



CRHIAM

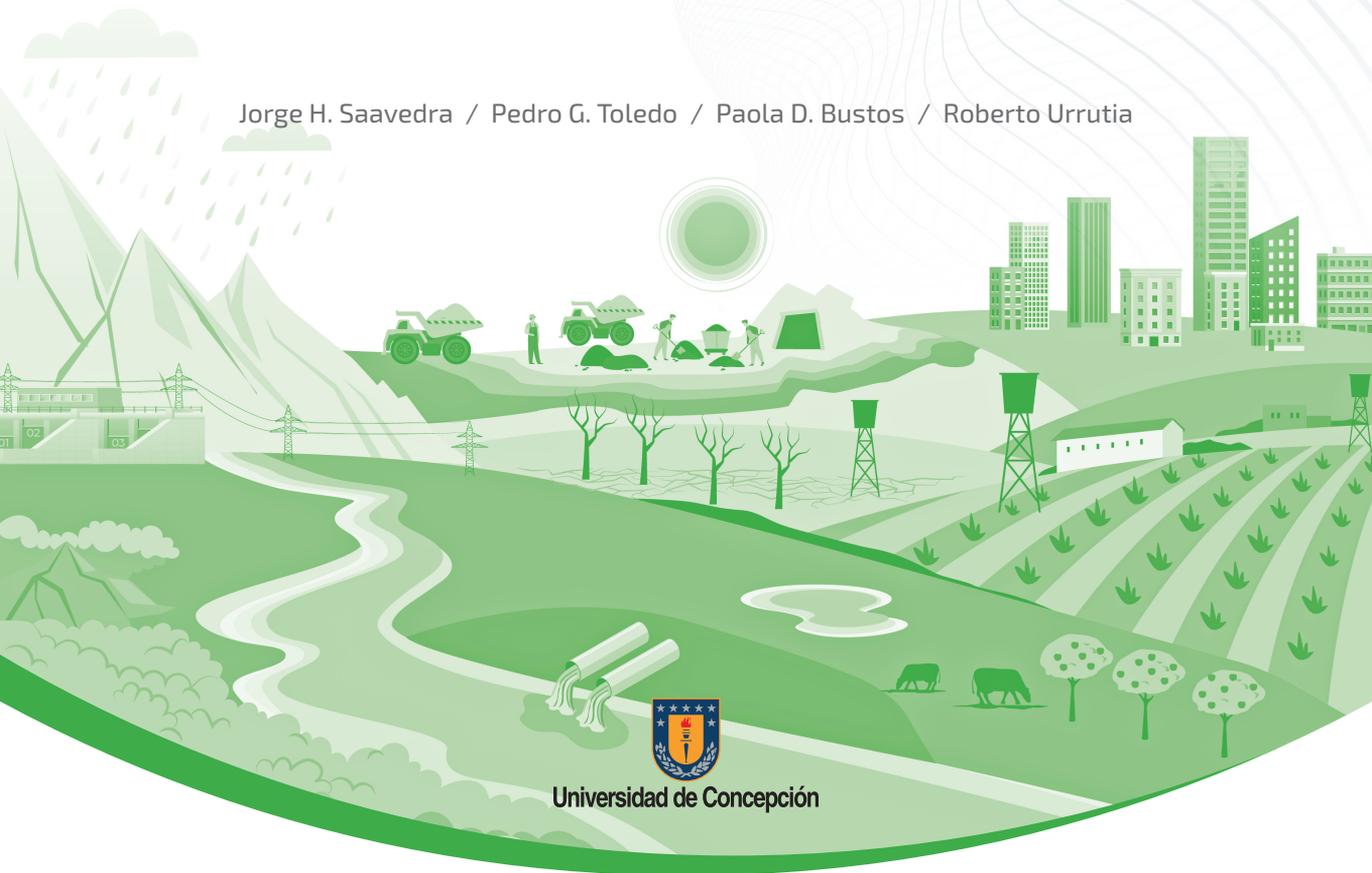
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

MICROALGAS: PEQUEÑAS AUNQUE PODEROSAS EN EL AGUA

Jorge H. Saavedra / Pedro G. Toledo / Paola D. Bustos / Roberto Urrutia



Universidad de Concepción

Serie Comunicacional CRHIAM

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Microalgas: pequeñas aunque poderosas en el agua.

Jorge H. Saavedra, Pedro G. Toledo, Paola D. Bustos
y Roberto Urrutia.

Abril 2024.

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

MICROALGAS: PEQUEÑAS AUNQUE PODEROSAS EN EL AGUA

Jorge H. Saavedra / Pedro G. Toledo / Paola D. Bustos / Roberto Urrutia



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU- Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Jorge H. Saavedra

Ingeniero Civil Químico, Universidad de Concepción.
Doctor en Ciencias de la Ingeniería con mención
en Ingeniería Química, Universidad de Concepción.
Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería
en Maderas, Universidad del Bío Bío.
Colaborador CRHIAM.



Pedro G. Toledo

Ingeniero Civil Químico,
Universidad de Concepción.
Doctor of Philosophy in Chemical Engineering,
University of Minnesota,
Estados Unidos.
Ex Investigador Principal y Subdirector CRHIAM.



Paola D. Bustos

Ingeniero Civil Químico, Universidad de Concepción.
Doctor en Ciencias de la Ingeniería con mención
en Ingeniería Química, Universidad de Concepción.
Profesora Asistente del Departamento de Ingeniería
en Maderas, Universidad del Bío Bío.



Roberto Urrutia

Biólogo, Universidad de Concepción.
Doctor en Ciencias Ambientales, Universidad de Concepción.
Profesor Titular, Facultad de Ciencias Ambientales,
Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.

RESUMEN

Las microalgas, diminutas pero poderosas habitantes del mundo acuático, son mucho más que simples organismos. Esta Serie Comunicacional introduce al fascinante mundo de las microalgas, destacando su importancia ecológica y su creciente relevancia en diversas industrias. A través de una exploración de su historia, evolución y las numerosas aplicaciones en campos tan diversos como la alimentación, la agricultura, el tratamiento de aguas y la producción de energía, mostramos el potencial de estas pequeñas gigantes en el agua. Además, examinamos las prometedoras posibilidades que se están investigando actualmente, incluyendo la producción de biomateriales, fármacos, hidrógeno y biorrefinerías, así como su rol en la captura de dióxido de carbono (CO₂), que es esencial para enfrentar desafíos ambientales globales. A pesar de sus prometedoras aplicaciones, también abordamos las limitaciones técnicas y los desafíos de sostenibilidad en la producción masiva de microalgas. Finalmente, presentamos un caso de estudio sobre las contribuciones innovadoras del Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM), poniendo en contexto nuestra investigación y los esfuerzos colaborativos para aprovechar el poder de las microalgas en beneficio de un futuro más sostenible.

INTRODUCCIÓN

Las algas son organismos fotosintéticos que crecen en una variedad de hábitats acuáticos, incluidos lagos, estanques, ríos, océanos e incluso aguas residuales. Pueden tolerar una amplia gama de condiciones ambientales pudiendo crecer de forma aislada o en simbiosis con otros organismos (Luna, 2007; Daneshvar *et al.*, 2021). Las algas se clasifican en términos generales como *Rhodophyta* (algas rojas), *Phaeophyta* (algas pardas) y *Chlorophyta* (algas verdes) y de acuerdo al tamaño como macroalgas o microalgas. Las macroalgas (algas marinas) son algas multicelulares de gran tamaño, visibles a simple vista, mientras que las microalgas son células microscópicas individuales y pueden ser procariotas, similares a las cianobacterias (*Chloroxybacteria*), o eucariotas, similares a las algas verdes o las diatomeas (*Bacillariophyceae*) (Khan *et al.*, 2018).

Las microalgas eucariotas unicelulares de considerable diversidad y capacidad adaptativa, representan un campo fascinante en la ciencia y la biotecnología. Con tamaños que varían entre 2 y 50 micrómetros (Bermejo *et al.*, 2021), estas células microscópicas (ver Figura 1) se encuentran tanto en hábitats acuáticos como en suelos y cortezas de árboles (González, 2015; Daneshvar *et al.*, 2021; Bermejo *et al.*, 2021), mostrando una notable capacidad para crecer en una amplia gama de condiciones ambientales, incluyendo diferentes intensidades de luz y una variedad de temperaturas y salinidades (Khan *et al.*, 2018; Onen-Cinar *et al.*, 2020).

