

Análisis bibliométrico de la producción de biomasa de chlorella vulgaris en bases de datos científicas y vosviewer

Bibliometric analysis of biomass production of chlorella vulgaris through the integration of scientific databases and vosviewer

Sebastian Guaza Lasso¹ Jorge Luis Sánchez Ortega^{1,2}

¹Facultad de Ciencias Agrícolas-Ingeniería Agroindustrial, Universidad del Cauca, Santander de Quilichao, Colombia

²Escuela de Ingeniería Química-Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Resumen

Introducción: las microalgas son organismos unicelulares fotosintéticos con gran capacidad para fijar CO₂ y adaptarse a diversas condiciones de cultivo. Entre ellas, Chlorella vulgaris destaca por su valor nutricional y biotecnológico. Su cultivo permite obtener lípidos, proteínas y pigmentos útiles en biocombustibles, alimentación y biorremediación. Aunque presentan ventajas ecológicas, enfrentan retos económicos por los altos costos de producción. Su versatilidad metabólica las convierte en clave para biorrefinerías sostenibles. El análisis bibliométrico permite identificar tendencias para mejorar su aprovechamiento industrial.

Objetivo: este estudio revisa la producción de biomasa de Chlorella vulgaris mediante la integración de bases de datos científicas y el uso de VOSviewer para analizar redes bibliométricas, con el fin de determinar tendencias de investigación sobre productividad, medios de cultivo, sistemas, escalas de producción y nutrientes clave.

Métodos: se recopilaron estudios en Scopus usando cinco ecuaciones de búsqueda. Los documentos más relevantes fueron seleccionados y analizados mediante coocurrencia en VOSviewer.

Resultados: el análisis bibliométrico mostró un crecimiento de estudios sobre Chlorella vulgaris entre 2014 y 2024, enfocados en alternativas tecnológicas y sostenibles. Las búsquedas arrojaron 4.354 documentos, predominando artículos científicos. Las áreas principales fueron ciencias ambientales, ingeniería química, energías y ciencias agrícolas.

Conclusiones: las fuentes alternativas de nutrientes son clave para reducir los costos de producción. El uso de aguas residuales puede disminuir aproximadamente un 50 % los costos de nutrientes al aportar nitrógeno, fósforo y compuestos orgánicos, convirtiéndose en un medio de excelente calidad.

Palabras clave: Chlorella vulgaris, Bibliométrico, Nutrientes, Productividad, Escalamiento, VOSviewer, Biorremediación, Biocombustible.

Abstract

Introduction: Microalgae are unicellular photosynthetic organisms with a high capacity for CO₂ fixation and adaptation to diverse cultivation conditions. Among them, Chlorella vulgaris stands out due to its nutritional and biotechnological value. Its cultivation enables the production of lipids, proteins, and pigments useful for biofuels, food, and bioremediation. Despite their ecological advantages, microalgae face economic challenges due to high production costs. Their metabolic versatility makes them key components for sustainable biorefineries. Bibliometric analysis allows the identification of research trends to improve their industrial utilization.

Objective: This study reviews the biomass production of Chlorella vulgaris through the integration of scientific databases and the use of VOSviewer to analyze bibliometric networks, aiming to determine research trends related to productivity, culture media, systems, production scales, and key nutrients.

Methods: Studies were collected from the Scopus database using five search equations. The most relevant documents were selected and analyzed through co-occurrence analysis using VOSviewer.

Results: The bibliometric analysis revealed a growth in studies on Chlorella vulgaris between 2014 and 2024, focused on technological and sustainable alternatives. The searches yielded 4,354 documents, predominantly scientific articles. The main subject areas were environmental sciences, chemical engineering, energy, and agricultural sciences.

Conclusions: Alternative nutrient sources are essential to reduce production costs. The use of wastewater can reduce nutrient costs by approximately 50% by providing nitrogen, phosphorus, and organic compounds, becoming a high-quality culture medium.

Keywords: Chlorella vulgaris, Bibliometric analysis, Nutrients, Productivity, Scale-up, VOSviewer, Bioremediation, Biofuel

¿Cómo citar?

