



FOTOBIORREACTOR URBANO PARA EL SECUESTRO DE CO₂ Y LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA MICROALGAL

URBAN PHOTOBIOREACTOR FOR CO₂ SEQUESTRATION AND MICROALGAL BIOMASS PRODUCTION

Saim Khan¹, Mehmood Ali*¹, Atif Mustafa¹ y Aqsa Iqbal²

¹ Department of Environmental Engineering, NED University of Engineering Technology, Karachi-75270, Pakistan.

² Department of Chemical Engineering, NED University of Engineering Technology, Karachi-75270, Pakistan.

*Autor para correspondencia: mehmood@neduet.edu.pk

Manuscrito recibido el 27 de mayo de 2024. Aceptado, tras revisión el 22 de octubre de 2024. Publicado el 1 de marzo de 2025.

Resumen

El sistema de crecimiento de fotobiorreactores (PBRs) de microalgas es de gran interés pues es un método viable y sostenible para generar biomasa de calidad destinada a productos de valor agregado y biocombustibles. En este estudio se cultivó la especie de microalga *Chlorella vulgaris* en un fotobiorreactor diseñado, fabricado y alimentado por un sistema de energía solar. Se compararon tres condiciones experimentales con proporciones de 1:4 de cultivo de microalgas (40 L) y agua fresca (10 L), utilizando 100 mL de medio (nutrientes) en cada experimento: un experimento control (aireación con aire ambiente, experimento # 1), la inyección de 200 g de CO₂ durante 15 segundos (experimento # 2), y la inyección de 300 g de CO₂ durante 25 segundos (experimento # 3) en días alternos durante el periodo de cultivo. Todos los experimentos mostraron una reducción en la concentración de nutrientes (ortofosfato y nitrato) y un aumento en la productividad de biomasa tras un periodo de cultivo de 10 días. Los experimentos 1, 2 y 3 mostraron remociones de ortofosfato del 50%, 41,74% y 60,78%, respectivamente, mientras que la remoción de nitrato fue del 22%, 48% y 58%. La productividad de biomasa en los experimentos 1, 2 y 3 tras 10 días de cultivo fue de 196,63 mg/L, 203,43 mg/L y 318,76 mg/L, respectivamente. El análisis estadístico reveló que el suministro de CO₂ desde una fuente externa en los experimentos # 2 y # 3 sigue un patrón similar de significancia estadística, con una correlación entre ambos grupos de medias y un valor de p de 6.306×10^{-14} . La mayor biomasa de microalgas fue recuperada del experimento # 3, con un contenido proteico del 7,98% en peso y un contenido lipídico del 37,4% en peso (1,87 g/5 g de biomasa seca). El estudio cinético mostró que las capacidades de transferencia volumétrica de masa de KO₂ y KCO₂ fueron de $1.763 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.676 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente, siendo más eficiente la capacidad de transferencia de KCO₂ del sistema. Los lípidos extraídos presentaron ácidos grasos favorables para la producción de biodiésel de microalgas, como ácido mirístico (C14:0), palmítico (C16:0), palmitoleico (C16:1), oleico (C18:1), linoleico (C18:1) y linolénico (C18:3). El uso de fotobiorreactores urbanos de microalgas es una estrategia ambientalmente sostenible que puede contribuir significativamente a la economía basada en recursos biológicos y reducir los efectos negativos del uso tradicional de combustibles fósiles sobre el medio ambiente.

Palabras clave: Secuestro de carbono, Fotobiorreactor urbano, Captura de carbono, Productividad de biomasa, Biofi-

jación de CO₂, *Chlorella vulgaris*, Producción de biocombustibles.

Abstract

The growth system of microalgae photobioreactors (PBRs) has drawn a lot of interest as a viable and sustainable method for generating quality biomass for value-added products and biofuels. The objective of this research work is to cultivate microalgae species *Chlorella vulgaris* in a photobioreactor that was designed, fabricated, and powered by solar energy system. Three experimental conditions were compared with 1:4 ratios of microalgae culture (40L) and fresh water (10L) having 100mL of media (nutrients) used in each experiment with control sample (ambient air aeration) experiment # 1, injecting 200 g of CO₂ for 15 sec (experiment # 2), and 300g of CO₂ for 25 sec (experiment # 3) on alternate days during the cultivation period. All experiments showed the reduction of nutrients concentration (orthophosphate and nitrate) and enhancement of biomass productivity with respect to 10 days of cultivation period. Experiments 1, 2 and 3 showed removal of orthophosphate as 50%, 41.74% and 60.78% respectively, whereas nitrate removal was 22%, 48% and 58%. Biomass productivity from experiments 1, 2 and 3 after 10 days of cultivation period were 196.63 mg/L, 203.43 mg/L, 318.76 mg/L respectively. Statistical analysis revealed that supplying CO₂ from external source in experiment # 2 and experiment # 3 have same pattern of statistical significance with co-relationship between two groups of means with p-value of 6.306×10^{-14} . The maximum microalgal biomass was recovered from experiment # 3, with 7.98% by weight protein content yield and lipid content yield 37.4% by weight (1.87/ 5 g of dried biomass). Kinetic study showed volumetric mass transfer capacities of KO₂ and KCO₂ were found to be $1.763 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ and $1.676 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$, with better result of KCO₂ gas transfer capacity of the system. In the extracted lipids favorable qualities of fatty acids for the production of microalgae biodiesel were found such as myristic (C14:0), palmitic (C16:0), palmitoleic (C16:1), oleic (C18:1), linoleic (C18:1), and linolenic acids (C18:3). The use of urban microalgae photobioreactors is an environmentally sustainable strategy that can contribute significantly to the bio-based economy and reduce the negative effects of traditional fossil fuel usage on the environment.

Keywords: Carbon sequestration, Urban photobioreactor, Carbon capture, Biomass productivity, CO₂ bio-fixation, *Chlorella vulgaris*, Biofuel production.

Forma sugerida de citar: Khan, S., Ali, A., Mustafa, A. e Iqbal, A. (2025). Fotobiorreactor urbano para el secuestro de CO₂ y la producción de biomasa microalgal. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida. Vol. 41(1):100-117. <https://doi.org/10.17163/lgr.n41.2025.06>.

IDs Orcid:

Saim Khan: <https://orcid.org/0009-0000-6256-4619>

Mehmood Ali: <https://orcid.org/0000-0002-1804-2677>

Atif Mustafa: <https://orcid.org/0000-0002-3815-0800>

Aqsa Iqbal: <https://orcid.org/0009-0001-7327-8877>

1 Introducción

La combustión de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural son la mayor causa del cambio climático, representando el 75% de todas las emisiones de gases de efecto invernadero y casi el 90% de todas las emisiones de dióxido de carbono. Las emisiones de gases de efecto invernadero cubren la Tierra, atrapando el calor del sol y causando el cambio climático y el calentamiento global. Actualmente la tierra se está calentando más rápido que en cualquier otro momento registrado en la historia. Con el tiempo, el aumento de las temperaturas está alterando los patrones climáticos y el equilibrio natural del medio ambiente, lo que plantea muchos riesgos para los seres humanos y todas las otras formas de vida en la Tierra (United Nations, 2024). Entre 1900 y 2020, la atmósfera de la Tierra experimentó un aumento de la temperatura de alrededor de 1,1 °C, lo que provocó cambios en los patrones climáticos y el calentamiento global; la temperatura media mundial aumenta a 2 °C por encima del nivel de los tiempos preindustriales, por lo que la búsqueda de medidas para limitar el aumento a 1,5 °C fue el objetivo declarado en el Acuerdo de París. Esto también ayuda a cumplir con el objetivo de desarrollo sostenible (ODS) número 13 de la ONU, es decir, combatir la acción climática formulada en 2016.

El consumo de energía se alimenta principalmente de combustibles fósiles, que representan alrededor del 85% de todas las fuentes de energía a nivel mundial. Los científicos han emitido advertencias sobre el riesgo de quedarse sin suministros finitos de combustibles fósiles por no crear una fuente de energía alternativa viable para reemplazar las reservas petroleras. Otro tema que no ha sido suficientemente estudiado es la contaminación y las emisiones que provienen de la exploración y producción de combustibles fósiles (Valavanidis, 2023). Por lo tanto, los retos que plantea el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y la crisis medioambiental que se derivan del uso de combustibles fósiles hacen cada vez más necesario encontrar combustibles ecológicamente sostenibles y limpios para utilizarlos con el fin de mitigar el cambio climático y el calentamiento global (Mahapatra et al., 2021; Rodionova et al., 2017). Con el fin de reducir el impacto de las emisiones de GEI procedentes de la quema de combustibles fósiles, los biocombus-

tibles se producen mediante procesos biológicos o se obtienen mediante la conversión química de la biomasa como sustituto de los combustibles fósiles (Rodionova et al., 2017). Existen varios tipos de biocombustibles, por ejemplo, los biocombustibles de primera generación, que consisten en etanol derivado de cultivos alimentarios ricos en almidón o biodiesel creado a partir de grasas animales residuales como grasa para freír. La segunda generación se compone de bioetanol derivado de material celulósico no alimentario y biodiesel producido a partir de semillas de plantas ricas en aceite como pongamia. El método más prometedor para satisfacer las demandas energéticas del mundo es la tercera generación de biocombustibles, que se producen a partir de microalgas, cianobacterias y otros microorganismos (Rodionova et al., 2017).