Estos organismos contienen clorofila y otros pigmentos, facilitando la fotosíntesis, un proceso que les permite absorber energía luminosa y convertirla en energía química, contribuyendo significativamente a la producción de oxígeno y al secuestro de CO₂ (Luna, 2007; Lemushkero *et al.*, 2018).

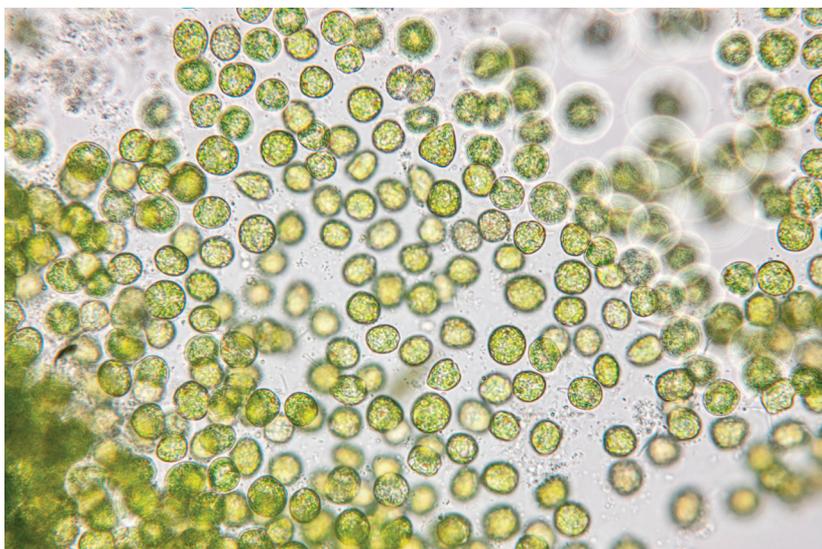


Figura 1.

Chlorella bajo el microscopio. Fuente: Adobe Stock, (2024).

La composición de las microalgas es rica y variada, incluyendo lípidos (7–23%), carbohidratos (5–23%) y proteínas (6–52%), junto con minerales como calcio, magnesio, fósforo, potasio, sodio, azufre, cobre, hierro, manganeso, selenio y zinc (Onen Cinar *et al.*, 2020).

La nutrición en estos microorganismos, así como la obtención de energía puede presentar diversas formas, lo cual se puede observar en la Figura 2. En este sentido, hay microalgas que son altamente eficientes en la fijación del CO₂ y utilizan la energía solar para producir biomasa mediante el proceso de la fotosíntesis (autótrofas) mientras que hay otras que se alimentan exclusivamente de fuentes orgánicas de carbono (heterótrofas). También hay algunas especies capaces de utilizar ambos tipos de fuentes de carbono (mixotróficas). Con relación a la fuente de energía necesaria para realizar las funciones metabólicas, las microalgas se dividen en dos grupos, aquellas que requieren de luz solar (fotoautótrofas) y aquellas que no la requieren pudiendo crecer en la oscuridad, transformando la energía brindada por fuentes orgánicas de carbono en energía química para sus procesos vitales (Luna, 2007; Daneshvar, 2021).

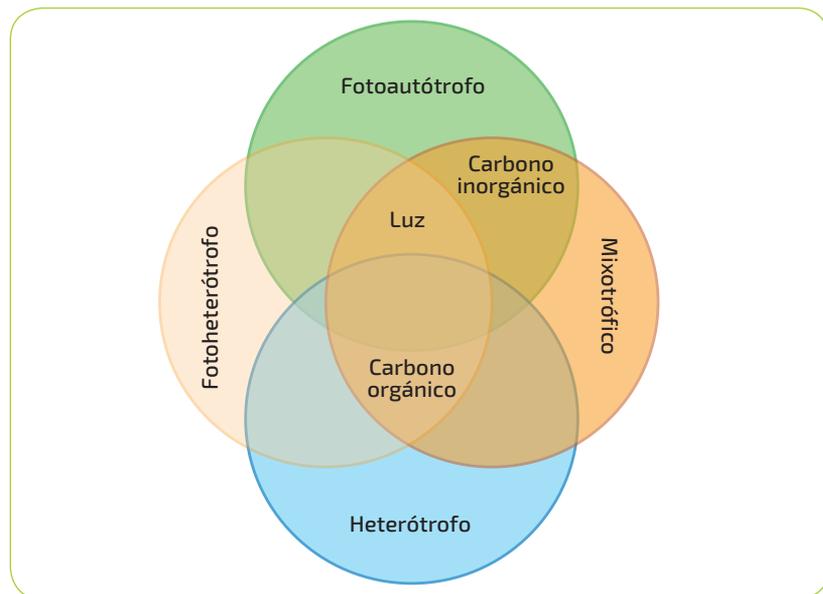


Figura 2.

Requerimientos de luz y fuentes de carbono para el cultivo fotoautótrofo, heterótrofo, mixotrófico y fotoheterótrofo de microalgas.

Fuente: Adaptado de Daneshvar *et al.*, (2021).

El estudio de las microalgas tiene una rica historia. Desde los trabajos pioneros de Otto Warburg en la década de 1930 sobre la fotosíntesis hasta su uso en la producción de lípidos durante la Segunda Guerra Mundial, estos microorganismos han sido fundamentales en la investigación científica y los desarrollos biotecnológicos. Su aplicación se ha expandido, incluyendo la nutrición, el tratamiento de aguas residuales y la producción de energía renovable (Khan *et al.*, 2018; Jimenez-Llanos *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2023).

Hoy en día, las microalgas se valoran por su capacidad para generar bioproductos de alto valor, incluyendo polisacáridos, lípidos, proteínas, vitaminas y antioxidantes (D'Alessandro y Antoniosi, 2016). La biotecnología algal ha avanzado, facilitando la modificación de su composición bioquímica y mejorando la eficiencia en la producción de biomasa y bioproductos (Daneshvar *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2021). Además, la ingeniería genética se está empleando para mejorar su potencial como fuente de bioproductos renovables (Orejuela-Escobar *et al.*, 2021; Zhu *et al.*, 2023).

La biodiversidad de las microalgas es vasta, con más de cincuenta mil especies identificadas, de las cuales solo treinta mil han sido estudiadas (Bermejo *et al.*, 2021). Esta riqueza inexplorada ofrece un potencial significativo para aplicaciones futuras en la industria y la sostenibilidad ambiental. Con cada nuevo descubrimiento, las microalgas se consolidan como una solución prometedora para enfrentar desafíos ambientales y energéticos a nivel mundial, abriendo caminos para investigaciones y aplicaciones prácticas innovadoras.

APLICACIONES

Las microalgas, organismos diminutos pero poderosos, juegan un papel crucial en una amplia gama de aplicaciones, abarcando desde la nutrición y la cosmética hasta la producción de energía y el tratamiento de aguas. Su capacidad para ofrecer soluciones sostenibles y ecológicas las convierte en un recurso valioso en diversos campos, impulsando innovaciones y avances tecnológicos hacia un futuro más verde y sostenible.

Nutrición humana y animal

Las microalgas presentan un gran potencial en las áreas de nutrición humana y animal, mejorando el valor nutricional de alimentos y piensos (alimento

para el ganado) debido a su composición química que incluye proteínas, vitaminas y minerales. Se comercializan en diversas formas, como tabletas, cápsulas, líquidos, y pueden incorporarse en pastas, snacks, barras de dulces, gomitas y bebidas (ver Figura 3). Además, actúan como suplementos nutricionales y como colorantes naturales en alimentos (Spolaore *et al.*, 2006).



Figura 3.

Spirulina en polvo y cápsulas. Fuente: Adobe Stock, (2024).

