, dissolved oxygen of 8.5 mg/L, and a temperature of 24 °C. The results showed significant differences between the control (C) and treatments T1 and T2 ($p<0.05$). Regarding productivity, no significant differences were observed between C and the treatments, although differences were found between T1 and T2, with the productivity of T1 being 1.31 times higher than that of T2. This study concluded that the variation in light intensities had a significant impact on the cultivation of *Chaetoceros sp.*, showing an increase in the growth of the microalgae as the light intensity was increased, with T2 (20,000 lux) presenting the highest growth. The results suggest that proper light management can improve biomass availability in less time, thereby reducing production costs and ensuring a more efficient supply of live food in aquatic organism hatcheries.

Keywords: Light intensity, microalgae, growth rate, productivity, photobioreactor.

* Correspondencia del autor:

E-mail: geovanna.parrar@ug.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia de creative commons: atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0. Los autores mantienen los derechos sobre los artículos y por tanto son libres de compartir, copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra.

Introducción

La mitigación del cambio climático, elaboración de productos químicos, biocombustible y la producción de alimentos son aplicaciones en las que se involucra el cultivo de microalgas, convirtiéndola en una tecnología prometedora para ciertas industrias como la Acuicultura (Beal et al. 2018). Chicaiza Ortiz et al., (2021) mencionan que aprovechar la luz solar y transformarla en biomasa, oxígeno y compuestos valiosos, es un potencial extraordinario que poseen estos microorganismos fotosintéticos unicelulares; no obstante, el éxito de su cultivo en sistemas de fotobioreactores está intrínsecamente ligado a un factor crítico: la disponibilidad de luz.

El diseño adecuado de fotobioreactores, sistemas que permiten el cultivo controlado de microalgas (Ruiz, 2017), se convierte en un componente crítico para maximizar la eficiencia fotosintética y la producción de biomasa. Por lo que es esencial comprender cómo diferentes intensidades y patrones de luz afectan su crecimiento; la relación entre la tasa fotosintética y la intensidad lumínica se describe mediante una cinética de Michaelis-Menten, indica que cuando las intensidades lumínicas son altas, la tasa fotosintética es incrementada hasta el punto de saturación, el cual puede variar dependiendo de la especie y las condiciones ambientales (Plasencia, 2012).

La productividad experimenta un incremento no lineal a medida que se incrementa la frecuencia del ciclo de luz y oscuridad, lo que significa que la mejora en la productividad se vuelve más significativa a medida que la frecuencia aumenta, pero llega a un punto

Tabla 1. Descripción de los tratamientos experimentales.

Tratamientos	Intensidad de luz experimental
C	4 000 lux
T1	10 000 lux
T2	20 000 lux

de estabilización o saturación en algún momento (Clagnan et al., 2023; Costache et al., 2013; García Sánchez et al., 2003; Molina Grima et al., 2000; Rebolloso Fuentes et al., 1999).

El cultivo de microalgas no sólo se limita a la disponibilidad de luz; Sanz, (2019) menciona que el cultivo de microalgas en fotobioreactores implica que el medio en el que crecen se mantenga en condiciones controladas, por lo que, es indispensable implementar un protocolo para el monitoreo y control de variables: temperatura, pH, oxígenos disueltos y nutrientes. Con el avance de estos estudios, se pretende dar soluciones o alternativas para maximizar la productividad de las microalgas y su potencial para la sostenibilidad acuícola. La presente tesis tiene como objetivo estimar el efecto de distintas intensidades de luz en el cultivo de microalgas en un fotobioreactor.

Materiales y Método

El estudio se realizó en las instalaciones del Laboratorio de Acuicultura de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad de Guayaquil.