La amenaza planteada por la contaminación del aire que causa el cambio climático provocada por diferentes actividades humanas ha atraído la atención de todo el mundo. Aunque antes se creía que la tecnología era la forma para disminuir esta situación, las técnicas de captura y almacenamiento de carbono (CAC) ahora no se consideran económicamente viables, y no está claro qué efecto tendrán en el medio ambiente en el futuro (Sievert et al., 2023). Como alternativa, el uso de microalgas para la captura biológica de dióxido de carbono (CO₂) se considera un método prometedor para reciclar el excedente de CO₂ producido por vehículos, plantas de energía, industrias, erupciones volcánicas, la descomposición de materiales orgánicos e incendios forestales. Por otra parte, el CO₂ se puede absorber por las microalgas y puede ser regenerado en biomasa, que luego puede utilizarse como fuente de carbono para fabricar lípidos para la síntesis de bioenergía y otros productos con valor añadido (Sievert et al., 2023). Se puede obtener la biomasa a escala masiva mediante el cultivo de microalgas, utilizando dos sistemas de cultivo principales, como un estanque abierto y un sistema de fotobiorreactor. La mayor productividad de la biomasa se puede obtener a través de un ambiente controlado utilizando un fotobiorreactor, y considerando el metabolismo de las microalgas que se puede clasificar como fotoautotrófico, fotoheterotrófico, heterotrófico y mixotrófico. De igual forma, se necesitan la luz solar, algunos elementos inorgánicos básicos como el dióxido de carbono (CO₂) y las sales metálicas para el desarrollo celular o el proceso de metabo-

lismo del cultivo de las microalgas. Las microalgas heterotróficas, por otra parte, requieren una fuente adicional de ciertos compuestos orgánicos y nutrientes, como nitrógeno (N) y fósforo (P). Otras investigaciones demuestran que el cultivo de *Clorella* en un medio mixotrófico aumenta la eficiencia de la fotosíntesis y proporciona recursos orgánicos exógenos. Además, a lo largo del proceso de cultivo, el cultivo de microalgas reduce significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero (CO₂), además de producir biomasa y biocombustibles. Por otro lado, se pueden usar las aguas residuales de diferentes fuentes como medio de cultivo para microalgas. Las cepas de microalgas que son fotoheterotróficas, mixotróficas o heterotróficas han crecido en medios claros y oscuros (Saratale et al., 2022).

Para el cultivo de microalgas, se utiliza un biorreactor fotográfico (PBR) que tiene un recipiente de cultivo cerrado con ajustes operativos para regular la biomasa. Como organismo fotosintético, las microalgas se pueden cultivar tanto en sistemas cerrados (fotobiorreactor) como abiertos (estanque). Por otro lado, se puede obtener un mejor control de los entornos de cultivo con los fotobiorreactores, que se están desarrollando para una máxima productividad, eficacia económica y mantenimiento mínimo. El crecimiento de las microalgas, la fotosíntesis y la acumulación de lípidos dependen de una serie de variables como la luz, la temperatura, el pH del medio, la presencia de CO₂, y de macronutrientes como el potasio, los fosfatos y los nitratos (Saratale et al., 2022).

Un fotobiorreactor urbano es un enfoque alternativo para la ecologización que se creó para el entorno urbano, donde la ecologización tradicional no es práctica debido a las limitaciones de espacio, los valores de la tierra y la contaminación del aire. Se basa en la alta eficiencia de producción de CO₂ y O₂ de la tecnología de microalgas y fotobiorreactores. Es igual a un árbol maduro o 200 metros cuadrados de césped, dependiendo de la tasa de fijación de carbono. Por su naturaleza polivalente, su diseño reflexivo y su construcción segura, se funde con el entorno urbano (Rehman et al., 2022). El cultivo de microalgas en un fotobiorreactor incluye una serie de factores como las especies de microalgas, el diseño del fotobiorreactor, la elección de la fuente de luz, los mecanismos de mezcla, el su-

ministro de nutrientes, el control de la temperatura y el pH, y consideraciones para la recolección y el procesamiento. En este proceso de diseño es importante hacer hincapié en una alta relación entre superficie y volumen. Debido a la naturaleza dependiente de la luz, una mayor superficie facilita una mayor penetración de la luz, que es un requisito fundamental para la fotosíntesis (Stojiljković and Spasojević, 2023).

Un método sostenible para capturar el dióxido de carbono y utilizarlo para producir productos renovables y reducir las emisiones es el uso de microalgas fotosintéticas. Estudios anteriores se han concentrado principalmente en los subproductos de las microalgas, especialmente los biocombustibles, en lugar de su capacidad para secuestrar CO₂. *Chlorella* sp. se cultivó en una investigación a concentraciones de CO₂ similares a las observadas en los gases de escape de las centrales eléctricas. Se descubrió que el 5% de CO₂ era la concentración ideal para la producción de biomasa de microalgas. La eficiencia de eliminación de CO₂ de los cultivos se observó de forma continua, utilizando un sensor infrarrojo no dispersivo. En el transcurso de 14 días, la eficacia media de eliminación de CO₂ fue del 17,5%, lo que es significativamente superior a los valores comunicados en la bibliografía cuando no se utiliza ningún sistema de control directo en tiempo real (Scheufele et al., 2019). Las microalgas tienen la capacidad de producir entre 10 y 20 veces más aceite que los cultivos de semillas de aceite vegetal, y se consideran una materia prima prometedora para la producción de biocombustibles de tercera generación (Leflay et al., 2021).

La limpieza de los gases de combustión ha generado un gran interés debido a la creciente preocupación por las emisiones de CO₂ y la degradación ambiental. Un método de reducción de las emisiones de CO₂ de los gases de combustión que se considera prometedor es el uso de microalgas para la fotosíntesis. Por otra parte, los contaminantes de los gases de combustión podrían impedir el crecimiento de las microalgas, lo que reduciría la tasa de fijación de CO₂ por las microalgas. Un nivel constante de pH puede ayudar a mitigar los efectos inhibidores de SO_x, que contribuyen al pH bajo, mientras que NO_x puede ser utilizado como fuente de nitrógeno para fomentar el crecimiento de las microalgas una vez que se disuelve y se oxida en el medio de cultivo. Fi-

jar el CO₂ de los gases de combustión y utilizar NO_x y SO_x como nutrientes generaría biomasa de microalgas, que puede utilizarse como materia prima adecuada para producir biocombustibles y bioproductos químicos (Ali et al., 2021). Las microalgas pueden utilizarse como materia prima sostenible para la producción de biodiésel mediante extracción de lípidos y un proceso de transesterificación debido a su alto contenido de lípidos y a sus tasas de crecimiento rápido. Sin embargo, es necesario eliminar una serie de obstáculos para producir biodiésel derivado de microalgas, como los altos costos de producción, la baja productividad de los lípidos y los temas relacionados con el crecimiento y la cosecha a gran escala. La producción de biodiésel a partir de microalgas parece tener un futuro prometedor con posibles usos en una serie de sectores, incluidos la agricultura, la energía y el transporte (Yen et al., 2015).

Los objetivos del presente estudio de investigación son diseñar y fabricar un fotobiorreactor urbano de 250 L operado por sistema de energía solar para cultivar *Chlorella vulgaris* en condición de agua dulce. Los experimentos incluyeron la muestra de control suministrada con aireación del medio ambiente, mientras que se realizaron dos experimentos con concentraciones intermitentes de CO₂ para investigar la influencia del CO₂ en la productividad de la biomasa y su biofijación. En días alternos se monitorearon y midieron los parámetros de crecimiento del cultivo de microalgas, como la eliminación de nutrientes, la productividad de la biomasa y el secuestro de CO₂.

2 Materiales y Métodos

2.1 Medio de cultivo y nutriente de microalgas

El cultivo de microalgas de *Chlorella vulgaris* se obtuvo en los Laboratorios Karachi del Departamento de Recursos Marinos del Consejo de Investigación Científica e Industrial de Pakistán (PCSIR), mientras que el medio de cultivo (F/2) Guillard se preparó por litro con una composición de 34g de sal marina, 84,15 mg NaNO₃, 6 mg Na₂MoO₄·2H₂O, 2,9 mg FeCl₃·6H₂O, 10 mg Na₂EDTA·2H₂O, 33 mg Na₂SiO₃·9H₂O, 1,96 mg CuSO₄·5H₂O, 4,4 mg ZnSO₄·7H₂O, 1,26 mg Ma₂MoO₄·2H₂O, 36 mg

MnCl₂·4H₂O, 2 mg CoCl₂·6H₂O, 0,4 mg Vitamina B1, 0,002 mg Vitamina B12, 0,1 mg Biotina.