En nutrición humana, microalgas como *Arthrospira sp.*, *Chlorella sp.* y *Dunaliella salina* son particularmente notables por su alto valor nutritivo (Spolaore *et al.*, 2006). *Chlorella sp.* es producida por numerosas empresas y se vende como un alimento saludable o suplemento dietético. Se han descrito varios efectos terapéuticos potenciales de *Chlorella*, incluyendo la eficacia en úlceras gástricas, heridas, estreñimiento, prevención de aterosclerosis e hipercolesterolemia, y actividad antitumoral. *Spirulina sp.* (*Arthrospira sp.*) se utiliza en nutrición humana por su alto contenido de proteínas y valor nutricional (Milledge, 2011). Las microalgas están siendo exploradas para el desarrollo de alimentos funcionales y nutraceuticos, ofreciendo beneficios adicionales para la salud más allá de su valor nutricional básico, para prevenir enfermedades y el mantenimiento de la salud general (Spolaore *et al.*, 2006; Milledge, 2011; Rizwan *et al.*, 2018).

En cuanto a la nutrición animal, las microalgas juegan un papel esencial en la acuicultura, particularmente en la alimentación de larvas y peces juveniles. Se usan para mejorar la calidad y el valor nutricional de los piensos, proporcionando un balance óptimo de nutrientes esenciales. En la alimentación de animales terrestres, las microalgas son incorporadas en la formulación de piensos. Su capacidad para enriquecerlos con un equilibrio adecuado de aminoácidos, ácidos grasos y micronutrientes es notable (Mata *et al.*, 2010; Priyadarshani y Rath, 2012). Esta aplicación también se extiende a las bio-refinerías, donde las microalgas son procesadas para obtener productos de alto valor, como pigmentos y compuestos bioactivos, con aplicaciones potenciales tanto en nutrición animal como humana (Chew *et al.*, 2017).

Las microalgas representan una fuente nutricional versátil y sostenible, con un creciente interés en sus aplicaciones en la nutrición humana y animal.

Cosmética

Las microalgas desempeñan un papel importante en la industria cosmética, proporcionando ingredientes activos para una variedad de productos de cuidado de la piel y del cabello. Sus propiedades antioxidantes, hidratantes y protectoras las hacen ideales para formulaciones cosméticas que buscan ofrecer beneficios tanto estéticos como de salud cutánea.

Microalgas como *Arthrospira sp.* y *Chlorella sp.* son comunes en el mercado del cuidado de la piel. Se encuentran en productos como cremas anti-envejecimiento, protectores solares y productos refrescantes, regeneradores, antiirritantes en exfoliantes y también hay productos para el cuidado del cabello (Spolaore *et al.*, 2006; Priyadarshani y Rath, 2012). Los componentes de las algas se utilizan en cosméticos por sus propiedades como espesantes, de retención de agua y antioxidantes. Estos componentes también incluyen pigmentos como la clorofila y los carotenoides, que no solo proporcionan color, sino que también tienen efectos antioxidantes beneficiosos para la piel (Priyadarshani y Rath, 2012).

Pigmentos

Los pigmentos naturales de las microalgas como los carotenoides, el betacaroteno y la astaxantina, son utilizados como colorantes naturales en alimentos humanos y de animales. También tienen aplicaciones en cosmética y relevancia nutricional y terapéutica como la provitamina A (Spolaore *et al.*, 2006; Milledge, 2011). Por ejemplo, el betacaroteno se utiliza como colorante alimentario, mejorando el color de la carne de pescado, la yema de huevo y mejorando la salud y fertilidad del ganado alimentado con grano (Priya-

darshani y Rath, 2012). Las ficobiliproteínas, presentes en ciertos tipos de microalgas, especialmente las algas rojas y cianobacterias, se utilizan como colorantes naturales en alimentos, cosméticos y productos farmacéuticos. También se utilizan en inmunología clínica o de investigación debido a sus propiedades fluorescentes altamente sensibles y potentes (Milledge, 2011). En relación a la medicina, algunos pigmentos de las microalgas, como la clorofila y los carotenoides, han demostrado ser efectivos como agentes quimiopreventivos contra el cáncer. Los pigmentos y otros componentes de las microalgas, como los ácidos grasos poliinsaturados, han mostrado potencial para reducir la inflamación, lo que sugiere su utilidad como ingredientes dietéticos para tratar enfermedades inflamatorias crónicas (Chew *et al.*, 2017).

Biocombustibles

Las microalgas son reconocidas como buenas fuentes potenciales para la producción de biocombustibles debido a su alto contenido de aceite y rápida producción de biomasa. Ofrecen ventajas como la producción de biodiésel, diesel verde, reemplazos de gasolina y bioetanol, además de otros productos (Priyadarshani y Rath, 2012). Esto las convierte en una alternativa atractiva frente al agotamiento de los combustibles fósiles y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (Odjadjare *et al.*, 2015).

Las microalgas tienen ventajas significativas sobre otros insumos para biodiésel, como su fácil cultivo, rápido crecimiento y capacidad para crecer en condiciones ambientales variadas. Requieren menos tierra que los cultivos agrícolas tradicionales, pueden ser alimentadas con aguas residuales, reduciendo la necesidad de agua fresca, y pueden usar CO₂ de gases de combustión como fuente de carbono. Sin embargo, el precio elevado de la biomasa microalgal y del biodiésel derivado representa un desafío significativo para su producción en masa (Mata *et al.*, 2010; Valverde *et al.*, 2016).

Además de biodiésel, las microalgas pueden producir otros combustibles renovables como metano, hidrógeno y etanol (Mata *et al.*, 2010). La biomasa de microalgas puede usarse como un material alternativo para la producción de bioetanol. Los procesos de pirólisis, que consisten en la descomposición de la biomasa a altas temperaturas y en condiciones de deficiencia de oxígeno, se han utilizado para la producción de bio-aceite, biogás y bio-carbón a partir de lignocelulosa, y su aplicación en la extracción de lípidos de microalgas ha demostrado tener potencial para aplicaciones a gran escala (Odjadjare *et al.*, 2015).

Las microalgas son reconocidas por su potencial como fuente de energía alternativa y como materias primas para diversos productos biotecnológicos. Aunque el uso exclusivo de microalgas como insumos energéticos no garantiza su escalabilidad y sostenibilidad económica, la coproducción de biomasa de microalgas con otras aplicaciones de biorrefinería puede compensar sus costos y mejorar su sostenibilidad (Rizwan *et al.*, 2018).

Tratamiento de aguas

Las microalgas son fundamentales para el tratamiento biológico de aguas residuales (industriales y urbanas) y se utilizan para purificar aguas de diversas fuentes, aprovechando el agua residual como sustrato para su crecimiento. Este enfoque no solo es sostenible y económico, sino que también permite la producción de biomasa microalgal, que es una fuente significativa de productos biológicos de valor agregado. Las tecnologías basadas en algas son efectivas en la fijación de compuestos inorgánicos, incluyendo dióxido de carbono y metales pesados. Las microalgas tienen una gran capacidad para absorber nutrientes inorgánicos como nitrógeno y fósforo, que son necesarios para su crecimiento. Además, las microalgas pueden ayudar a mantener el contenido de oxígeno disuelto en las aguas residuales y asistir en la reducción de patógenos y bacterias fecales presentes en las mismas (Chai *et al.*, 2021).

Las especies de microalgas utilizadas en tratamientos de aguas residuales incluyen tanto algas eucariotas como cianobacterias procariontes. Las microalgas ofrecen ventajas sobre los tratamientos convencionales, como costos operativos más bajos, menor contaminación secundaria, demanda de espacio reducida, y una utilización más eficiente de los recursos naturales. Además, producen oxígeno que es utilizado por los microbios para degradar material orgánico a dióxido de carbono y agua, reduciendo así los niveles de demanda bioquímica de oxígeno (BOD) y demanda química de oxígeno (COD) en las aguas residuales (Chai *et al.*, 2021).

Estos organismos son eficientes en la eliminación de metales pesados a través de la biosorción pasiva y activa. En la biosorción pasiva, los iones metálicos son absorbidos físicamente en la superficie celular de las microalgas, mientras que en la biosorción activa, los metales son transportados a través de la membrana celular hacia el citoplasma. Las microalgas eliminan patógenos en las aguas residuales a través de mecanismos como la competencia por nutrientes, elevación del pH y del nivel de oxígeno disuelto, adhesión y sedimentación de patógenos y toxinas algales. La fotosíntesis de las microalgas eleva las concentraciones de oxígeno en el agua, lo que es perjudicial para las bacterias fecales.