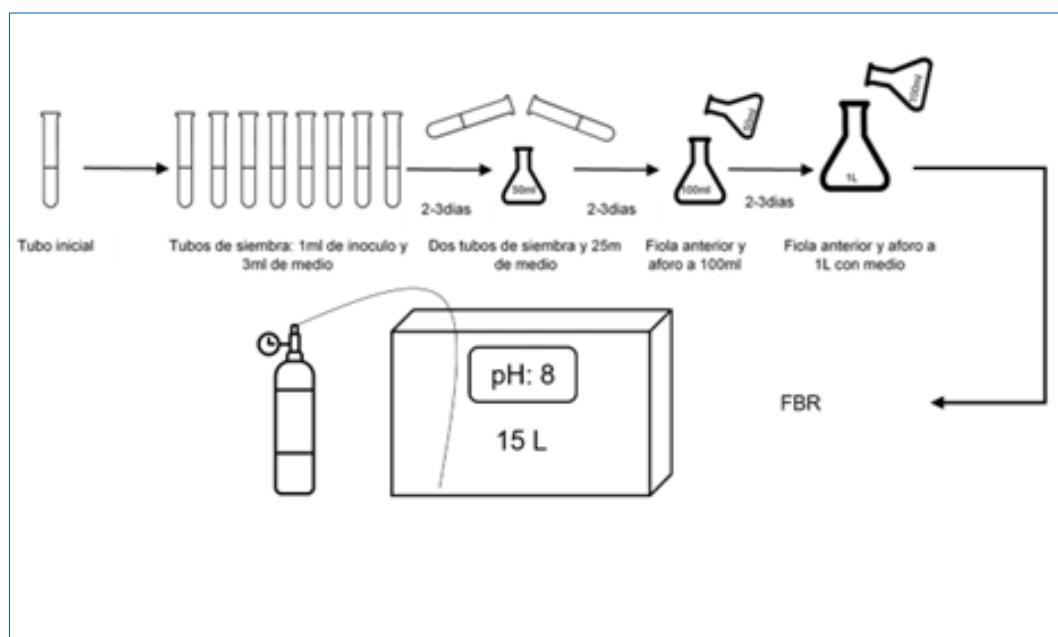


Figura 1. Secuencia de escalamiento volumétrico del cultivo

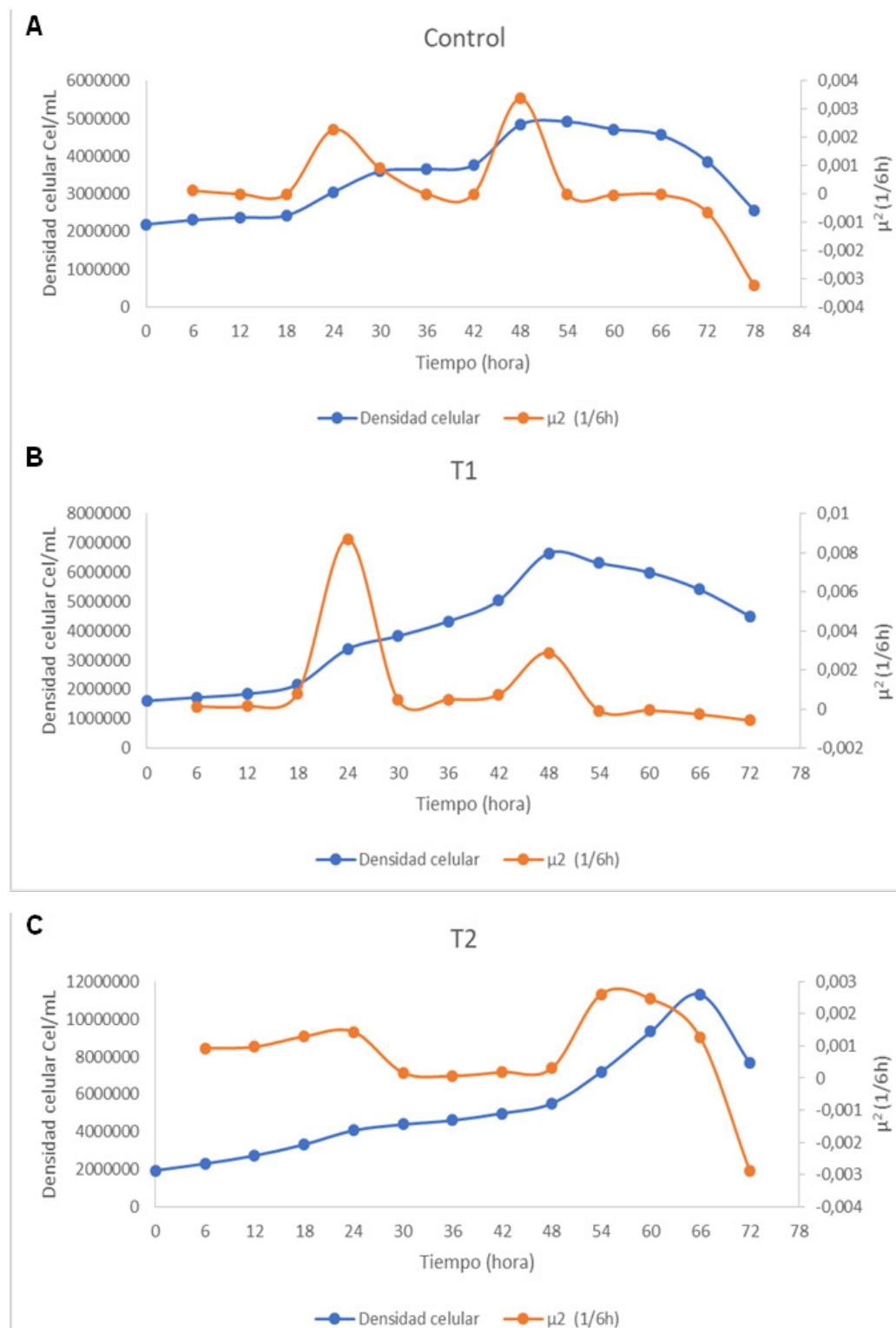


Figura 2. Cinética y velocidad de crecimiento del cultivo A. 4 000 lux; B. 10 000 lux; C. 20 000 lux.

Para el diseño experimental se usó la microalga *Chaetoceros sp.*, a una densidad inicial de $1.6\text{-}2.0 \times 10^6$ cel/mL en un fotobiorreactor, con tres réplicas asignadas para cada tratamiento (Tabla 1).

La cepa de *Chaetoceros sp.*, fue proporcionada del cepario del Centro Nacional de Acuicultura e Investigaciones Marinas (CENAIM - ESPOL), la cual se sometió a un sistema de cultivo batch (Figura 1) en el que se usó el medio de cultivo F/2 modificado (Guillard, 1975). Se realizó un escalamiento volumétrico hasta llegar a un cultivo en un fotobiorreactor de geometría plana (FBR) (dimensiones: largo-ancho-alto, 60-10-40 cm) a un volumen de 15 L, el fotoperiodo usado fue luz: oscuridad (12:12). El cultivo se inoculó con una concentración de $1.6\text{-}2.0 \times 10^6$ cel/mL y la salinidad fue 35 ‰.

El sistema de agitación fue por medio de burbujeo continuo con una bomba de aire (Hygger 10W); en cuanto al oxígeno disuelto, se utilizó un medidor de oxígeno Healthlife digital con precisión de 0-40,00 mg/L. Se mantuvo una temperatura constante de 24°C (calentador de acuario FUMAK 100W). Para controlar los niveles de pH del cultivo se dispuso de un medidor digital Milwaukee Instruments MC122US, este equipo integra en su sistema un dosificador de CO₂ que permitió mantener el nivel de pH constante (pH 8). Alcanzada la fase de muerte de la microalga, se