2.2 Diseño de un fotobiorreactor

Un fotobiorreactor para el cultivo de microalgas incluye una serie de factores como las especies de microalgas, el diseño del fotobiorreactor, la elección de la fuente de luz, los mecanismos de mezcla, el suministro de nutrientes, el control de la temperatura y el pH, y consideraciones para la recolección y el procesamiento. En este diseño resulta crítico una relación alta entre superficie y volumen. Debido a la naturaleza dependiente de la reacción de la luz, una mayor superficie facilita una mayor penetración de la luz, que es un requisito fundamental para la fotosíntesis. Para lograr un equilibrio óptimo, se puede aumentar la relación entre superficie y volumen empleando diseños y configuraciones geométricamente eficientes. Este énfasis en la optimización de la relación superficie-volumen subraya la importancia de una exposición eficiente a la luz y una distribución eficiente de los nutrientes. Para un fotobiorreactor rectangular basado en su especificación geométrica, se puede calcular la superficie y el volumen mediante las siguientes ecuaciones (1) y (2):

$$A_s = 2HW + 2HL \quad (1)$$

$$V = HWL \quad (2)$$

Donde W es la anchura, H es la altura y L es la longitud del fotobiorreactor de pantalla plana. De acuerdo con la ecuación 3, la tasa de subida de la burbuja u_b y el diámetro medio de la burbuja d_b determinan la tasa de los cultivos de burbuja o aireación. La velocidad de las burbujas depende de su tamaño y de las características del fluido, por lo tanto, para las burbujas medianas en el agua, 0,24 m/s es un valor aceptable obtenido por la ecuación de Hadamard-Rybczynski El diámetro de la burbuja se puede estimar en función de las propiedades y condiciones del fluido utilizando la ecuación de Calderbank (Gaurav et al., 2024). Esta ecuación indica que cuanto menor es el tamaño de la burbuja, mayor es la tasa de corte y el daño resultante a los cultivos de microalgas.

$$Y_{\text{aireación}} = \frac{2 \cdot u_b}{d_b} \quad (3)$$

La Figura 1 muestra el diagrama esquemático de un fotobiorreactor urbano.

FOTOBIORREACTOR DE MICROALGAS

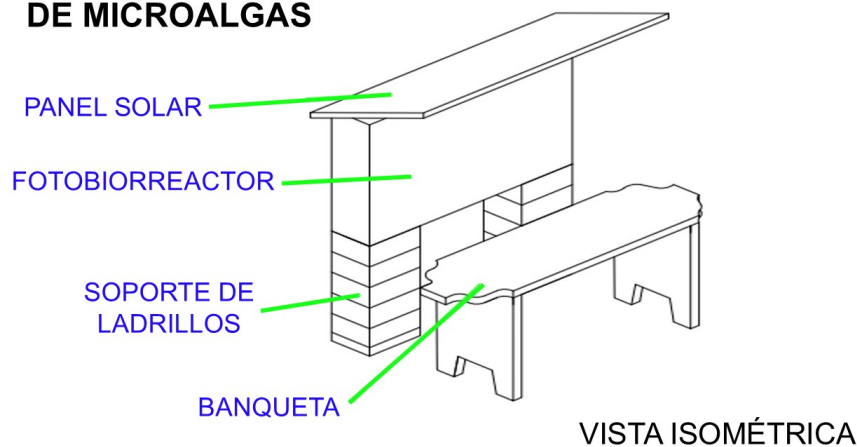


Figura 1. Vista isométrica del diseño de un fotobiorreactor urbano.

2.3 Condiciones experimentales del cultivo de microalgas en un fotobiorreactor

Se diseñó un fotobiorreactor de vidrio rectangular de 90cm de altura (35,43 pulgadas), 32cm de ancho (12,59 pulgadas), 121cm de longitud (47,63 pulgadas), con capacidad de volumen de aproximadamente ~ 350 L, mientras que su cubierta superior es de 97 cm (38,18 pulgadas) y 178 cm (70 pulgadas) con 500 W panel solar PV con tamaño 58 pulgadas × 26 pulgadas × 1,5 (largo × ancho y alto). El panel solar fotovoltaico se colocó en un ángulo de 30 grados en la parte superior del fotobiorreactor para aprovechar la energía solar de manera eficiente, pero también se alinea con las prácticas ecológicas contemporáneas, contribuyendo a una reducción de la huella de carbono. El fotobiorreactor estaba provisto de un marco metálico para albergar una batería, un inversor y una bomba de aire. Para las especies de microalgas *Chlorella vulgaris*, la fuente de luz para la fotosíntesis es un componente esencial del sistema, por lo que se instalaron dos leds de 7 W operado por sistema de energía solar. El fotobiorreactor utiliza una combinación de luz solar durante el día y luces led durante la noche, obtenida mediante el uso de energía solar. Para mantener una dispersión uniforme de la luz y los nutrientes, se proporcionan difusores de aire para una aireación adecuada desde el fondo del fotobiorreactor.

El cultivo de microalgas tuvo un volumen de trabajo de 100 L. Se utilizó el nutriente (medio es-

tándar F/2) como aditivo de crecimiento para los experimentos. El cultivo de microalgas se mantuvo bajo luz solar asistida durante los 10 días de tiempo de cultivo. La irradiancia de la luz solar en caída (Lux) en el fotobiorreactor y el panel solar fotovoltaico y los LED durante la noche se midieron con un medidor de intensidad de luz (MS6612T, Mastech, China). Cada experimento se midió con diferentes proporciones de cultivo, medio (nutrientes) y agua con/sin dióxido de carbono (CO₂); de igual forma, los parámetros como pH, TDS, temperatura y EC se midieron usando un medidor de pH/ORP/EC/TDS/temperatura (EZ-9910, Multifunción, China).

Se realizaron tres experimentos según el siguiente protocolo, variando la concentración de dióxido de carbono en el cultivo de microalgas y en el agua (ver Tabla 1). El dióxido de carbono (CO₂) con una concentración de pureza del 98% se dosificó de forma intermitente en días alternos. La mezcla se logra utilizando difusores de aire operados por una bomba de aire (1780 GPH, Kulife Aquarium Air Pump, China), que suministra aire en una hora alternativa durante 15 minutos, alimentado por un sistema de energía solar. Se utilizó el cultivo de microalgas con aireación al aire y con enriquecimiento de CO₂ (200 g y 300 g) de inyección intermitente de CO₂ en las fases posteriores del experimento. Este estudio incluye tres conjuntos de experimentos para investigar el crecimiento de las microalgas a diversos niveles de concentración de CO₂.

Tabla 1. Ratios agua/medio (nutrientes) utilizados en el estudio experimental.

	Experimento n° 1*	Experimento n° 2*	Experimento n° 3*
Agua (L)	40	40	40
Cultivo de microalgas (L)	10	10	10
Solución de medio nutritivo estándar F/2 (ml)	100	100	100
Tiempo de inyección intermitente de CO ₂	0	15 seg. (200 g de CO ₂)	25 seg. (300 g de CO ₂)

*Cada experimento se repitió dos veces, y los resultados de los parámetros físicos y químicos se presentan como un valor promedio.

2.4 Biofijación de CO₂ por microalgas durante el cultivo

El caudal de CO₂ introducido en el fotobiorreactor se midió mediante la ecuación de continuidad (4):

$$Q = A \times V \quad (4)$$

Se midieron el caudal (Q), el área de la tubería (A) y la velocidad del gas CO₂ (V) inyectado en el sistema a través de una tubería de manguera de caucho con un diámetro (0,018 m) utilizado para inyectar CO₂ en el fotobiorreactor, usando un calibrador vernier a través del cual se calculó el área. Mientras que la velocidad del CO₂ inyectado en el tanque del fotobiorreactor se midió con un medidor meteorológico (Kestrel 4000NV, USA). El CO₂ se dosificó durante 15 segundos en el experimento # 1 y 25 segundos en el experimento # 2 en días alternos. El volumen de CO₂ inyectado se calcula multiplicando el caudal por el tiempo de dosificación y, a continuación, la masa de CO₂ se calcula por Densidad = Masa/ Volumen.

