



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA - *Iztapalapa*

División de Ciencias Básicas e Ingeniería

Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica

Ciudad de México, a 24 de julio de 2024.

IPH. 026.2024.AAIQ.3

DR. ROMÁN LINARES ROMERO
Presidente del Consejo Divisional de C.B.I.

Presente

Por este conducto solicito a usted, de la manera más atenta, someter a la consideración del Consejo Divisional la solicitud de integración de una comisión, para analizar y en su caso proponer la aprobación del proyecto: "Desarrollo de un sistema de fotobiorreactores para los procesos acoplados de mitigación de CO₂ y producción de carotenoides por microalgas, con aplicación acuícola sustentable.", bajo la responsabilidad del **DR. HUGO JOAQUÍN ÁVILA PAREDES**.

Se anexa el protocolo del proyecto aprobado dentro de la convocatoria de Rectoría General: **Postulación de Proyectos de Investigación relacionados con desafíos actuales.**

A t e n t a m e n t e

"Casa abierta al tiempo"



DR. RODOLFO VÁZQUEZ RODRÍGUEZ
Jefe del Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica

Ferrocarril San Rafael Atlixco No. 186, Col. Leyes de Reforma 1ª. Sección, C.P. 09310, Iztapalapa, CDMX.

Tel. [REDACTED] Email: [REDACTED]@xanum.uam.mx

Proyecto de investigación para ser evaluado y registrado ante Consejo
Divisional de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la UAM-I:

Desarrollo de un sistema de fotobiorreactores para los procesos
acoplados de mitigación de CO₂ y producción de carotenoides por
microalgas, con aplicación acuícola sustentable.

Presenta:

Dr. Hugo Joaquín Ávila Paredes (responsable técnico)

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa

Ciudad de México, 22 de julio de 2024

Desarrollo de un sistema de fotobiorreactores para los procesos acoplados de mitigación de CO₂ y producción de carotenoides por microalgas, con aplicación acuícola sustentable.

Resumen

El presente proyecto de investigación fue evaluado y obtuvo financiamiento de Rectoría General de la UAM, en el marco de la convocatoria para la postulación de proyectos de investigación relacionados con desafíos actuales.

En este proyecto se propone diseñar, construir y evaluar el desempeño de un sistema de fotobiorreactores que permita acoplar el uso de efluentes gaseosos que contengan CO₂ para lograr su mitigación mediante el cultivo de microalgas y además, producir carotenoides. Los carotenoides son pigmentos de alto valor comercial y con aplicaciones en productos alimenticios, nutraceuticos y acuicolas, por sus propiedades de color y antioxidantes. Se propone también evaluar el efecto en el crecimiento de truchas o camarones de los carotenoides producidos por microalgas, al incorporarlos en la dieta de los primeros, así como determinar la concentración acumulada de carotenoides en el tejido muscular de las truchas o camarones y su apariencia. Generalmente, la coloración de los carotenoides al incorporarse en el tejido muscular de truchas o camarones, mejora su apariencia, dándole un valor agregado como producto para el consumidor.

Palabras clave

Mitigación de CO₂, fotobiorreactores, microalgas, carotenoides, acuicultura.

Participantes

➤ Dr. Hugo Joaquín Ávila Paredes

Área de Ingeniería Química, Depto. de Ing. de Procesos e Hidráulica, CBI, UAM-I.

Número económico: 29449

Actividades y contribución: Coordinación del proyecto (responsable técnico), asesoría en cultivo de microalgas para producción de carotenoides, diseño de experimentos en las distintas etapas, análisis de resultados, preparación de artículos especializados, participación en eventos de difusión y de divulgación de resultados, elaboración de reportes técnicos, búsqueda de financiamientos externos.

Tiempo de dedicación: 10 h/semana.

➤ M.C. Miguel Sergio Hernández Jiménez

Depto. de Procesos y Tecnología, CNI, UAM-C.

Número económico: 20971

Actividades y contribución: Diseño y supervisión en la construcción de los módulos así como evaluación y desempeño del sistema de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas, para determinar las condiciones adecuadas de cultivo de distintas especies de microalgas. Asesoría a alumnos, diseño de experimentos en las distintas etapas, análisis de resultados, preparación de artículos especializados, participación en eventos de difusión y de divulgación de resultados, elaboración de reportes técnicos.

Tiempo de dedicación: 5 h/semana.