También son capaces de asimilar una amplia gama de contaminantes orgánicos, incluyendo pesticidas, a través de la biosorción y la biodegradación. Estos procesos involucran la absorción, adsorción, intercambio iónico y precipitación en la pared celular de las microalgas. Éstas se han utilizado para la eliminación de colorantes y tintes de las aguas residuales textiles. Utilizan mecanismos como la biosorción, la atracción electrostática, la complejación y la bioconversión para eliminar los colorantes. Son efectivas en la neutralización del pH de las aguas residuales, ya que tienen una gran tolerancia a altas cantidades de dióxido de carbono. La fotosíntesis de las microalgas convierte el CO_2 en productos de carbohidratos, contribuyendo a la reducción de la carga orgánica en las aguas residuales a través del metabolismo microbiano (Rizwan *et al.*, 2018; Chai *et al.*, 2021). En la Figura 4 se muestra un esquema simplificado de este proceso.

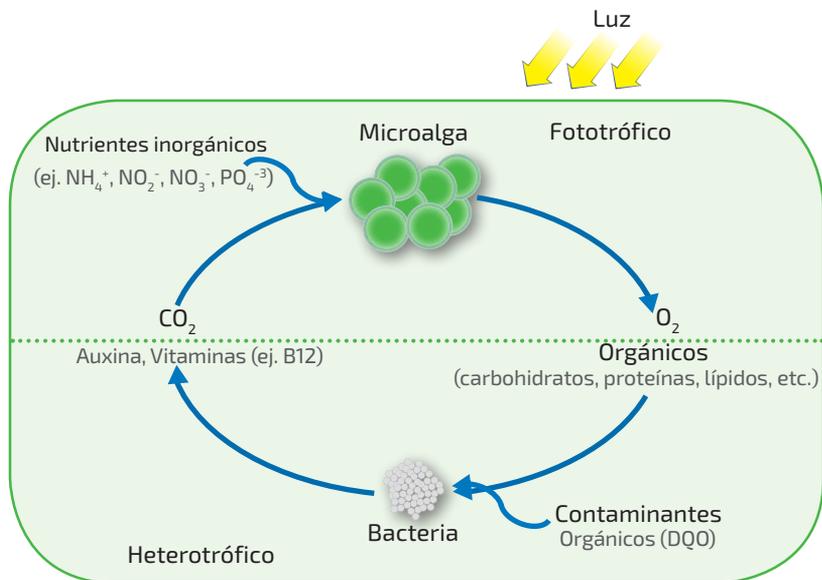


Figura 4.

Tratamiento de aguas residuales en la interacción microalga-bacteria.

Fuente: Adaptada de Chai *et al.*, (2021).

La biomasa de microalgas producida en el tratamiento de aguas residuales puede ser convertida en una variedad de bioproductos de combustible y productos químicos de valor agregado a través de procesos de biorrefinería (Rizwan *et al.*, 2018).

Agricultura

Las microalgas se utilizan en la agricultura como biofertilizantes y acondicionadores de suelo. La biomasa de microalgas puede ser convertida en syngas, bio-aceite y carbón vegetal a través de procesos de pirólisis. El biochar resultante se puede utilizar como biofertilizante y como fuente de secuestro de carbono. Este proceso no solo mejora la fertilidad del suelo, sino que también puede reducir las emisiones de dióxido de carbono. Las algas azul-verdes (cianobacterias), en particular, pueden aumentar el rendimiento de la biomasa, reducir el uso de fertilizantes nitrogenados y mejorar las propiedades físico-químicas del suelo. Además, las microalgas pueden aumentar el nitrógeno y mejorar el pH del mismo (Rizwan *et al.*, 2018).

Por ejemplo, microalgas como *Aulosira sp.*, *Anabaena sp.*, *Nostoc sp.* y *Tolypothrix sp.* son capaces de fijar nitrógeno atmosférico y se utilizan para fertilizar los cultivos de arroz. La tecnología para la producción de microalgas es relativamente simple y adaptable, lo que facilita su aplicación en la agricultura y genera ingresos adicionales a través de la venta de biofertilizantes de algas (Rizwan *et al.*, 2018).

NUEVAS POSIBILIDADES

Las microalgas poseen un gran potencial de aplicación en las industrias de energías renovables, biofarmacéutica y nutracéutica y por eso en los últimos años han despertado interés en todo el mundo. Las microalgas son renovables, sostenibles y fuentes económicas de biocombustibles, productos medicinales bioactivos e ingredientes alimentarios. De acuerdo con Khan *et al.* (2018) diversas especies de microalgas han sido investigadas por su potencial como productos de valor agregado con notables cualidades farmacológicas y biológicas. Las microalgas son muy atractivas como reemplazo de los combustibles fósiles líquidos, tanto por costo como por renovabilidad y preservación del ambiente. Las microalgas tienen una capacidad importante para convertir el CO₂ atmosférico en productos útiles como carbohidratos, lípidos y otros metabolitos bioactivos. Numerosos grupos de investigación y laboratorios trabajan intensamente para llevar las tecnologías actuales desde la fase piloto a la fase industrial. Los desafíos más importantes incluyen mejorar la tasa de crecimiento de las microalgas y síntesis de productos, deshidratación del cultivo de algas para la producción y pretratamiento de biomasa, y optimización del proceso de fermentación en el caso de la pro-

ducción de bioetanol. La Figura 5 muestra un diagrama de microalgas que convierten el CO₂ atmosférico en carbohidratos, lípidos, y otros bioproductos mediante luz. Por otro lado, la biomasa es una fuente rica de biocombustibles y compuestos bioactivos.

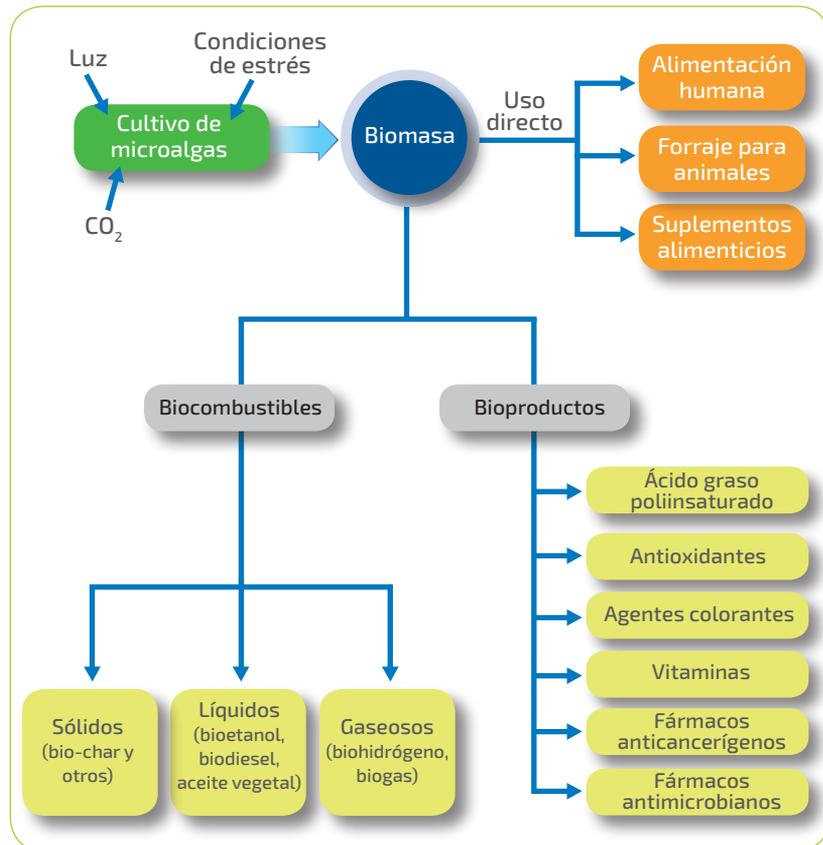


Figura 5.

Microalgas y su conversión de CO₂ a carbohidratos, lípidos y otros productos de alto valor para distintos usos y aplicaciones. Fuente: Adaptado de Khan *et al.*, (2018).