realizó el proceso de floculación, el agente floculante fue el hidróxido de sodio (40 g/L), colocando 10mL/L en el cultivo. Una vez floculado el cultivo, se centrifugó (F2C 800-1) a 4 000 rpm por 10min; se enjuagó la biomasa con agua destilada esterilizada para retirar las sales y la biomasa húmeda fue secada en una estufa (BEKTRON) a una temperatura de 80°C por 5h.

La intensidad de luz incidente se midió con un equipo digital ANNMETER AN-8801C (rango: 0-40 000 Lux), mientras que para calcular la intensidad de luz, se analizó la ley de Lambert Beer a partir de un coeficiente de extinción k_a:

$$I = I_0 \times e^{-k_a x c b \times x}$$

I: intensidad de la luz

I₀: Intensidad de luz incidente

K_a: coeficiente de extinción

x: distancia a la superficie

Parámetros poblacionales

Densidad celular (recuento celular)

Se llevó a cabo mediante una numeración directa a través de un microscopio óptico marca Novic en el objetivo de 40x. Se utilizó una cámara de conteo celular Neubauer marca BOECO cada 6h.

La concentración celular se determinó utilizando la ecuación de Arredondo-Vega y Voltolina (2007):

$$\text{Densidad celular } \left(\frac{\text{cel}}{\text{mL}} \right) = \frac{\text{Número total de células}}{\text{Número de cuadrantes}} \times 10000$$

Velocidad específica de crecimiento, μ

Mide la cantidad de biomasa generada por cada

Tabla 2. Diferencias de los parámetros poblacionales del cultivo en los distintos tratamientos. Los resultados indican la media ± la desviación estándar (n=3). Letras distintas señalan diferencias estadísticamente significativas (ANOVA, test Tukey p < 0,05).