➤ Dr. Gerardo Figueroa Lucero

Depto. de Hidrobiología, CBS, UAM-I.

Número económico: 35024

Actividades y contribución: Determinación de condiciones y cultivo de truchas o camarones, formulación de producto alimenticio con carotenoides y evaluación de efectos de la incorporación de carotenoides en la dieta de truchas o camarones. Asesoría a alumnos, diseño de experimentos, análisis de resultados, preparación de artículos especializados, participación en eventos de difusión y de divulgación de resultados, elaboración de reportes técnicos.

Tiempo de dedicación: 5 h/semana.

➤ Dra. Ariadna Alicia Morales Pérez

Área de Ingeniería Química, Depto. de Ing. de Procesos e Hidráulica, CBI, UAM-I.

Número económico: 25750

Actividades y contribución: Con su grupo de investigación (Laboratorio de Análisis del Agua) realizará análisis de la calidad del agua utilizada para los cultivos de microalgas y de truchas o camarones y del agua después del uso en el proceso.

Tiempo de dedicación: 2 h/semana.

➤ M.C. Eduardo Martínez Niño

Alumno de doctorado en Ingeniería Química, CBI, UAM-I.

Matrícula: 2202800139

Actividades y contribución: Participación en actividades experimentales de conservación, mantenimiento, escalamiento de cepas de microalgas; diseño y construcción de sistemas experimentales de fotobiorreactores; separación (extracción) y análisis (identificación y cuantificación) de carotenoides; evaluación de productividades de biomasa y de carotenoides, así como de tolerancia de CO₂ por cepas de microalgas. Diseño de experimentos en las distintas etapas, análisis de resultados, preparación de artículos especializados, participación en eventos de difusión y de divulgación de resultados.

Tiempo de dedicación: 40 h/semana.

➤ M.C. Luis Ángel Castillo Cruz

Alumno de doctorado en Ingeniería Química, CBI, UAM-I.

Matrícula: 2173802109

Actividades y contribución: Participación en actividades experimentales de conservación, mantenimiento, escalamiento de cepas de microalgas; diseño y construcción de sistemas experimentales de fotobiorreactores; separación (extracción) y análisis (identificación y cuantificación) de carotenoides; evaluación de productividades de biomasa y de carotenoides, así como de tolerancia de CO₂ por cepas de microalgas. Diseño de experimentos en las distintas etapas, análisis de resultados, preparación de artículos especializados, participación en eventos de difusión y de divulgación de resultados.

Tiempo de dedicación: 40 h/semana.

➤ I. Q. Luis Ángel Rodríguez Olivares

Alumno de maestría en Ingeniería Química, CBI, UAM-I.

Matrícula: 2231801542

Actividades y contribución: Participación en actividades experimentales de conservación, mantenimiento, escalamiento de cepas de microalgas; diseño y construcción de sistemas experimentales de fotobiorreactores; separación (extracción) y análisis (identificación y cuantificación) de carotenoides; evaluación de productividades de biomasa y de carotenoides, así como de tolerancia de CO₂ por cepas de microalgas; evaluación de concentración de carotenoides acumulados en tejido muscular de truchas o camarones. Análisis de impactos ambientales, de acuerdo con metodología de Análisis de Ciclo de Vida, del proceso propuesto. Diseño de experimentos en las distintas etapas, análisis de resultados, preparación de artículos especializados, participación en eventos de difusión y de divulgación de resultados.

Tiempo de dedicación: 40 h/semana.

➤ Arlette Casillas Santamaría, Alan Campos Domínguez y Jorge Alberto López Ambrosio.

Alumnos de la licenciatura en Ingeniería Química, CBI, UAM-I.

Matrículas: 2173048329, 2173048294, 2173047395.

Actividades y contribución: Realización del proyecto terminal “Diseño de un proceso de producción de carotenoides provenientes de microalgas” (trimestres 23O, 24I, 24P). Evaluación de productividades de biomasa y de carotenoides y determinación de condiciones de extracción de carotenoides.

Tiempo de dedicación: 10 h/semana.

➤ Rebeca Vazquez Munive

Alumna de la licenciatura en Ingeniería Química, CBI, UAM-I.

Matrícula: 2133013066.

Actividades y contribución: Realización del proyecto de servicio social “Determinación de condiciones de cultivo para inducir la carotenogénesis en microalgas encapsuladas en alginato” (marzo-agosto 2024). Evaluación de

productividades de biomasa y de carotenoides de microalgas encapsuladas en alginato.