Guaza S, Sánchez JL. Análisis bibliométrico de la producción de biomasa de chlorella vulgaris en bases de datos científicas y vosviewer. Ingeniería y Competitividad, 2026, 28(1)e-20315060

<https://doi.org/10.25100/iyc.v28i1.15060>

Recibido: 25/06/25

Revisado: 27/08/25

Aceptado: 21/10/25

Online: 13/02/26

Correspondencia

sguaza@unicauba.edu.co



CrossMark



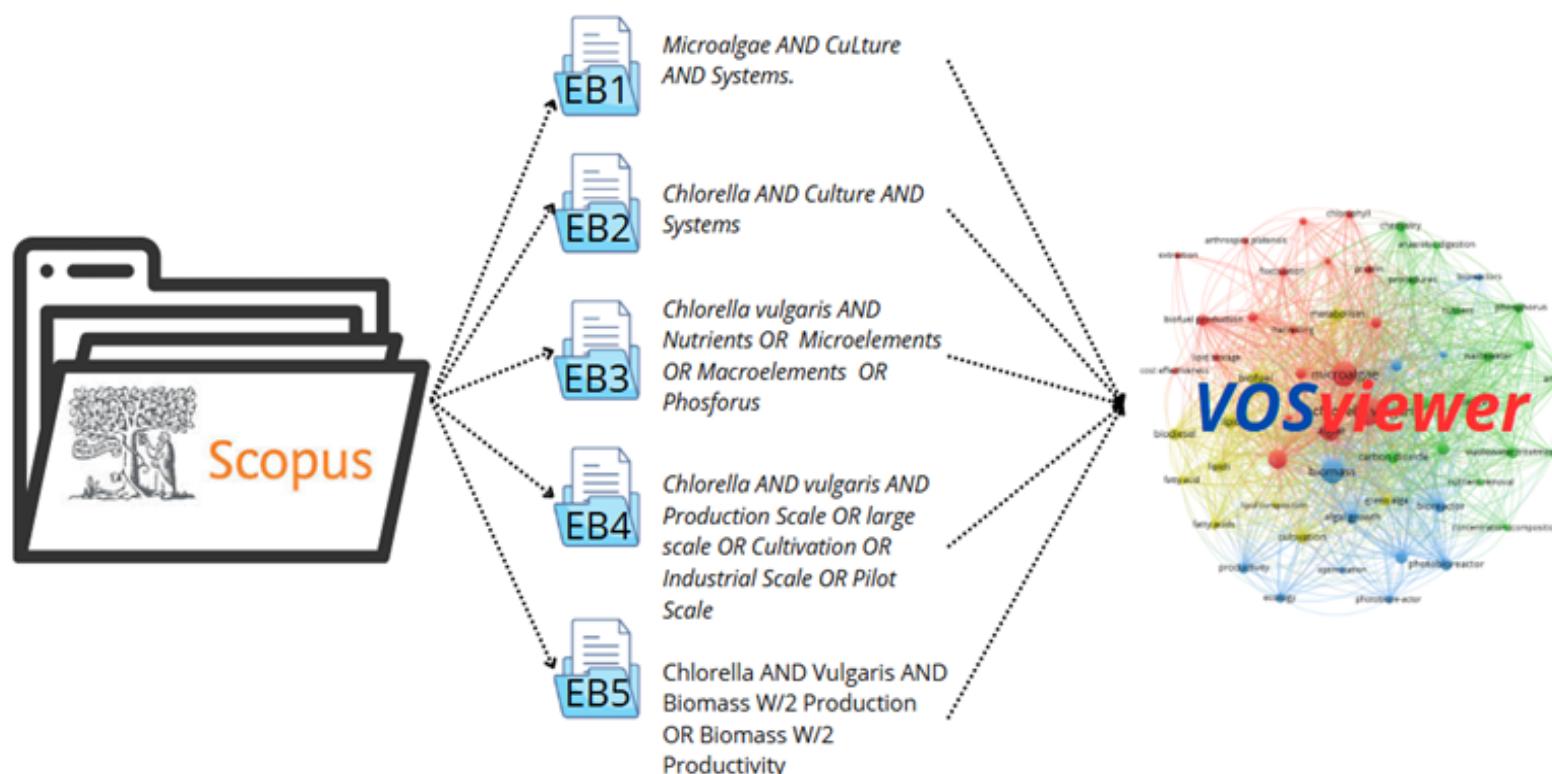
OPEN ACCESS

¿Por qué se realizó este estudio?

Realizar un análisis bibliométrico sobre los sistemas de producción de Chlorella vulgaris es relevante porque este enfoque permite cuantificar y visualizar la producción científica en el campo, identificando los temas más estudiados, las colaboraciones entre investigadores e instituciones líderes. Este análisis revela tendencias temporales en la investigación, como el creciente interés en tecnologías de cultivo más eficientes o el uso de residuos agroindustriales como sustratos alternativos para el crecimiento de microalgas. Abordar estas brechas promueve la transferencia de tecnología del laboratorio a la industria, impulsando la adopción de sistemas de producción de microalgas más sostenibles y rentables.