El uso de microalgas fotosintéticas para la captura de carbono ofrece el potencial de un sistema de captura sostenible, que puede reducir las emisiones y producir productos renovables (Borowitzka, 1999). La tasa de biofijación del carbono, R_{CO₂} (gCO₂/L/ día) se calcula mediante la ecuación 5:

$$R_{CO_2} = \%C \times PB \left(\frac{MW_{CO_2}}{MW_C} \right) \quad (5)$$

El R_{CO₂} se refiere a la tasa de biofijación del CO₂, el % C indica el contenido total de carbono, el PB es la productividad de la biomasa (mg de biomasa producida por litro al día), el MW_{CO₂} denota el peso molecular del CO₂ y el MW_C es el peso molecular del carbono. %C es el contenido de carbono de la biomasa seca, estimado en ~ 50 (Borowitzka, 1999).

2.5 Modelización de la capacidad de transferencia volumétrica de masa de dióxido de carbono (CO₂) en un fotobiorreactor

La transferencia de masa en un fotobiorreactor es el flujo de sustancias entre las fases gaseosa y líquida, incluidos los gases (como el dióxido de carbono y el oxígeno) y los nutrientes. La transferencia de masa se ve favorecida en gran medida por la aireación, que generalmente se logra por el aire burbujeante a través del medio líquido. Como resultado se incrementa el área interfacial entre las fases líquida y gaseosa. La teoría de la película es un método común que se utiliza para explicar la transferencia de masa en la superficie de la interfaz gas-líquido (Amaral et al., 2019). Esta hipótesis afirma que la transferencia de masa se produce a través de un revestimiento líquido delgado que se forma alrededor de las burbujas de gas. La velocidad a la que una sustancia pasa de la fase gaseosa a la fase líquida se mide mediante el coeficiente de transferencia de masa (k) de la ecuación 6. Su definición es la relación entre el es-

pesor de la capa limítrofe (δ) en el punto de contacto entre gas y líquido y el coeficiente de difusión de la sustancia (D) en un medio líquido. El coeficiente de transferencia de masa para O₂ en el fotobiorreactor viene dado por (Faruque et al., 2021).

$$k = \frac{D}{\delta} \quad (6)$$

Teniendo en cuenta el impacto de las dimensiones del fotobiorreactor en las tasas de transferencia de masa, incluyendo su superficie en los cálculos, la superficie del fotobiorreactor afecta directamente a las tasas de transferencia de masa, ya que determina la interfaz gas-líquido disponible para el intercambio de gas. Considerando la geometría única del reactor, la capacidad de transferencia volumétrica de masa calculada muestra las velocidades a las que las moléculas de dióxido de carbono y oxígeno pueden pasar de la fase gaseosa a la fase líquida por área unitaria de la interfaz gas-líquido. Esto se calcula mediante la ecuación 7 (Faruque et al., 2021):

$$k = \frac{D \times A}{\delta} \quad (7)$$

El área de superficie de un fotobiorreactor rectangular se calculó mediante la ecuación 8:

$$A = 2 (L \times W + L \times H + W \times H) \quad (8)$$

2.6 Medición de los parámetros de crecimiento de las microalgas

2.6.1 Irradiancia y temperatura solares

La irradiancia solar en caída (Lux) en el fotobiorreactor y los LED durante la noche se midieron con un medidor de intensidad luminosa (MS6612T, Mastech, China).

2.6.2 pH, TDS, TSS y conductividad eléctrica

pH, TDS, TSS y conductividad eléctrica fueron por medidor multifuncional (EZ-9910, Multifunction, China).

2.6.3 Eliminación de nutrientes (nitratos y ortofosfato)

Las concentraciones de nitrato y ortofosfato se midieron con un espectrofotómetro DR-500 UV-Vis (Hach, EE.UU.). La cantidad de nitrato se midió añadiendo nitrato de aluminio en polvo (Hach,

EE.UU.) como reactivo a 10 mL de la muestra para detectar la concentración de nitrato. Para medir la cantidad de nitrato a 425 nm, se introdujeron 10 mL de la solución preparada en la muestra, de forma similar a como se añadieron y mezclaron adecuadamente las muestras agitando con 8 mL de solución reactiva combinada con procedimientos convencionales para el ensayo de agua y aguas residuales de acuerdo con las proporciones dadas para el método del ácido ascórbico (4500-P. E) para determinar la concentración de ortofosfato (Amaral et al., 2019). Se añadió una muestra de 10 mL de la solución a la célula de muestreo del espectrofotómetro después de 10 minutos, y la concentración se determinó a 880 nm.

2.6.4 Productividad de biomasa

La productividad de la biomasa se midió con un espectrofotómetro UV-Vis (DR 5000, Hach, EE.UU.) a 680 nm de Hach (EE.UU.). Según la bibliografía (Leflay et al., 2021), se evaluaron los rendimientos de la biomasa de microalgas durante un período de crecimiento de 10 días midiendo la densidad óptica. Se utilizó biomasa seca estándar de *Chlorella vulgaris* para graficar la concentración conocida de biomasa de microalgas (mg/mL) y la absorbancia a 680 nm.

2.7 Extracción de proteínas

La muestra líquida con mayor productividad de biomasa fue seleccionada para la detección de proteínas y análisis de ácidos grasos. Para la detección de proteínas, se utilizó el método estándar de Lowry para la extracción y cuantificación de proteínas. El análisis de extracción de proteínas se llevó a cabo en el Centro de Investigación de Recursos Marinos y Alimentarios, Laboratorios PCSIR, Karachi.

2.8 Análisis de la composición de la extracción de lípidos y ácidos grasos

Se centrifugó una muestra de suspensión de microalgas cultivadas de 250 mL a 3000 rpm mediante centrifugadora multiuso (1580 R, Lab-Tech, Italia) durante 30 minutos para separar la fase líquida del contenido de biomasa orgánica. La biomasa orgánica se secó a 80 °C durante 3 horas en un horno (YCO-NO1, Gemmy Industrial corporation, Taiwán), después de secar las astillas de biomasa secas se pulverizaron en un mortero y el almirez. Se si-

guió el procedimiento de Bligh y Dyer para extraer lípidos de la biomasa de microalgas secas según la bibliografía, utilizando n-hexano como disolvente orgánico de extracción (Leflay et al., 2021) y se midió el rendimiento de lípidos extraídos en peso utilizando una balanza electrónica (AB 304-S, Mettler Tolendo, Suiza).

3 Resultados y Discusión

3.1 Fotobiorreactor urbano fabricado

Se diseñó un fotobiorreactor urbano con dimensiones altura $\times$ anchura $\times$ longitud (35,43 $\times$ 12,59 $\times$ 47,63) pulgadas, con un volumen total de 350 L que muestra una estructura innovadora adaptada para el cultivo eficiente de microalgas para la mitigación del cambio climático, como se muestra en la Figura 2.

3.2 Análisis de parámetros de crecimiento de microalgas

3.2.1 Irradiancia y temperatura solares

La investigación indica que las temperaturas más altas pueden mejorar las actividades enzimáticas

involucradas en la asimilación de nutrientes y la acumulación de lípidos, fundamental para la producción de biocombustibles. Sin embargo, existe un intervalo óptimo de temperaturas para cada especie de alga, ya que las temperaturas excesivamente altas pueden dar lugar a estrés térmico, alterando las funciones celulares e impidiendo el crecimiento. El poder comprender y controlar las condiciones de temperatura resulta esencial para optimizar los sistemas de producción de biocombustibles basados en algas. Los resultados del experimento # 1 mostraron la irradiación solar y el perfil de temperatura para los 10 días de tiempo de cultivo, con valores promedio de 22,02 °C y 362,5 W/m² respectivamente (ver Tabla 2).

Las Tablas 3 y 4 muestran variaciones de temperatura durante el período de cultivo entre 22,3 y 24,0 °C y entre 23,9 y 25,3 °C para el experimento # 2 y # 3, respectivamente. La irradiación solar promedio medida para el experimento 1 y el experimento 2 fue de 391,9 y 430,4 W/m² respectivamente. La Tabla 4 indica que el intervalo óptimo de temperaturas para una mayor producción de biomasa está entre 24 y 25 °C, mientras que para la irradiación solar es de 430,4 W/m² lo que produce un máximo de 319,9 mg/L de rendimiento de biomasa de microalgas después de 10 días de período de cultivo.



Figura 2. Fotobiorreactor urbano diseñado y fabricado localmente.

3.2.2 pH, TDS, TSS y conductividad eléctrica

El crecimiento y el metabolismo de las algas se ven influidos por el pH tanto para el comportamiento

de los fotobiorreactores como para el crecimiento de las microalgas, y desempeña un rol fundamental en la determinación de la disponibilidad de nutrientes

tes, la regulación de las actividades metabólicas y la salud general de las microalgas en el medio de cultivo (Shuler and Kargi, 2002). Además de depender de la solubilidad en CO₂, el valor de pH del medio de cultivo parece estar influido por la absorción de nitrógeno, que es necesaria para el desarrollo de las células de las algas y el consumo posterior de nitrato por las microalgas (Borowitzka, 1999). El pH del medio del experimento # 1 fue entre 7,9 y 8,3, arrojando un promedio de 8,12 que es mayor que el valor deseado según la literatura (APHA, 2005), resultando en una menor productividad de la biomasa. Mientras que el pH medio del ciclo de cultivo se determinó en 7,57 en los experimentos 2 y 3 y se hallaron de acuerdo con la bibliografía anterior (APHA, 2005).