Tiempo de dedicación: 20 h/semana.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar el desempeño de un sistema de fotobiorreactores para acoplar la mitigación de CO₂ de un efluente gaseoso con la producción de carotenoides por microalgas. Evaluar el efecto de la incorporación de carotenoides en la dieta de truchas o camarones en el crecimiento y apariencia de tejido muscular.

Objetivos particulares

Seleccionar una cepa de microalga productora de carotenoides para su utilización.

Determinar límites de tolerancia de CO₂ de la cepa de microalgas.

Diseñar y construir un sistema de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas para producir biomasa y para inducir la síntesis y acumulación de carotenoides.

Evaluar el desempeño de fotobiorreactores en términos de la mitigación de CO₂ y de las productividades de biomasa y carotenoides.

Evaluar el efecto de la ingesta de carotenoides por truchas o camarones en su crecimiento y en la apariencia del tejido muscular.

Realizar un análisis de impactos ambientales del proceso.

Antecedentes

Alrededor del 20% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero provienen de la industria y 25%, de la producción de electricidad y de dichas emisiones, cerca del 65% son de dióxido de carbono [1]. Por las implicaciones sobre el calentamiento global, resulta de suma importancia desarrollar acciones y procesos para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero. En el presente proyecto, se plantea el desarrollo de un sistema modular de fotobiorreactores para cultivo de microalgas en que sea posible utilizar el CO₂ como fuente de carbono de las microalgas, con lo que se contribuirá a la mitigación de las correspondientes emisiones.

Por otra parte, los carotenoides son productos de alto valor agregado, con amplias aplicaciones por sus propiedades antioxidantes y como pigmentos (con color amarillo, naranja, rojo), en los sectores industriales de alimentos, nutracéuticos y

acuícola. Si bien, los carotenoides pueden obtenerse de manera sintética y a partir de plantas, su obtención a partir de microalgas tiene ventajas como mayor actividad antioxidante y el cultivo de microalgas requiere menor extensión territorial respecto a plantas [2]. Así se considera que la producción de carotenoides por microalgas es una opción más sustentable. El cultivo de microalgas se realiza en 2 etapas: una para producir biomasa, en la que se utiliza el CO₂ como fuente de carbono y otra, en que se cambian las condiciones de cultivo (se incrementa la intensidad luminosa y pueden añadirse sales) para promover la síntesis y acumulación de carotenoides por las microalgas [3].

Dependiendo del uso final, las microalgas se cosechan y pueden extraerse los carotenoides. En este proyecto se considera la utilización en un proceso acuícola: incluirse en la dieta de truchas o camarones para mejorar la salud de los mismos (y la de los consumidores correspondientes), así como el aspecto, ya que los carotenoides al acumularse en el tejido muscular de las truchas o camarones, produce una mejor apariencia (color más atractivo) para el consumidor [4-5]. Cabe mencionar también que el cultivo de truchas o camarones también se encuentra en el ámbito de la sustentabilidad, en el sentido de utilizarlos como fuentes renovables de alimentos, para así evitar contribuir a la sobreexplotación de estos recursos directamente de ecosistemas naturales.

Desde 2016, en el grupo de investigación a cargo del Dr. Hugo Joaquín Ávila Paredes (Laboratory of Alternative Energy Sources and Systems, LAESS, UAM-I) se empezaron estudios relacionados con el cultivo de microalgas productoras de carotenoides, para determinar propiedades ópticas, útiles en el diseño de fotobiorreactores, en colaboración con el Dr. Patricio J. Valadés Pelayo (IER-UNAM). Se ha logrado cultivar distintas cepas a escala laboratorio y se ha logrado la síntesis y acumulación de carotenoides; actualmente se cuenta con cepas de *Chorella vulgaris*, *Coelastrella* sp., *Coelastrella striolata*, *Scenedesmus* sp., *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis* (Tabla 1). Se han diseñado fotobiorreactores de columna de burbujeo y tipo air-lift con capacidades menores a 5 L. El presente proyecto brindará la oportunidad de colaborar con el grupo de investigación del M.C. Miguel Sergio Hernández Jiménez (UAM-C) para realizar el escalamiento del proceso del cultivo de microalgas que acople la mitigación de CO₂ y la producción de carotenoides por microalgas. Por otra parte, también se podrá colaborar con el grupo de investigación del Dr. Gerardo Figueroa Lucero, experto en el área de manejo integral de recursos acuáticos (planta experimental de producción acuícola, UAM-I), al evaluar el efecto de la incorporación de carotenoides en la dieta, en el crecimiento de truchas juveniles o camarones y la acumulación en el tejido muscular tal que mejore su apariencia para el consumidor.