Parámetros poblacionales	C	T1	T2
Densidad celular (cel/mL)	$4.8 \times 10^6 \pm 2.9 \times 10^5$ ^a	$6.6 \times 10^6 \pm 4.9 \times 10^5$ ^a	$1.1 \times 10^7 \pm 2.3 \times 10^6$ ^b
Velocidad de crecimiento (μ)	0.05 ± 0.01 ^a	0.09 ± 0.01 ^b	0.10 ± 0.02 ^b
Tiempo de duplicación (g)	13.60 ± 2.16 ^a	7.45 ± 0.67 ^b	7.00 ± 1.73 ^b
Coeficiente de extinción (ka)	$2.8 \times 10^{-6} \pm 1.1 \times 10^{-8}$ ^a	$3.7 \times 10^{-6} \pm 2.67 \times 10^{-7}$ ^a	$1.2 \times 10^{-5} \pm 1.9 \times 10^{-6}$ ^b

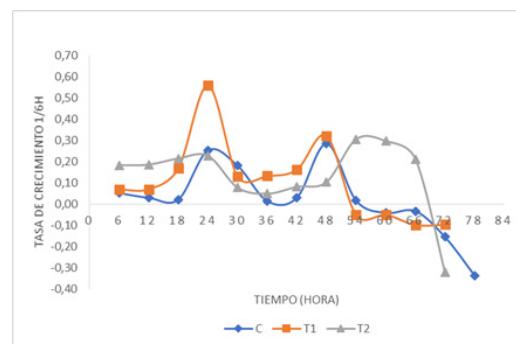


Figura 3. Tasa de crecimiento del cultivo a 4 000 lux (C); Tasa de crecimiento del cultivo a 10 000 lux (T1); Tasa de crecimiento del cultivo a 20 000 lux (T2).

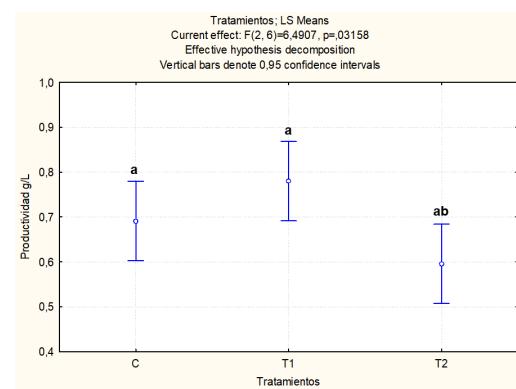


Figura 4. Tasa de crecimiento del cultivo a 4 000 lux (C); Tasa de crecimiento del cultivo a 10 000 lux (T1); Tasa de crecimiento del cultivo a 20 000 lux (T2).

gramo de biomasa en una unidad de tiempo (Acién Fernández, 2014).

Se usó la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{1}{C} \times \frac{dC}{dt}$$

C: concentración de la biomasa

T: tiempo

Tiempo de duplicación

Se determinó el tiempo de duplicación con la siguiente ecuación (Arredondo-Vega & Voltolina, 2007):

$$t_g = \ln 2 / \mu$$

Coeficiente de extinción ka

Se evaluó el coeficiente mediante la siguiente ecuación (Acién Fernández, 2014):

$$ka = \frac{\ln(I_0/I)}{C_n \times L}$$

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos experimentales se utilizó el software STATISTICA (V. 7). Los resultados fueron expresados como promedio \pm desviación estándar (SD). Se aplicó un test de Normalidad de Shapiro-Wilk y posterior un análisis de varianza de un factor (ANOVA) con el fin de detectar diferencias entre los tratamientos de los cultivos. Cuando el ANOVA mostró diferencias significativas, se procedió a realizar la prueba post-hoc de Tukey para determinar con mayor precisión las variaciones específicas entre los tratamientos.

Resultados

El cultivo de *Chaetoceros sp.* expuesto a una intensidad de luz C llegó a su fase estacionaria a las 48 horas, con una densidad celular de 4.8×10^6 cel/mL y una velocidad de crecimiento de $0.0034 \mu^2$ (1/6h) (Figura 2A). El cultivo en una intensidad de luz T1 alcanzó su fase estacionaria a las 48 horas, con una densidad celular de 6.6×10^6 cel/mL y una velocidad de crecimiento de $0.0029 \mu^2$ (1/6h) (Figura 2B). La exposición del cultivo a una intensidad de luz T2 alcanzó su fase estacionaria a las 66 horas, con una densidad celular de 1.1×10^7 y una velocidad de crecimiento de $0.0013 \mu^2$ (1/6h) (Figura 2C).