Los niveles de conductividad eléctrica (CE) y sólidos disueltos totales (TDS) del medio de crecimiento son cruciales para controlar la disponibilidad y solubilidad de los nutrientes esenciales, incluidos el nitrógeno, el fósforo, el potasio y los micronutrientes. Los desequilibrios en los niveles

de TDS y CE, ya sea demasiado altos o bajos, pueden afectar la absorción de nutrientes por las algas, imponiendo limitaciones a su crecimiento. Además, los niveles elevados de TDS y CE pueden someter a las células de algas a un estrés osmótico causado por una mayor concentración de solutos en el medio de crecimiento, que difiere del entorno interno de la célula y afecta al equilibrio del agua y a la salud celular en general.

La Tabla 2 mostró una conductividad eléctrica decreciente de 1,34 a 0,98, esto se debe a que la CE está directamente relacionada con la concentración de iones en el medio, incluyendo nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y micronutrientes reducidos durante el período de cultivo. Sin embargo, la disponibilidad adecuada de nutrientes es crucial para el crecimiento de las microalgas durante su período de cultivo (Brindhadevi et al., 2021). Se observó una disminución considerable de la CE en el experimento # 2 y en el experimento # 3 entre 1,13 y 0,82 y entre 1,34 y 0,95, respectivamente (ver Tabla 3 y Tabla 4).

Tabla 2. Experimento n° 1 (proporciones utilizadas: 80% de agua y 20% de cultivo de microalgas).

Parámetros	Duración del cultivo				
	Día 1	Día 3	Día 5	Día 7	Día 10
Temperatura (C)	21,8	22,7	21,9	21,3	22,4
Irradiación solar (W/m ²)	365,9	342,6	383	397,1	323,9
pH	8,1	8	8,3	7,9	8,3
CE (μs/cm)	1,34	1,33	1,15	1,11	0,98
TDS (mg/L)	610	600	580	550	540
TSS (mg/L)	71	82	93	98	100
Ortofosfato (mg/L)	104	100	73	60	52
Nitrato (mg/L)	10	9,5	8,8	8,2	7,8
Absorbancia (abs)	0,11	0,14	0,16	0,2	0,23
Productividad de la biomasa (mg/L)	113,3	134,4	148,4	176,5	196,63

Se ha observado que el contenido de TDS disminuye drásticamente en los tres experimentos # 1, 2 y 3 durante el período de cultivo. La absorbancia (intensidad de la luz) es mayor en el experimento # 3 (con 300g de CO₂ introducidos en el fotobiorreactor), oscilando entre 0,12 y 0,49 de absorbancia que posteriormente disminuye la conductividad eléctrica de las sales en el sistema. Si bien la intensidad de la luz en sí misma no contribuye directamente a la conductividad eléctrica, tiene un impacto en la

fotosíntesis, el crecimiento de la biomasa y las actividades metabólicas y puede conducir a cambios en la composición iónica del medio de cultivo (Morales et al., 2018; Nezammahalleh et al., 2016). La reducción de los niveles de TDS y CE puede interpretarse como un resultado positivo, que indica el uso de nutrientes por las microalgas para su crecimiento y procesos metabólicos (Nezammahalleh et al., 2016).

El Total de Sólidos Suspendidos (TSS) mostró

una tendencia creciente notable, atribuida principalmente a la formación de biomasa insoluble dentro del sistema, tal como se presenta en las tablas 2, 3 y 4. Este fenómeno contribuye a la turbidez elevada del sistema. Es importante destacar que este aumento observado en los TSS no sólo es consecuencia de la formación de biomasa, sino también es un indicador valioso para cuantificar la productividad de la biomasa. Los crecientes niveles de TSS actúan como una medida tangible y fácilmente medible, ofreciendo un medio directo para medir la eficacia de la producción de biomasa dentro del sistema de cultivo del fotobiorreactor. La producción de biomasa de microorganismos como *Chlorella vulgaris* durante toda la fase de cultivo puede verse influida significativamente por los niveles de sólidos en suspensión total (TSS) y sólidos disueltos totales (TDS) en el agua. Durante el ensayo, la concentración de TSS

aumenta de 71 a 100 mg/L (experimento 1), de 74 a 105 mg/L (experimento 2) y de 81 a 110 mg/L (experimento 3), del día uno al día décimo durante el período de cultivo. Los altos niveles de TSS pueden afectar la penetración de la luz en el agua, reduciendo la disponibilidad de la luz para la fotosíntesis en las células de *Chlorella vulgaris*, lo que puede obstaculizar el crecimiento y la producción de biomasa (Morales et al., 2018).

3.2.3 Reducción de la concentración de nutrientes durante el tiempo de cultivo

Un suministro adecuado de nutrientes promueve el crecimiento de algas y aumenta la productividad de la biomasa. Se observa que una concentración de nutrientes externos, o la concentración de nutrientes en el medio de cultivo, controla la fase de crecimiento de las microalgas.

Tabla 3. Experimento n° 2 (proporciones utilizadas: 80 % de agua y 20 % de cultivo con 200 g de CO₂ intermitentes).

Parámetros	Duración del cultivo				
	Día 1	Día 3	Día 5	Día 7	Día 10
Temperatura (C)	23,8	22,5	22,9	22,3	24
Irradiación solar (W/m ²)	412,6	377,8	410,9	390,4	367,8
pH	7,8	8	7,5	7,1	7,37
CE (μs/cm)	1,13	1,06	0,97	0,91	0,82
TDS (mg/L)	690	670	600	620	570
TSS (mg/L)	74	78	89	93	105
Ortofosfato (mg/L)	103	77	70	59	60
Nitrato (mg/L)	10	9,3	8,5	7,4	5,2
Absorbencia (abs)	0,091	0,11	0,135	0,21	0,24
Productividad de la biomasa (mg/L)	115,3	142,4	163,1	183,5	203,43

Tabla 4. Experimento n° 3 (proporciones utilizadas: 80 % de agua y 20 % de cultivo con 300 g de CO₂).

Parámetros	Duración del cultivo				
	Día 1	Día 3	Día 5	Día 7	Día 10
Temperatura (C)	24,1	24,3	23,9	25,3	24
Irradiación solar (W/m ²)	426,5	428,6	398,3	463,9	434,7
pH	8,5	7,7	7,5	7,6	7,1
CE (μs/cm)	1,34	1,27	1,35	0,99	0,95
TDS (mg/L)	740	720	690	60	580
TSS (mg/L)	81	87	102	99	110
Ortofosfato (mg/L)	102	89	85	65	40
Nitrato (mg/L)	10	8,1	7,3	5,8	4,2
Absorbencia (abs)	0,12	0,25	0,27	0,38	0,49
Productividad de la biomasa (mg/L)	120,3	211,5	225,6	302,7	318,76

Las tablas 2, 3 y 4 mostraron el patrón de eliminación de ortofosfato y nitrato por microalgas durante su ciclo de crecimiento. Los experimentos 1, 2 y 3 mostraron que el porcentaje de eliminación de ortofosfato del agua por microalgas fue del 50%, 41,74% y 60,78% respectivamente, mientras que la eliminación de nitratos fue del 22%, 48% y 58%, respectivamente durante el ciclo de crecimiento de 10 días. En el presente estudio, esta variabilidad en el porcentaje de fósforo extraído puede deberse a variaciones en la cantidad inicial de fósforo en los medios de cultivo y en las condiciones de cultivo (Barghbani et al., 2012). El contenido global de nitrógeno en los medios disminuye gradualmente durante el proceso de crecimiento para todas las concentraciones de CO₂. Esto podría deberse al anabolismo rápido de *Chlorella vulgaris* en los primeros días de la fase de cultivo (Barghbani et al., 2012). La *Chlorella vulgaris* ha consumido la máxima cantidad de ortofosfatos, que es un nutriente esencial para las microalgas, y es un componente crucial de los ácidos nucleicos, ATP (trifosfato de adenosina) y fosfolípidos, desempeñando un rol vital en varios procesos celulares. Una disponibilidad adecuada de fósforo favorece el crecimiento, el metabolismo y la reproducción de las células de *Chlorella vulgaris* (Sriwiriyarat and Mukhthong, 2021). Los resultados destacan la interacción dinámica entre la disponibilidad de nutrientes y el consumo de microalgas, con una reducción sustancial de las concentraciones de ortofosfato y nitrato que subrayan el buen uso de estos nutrientes por parte de las microalgas, demostrando un aporte positivo de nutrientes que favorece su crecimiento y productividad de la biomasa (Tavares et al., 2023).