Tabla 1. Cepas de microalgas existentes en LAESS.

Cepa	Principal carotenoide producido
<i>Chlorella vulgaris</i> UTEX 2714	Astaxantina
<i>Coelastrella</i> sp. UTEX B 306	β -caroteno y astaxantina
<i>Coelastrella striolata</i>	β -caroteno y astaxantina
<i>Scendesmus</i> sp. UTEX 1591	Luteína
<i>Dunaliella salina</i> UTEX LB200	β -caroteno
<i>Haematococcus pluvialis</i> UTEX 2505	Astaxantina

En febrero de 2024 se realizó el pre-registro del presente proyecto y en marzo, el registro del proyecto en el marco de la convocatoria para la postulación de proyectos de investigación relacionados con desafíos actuales. En mayo de 2024 se conocieron los resultados de la convocatoria: el proyecto obtuvo financiamiento de Rectoría General de la UAM por un monto de \$500,000.00 pesos, para desarrollarse en un periodo de 24 meses.

Descripción

Se propone diseñar, construir y evaluar el desempeño de un sistema de fotobiorreactores que permita acoplar el uso de efluentes gaseosos que contengan CO₂ para lograr su mitigación mediante el cultivo de microalgas y además, producir carotenoides. Se propone también evaluar el efecto en el crecimiento de truchas o camarones de los carotenoides producidos por microalgas, al incorporarlos en la dieta de los primeros, así como determinar la concentración acumulada de carotenoides en el tejido muscular de las truchas o camarones y su apariencia. Para realizar lo anterior se han propuesto las siguientes etapas:

1. Escalamiento de cultivo de microalgas.

Se seleccionará un par de cepas de microalgas productoras de carotenoides, de las existentes en LAESS (Tabla 1), con base en la productividad de biomasa en los fotobiorreactores actuales (escala laboratorio). Se determinarán condiciones de cultivo que permitan asegurar reproducibilidad en la producción de carotenoides; la carotenogénesis se induce mediante aumento de salinidad del medio de cultivo y aumento en intensidad luminosa [6-10]. Se realizará el escalamiento de los cultivos para tener suficiente biomasa para inocular el sistema de fotobiorreactores. Se realizará la extracción, identificación y cuantificación de los carotenoides (cromatografía de líquidos de alta eficacia acoplada a espectrometría de masas).

2. Evaluación (escala laboratorio) de tolerancia al CO₂ y su asimilación por las cepas de microalgas.

Se diseñarán los sistemas experimentales y se determinarán los límites de tolerancia al CO₂ de las cepas de microalgas seleccionadas, así como su asimilación

y las productividades de biomasa correspondientes, en sistemas de cultivo menores a 1 L.

3. Selección de una cepa de microalgas.

Con base en los resultados que se obtengan respecto a tolerancia al CO₂, productividades de biomasa y carotenoides, se seleccionará una cepa para evaluar el desempeño del sistema de fotobiorreactores a escala banco (capacidad entre 10 y 20 L).

4. Diseño, fabricación y evaluación del desempeño de módulos del sistema de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas.

El sistema de fotobiorreactores estará compuesto por 2 módulos y tendrá una capacidad entre 10 y 20 L de cultivo. Uno de los módulos se utilizará para cultivar las microalgas y aumentar la cantidad de biomasa; en éste se alimentará una corriente gaseosa que contenga CO₂ (a la concentración determinada a nivel laboratorio como la adecuada). El segundo módulo se utilizará para que las microalgas se cultiven en condiciones distintas (mayor intensidad luminosa y con sales como cloruro de sodio o cloruro de magnesio), de manera que se promueva la síntesis y acumulación de los carotenoides en las microalgas. Se diseñarán los fotobiorreactores tipo air lift, ya que estos tienen la ventaja de que el gas suministrado permite mantener en suspensión a las microalgas, lo que evita la necesidad de agitación o mezclado mecánico. Se realizará la puesta en marcha, pruebas hidrodinámicas, adaptaciones o modificaciones. Se evaluará el desempeño de los módulos respecto a la mitigación de CO₂ y las productividades de biomasa y de carotenoides (posterior a su extracción). Se analizará la calidad del agua utilizada y después de uso en este proceso.