DESAFÍOS Y LIMITACIONES

Dentro de los desafíos y limitaciones más importantes en el cultivo de microalgas, encontramos la elección entre sistemas de cultivo abiertos y cerrados, la optimización de variables como la luz, la temperatura y los nutrientes. Además, la selección adecuada de especies de microalgas y el manejo de variables del proceso son cruciales para la eficiencia y viabilidad del cultivo. Finalmente, se destacan los retos asociados con el tratamiento post-cosecha de la biomasa, esenciales para la producción comercial de bioproductos.

SELECCIÓN DE SISTEMA DE CULTIVO

El campo del cultivo de microalgas, crucial para la producción de biomasa y biocombustibles, ha visto un desarrollo significativo en dos enfoques principales: cultivos abiertos y cultivos cerrados, cada uno con sus propias ventajas y limitaciones. En el caso de los cultivos abiertos, Hernández y Labbé (2014) destacan que estos sistemas, aunque de bajo costo y fácil operación, enfrentan desafíos notables. La exposición a las condiciones ambientales lleva a un acceso deficiente a la luz, altas tasas de evaporación, y riesgos de contaminación y el crecimiento de organismos zooplanctónicos predadores. Khant *et al.* (2018) por su parte, apuntan a que estos sistemas requieren grandes extensiones de terreno y ya han alcanzado su límite de desarrollo. Específicamente, los estanques con canales abiertos del tipo *raceway*, son rentables pero dependen de un inóculo libre de contaminantes, y la productividad es limitada debido a la dificultad para controlar las condiciones de cultivo y la exposición directa a la radiación ultravioleta. Taparia *et al.* (2015) indican que la productividad de estos sistemas alcanza hasta 0.231 g/l/día, lo cual es significativamente menor que la obtenida en cultivos cerrados, los que pueden llegar a 3 g/l/día.

Los cultivos cerrados también conocidos como fotobiorreactores o, por sus siglas en inglés PBR, representan una solución más sofisticada, proporcionando un ambiente controlado con mínimo contacto con el medio externo (Hernández y Labbé, 2014; Nath *et al.*, 2017). Estos sistemas son preferibles debido a su capacidad para evitar la contaminación y reducir las pérdidas por evaporación. Los PBR comunes incluyen diseños de placa plana, columna de burbujeo, *airlift*, tubulares y tanque agitado. A pesar de sus ventajas, como señalan Taparia *et al.* (2015), los altos costos operativos y la limitada escalabilidad restringen su uso principalmente a productos de alto valor en lugar de biocombustibles.

La eficiencia del cultivo de microalgas, como señala Nath *et al.* (2017), depende de múltiples factores, incluyendo la intensidad de la luz, la temperatura y la concentración de nutrientes. El trabajo de Fu *et al.* (2019) profundiza en la importancia del flujo bifásico gas-líquido en fotobiorreactores, destacando que la transferencia de CO₂ y nutrientes es crucial para el crecimiento de las microalgas. Además, la eficiencia fotosintética está determinada por el flujo entre las fases y el transporte de CO₂, luz y nutrientes. Esto subraya la necesidad de un diseño cuidadoso y una comprensión detallada de estos procesos para optimizar la eficiencia de los reactores.

La elección entre cultivos abiertos y cerrados implica una compleja evaluación de factores como la biología del microorganismo, la tolerancia al estrés, los requerimientos de nutrientes y luminosidad, y los costos de construcción y operación. Los avances en la tecnología de fotobiorreactores ofrecen oportunidades prometedoras, pero aún enfrentan desafíos significativos en términos de costos operativos y escalabilidad. La investigación continua es vital para superar estas limitaciones y maximizar el potencial de los sistemas de cultivo de microalgas en la producción sostenible de biomasa y biocombustibles.

VARIABLES DE PROCESO

Para asegurar la viabilidad y sostenibilidad económica de la biotecnología de algas, es esencial desarrollar métodos de cultivo eficientes que permitan una producción de biomasa superior a 30 g/m²/día (Khan *et al.* 2018). El éxito del cultivo depende, además del sistema escogido, de factores como nutrientes, temperatura, pH, salinidad, oxígeno, luz, CO₂ y agitación. A continuación se mostrarán algunos aspectos relevantes a tener en cuenta en cada uno de ellos.

a) Especie de microalga

La selección adecuada del microorganismo es crucial en aplicaciones biotecnológicas, especialmente en el cultivo de microalgas, como lo destacan Hernández y Labbé (2014) y Khant *et al.* (2018). En la fitorremediación, por ejemplo, es esencial elegir especies como *Chlorella sp.*, *Phormidium sp.* o *Botryococcus sp.* que no solo tienen rápidas tasas de crecimiento, sino que también toleran variaciones estacionales y diurnas y forman agregados que facilitan su recolección por gravedad.

En el campo del bioetanol, una alternativa a los combustibles fósiles, la viabilidad económica depende de la biomasa de las algas y su contenido en carbohidratos. Aunque la producción de bioetanol, a partir de algas, aún no es comercialmente viable debido a su bajo contenido en carbohidratos, se pueden inducir mayores niveles mediante estrés ambiental controlado o modificaciones genéticas. La ingeniería genética, en rápido desarrollo, ofrece métodos de transformación para modificar las vías metabólicas y aumentar la producción de carbohidratos, lípidos y otros compuestos de interés.

En cuanto a la selección de especies para alta productividad, se prefieren microalgas como *Chlamydomonas reinhardtii*, *Dunaliella salina*, *Chlorella vulgaris*, *Botryococcus braunii* y diatomeas como *Phaeodactylum tricorutum* y *Thalassiosira pseudonana*, así como *Heterokontos* de los géneros *Nannochloropsis sp.* e *Isochrysis sp.*, conocidos por su alto contenido de lípidos (>60% en peso), según señala Taparia *et al.* (2015). Estos esfuerzos reflejan la importancia de elegir el microorganismo adecuado para lograr la viabilidad y eficiencia en aplicaciones biotecnológicas específicas.

b) Luz

La luz juega un papel crucial en el cultivo de microalgas, siendo un factor determinante tanto en la productividad como en la composición bioquímica de estos organismos. En los cultivos abiertos, la calidad espectral de la luz, influenciada por el clima, las estaciones y la posición de las algas en la columna de agua, afecta directamente su comportamiento y productividad. Esta variabilidad representa un desafío para el manejo eficiente de los cultivos, como lo señalan Luna (2007) y Daneshvar *et al.* (2021).

En los cultivos cerrados, como los fotobiorreactores, la comprensión de las necesidades lumínicas de la especie de microalga es esencial. La duración de la luz requerida varía ampliamente, desde cero, en el modo heterotrófico, hasta 24 horas al día en el modo fototrófico. Nath *et al.* (2017) y Khan *et al.* (2018) destacan la importancia de un balance óptimo entre la duración y la intensidad de la luz para influir en la fotosíntesis y la producción de biomasa de las microalgas. Sin embargo, tanto la luz insuficiente como la excesivamente intensa pueden ser contraproducentes para el crecimiento eficiente de las microalgas.

En los fotobiorreactores, uno de los retos es asegurar una penetración y distribución uniforme de la luz para evitar problemas como la fotoinhibición o el sombreado, donde las microalgas en las capas inferiores no reciben suficiente luz debido a las capas superiores. Según Khan *et al.* (2018), el uso de

luces LED, así como tubos fluorescentes, puede ser efectivo para lograr una iluminación adecuada. Esta gestión de la luz es fundamental para optimizar el rendimiento de los cultivos de microalgas.

Temperatura

El cultivo de microalgas enfrenta retos significativos relacionados con el control de la temperatura, un factor esencial que influye directamente en su crecimiento y adaptación. Aunque mantener la temperatura estable es relativamente sencillo en laboratorio, se vuelve más complicado en cultivos a gran escala, especialmente en ambientes abiertos, como señala Luna (2007). Cada especie de microalga tiene su propia temperatura óptima para crecer, y la mayoría de estas especies prosperan en un rango de 20 a 30 °C, aunque hay algunas que pueden llegar hasta los 40°C (Khan *et al.*, 2018). Un aumento de temperatura dentro de este rango óptimo puede acelerar exponencialmente su crecimiento; sin embargo, cualquier variación fuera de este rango puede ralentizar o detener completamente su desarrollo y actividad.