El cultivo de *Chaetoceros sp.*, presentó diferencias significativas ($p<0.05$) en los parámetros poblacionales; respecto a la densidad celular, los tratamientos C y T1 mostraron diferencias significativas frente al tratamiento T2, el cual alcanzó la mayor concentración $1.1 \times 10^7 \pm 2.3 \times 10^6$ cel/mL. Así mismo, T1 y T2 duplicaron su velocidad de crecimiento en comparación a C. Del mismo modo, T1 y T2 disminuyeron significativamente el tiempo de duplicación (7.45 ± 0.67 y 7.00 ± 1.73) frente a C (13.60 ± 2.16). Por último, los tratamientos C y T1 presentaron un coeficiente de extinción alto en comparación con el tratamiento T2 (Tabla 2).

El cultivo de *Chaetoceros sp.* bajo una intensidad de luz C, presentó un incremento en la tasa de crecimiento de 0.25 a las 24h y de 0.29 a las 48h de cultivo. Así mismo, en la exposición del cultivo a una intensidad de luz T1, incremento la tasa de crecimiento de 0.56 a las 24h y de 0.32 a las 48h. Por otra parte, el cultivo bajo una intensidad de luz T2, presentó un incremento en la tasa de crecimiento de 0.23 a las 24h y de 0.31 a las 48h (Figura 3).

La productividad del cultivo de *Chaetoceros sp.* a una intensidad de luz C, no presentó diferencias significativas frente a los tratamientos T1 y T2 ($p>0.05$); sin embargo, el tratamiento T1 si presentó diferencias significativas con el tratamiento T2 ($p<0.05$), siendo T1 1.31 veces mayor que T2 (Figura 4).

Discusión

Este estudio tuvo como objetivo estimar el efecto de distintas intensidades de luz en el cultivo de microalgas en un FBR considerando los valores de los parámetros poblacionales y productividad.

La mayor densidad celular del cultivo a 4 000 lux fue de 4.8×10^6 cel/mL a las 48 horas, con una tasa de crecimiento de 0.25 (1/6h) a las 24 horas y de 0.29 (1/6h) a las 48 horas; mientras que, en el estudio llevado a cabo por Shan et al. (2023) a una intensidad de luz de 3 000 lux, la densidad celular máxima en el modo de cultivo fotoautótrofo fue de 25.41×10^5 cel/mL, con una tasa de crecimiento de 0.26 d^{-1} al cabo de 6 días. Así mismo, el estudio de Chen et al. (2023) evaluó el crecimiento en mixotrofía de *Chaetoceros sp.* a una intensidad lumínica de $2\ 500 \pm 200$ lux y con diferentes fuentes de carbono orgánico, y los resultados indicaron que el glicerol como fuente de carbono generó la mayor densidad celular (5.25×10^6 cel/mL) y la tasa de crecimiento específica más alta (0.22 d^{-1}) al octavo día. Se evidencia un periodo prolongado en comparación con el presente estudio en cuanto al tiempo que le toma a la microalga alcanzar su densidad máxima, estos resultados pueden atribuirse principalmente a las disparidades en las condiciones experimentales, tales como la variación en la intensidad lumínica y las fuentes de carbono utilizadas.

En este estudio se implementó directamente CO₂ gaseoso en el sistema del cultivo, mientras que, en el trabajo de Shan et al. (2023) se usó NaHCO₃ (Bicarbonato de sodio) y Chen et al. (2023) usaron distintas fuentes de carbono glucosa, ácido acético y glicerol. El uso de distintas fuentes de carbono puede provocar variaciones en los parámetros del cultivo como el pH, ocasionando cambios en la respuesta metabólica de las microalgas. Aditya et al. (2023) señalan que una cantidad excesiva de CO₂ puede restringir el crecimiento de las microalgas al provocar la acidificación originada por la disolución del CO₂.