5. Utilización y evaluación de los carotenoides obtenidos en el cultivo de truchas o camarones al incorporarlos en su dieta.

Se realizará la extracción y secado de los carotenoides de la biomasa microalgal, se formularán dos opciones de producto alimenticio que incorpore los carotenoides para las truchas o camarones: a) con carotenoides extraídos y b) con microalgas que contienen carotenoides). Se seleccionará una especie de trucha o camarón. Se prepararán los sistemas de cultivo. Se determinará la etapa de vida y duración adecuadas para suministrar el alimento con carotenoides a las truchas o camarones. Se evaluará el efecto de la ingesta de carotenoides en el crecimiento de truchas o camarones (diferenciados por sexo) y en la cantidad acumulada de carotenoides en el tejido muscular. Se determinará si hay una concentración óptima de carotenoides para lograr una apariencia mejorada del tejido muscular (y su correlación con el color), en función del periodo en que se suministran los carotenoides durante el cultivo de truchas o camarones. Se analizará la calidad del agua utilizada y después de uso en este proceso.

6. Evaluación de impactos ambientales por el proceso.

Se hará un análisis de impactos ambientales por el proceso desarrollado, en sus distintas etapas.

Recursos e infraestructura disponibles en laboratorio T-166

- 1 autoclave (esterilizador) de 24 L.
- 1 campana de flujo laminar,
- 2 agitadores orbitales con capacidad para 20 matraces Erlenmeyer de 250 mL y control de temperatura.
- 1 distribuidor de gas (aire) con 10 salidas.
- 1 distribuidor de gas (CO₂) con 10 salidas.
- 1 compresor de aire.
- 3 muebles construidos con vitrinas, con iluminación para almacenamiento de microalgas en conservación (cepario).
- Cepas de microalgas: *Chorella vulgaris*, *Coelastrella* sp., *Coelastrella striolata*, *Scenedesmus* sp., *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis*
- Sistema para medición de propiedades ópticas de cultivo (fabricación propia). El Dr. Carlos Omar Castillo Araiza tiene bajo su resguardo un espectroradiómetro, que presta a nuestro grupo de investigación y se adapta al sistema.
- 2 fotómetros portátiles con intervalo de absorbancia de 0 a 2.0, marca Texas ET2020.
- 1 mufla (temperatura máxima de 1000 °C) para secado de muestras.
- 6 parrillas de agitación con calentamiento.
- 2 micropipetas digitales con capacidad de 1000 a 10,000 µL.
- 1 medidor de intensidad de luz (máximo 400,000 luxes).
- 2 rotámetros para aire y CO₂.
- 1 tanque de CO₂.
- 1 medidor de pH.
- 1 refrigerador vertical para conservación de muestras.
- 1 centrifuga para tubos de 50 mL.
- 1 centrifuga para tubos eppendorf de 2 mL.

- 1 microscopio triocular con cámara digital.
- 1 espectrofotómetro UV-Vis.
- Cristalería: tubos de ensayo; matraces Erlenmeyer de 250 mL, 500mL; botellas cilíndricas para cultivos de 500, 1000 y 2000 mL.
- 1 fotobiorreactor de columna de burbujeo (de vidrio; fabricación propia) de 1 L.
- 2 fotobiorreactores tipo airlift (de acrílico; fabricación propia) de 4.5 L.

Fuentes de financiamiento

Se obtuvo financiamiento de Rectoría General de la UAM (convocatoria para la postulación de proyectos de investigación relacionados con desafíos actuales) por un monto de \$500,000.00 pesos, para el desarrollo del proyecto en un periodo de 24 meses.

Conforme se avance en el proyecto y se evalúen los resultados, se solicitará financiamiento de otras fuentes. Se buscarán posibles fuentes en la base de datos Pivot, recientemente adquirida por la UAM.