Las temperaturas extremas, tanto bajas como altas, afectan procesos clave como la fotosíntesis: las bajas temperaturas reducen la asimilación de carbono, mientras que las altas pueden inactivar las proteínas fotosintéticas y alterar el balance energético celular, lo que resulta en una reducción del tamaño de las células y su respiración (Khan *et al.*, 2018). Controlar la temperatura en los cultivos de microalgas es posible mediante el uso de intercambiadores de calor o serpentines externos, aunque esto puede incrementar los costos operativos. Por ello, el uso de modelos dinámicos, para estudiar y controlar la temperatura en fotobiorreactores se vuelve crucial (Rodríguez-Miranda *et al.*, 2020). La integración de modelos matemáticos de temperatura con modelos de crecimiento de microalgas proporciona una representación más precisa del comportamiento de estas y optimiza los sistemas de control para la producción de biomasa y sus aplicaciones (Nath *et al.*, 2017; Rodríguez-Miranda *et al.*, 2020). Además, es interesante mencionar que la temperatura también puede ser utilizada estratégicamente como factor de estrés no letal para inducir la producción de metabolitos valiosos, ampliando así las aplicaciones potenciales de las microalgas en diversos campos (Converti *et al.*, 2009; Khan *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2021).

c) pH y dióxido de carbono (CO₂)

El pH y la concentración de CO₂, son factores críticos para el crecimiento y metabolismo de las microalgas. El pH del medio de cultivo es fundamental, ya que afecta la solubilidad y disponibilidad de diferentes formas de carbono inorgánico y nutrientes, siendo esencial para el proceso metabólico de las

microalgas (Daneshvar *et al.*, 2021). Las microalgas tienen diferentes requisitos de pH, aunque la mayoría crece bien en un rango de 6 a 8,5, esto varía según las diferentes fuentes de medios de crecimiento (Khan *et al.*, 2018).

Aproximadamente el 50% del peso seco de la biomasa de microalgas proviene del CO₂, y la concentración de este gas influye en la síntesis de enzimas vitales para el metabolismo del carbono (Daneshvar *et al.*, 2021).

Un desafío asociado en los cultivos cuando se acidifican es que, al aumentar el pH puede incrementar la salinidad del medio, lo cual es perjudicial para las células de las algas (Khan *et al.*, 2018). En ausencia de una fuerte amortiguación, el pH es un indicador de crecimiento particularmente relevante en cultivos de microalgas. El control eficaz del pH, a menudo mediante la inyección de CO₂, es crucial para mantener una distribución óptima de especies de carbono en los medios de crecimiento (Bermejo *et al.*, 2021). Este método de control también tiene implicaciones económicas, ya que las necesidades de CO₂ pueden ser considerables, elevando potencialmente los costos en un cultivo comercial, lo que subraya la importancia de buscar formas económicas de mitigar estos costos (Hernandez y Labbé, 2014).

d) Nutrientes

Los nutrientes son esenciales en el cultivo de microalgas y su adecuado balance es crucial para el crecimiento y desarrollo de estas especies. Los requerimientos nutricionales varían de una especie a otra, pero en términos generales, un cultivo de microalgas debe contener carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, fósforo, y trazas de vitaminas y otros elementos necesarios como hierro, manganeso, cobalto, zinc y cobre. Las alteraciones en las proporciones de estos elementos pueden tener un efecto negativo en el desarrollo de la especie de interés y/o favorecer la aparición de otras especies no deseadas, actuando como contaminación (Luna, 2007).

El nitrógeno es un nutriente clave, cuyas cantidades disponibles en el cultivo alteran directamente el crecimiento celular. Aunque la limitación de nitrógeno puede reducir el crecimiento y la productividad de la biomasa, curiosamente, aumenta la producción de carbohidratos y lípidos. Además, los micronutrientes como el molibdeno (Mo), potasio (K), cobalto (Co), hierro (Fe), magnesio (Mg), manganeso (Mn), boro (B) y zinc (Zn) son necesarios solo en pequeñas cantidades, pero tienen un fuerte impacto en el crecimiento de las microalgas, ya que influyen en muchas actividades enzimáticas en las células (Khan *et al.*, 2018).

El nitrógeno es el nutriente más importante para las microalgas (después del carbono) y se incorpora como nitrato (NO_3^-) o como amonio (NH_4^+) (Hernandez-Perez & Labbé, 2014). Es también un factor crítico para regular el contenido de lípidos. Normalmente, las microalgas tienen un contenido lipídico de aproximadamente del 20%, pero cuando el nitrógeno es limitante del crecimiento, la acumulación aumenta en más de 40% (Hernandez-Perez & Labbé, 2014). Sin embargo, usando la limitación de nitrógeno para estimular la acumulación de lípidos en las células, a menudo reduce la producción de algas, lo que sugiere que estas dos condiciones, alto contenido en lípidos y alta productividad, tienen una relación inversa.

Por otra parte, el fósforo es fundamental en muchos procesos celulares, tales como la formación de ácidos nucleicos y transferencia de energía. Aunque el contenido en fósforo de las microalgas es menor al 1%, su déficit en el medio es una de las mayores limitaciones al crecimiento de los cultivos. En los medios de cultivo suele incorporarse en forma de HPO_4^{2-} o HPO_4^- (Hernandez-Perez & Labbé, 2014).

En cuanto al carbono, esencial para el cultivo de algas, puede añadirse en formas orgánicas como glicerol o acetatos, o como CO_2 . Para el cultivo de microalgas a gran escala, se recomienda utilizar el CO_2 ambiental como fuente de carbono, lo que no solo tiene un bajo costo sino que también contribuye a la mitigación del CO_2 (Khan *et al.*, 2018). Para la producción comercial de biomasa de microalgas, es fundamental que el cultivo crezca rápidamente. Por lo tanto, proporcionar los nutrientes adecuados es esencial para acelerar el crecimiento de las algas. Algunas sustancias fuertemente limitantes pueden utilizarse como potenciadores del crecimiento, y ciertas bacterias pueden mejorar las tasas de crecimiento de las microalgas al suministrarles nutrientes importantes en formas asimilables como el amoníaco o el nitrato (Khan *et al.*, 2018).

e) Oxígeno disuelto

Durante el proceso de fotosíntesis en el cultivo de microalgas, especialmente en fotobiorreactores cerrados, el oxígeno generado puede acumularse a niveles significativos, lo que conlleva varios desafíos. Esta acumulación de oxígeno puede inducir procesos como la fotoinhibición y la fotorrespiración, los cuales disminuyen el rendimiento de la eficiencia fotosintética y generan especies reactivas de oxígeno (ROS). Estas ROS son perjudiciales, ya que pueden dañar los componentes celulares de las microalgas (Bermejo *et al.*, 2021). Además, durante periodos de intensa fotosíntesis, como los que ocurren durante el día en sistemas de cultivo, los niveles de oxígeno disuelto

pueden alcanzar saturaciones superiores al 200%, lo que se cree que puede afectar negativamente la productividad de las algas. En efecto, se ha determinado que a una saturación del 200% se produce una reducción del 17% en la productividad, y a 300%, esta disminución alcanza el 25%. Sin embargo, aún se requiere más investigación para comprender completamente el efecto de estos altos niveles de oxígeno en el cultivo de microalgas y como prevenirlos (Hernández y Labbé, 2014).

f) Mezclado y aireación

La mezcla y la aireación en el cultivo de microalgas son esenciales para su desarrollo óptimo. Estos procesos garantizan una distribución homogénea de nutrientes, CO₂ y oxígeno, además de permitir una penetración uniforme de la luz, evitando así la agregación y asentamiento de la biomasa. Un sistema de mezcla eficiente en un fotobiorreactor facilita no solo la disolución de nutrientes y la penetración de la luz, sino también un intercambio gaseoso efectivo. Este aspecto es crucial, ya que sin una mezcla adecuada, la productividad de la biomasa se reduce significativamente, según Khan *et al.* (2018). Sin embargo, el cultivo de microalgas también plantea desafíos, especialmente en relación con el esfuerzo cortante generado por la mezcla, la circulación, la aireación y el bombeo.