En el presente ensayo a 10 000 lux, la densidad máxima fue de 6.6×10^6 cel/mL a las 48 horas, con una tasa de crecimiento de 0.56 (1/6h) a las 24 horas y de 0.32 (1/6h) a las 48 horas. En contraste, el estudio de Chin et al. (2023) exploraron múltiples microalgas, incluyendo entre ellas *C. muelleri*, bajo diversas intensidades de luz. *C. muelleri* alcanzó su densidad máxima 145×10^4 cel/mL bajo una intensidad lumínica de 7 297 lux, con una tasa de crecimiento de 0.63 d⁻¹. Se evidenció diferencias significativas entre las densidades celulares, probablemente porque en este estudio se usó el medio de cultivo F/2 Guillard modificado, mientras que en el trabajo de Chin et al. (2023) se usó un medio de cultivo distinto (medio basal de Bold). Attar et al. (2023) mencionan que el tratamiento con diferentes medios de cultivo puede tener diversos efectos en las microalgas entre ellos, inhibir el crecimiento y alterar su metabolismo provocando un cambio en su composición.

Del mismo modo, en el estudio de Kong et al. (2021), evaluaron la influencia de la temperatura y la intensidad de luz en *C. calcitrans*, a 30 °C y 10 810 lux alcanzó su mayor densidad celular ($54.27 \pm 2.24 \times 10^5$ cel/mL), se registró a los 16 días; por el contrario, en este estudio se ensayó a 10 000 lux, la densidad máxima fue de 6.6×10^6 cel/mL a las 48 horas, con una tasa de crecimiento de 0.56 (1/6h) a las 24 horas y de 0.32 (1/6h) a las 48 horas, siendo diferentes los resultados, debido a que en el trabajo de Kong et al. (2021) la microalga mostró una efecto positivo en cuanto al crecimiento a una intensidad de 6 486 lux, no obstante, al incrementar la intensidad de la luz a 10 810 lux, no hubo un incremento en el crecimiento. En el presente estudio, se realizó el análisis a 20 000 lux; sin embargo no se dispone de otros estudios que hayan utilizado estas intensidades de luz, por lo cual se indican que se alcanzó una densidad celular máxima de 1.1×10^7 cel/mL a las 66 horas, con una tasa de crecimiento de 0.23 d⁻¹ a las 24 horas y de 0.31 d⁻¹ a las 48 horas.

Es importante considerar que los incrementos de la intensidad de la luz tienen el potencial de elevar el pH, ya que el proceso de carboxilación implica el consumo de fotones y la transferencia de iones de hidrógeno al interior de la célula (Aditya et al., 2023), considerando cambios que pueden afectar el metabolismo de las microalgas, además de que de acuerdo a Fierro et al. (2023) la exposición excesiva a la luz, conlleva a un daño photooxidativo, dando lugar a una disminución en el crecimiento de las microalgas por foto inhibición. En conjunto, estos hallazgos subrayan la complejidad y la necesidad de considerar las condiciones experimentales al interpretar resultados y al comparar estudios sobre el crecimiento de microalgas.

En este estudio, se observó que la productividad de *Chaetoceros sp.*, bajo una intensidad lumínica de 4 000 lux, se obtuvo una productividad de 0.69 g L⁻¹d⁻¹; siendo superior al estudio de Chin et al. (2023) con *C. muelleri*, que muestra un aumento en la productividad

de biomasa de 0.44 g L⁻¹d⁻¹ a una intensidad de 7 297 lux. Esto podría deberse a fenómenos como la foto inhibición, donde las tasas de fotosíntesis disminuyen a medida que la intensidad de la luz alcanza niveles excesivos, afectando negativamente la productividad de biomasa.

Mientras que Nur et al. (2023), con *C. calcitrans* presentó una productividad de 4.72 g L⁻¹ d⁻¹ a una intensidad de luz de 10 810 lux, a diferencia de este estudio que *Chaetoceros sp.*, a 10 000 lux se obtuvo una productividad de 0.78 g L⁻¹d⁻¹. Se muestra una productividad diferente entre las especies, lo que resalta la complejidad de los sistemas de cultivo, además de los días de cultivo, se considera que estas variaciones se deben a la inclusión del efluente de la molienda de aceite de palma (POME) como medio de crecimiento, ya que de acuerdo a Ravishan et al. (2021) señalan que las microalgas pueden actuar como biofiltros, extrayendo nutrientes valiosos del POME y convirtiéndolos en biomasa.

En el ensayo a 20 000 lux con la microalga *Chaetoceros sp.*, se obtuvo una productividad de 0.59 g L⁻¹d⁻¹; en el caso del estudio realizado por Tachihana et al. (2023) revelan la sensibilidad de *C. gracilis* a la intensidad de luz, se llegó a un estado estacionario con un promedio de 0.50 ± 0.03 g de peso seco (dw) L⁻¹ por debajo de 16 216 lux, mientras que, con un incremento a 54 054 lux resulta en un aumento significativo en el peso seco 0.72 ± 0.05 g peso seco L⁻¹. No obstante, este aumento no es indefinido, ya que existe un punto máximo de intensidad lumínosa para cada especie de microalga, más allá del cual el crecimiento puede estancarse o incluso inhibirse.