Indicadores de desempeño

- Prototipo de sistema modular escala banco de fotobiorreactores para acoplar la mitigación de CO₂ con la producción de carotenoides por microalgas. Patente del prototipo.
- Producto alimenticio, formulado con carotenoides, para peces o camarones.
- Artículos científicos en revistas indexadas internacionales sobre los resultados obtenidos en los experimentos a nivel laboratorio, así como la evaluación del prototipo de sistema de fotobiorreactores y la aplicación y evaluación de los carotenoides en el cultivo de truchas y camarones. Mínimo 2 artículos.
- Formación de recursos humanos: alumnos de licenciatura y posgrado podrán desarrollar proyectos de servicio social, proyectos terminales y tesis. Actualmente hay 3 alumnos del posgrado en Ingeniería Química, 3 alumnos de licenciatura en Ingeniería Química que desarrollan su proyecto terminal y 1 alumna de licenciatura en Ingeniería Química en proyecto de servicio social, que participarán en este proyecto. Se fomentará la inclusión de más alumnos de distintas disciplinas, y Unidades de la UAM, en el proyecto, especialmente para la etapa de cultivo de truchas o camarones. La naturaleza del presente proyecto y sus alcances permitirá enriquecer la formación de los alumnos participantes, con alta calidad (especialización).

- Vinculación con egresados. Si bien al momento de elaborar la presente propuesta, no se cuenta con egresados como participantes, es posible que se logre la incorporación de estos más adelante.

Fecha de inicio, duración y planeación a 2 años

Inicio: En mayo de 2024 se conocieron los resultados de la convocatoria UAM para la postulación de proyectos de investigación relacionados con desafíos actuales. Se inició el proyecto en la última semana de mayo de 2024.

Duración: 2 años, dado el financiamiento obtenido.

Planeación:

Cronograma de actividades

Actividades	Meses																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Escalamiento de cultivos de microalgas	█	█	█	█	█	█																		
Evaluación de tolerancia al CO ₂	█	█	█	█	█	█																		
Diseño y fabricación de módulos de fotobiorreactores	█	█	█	█	█	█																		
Evaluación de desempeño de sistema de fotobiorreactores					█	█	█	█	█	█	█	█												
Elaboración de informe anual											█	█												
Preparación de artículo especializado sobre desempeño de												█	█	█										

Nota: la participación en eventos de difusión y divulgación científica se realizará en función de la obtención de resultados de los distintos estudios y de las fechas en que se realicen simposios, congresos, etc. No se han indicado en el cronograma, pero se fomentará la participación de todos los involucrados en el presente proyecto.

Referencias

- [1] Global greenhouse gas emissions data, <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>, consultado enero 2024.
- [2] Ren Y., Sun H., Deng J., Huang J., Chen F. Carotenoid production from microalgae: biosynthesis, salinity responses and novel biotechnologies. *Marine drugs*, 19 (713), 1-21, 2021.
- [3] Shi T. Q., Wang L. R., Zhang Z. X., Sun X. M. y Huang, H. Stresses as first-line tools for enhancing lipid and carotenoid production in microalgae. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 8, 610, 2020
- [4] Nakano T., Wiegertjes G. Properties of carotenoids in fish fitness: A Review. *Marine drugs*, 18 (0568), 1-17, 2020.
- [5] Pererira da Costa D., Campos Miranda-Fihlo K. The use of carotenoids pigments as food additives for aquatic organisms and their functional roles. *Reviews in Aquaculture*, 12, 1567-1578, 2020.
- [6] Ali H. E. A., El-fayoumy E. A., Rasmy W. E., Soliman R. M., y Abdullah M. A. Two-stage cultivation of *Chlorella vulgaris* using light and salt stress conditions for simultaneous production of lipid, carotenoids, and antioxidants. *Journal of Applied Phycology*, 33(1), 227–239, 2021.
- [7] Abe K., Hattori H. y Hirano M. Accumulation and antioxidant activity of secondary carotenoids in the aerial microalga *Coelastrella striolata* var. *multistriata*. *Food Chemistry*, 100(2), 656–661, 2007.
- [8] Saeki K., Aburai N., Aratani S., Miyashita H. y Abe K. Salt-stress and plant hormone-like responses for selective reactions of esterified xanthophylls in the aerial microalga *Coelastrella* sp. KGU-Y002. *Journal Applied Phycology*, 29(1), 115–122, 2017.
- [9] Elloumi W., Jebali A., Maalej A., Chamkha M. y Sayadi S. Effect of mild salinity stress on the growth, fatty acid and carotenoid compositions, and biological activities of the thermal freshwater microalgae *Scenedesmus* sp. *Biomolecules*, 10(11), 1–17, 2020.
- [10] Borowitzka, M. A., Borowitzka, L. J., & Kessly, D. Effects of salinity increase on carotenoid accumulation in the green alga *Dunaliella salina*. *Journal of applied Phycology*, 2, 111-119, 1990.