3.2.4 Tasa de productividad de biomasa

Los resultados de productividad de la biomasa presentados en las tablas 2, 3 y 4 mostraron que la productividad de la biomasa en los dos experimentos iniciales # 1 y 2 estaba aumentando gradualmente; sin embargo, se observó que el experimento # 3 con 300 g de CO₂ intermitente estaba teniendo un patrón con un aumento significativo con respecto al período de cultivo. El patrón de aumento de biomasa presentó desde el primer día de cultivo 113,3, 115,3 hasta el décimo día de cultivo 120,3 hasta 196,6, 203,4 y 318,7 mg/L respectivamente. Aunque la productividad de la biomasa no fue demasiado, se puede mejorar optimizando la exposición del cultivo de microalgas a la luz solar y aumentando

el suministro de dióxido de carbono, potencialmente a partir de diversas fuentes de emisión de gases de escape. Este enfoque estratégico se alinea con el reconocimiento de la investigación de que las especies fotoautotróficas requieren cantidades sustanciales de carbono para lograr una producción óptima de biomasa (Razzak, 2019).

Los resultados tabulados del Experimento # 1 muestran que la productividad de la biomasa aumenta durante el tiempo de cultivo y la concentración máxima de biomasa resultó ser de 197,5 mg/L, lo que es significativamente menor que los resultados de los experimentos 2 y 3 utilizando inyecciones de CO₂. El ensayo realizado con 200 g de CO₂ mostró un aumento progresivo de la concentración de biomasa durante la fase de cultivo. Las microalgas cultivadas en condiciones de medio ambiente y enriquecimiento atmosférico de CO₂ (denominado CO₂ 0,03% atmosférico), mostraron que la concentración de biomasa aumentó ligeramente. Adicionalmente, con 300 g de CO₂ se obtuvo la máxima concentración de biomasa, esto podría ser el resultado de las microalgas cultivadas con mayor concentración de CO₂ es decir, 300 g (Faruque et al., 2021).

3.3 Análisis estadístico de la productividad de la biomasa

En el análisis estadístico se utilizó la prueba de medias (HSD) de Tukey para determinar la significación de las diferencias entre pares de medias de productividad de biomasa en el día 10 del período de cultivo mediante el software Minitab (versión 17) con un nivel de significancia de ($\alpha=0,05$). El análisis estadístico se realizó entre la muestra de control (experimento # 1) sin CO₂ suministrado de fuente externa (x1), el experimento # 2 con 200 g de CO₂ suministrado (x2) y el experimento # 3 con 300 g de CO₂ suministrado (x3) en el sistema de cultivo del fotobiorreactor.

La Tabla 5 mostró que el valor de p ($6,306 \times 10^{-14}$) es altamente significativo y similar con diferencia entre x1 y x3, seguido por x2 y x3 en comparación con la muestra control (experimento # 1), es decir, $p=0,0001$. Así, se puede concluir que el suministro de CO₂ de fuente externa en el experimento # 2 y experimento # 3 tiene el mismo patrón de significancia estadística con la co-relación entre dos grupos de medias, teniendo un valor altamente significativo con x2 y x3.

Tabla 5. Declaración comparativa de la diferencia de las medias de productividad de la biomasa en la prueba de la HSD de Tukey.

Par	Diferencia	SE	Q	IC inferior	IC superior	Medio Crítico	valor p
x1-x2	6,8	0,4679	14,5344	4,7699	8,8301	2,0301	0,0001221
x1-x3	122,5	0,4679	261,833	120,4699	124,5301	2,0301	$6,306 \times 10^{-14}$
x2-x3	115,7	0,4679	247,2986	113,6699	117,7301	2,0301	$6,306 \times 10^{-14}$

3.4 Rendimiento de la extracción de proteínas y lípidos

Se recolectó la muestra de biomasa de microalgas para la extracción de proteínas y lípidos, mostrando la mayor productividad de biomasa. El contenido de proteína de biomasa microalgal seca del 7,98% en peso se obtuvo utilizando el método de Lowrys, y el rendimiento lipídico de 1,87 g/ 5 g de biomasa seca se obtuvo utilizando n-hexano en el método de extracción con disolvente. El resultado proteico indica un contenido proteico relativamente menor en comparación con otros estudios realizados en el pasado. Esta divergencia en el contenido proteico podría atribuirse a los parámetros experimentales empleados en este estudio utilizando el medio ambiente. A diferencia de la mayoría de las investigaciones enfocadas en aguas residuales, el método para utilizar los gases de escape de la atmósfera contiene cantidades importantes de óxidos de nitrógeno. La eliminación biológica de óxidos de nitrógeno por parte de las microalgas es un método potencial para convertir los óxidos de nitrógeno en proteínas (Lam and Lee, 2012).

En este caso, el nitrógeno atmosférico se usó en el fotobiorreactor con baja concentración, que es un macronutriente para el crecimiento de las microalgas y, por lo tanto, se observó una menor producción de proteínas. Los estudios que utilizan el medio sintético con la microalga verde *Scenedesmus dimorphus* en BG-11 en entornos de cultivo tanto interiores como exteriores muestran que *S. dimorphus* puede producir biomasa celular en entornos exteriores con hasta un 35% de proteína y un 37% de lípido total en condiciones de crecimiento específicas. Se demostró que los mayores rendimientos de proteínas y carbohidratos eran de 0,2 y 0,7 g/ 1/ día, respectivamente, y podían obtenerse en las primeras etapas del cultivo. El mayor rendimiento de lípidos, 0,17 g/1/día, ocurrió en una etapa tardía del cultivo. Estos resultados se obtuvieron mediante una combinación de manipulación de la disponibilidad de nitrógeno, la intensidad de la luz y la den-

sidad de inoculación celular (Çoban et al., 2021). La cantidad de nitrógeno en un medio de cultivo determina la tasa de desarrollo celular y la composición bioquímica de las microalgas. La investigación demostró que la inanición de nitrógeno en un medio de cultivo retrasa la tasa de crecimiento celular de las microalgas y reduce la síntesis de proteínas al aumentar el contenido de lípidos o carbohidratos (Razzak, 2019).

Tabla 6. Principales ácidos grasos identificados en los lípidos extraídos.

Nombre del ácido graso	g/100g Ácidos grasos totales
Mirístico (C14:0)	11,39
Palmítico (C16:0)	34,03
Palmitoleico (C16:1)	9,16
Esteárico (C18:0)	5,38
Oleico (C18:1n9c)	16,58
Linoleico (C18:2n6c)	4,52
g-linolénico (C18:3n6)	13,23
Eurico (C22:1n9)	5,66

3.5 Análisis de la composición de los ácidos grasos

Se extrajeron los lípidos de las microalgas y se realizó un análisis de composición de ácidos grasos presentado en la Tabla 6. Se identificó la composición lipídica para incluir ácido mirístico (C14:0), ácido palmítico (C16:0), ácido palmitoleico (C16:1), ácido oleico (C18:1), ácido linoleico (C18:1) y ácido linolénico (C18:3). Este perfil detallado de ácidos grasos proporciona información sobre la influencia en las propiedades del biodiesel. Se observa que todos los principales ácidos grasos estaban presentes en el lípido extraído, teniendo propiedades favorables para producir biodiesel de microalgas.

La literatura destaca que la presencia de ácidos grasos saturados y monoinsaturados de cadena larga, particularmente C18:2 y C18:3, influye significativamente en el número de cetanos de biodiesel,

la estabilidad a la oxidación y el contenido de yodo. Se conoce que las cualidades del biodiésel están estrechamente relacionadas con la composición de los ácidos grasos libres. Por ejemplo, el ácido oleico (C18:1) mejora las propiedades del flujo frío, mientras que el ácido palmítico (C16:0) contribuye a una menor concentración de yodo y a un mayor número de cetano. Además, la presencia de ácido linoleico (C18:2) y ácido linolénico (C18:3) se asocia con propiedades de combustión mejoradas, contribuyendo a una mejor calidad general del combustible. El valor del yodo, un parámetro crítico para evaluar la estabilidad química del biodiésel y su susceptibilidad a la reacción oxidativa está significativamente influenciado por la presencia de ácidos grasos de doble enlace. Un mayor número de enlaces dobles aumenta el potencial de polimerización, reduciendo así la estabilidad a la oxidación. Esta comprensión de la composición de los ácidos grasos proporciona información valiosa sobre las posibles aplicaciones y cualidades del biodiésel derivado del cultivo de microalgas (Qie et al., 2019).