Estas operaciones son fundamentales para la transferencia de masa y calor y la distribución de luz, pero un esfuerzo cortante excesivo puede causar daño celular y afectar el crecimiento. Por lo tanto, se busca un equilibrio para asegurar un crecimiento celular óptimo sin comprometer la integridad de las células, lo cual puede ser particularmente desafiante para especies sensibles al estrés cortante. La aireación, necesaria para el intercambio de gases, puede en algunos casos proporcionar también la energía necesaria para la mezcla y circulación. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las burbujas de aire, especialmente las más pequeñas, pueden dañar las células. Por otro lado, la tolerancia al esfuerzo cortante varía entre las especies de microalgas, siendo generalmente mayor en las algas verdes y menor en los dinoflagelados, según Wang y Lan (2018). Estos hallazgos sugieren la necesidad de más investigación para maximizar el potencial biotecnológico de las microalgas, evaluando las fuentes de estrés cortante en cultivos a gran escala y las condiciones que pueden mitigar sus efectos.

POSTRATAMIENTO DE LA BIOMASA

La producción y procesamiento de microalgas para obtener bioproductos enfrenta desafíos significativos antes de alcanzar una escala comercial viable. Según Costas *et al.* (2020), estos desafíos incluyen mejorar la competitividad de costos y la sostenibilidad. El cultivo de microalgas debe superar obstáculos como la reducción del costo de los medios de cultivo, la minimización de la contaminación y el desarrollo de técnicas más eficientes para la extracción de compuestos activos.

El pretratamiento de la biomasa de microalgas es crucial para su uso en aplicaciones como la producción de biocombustibles, y este paso debe ser optimizado para mejorar la viabilidad económica y la sostenibilidad del proceso (Khan *et al.*, 2018). La cosecha y deshidratación eficientes de la biomasa de microalgas son desafíos significativos, especialmente para la producción a gran escala, y deben optimizarse para maximizar la eficiencia y minimizar los costos (Khan *et al.*, 2018).

El pretratamiento implica la degradación o alteración de la biomasa para procesar los carbohidratos y lípidos. Sin embargo, no existe un método óptimo para el pretratamiento de biomasa a gran escala, lo que representa un cuello de botella en la producción de biocombustibles. La extracción de componentes bioquímicos de las microalgas requiere métodos de fraccionamiento y alteración celular, y la rigidez de la pared celular implica la necesidad de procesos físicos y químicos para su descomposición (Orejuela-Escobar *et al.*, 2021).

Actualmente se exploran métodos químicos, biológicos, termoquímicos y termofísicos, a veces en combinación. En la producción de bioetanol, se suele pretratar la biomasa con ácidos y álcalis. La lignocelulosa presente en la biomasa dificulta el proceso, aumentando el coste del pretratamiento, aunque, las microalgas, al tener menos componentes lignocelulósicos, podrían ser más competitivas económicamente que otras materias primas (Khan *et al.*, 2018). No obstante, el costo de producción de biocombustibles a partir de biomasa de microalgas sigue siendo más alto en comparación con otras fuentes, lo que plantea dudas sobre su viabilidad económica (Choudhury y Loganathan, 2019).

El potencial de sostenibilidad de las microalgas se ve reforzado también por la posibilidad de convertirlas en bioplásticos y biopolímeros, que son alternativas naturales a los plásticos derivados del petróleo. La comercialización exitosa de biorrefinerías de algas depende de superar los obstáculos tecnológicos asociados con el cultivo y el procesamiento posterior de microalgas (Orejuela-Escobar *et al.*, 2021).

APORTE DE CRHIAM

En CRHIAM estamos combinando el mundo del cultivo de microalgas con la visión artificial, tanto para monitorear la generación de espumas y evaporación del medio de cultivo durante el crecimiento de las microalgas en experiencias que duran varios días; como para conocer la forma en que las fases gaseosa y líquida interactúan durante el crecimiento de las microalgas bajo distintos regímenes de flujo de gases, lo cual se realiza mediante grabaciones en cámara lenta y análisis de imágenes que combinan técnicas de *Machine Learning*.

Estos estudios permiten comprender de mejor forma la influencia de parámetros como flujo de gases, condiciones de luz, tamaño del sistema, temperatura, forma del sistema, agitación, entre otros, para desarrollar un óptimo crecimiento de las microalgas. En la Figura 6 se observa la distribución de burbujas en un medio de cultivo con microalgas del género *Chlorella* dentro de una celda delgada de paredes planas con iluminación, para dos flujos de gases ingresando por los capilares ubicados en la parte inferior de la celda. El flujo de aire mayor genera, gracias a la mayor agitación, mayor coalescencia entre las burbujas haciendo que el tamaño de estas crezca, lo cual no favorece la interacción burbuja-líquido. En cambio, con un flujo de aire más bajo, se logran tamaños de burbujas más pequeños, los cuales favorecen la interacción entre las fases líquida y gaseosa. Se observó también que el medio de cultivo con microalgas previene la coalescencia de burbujas en comparación a un sistema de agua pura, por lo que componentes del medio están evitando la coalescencia de burbujas y favoreciendo la formación de espuma (Grgurina, 2024)

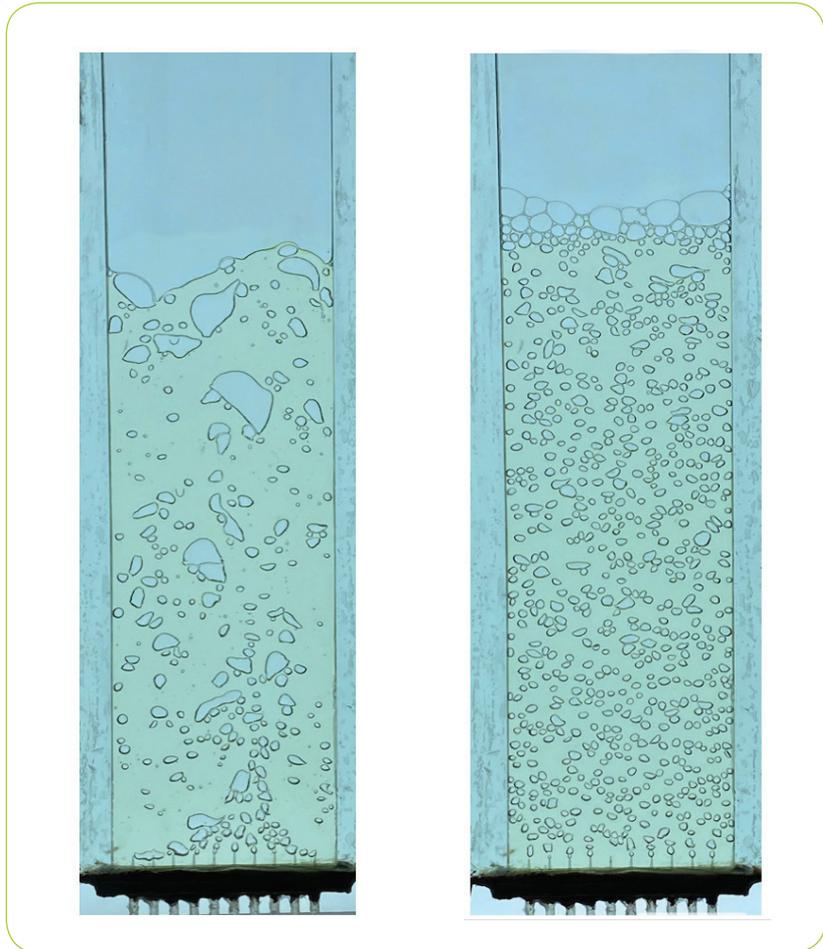


Figura 6.

Medio de cultivo con *Chlorella sp.* en celda de burbujeo de placas planas con iluminación y burbujeo para alto (izquierda) y bajo (derecha) flujo de gases. Fuente: Grgurina, (2024).

CONCLUSIONES

Este trabajo ha explorado el mundo extraordinario de las microalgas, mostrando su gran potencial y versatilidad. A pesar de su pequeño tamaño, las microalgas juegan un importante rol en el equilibrio ecológico y en el desarrollo de soluciones sostenibles para desafíos globales. Su aplicación en campos tan variados como la nutrición humana y animal, la cosmética, la producción de energía renovable, y el tratamiento de aguas residuales, resalta su valor y diversidad.