De manera integral, los resultados sugieren que la respuesta de *Chaetoceros sp.*, a la intensidad lumínica es influenciada por factores específicos de la especie y que otros aspectos del ambiente, como nutrientes y temperatura, pueden modular significativamente los resultados observados. La variabilidad en los estudios destaca la necesidad de considerar múltiples variables ambientales para comprender completamente el impacto de la intensidad de luz en la productividad de *Chaetoceros sp.*.

Conclusión

La intensidad lumínica es un factor decisivo para optimizar el cultivo de *Chaetoceros spp.*, microalga de gran relevancia en la alimentación acuícola. Se determinó que a 20 000 lux se alcanzó la mayor densidad celular, mientras que a 10 000 lux se registró la tasa de crecimiento más elevada, lo que evidencia que la especie responde de manera diferenciada a las variaciones de irradiancia. Aunque la productividad no mostró diferencias significativas entre los tratamientos, los resultados sugieren que el manejo adecuado de la luz puede mejorar la disponibilidad de biomasa en menor tiempo, reduciendo así los costos de producción y asegurando un suministro más

eficiente de alimento vivo en criaderos de organismos acuáticos. En este sentido, establecer rangos óptimos de iluminación constituye una herramienta estratégica para potenciar la sostenibilidad y competitividad del sector acuícola.