3.6 Inyección de CO₂ en el sistema del fotobiorreactor

El CO₂ intermitente inyectado en el sistema del fotobiorreactor con una velocidad de 25 m/s de CO₂ para el Experimento # 2 y el Experimento # 3 representó 15 seg y 25 seg respectivamente. El área de la tubería de la manguera de alimentación se calculó como $2,54 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ y la velocidad de CO₂ 25m/s, y el caudal encontrado fue de $6,36 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (utilizando $Q = AV$). Ahora, este caudal (Q) se multiplica por el tiempo de dosificación (t) utilizando la ecuación $V = Q \times t$, es decir, 15 segundos y 25 segundos para obtener el volumen de CO₂ gas introducido en el sistema de cultivo del fotobiorreactor. La masa del gas CO₂ introducido en el tanque del fotobiorreactor fue de 200 g y 300 g, calculados por ($D = M/V$) para el Experimento # 2 y el Experimento # 3, respectivamente.

3.7 Biofijación de dióxido de carbono (CO₂) mediante el cultivo de microalgas

Las tasas de biofijación de CO₂ (R_{CO₂}) se calculan utilizando la ecuación 5 para los tres experimentos

realizados en días alternativos. Por lo tanto, para calcular el R_{CO₂}, la productividad diaria de la biomasa se calculó utilizando la ecuación 9 de regresión obtenida a partir de una curva estándar:

$$y = 0,7015x + 0,0362 \quad (R^2 = 0,9987) \quad (9)$$

El % C se asumió como el 50% en peso seco de la biomasa de algas según la literatura (Scheufele et al., 2019), peso molecular de CO₂ 44,01 g/mol y peso molecular del carbono 12,01 g/mol.

La Figura 3 mostró que el Experimento # 1 tiene una tendencia lineal creciente en la tasa de biofijación durante los días de cultivo con el nivel más alto a 362,07 mg/L/día. Del mismo modo, el experimento # 2 también mostró un patrón similar, pero después del 7^{mo} día de cultivo aumentó al nivel más alto a 374,92mg/L/día hasta el 9^{no} día de tiempo de cultivo. Este aumento se debió a la introducción de CO₂ intermitente (200 mg) en el fotobiorreactor para el cultivo de microalgas. El experimento # 3 mostró una tendencia drástica al aumento del cultivo del 1^{ro} al 9^{no} día con la introducción de 300 mg de masa de CO₂ en el sistema del fotobiorreactor. El nivel más bajo y alto de la tasa de la bio-fijación fue de 220,55 y 586,48 mg/L/día en 1^{er} día y 9^{no} día respectivamente.

Las altas concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) son esenciales para la fotosíntesis y tienen un impacto directo en las tasas de crecimiento a las que se cultivan las microalgas. La disponibilidad de CO₂ afecta significativamente la eficiencia de la fotosíntesis y a la productividad de la biomasa. Como componente crítico de las reacciones fotosintéticas, el aumento de los niveles de CO₂ puede mejorar la eficiencia de este proceso, lo que en última instancia conduce a tasas más altas de producción de biomasa (Wang et al., 2013). En este estudio, se encontró que introducir menos CO₂ durante un período más corto de tiempo hace que se disuelva completamente debido al proceso de absorción gas-líquido, mientras que introducir más CO₂ durante un período más largo de tiempo reduce su capacidad de disolverse completamente porque las moléculas de gas no pueden entrar en las moléculas de agua, alcanzando el estado de equilibrio (Razzak et al., 2024).

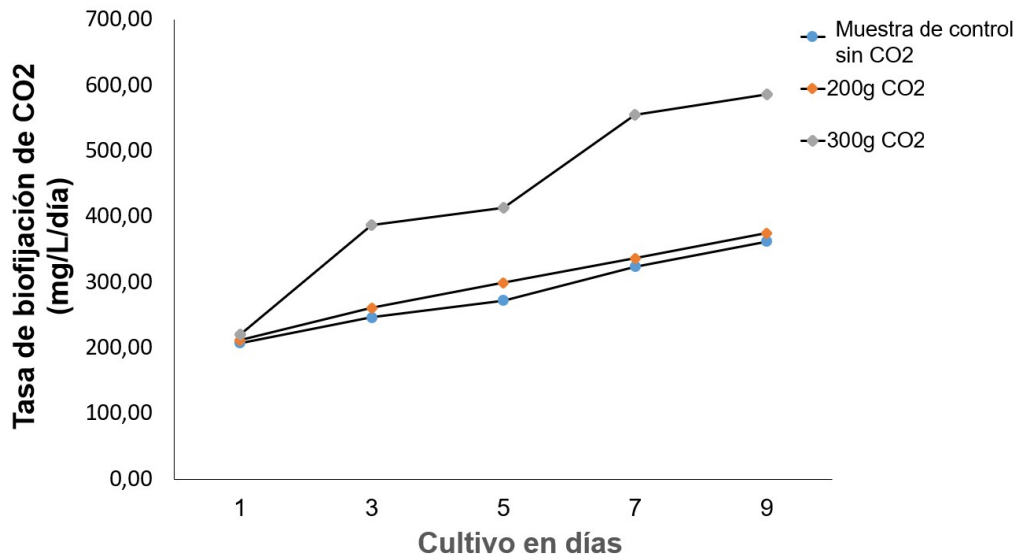


Figura 3. Tasa de biofijación de CO₂ de microalgas al tiempo de cultivo.

3.8 Modelización cinética de la capacidad de transferencia volumétrica de masa de CO₂

La multiplicación del coeficiente de transferencia de masa de oxígeno (k) por la superficie del recipiente en un fotobiorreactor permite evaluar la capacidad del sistema para la transferencia tanto de oxígeno como de dióxido de carbono. Este producto combinado refleja la velocidad a la que estos gases pueden moverse eficientemente al medio de cultivo dentro del fotobiorreactor, necesario para apoyar las necesidades metabólicas de las algas que se cultivan. La superficie de un fotobiorreactor rectangular con dimensiones longitud (47,63 pulgadas), anchura (12,6 pulgadas) y altura (35,43 pulgadas) se calcula como 2734,08 pulgadas² (1,763 m²).

3.8.1 Capacidad volumétrica de transferencia de masa (k) para el oxígeno:

El coeficiente de difusión de oxígeno en el agua (D_{O₂}) fue de 2×10⁻⁹ m² /s y el grosor de la capa límite (δ en el caso de las pruebas de oxígeno) es de 0,02 metros.

$$k_{O_2} = \frac{2 \times 10^{-9} \times 1,763}{0,02} = 1,763 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} \quad (10)$$

3.8.2 Capacidad volumétrica de transferencia de masa (k) para el dióxido de carbono:

El coeficiente de difusión del dióxido de carbono en el agua (D_{CO₂}) es de 1,9×10⁻⁹ m² /s y el grosor de la capa límite (en la sección de aguas) es de 0,02 m.

$$k_{CO_2} = \frac{1,9 \times 10^{-9} \times 1,763}{0,02} = 1,676 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s} \quad (11)$$

Las velocidades a las que las moléculas de oxígeno y dióxido de carbono pueden pasar de la fase gaseosa a la fase líquida de la interfaz gas-líquido están representadas por la capacidad de transferencia volumétrica de masa calculada. Un valor mayor denota una tasa de transferencia de gas más rápida y una mayor cantidad de transferencia de gas, lo que es necesario para mantener el metabolismo de las algas, incluida la fotosíntesis.

4 Conclusiones

La investigación desarrollada incluyó el diseño y fabricación de un fotobiorreactor urbano operado por el sistema de energía solar para cultivar especies de microalgas de *Chlorella vulgaris* para la eliminación de nutrientes, producción de biomasa, producción de proteínas y secuestro de CO₂. La investigación incluyó el seguimiento de los parámetros de cultivo durante un período de cultivo de 10 días. Se

compararon tres condiciones experimentales, y se encontró que el experimento #3 tuvo una mayor productividad de biomasa de 318,76 mg/L al introducir 300 g de CO₂ intermitente en el sistema de cultivo y las eficiencias de eliminación de nutrientes fueron de 60,78 % (ortofosfato) y 58 % (nitrato). El análisis estadístico encontró que la introducción de CO₂ de una fuente externa en experimentos #2 y #3 resultó en el mismo patrón de significancia estadística, con una co-relación entre dos conjuntos de medias (valor $p = 6,306 \times 10^{-14}$). Los rendimientos de proteínas y lípidos fueron del 7,98 % y 37,4 % en peso respectivamente. Las capacidades volumétricas de transferencia de masa de O₂ y CO₂ para KO₂ y KCO₂ fueron de $1,763 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ y $1,676 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

La capacidad media de transferencia de O₂ y CO₂ se ve mejorada por la agitación continua en un fotobiorreactor, esencial para mantener condiciones óptimas para el cultivo de microalgas. Los lípidos extraídos contenían calidades favorables de ácidos grasos para la producción de microalgas biodiésel, mirístico (C14:0), palmítico (C16:0), palmitoleico (C16:1), oleico (C18:1), linoleico (C18:1) y linolénico (C18:3). Un fotobiorreactor urbano de microalgas es una estrategia respetuosa con el medio ambiente que puede hacer mejorar en gran medida la economía basada en la biotecnología y disminuir los efectos perjudiciales del CO₂ producido por la quema convencional de combustibles fósiles en el medio ambiente.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Ingeniería y Tecnología de la Universidad NED, Karachi, por proporcionar las instalaciones de laboratorio y los fondos para este estudio de investigación. Este trabajo fue apoyado a través de una subvención financiera proporcionada por la Junta de Estudios Avanzados e Investigación de la Universidad de Ingeniería y Tecnología de NED [Número de referencia: Acad /50 (48) /4168].