En el ámbito de la energía, las microalgas representan una fuente prometedora de biocombustibles, marcando un paso significativo hacia la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y la mitigación del cambio climático. Su capacidad para capturar CO₂ y purificar aguas residuales mediante la absorción de nutrientes inorgánicos y metales pesados demuestra su eficacia en la mejora del medio ambiente y la gestión de recursos naturales. Sin embargo, a pesar de estos beneficios, el cultivo y procesamiento de microalgas enfrenta desafíos técnicos y económicos. La selección del sistema de cultivo adecuado, la gestión de variables como la luz, temperatura, pH y nutrientes, y la eficiencia en la cosecha y el procesamiento posterior son aspectos cruciales que deben abordarse para maximizar su potencial.

Mirando hacia el futuro, las microalgas ofrecen un campo fértil para la investigación y el desarrollo. La explotación de su biodiversidad aún inexplorada y el avance en las técnicas de biotecnología y genética pueden abrir nuevas puertas para la producción de biomateriales, fármacos y otros compuestos de alto valor. La continua innovación y el desarrollo sostenible en el uso de microalgas no solo tienen el potencial de enriquecer diversas industrias, sino también de jugar un papel crucial en la construcción de un futuro más sostenible y ecológicamente responsable.

REFERENCIAS

- Chai, W. S., Tan, W. G., Munawaroh, H. S. H., Gupta, V. K., Ho, S. H., & Show, P. L. 2021. Multifaceted roles of microalgae in the application of wastewater biotreatment: a review. *Environmental Pollution*, 269, 116236.
- Chew, K. W., Yap, J. Y., Show, P. L., Suan, N. H., Juan, J. C., Ling, T. C., Lee, D. J. & Chang, J. S. 2017. Microalgae biorefinery: high value products perspectives. *Bioresource technology*, 229, 53-62.
- Chowdhury, H., & Loganathan, B. 2019. Third-generation biofuels from microalgae: a review. *Current opinion in green and sustainable chemistry*, 20, 39-44.
- Converti, A., Casazza, A. A., Ortiz, E. Y., Perego, P., & Del Borghi, M. 2009. Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 48(6), 1146-1151.
- Costa, J. A. V., Freitas, B. C. B., Moraes, L., Zapparoli, M., & Morais, M. G. 2020. Progress in the physicochemical treatment of microalgae biomass for value-added product recovery. *Bioresource technology*, 301, 122727.
- D'Alessandro, E. B., & Antoniosi Filho, N. R. 2016. Concepts and studies on lipid and pigments of microalgae: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 832-841.
- Daneshvar, E., Ok, Y. S., Tavakoli, S., Sarkar, B., Shaheen, S. M., Hong, H., Luo, Y., Rinklebe, J., Song, H., & Bhatnagar, A. 2021. Insights into upstream processing of microalgae: A review. *Bioresource technology*, 329, 124870.
- Elisabeth, B., Rayen, F., & Behnam, T. 2021. Microalgae culture quality indicators: a review. *Critical reviews in biotechnology*, 41(4), 457-473.
- Fu, J., Huang, Y., Liao, Q., Xia, A., Fu, Q., & Zhu, X. 2019. Photo-bioreactor design for microalgae: A review from the aspect of CO₂ transfer and conversion. *Bioresource technology*, 292, 121947.
- Garrido-Cardenas, J. A., Manzano-Agugliaro, F., Acien-Fernandez, F. G., & Molina-Grima, E. 2018. Microalgae research worldwide. *Algal research*, 35, 50-60.

- González, A. 2015. ¿Qué son las microalgas? Interés y uso. Fundación Cajamar – Grupo Cooperativo Cajamar. Disponible en: <https://www.cajamar.es/storage/documents/microalgas-1444391623-ca345.pdf>
- Grgurina, H. 2024. Tesis de pregrado UBB. (Supervisores: Saavedra, Toledo, Bustos).
- Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. 2014. Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de biología marina y oceanografía*, 49(2), 157-173.
- Jimenez-Llanos, J., Ramirez-Carmona, M., Rendón-Castrillón, L., & Ocampo-López, C. 2020. Sustainable biohydrogen production by *Chlorella* sp. microalgae: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(15), 8310-8328.
- Khan, M. I., Shin, J. H., & Kim, J. D. 2018. The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial cell factories*, 17(1), 1-21.
- Khanra, S., Mondal, M., Halder, G., Tiwari, O. N., Gayen, K., & Bhowmick, T. K. 2018. Downstream processing of microalgae for pigments, protein and carbohydrate in industrial application: A review. *Food and bioproducts processing*, 110, 60-84.
- Lehmuskero, A., Chauton, M. S., & Boström, T. 2018. Light and photosynthetic microalgae: A review of cellular-and molecular-scale optical processes. *Progress in oceanography*, 168, 43-56.
- Liu, C., Hu, B., Cheng, Y., Guo, Y., Yao, W., & Qian, H. 2021. Carotenoids from fungi and microalgae: A review on their recent production, extraction, and developments. *Bioresource Technology*, 337, 125398.
- Luna, L. M. G. 2007. Microalgas: Aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista cubana de química*, 19(2), 3-20.
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(1), 217-232.
- Milledge, J. J. 2011. Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 10, 31-41.

- Nath, S. R., Mubarak, M., Bhowmik, A., & Shaija, A. 2017. Predictive model for microalgae growth in continuous culture tubular photobioreactor: Effect of light and temperature. In *Proceedings of CHT-17 ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer*. Begel House Inc.
- Onen Cinar, S., Chong, Z. K., Kucuker, M. A., Wieczorek, N., Cengiz, U., & Kuchta, K. 2020. Bioplastic production from microalgae: a review. *International journal of environmental research and public health*, 17(11), 3842.
- Odjadjare, E. C., Mutanda, T., & Olaniran, A. O. 2017. Potential biotechnological application of microalgae: a critical review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 37(1), 37-52.
- Orejuela-Escobar, L., Gualle, A., Ochoa-Herrera, V., & Philippidis, G. P. 2021. Prospects of microalgae for biomaterial production and environmental applications at biorefineries. *Sustainability*, 13(6), 3063.
- Priyadarshani, I., & Rath, B. 2012. Commercial and industrial applications of micro algae—A review. *Journal of Algal Biomass Utilization*, 3(4), 89-100.
- Rizwan, M., Mujtaba, G., Memon, S. A., Lee, K., & Rashid, N. 2018. Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 394-404.
- Rodríguez-Miranda, E., Acien, F. G., Guzman, J. L., Berenguel, M., & Visioli, A. 2021. A new model to analyze the temperature effect on the microalgae performance at large scale raceway reactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 118(2), 877-889.
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., & Isambert, A. 2006. Commercial applications of microalgae. *Journal of bioscience and bioengineering*, 101(2), 87-96.
- Taparia, T., Mvss, M., Mehrotra, R., Shukla, P., & Mehrotra, S. 2016. Developments and challenges in biodiesel production from microalgae: A review. *Biotechnology and applied biochemistry*, 63(5), 715-726.
- Valverde, F., Romero-Campero, F. J., León, R., Guerrero, M. G., & Serrano, A. 2016. New challenges in microalgae biotechnology. *European journal of protistology*, 55, 95-101.

Microalgas: pequeñas aunque poderosas en el agua

- Wang, C., & Lan, C. Q. 2018. Effects of shear stress on microalgae—A review. *Biotechnology Advances*, 36(4), 986-1002.
- Zhu, J., Cai, Y., Wakasaka, M., Yang, Z., Yin, Y., Fang, W., Xu, Y., Omura, T., Yu, R., & Zheng, A. L. T. 2023. Mitigation of oxidative stress damage caused by abiotic stress to improve biomass yield of microalgae: A review. *Science of The Total Environment*, 165200.



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA

ANID/FONDAP/15130015

ANID/FONDAP/1523A0001

MICROALGAS: PEQUEÑAS AUNQUE PODEROSAS EN EL AGUA



Universidad de Concepción



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia



Serie Comunicacional CRHIAM