Referencias Bibliográficas

- Acién-Fernández, F.G., Molina Grima, E. y Fernández-Sevilla, J.M. (2014). *Ingeniería de Procesos aplicada a la Biotecnología de Microalgas*. Universidad de Almería.
- Aditya, L., Vu, H. P., Johir, M., Mahlia, T., Silitonga, A., Zhang, X., Liu, Q., Tra, V., Ngo, H. H., & Nghiêm, L. D. (2023). Role of culture solution pH in balancing CO₂ input and light intensity for maximising microalgae growth rate. *Chemosphere*, 343, 140255.
- Arredondo-Vega, B. O., & Voltolina, D. (2007). Concentración, recuento celular y tasa de crecimiento. En *Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal*.
- Attar, S. B., Morillas-España, A., Sánchez-Zurano, A., Pessôa, L. C., Pinna-Hernández, M. G., De Jesus Assis, D., López, J. C., & Acién, G. (2023). Influence of culture media composition on the rheology of microalgae concentrates on a large scale. *New Biotechnology*, 77, 90-99.
- Beal, C. M., Gerber, L. N., Thongrod, S., Phromkunthong, W., Kiron, V., Granados, J., Archibald, I., Greene, C. H., & Huntley, M. E. (2018). Marine microalgae commercial production improves sustainability of global fisheries and aquaculture. *Scientific Reports*, 8(1).
- Bhattacharjya, R., Tyagi, R., Rastogi, S., Ullmann, L., & Tiwari, A. (2024). Response of varying combined nutrients on biomass and biochemical composition of marine diatom *Chaetoceros gracilis* and *Thalassiosira weissflogii*. *Bioresource Technology*, 394, 130274. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130274>
- Bravo, M.; Lodeiro, C., Zapata, E. y Alió, J. (2020). Efecto de luces LED y fluorescentes sobre el crecimiento y la biomasa de *Thalassiosira pseudonana* (Cleve, 1873). *La Técnica: Revista de las Agrociencias*, 24.
- Chen, H., Shan, S., Wang, C., Hamcapaeb, Z. B., Dubovskiy, I. M., Zhou, C., Ruan, R., Yan, X., & Cheng, P. (2023). Mixotrophic culture of *Chaetoceros* sp. and its response to circadian rhythm. *Algal Research*, 73, 103119.
- Chicaiza Ortiz, C., León Chimbolema, J., Godoy Ponce, S., Alvarado Ávila, G. y Chicaiza Ortiz, A. (2021). Ensayos de laboratorio para la obtención de biomasa algal en un fotobioreactor discontinuo. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 8 (1), 01-07.
- Chin, G. J. W. L., Andrew, A. R., Abdul-Sani, E. R., Yong, W. T. L., Misson, M., & Anton, A. (2023). The effects of light intensity and nitrogen concentration to enhance lipid production in four tropical microalgae. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 48, 102660.
- Clagnan, E., Dell'Orto, M.; Štěrbová, K., Grivalký, T., Câmara Manoel, J.A., Masojídek, J., D'Imporzano, G., Acién-Fernández, F.G. y Adani, F. (2023). Impact of photobioreactor design on microalgae-bacteria communities grown on wastewater: Differences between thin-layer cascade and thin-layer raceway ponds. *Bioresource Technology*, 374, pág. 128781.
- Contreras, C., Peña, J., Flores, L. y Cañizares, R. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobioreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia*, 28 (8), 450-456.
- Costache, T., Acién Fernández, F.G., Morales, M., Fernández-Sevilla, J., Stamatini, I. y Molina, E. (2013). Comprehensive model of microalgae photosynthesis rate as a function of culture conditions in photobioreactors. *Applied microbiology and biotechnology*, 97 (1), 7627-7637.
- Fierro, I., Djema, W., & Bernard, O. (2023). Optimal control of microalgae culture accounting for photoinhibition and light attenuation. *IFAC-PapersOnLine*, 56(2), 7222-7227. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.329>
- García Sánchez, J.L., Bernguel, M., Rodríguez, F., Fernández Sevilla, J.M., Brindley Alias, C. y Acién Fernández F.G. (2003). Minimization of carbon losses in pilot-scale outdoor photobioreactors by model-based predictive control. *Biotechnology and bioengineering*, 84 (5), 533-543.
- Guillard, R. (1975). Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrate animals. In W. Smith & M. Chanley (Eds.), *Culture of marine invertebrates* (1st ed., pp. 29-60). Plenum Press.
- Kong, F., Ran, Z., Zhang, J., Zhang, M., Wu, K., Zhang, R., Liao, K., Cao, J., Zhang, L., Xu, J., & Yan, X. (2021). Synergistic effects of temperature and light intensity on growth and physiological performance in *Chaetoceros calcitrans*. *Aquaculture Reports*, 21, 100805.
- Molina Grima, E., Acién Fernández, F.G., García Camacho, F. y Chisti, Y. (2000). Scale-up of photobioreactors. *Journal of applied phycology*, 12(1), 355-368.
- Plasencia, J. (2012). *Cultivo de microalgas (Clorella sorokiniana) con iluminación mediante LEDs (Light Emitting Diodes)* [Trabajo Fin de Carrera]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ravishan, J. S. R., Premaratne, M., Dinalankara, D. M. S. D., Perera, G. L. N. J., & Ariyadasa, T. U. (2021). Cultivation of microalgae in palm oil mill effluent (POME) for astaxanthin production and simultaneous phytoremediation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105375.
- Rebollosa Fuentes, M.M., García Sánchez J.L., Fernández Sevilla J.M., Acién Fernández F.G., Sánchez Pérez J.A. y Molina Grima, E. (1999). Outdoor continuous culture of *Porphyridium cruentum* in a tubular photobioreactor: quantitative analysis of the daily cyclic variation of culture parameters. *Journal of Biotechnology*, 70 (1), 271-288.
- Ruiz, J. (2015). *Estudio de fotobioreactor de microalga: sistema de monitoreo y simulación de estrategias de control* [Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico-Eléctrica, Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería]. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.
- Sanz, V. (2019). *Diseño de un fotobioreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes* [Trabajo Final de Máster]. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
- Shan, S., Wang, S., Yan, X., Chen, K., Liang, L., Li, X., Zhou, C., Yan, X., Ruan, R., & Cheng, P. (2023). Mixotrophic culture of *Chaetoceros* sp. and the synergistic carbon and energy metabolism. *Bioresource Technology*, 390, 129912.
- Tachihana, S., Nagao, N., Katayama, T., Yusoff, F. M., Banerjee, S., Shariff, M., Yamada, Y., Imaizumi, Y., Toda, T., & Furuya, K. (2023). High productivity of fucoxanthin and eicosapentaenoic acid in a marine diatom *Chaetoceros gracilis* by perfusion culture under high irradiance. *Algal Research*, 72, 103123.
- Vásquez-Suárez, A., Guevara, M., González, M., Cortez, R., & Arredondo-Vega, B. (2013). Crecimiento y composición bioquímica de *Thalassiosira pseudonana* (Thalassiosirales: Thalassiosiraceae) bajo cultivo semi-continuo en diferentes medios y niveles de irradiancias. *Revista De Biología Tropical*, 61(3).