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de intereses. Todos los coautores han examinado la obra y están de acuerdo con su contenido. Además,

los autores afirman que la presentación es su trabajo original.

Contribución de los autores

S.K.: Investigación, metodología y redacción del borrador original. M.A.: Conceptualización, supervisión, obtención de fondos, análisis formal y edición. A.M.: Redacción - revisión y edición. A.I.: Escritura y procesamiento de datos.

Referencias

- Ali, M., Masood, A., and Saleem, M. (2021). Microalgae cultivation in wastewater for simultaneous nutrients removal and biomass production. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 12:475–485. Online:https://n9.cl/answax.
- Amaral, A., Gillot, S., Garrido-Baserba, M., Filali, A., Karpinska, A., Plósz, B., De Groot, C., Bellandi, G., Nopens, I., and Takács, I. (2019). Modelling gas-liquid mass transfer in wastewater treatment: when current knowledge needs to encounter engineering practice and vice versa. *Water science and technology*, 80(4):607–619. Online:https://n9.cl/5vgwj.
- APHA (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 21st edition edition.
- Barghbani, R., Rezaei, K., and Javanshir, A. (2012). Investigating the effects of several parameters on the growth of *Chlorella vulgaris* using taguchi's experimental approach. *International Journal of Biotechnology for Wellness Industries*, 1(2):128. Online:https://n9.cl/iohix.
- Borowitzka, M. (1999). Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of biotechnology*, 70(1-3):313–321. Online:https://n9.cl/shstm.
- Brindhadevi, K., Mathimani, T., Rene, E., Shanmugam, S., Chi, N., and Pugazhendhi, A. (2021). Impact of cultivation conditions on the biomass and lipid in microalgae with an emphasis on biodiesel. *Fuel*, 284:119058. Online:https://n9.cl/9isnj.

- Çoban, A., Şimşek, G., and Çetin, A. (2021). Effect of nitrogen source on growth and protein and lipid amounts of a freshwater microalga *Scenedesmus acutus*. *Turkish Journal of Science and Technology*, 16(2):215–220. Online: <https://n9.cl/m9igzn>.
- Faruque, M., Mohammed, K., Hossain, M., and Razzak, S. (2021). Influence of elevated CO₂ concentrations on growth, nutrient removal, and CO₂ biofixation using *Chlorella kessleri* cultivation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18:913–926. Online: <https://n9.cl/qhk2pc>.
- Gaurav, K., Neeti, K., and Singh, R. (2024). Microalgae-based biodiesel production and its challenges and future opportunities: A review. *Green Technologies and Sustainability*, 2(1):100060. Online: <https://n9.cl/znc4x>.
- Lam, M. and Lee, K. (2012). Microalgae biofuels: a critical review of issues, problems and the way forward. *Biotechnology advances*, 30(3):673–690. Online: <https://n9.cl/w9fok>.
- Leflay, H., Pandhal, J., and Brown, S. (2021). Direct measurements of CO₂ capture are essential to assess the technical and economic potential of algal-cultus. *Journal of CO₂ Utilization*, 52:101657. Online: <https://n9.cl/ng2a3>.
- Mahapatra, S., Kumar, D., Singh, B., and Sachan, P. (2021). Biofuels and their sources of production: A review on cleaner sustainable alternative against conventional fuel, in the framework of the food and energy nexus. *Energy Nexus*, 4:100036. Online: <https://n9.cl/8wa5y>.
- Morales, M., Sánchez, L., and Revah, S. (2018). The impact of environmental factors on carbon dioxide fixation by microalgae. *FEMS microbiology letters*, 365(3):fnx262. Online: <https://n9.cl/h6rnz>.
- Nezammahalleh, H., Ghanati, F., Adams, T., Nosrati, M., and Shojaosadati, S. (2016). Effect of moderate static electric field on the growth and metabolism of *Chlorella vulgaris*. *Bioresource technology*, 218:700–711. Online: <https://n9.cl/5rotd>.
- Qie, F., Zhu, J., Rong, J., and Zong, B. (2019). Biological removal of nitrogen oxides by microalgae, a promising strategy from nitrogen oxides to protein production. *Bioresource technology*, 292:122037. Online: <https://n9.cl/fmenw>.
- Razzak, S. (2019). In situ biological CO₂ fixation and wastewater nutrient removal with *Neochloris oleoabundans* in batch photobioreactor. *Bioprocess and biosystems engineering*, 42(1):93–105. Online: <https://n9.cl/yq31m7>.
- Razzak, S., Bahar, K., Islam, K., Haniffa, A., Faruque, M., Hossain, S., and Hossain, M. (2024). Microalgae cultivation in photobioreactors: Sustainable solutions for a greener future. *Green Chemical Engineering*, 5(4):418–439. Online: <https://n9.cl/2lhn0>.
- Rehman, M., Kesharvani, S., Dwivedi, G., and Suneja, K. (2022). Impact of cultivation conditions on microalgae biomass productivity and lipid content. *Materials Today: Proceedings*, 56:282–290. Online: <https://n9.cl/nl31us>.
- Rodionova, M., Poudyal, R., Tiwari, I., Voloshin, R., Zharmukhamedov, S., Nam, H., Zayadan, B., Bruce, B., Hou, H., and Allakhverdiev, S. (2017). Biofuel production: challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(12):8450–8461. Online: <https://n9.cl/0xwr4>.
- Saratale, R., Ponnusamy, V., Jeyakumar, R., Sirohi, R., Piechota, G., Shobana, S., Dharmaraja, J., Lay, C.-H., Saratale, G., and Shin, H. (2022). Microalgae cultivation strategies using cost-effective nutrient sources: Recent updates and progress towards biofuel production. *Bioresource Technology*, 361:127691. Online: <https://n9.cl/srjve>.
- Scheufele, F., Hinterholz, C., Zaharieva, M., Najdenski, H., Módenes, A., Trigueros, D., Borba, C., Espinoza-Quiñones, F., and Kroumov, A. (2019). Complex mathematical analysis of photobioreactor system. *Engineering in life sciences*, 19(12):844–859. Online: <https://n9.cl/xtk4h>.
- Shuler, M. and Kargi, F. (2002). *Bioprocess Engineering- Basic Concepts*. Prentice-Hall, second edition edition.
- Sievert, K., Cameron, L., and Carter, A. (2023). Why the cost of carbon capture and storage remains persistently high. Online: <https://n9.cl/grhfk>.
- Sriwiriyarat, T. and Mukhthong, M. (2021). The feasibility study of using microalgae for polishing consumer-products industrial effluent containing high total dissolved solids. *Thai Environmental Engineering Journal*, 35(1):1–14. Online: <https://n9.cl/9kjzb>.

- Stojiljković, D. and Spasojević, I. (2023). Urban photo-bioreactor liquid3. Green Product Award. Online:<https://n9.cl/xx5ch>.
- Tavares, L., Nudi, M., Arroyo, P., Godoy, R., and Trevisan, E. (2023). Effect of different concentrations of phosphorus and nitrogen on the growth of the microalgae *Chlorella vulgaris*. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 14(4):563–572. Online:<https://n9.cl/vmaxgx>.
- United Nations (2024). Causes and effects of climate change. United Nations. Online:<https://n9.cl/nij3r>.
- Valavanidis, A. (2023). Extreme weather events exacerbated by the global impact of climate change. glimpse of the future, if climate change continues unabated. Online:<https://n9.cl/5nffq>.
- Wang, L., Li, Y., Sommerfeld, M., and Hu, Q. (2013). A flexible culture process for production of the green microalga *Scenedesmus dimorphus* rich in protein, carbohydrate or lipid. *Bioresource Technology*, 129:289–295. Online:<https://n9.cl/ghase>.
- Yen, H., Ho, S., Chen, C., and Chang, J. (2015). CO₂, NO_x and SO_x removal from flue gas via microalgae cultivation: A critical review. *Biotechnology Journal*, 10(6):829–839. Online:<https://n9.cl/dy725>.