¿Cuáles fueron los resultados más significativos? ¿Qué aportan estos resultados?

Los resultados muestran un crecimiento significativo en la producción de productos de microalgas, en particular nutrientes y compuestos energéticos. Para abordar los desafíos asociados con los requerimientos nutricionales, se recomienda integrar los sistemas de producción de biomasa de microalgas con sistemas de tratamiento de aguas residuales, efluentes industriales y residuos de procesos. Al aprovechar los compuestos presentes en estos efluentes, las microalgas contribuyen directamente a la biorremediación al obtener los nutrientes necesarios para generar biomasa de alto valor nutricional y energético a costos de producción más bajos y sostenibles.



Introducción

Las microalgas son un grupo de microorganismos autótrofos que habitan ecosistemas marinos, de agua dulce y salinas y producen sustancias orgánicas mediante la fotosíntesis. Son organismos unicelulares eucariotas fotosintéticos (2–200 µm) capaces de crecer bajo condiciones autótrofas o heterotróficas (1). En general, son muy eficientes en la fijación de CO₂. Debido a su alta flexibilidad metabólica, adaptabilidad a diversas condiciones de cultivo y rápido potencial de crecimiento, la investigación sobre su uso como fuentes de productos biológicamente valiosos ha aumentado rápidamente. Actualmente, se están explorando tecnologías integradas para el cultivo de microalgas para aislar diversos compuestos biológicamente activos de la biomasa, aumentando así la rentabilidad de la producción (2).

Las microalgas requieren nutrientes relativamente simples como carbono, nitrógeno y fósforo (3), lo que permite la generación de biomasa útil para la producción de lípidos y proteínas, aceites biocombustibles, síntesis de pigmentos y sistemas de biorremediación de aguas residuales, entre otras aplicaciones. Sin embargo, los costos de producción siguen siendo relativamente altos en comparación con otras fuentes de proteínas de origen vegetal o animal comúnmente utilizadas en la producción de piensos acuícolas. Varios factores influyen en los costos de producción de biomasa microalgal, incluyendo el medio de crecimiento y las fuentes de luz (4).

La producción de microalgas, particularmente *Chlorella vulgaris*, un alga unicelular verde con forma esférica que mide entre 2,5 y 10 µm de diámetro (5), ha cobrado relevancia en las últimas décadas debido a su potencial biotecnológico (7). Su color verde proviene de los cloroplastos responsables de la fotosíntesis, una característica que da nombre al género Chlorella, que significa "pequeño" (6). A pesar de los avances tecnológicos y científicos, la implementación a gran escala de los sistemas de producción de *Chlorella vulgaris* enfrenta desafíos significativos que limitan la viabilidad económica y la sostenibilidad medioambiental (8). Estos desafíos incluyen altos costos de producción de biomasa, dependencia de medios de cultivo costosos y complejos, y dificultades técnicas para escalar eficientemente los procesos de cultivo.

Las microalgas han adquirido una importancia significativa en el sector de los biocombustibles. *Chlorella vulgaris* es especialmente rica en proteínas (61,6%), lípidos (12,5%) y carbohidratos (13,7%), y contiene vitaminas, minerales y pigmentos (9), lo que la convierte en una fuente nutricional altamente completa. También se utiliza en el tratamiento de aguas residuales y la captura de CO₂, lo que destaca su potencial en aplicaciones energéticas, alimentarias y sanitarias (10). En las últimas décadas, el diseño y la construcción de biorrefinerías han aumentado debido a la necesidad de obtener biocombustibles y bioproductos de fuentes renovables (11).

Las microalgas presentan diferentes modos nutricionales: autótrofos, que utilizan energía solar y carbono inorgánico como CO₂ (12); heterotrófico, obteniendo energía de compuestos orgánicos como azúcares, glicerol, acetatos o glutamatos (13); y mixotróficos, combinando ambos procesos al asimilar simultáneamente CO₂ y carbono orgánico (14). Esta versatilidad metabólica convierte a las microalgas en una materia prima prometedora para biorrefinerías que utilizan tecnologías químicas,

bioquímicas o termoquímicas. Estas biorrefinerías deben integrar sostenibilidad, diversificación de productos y rentabilidad económica (8).

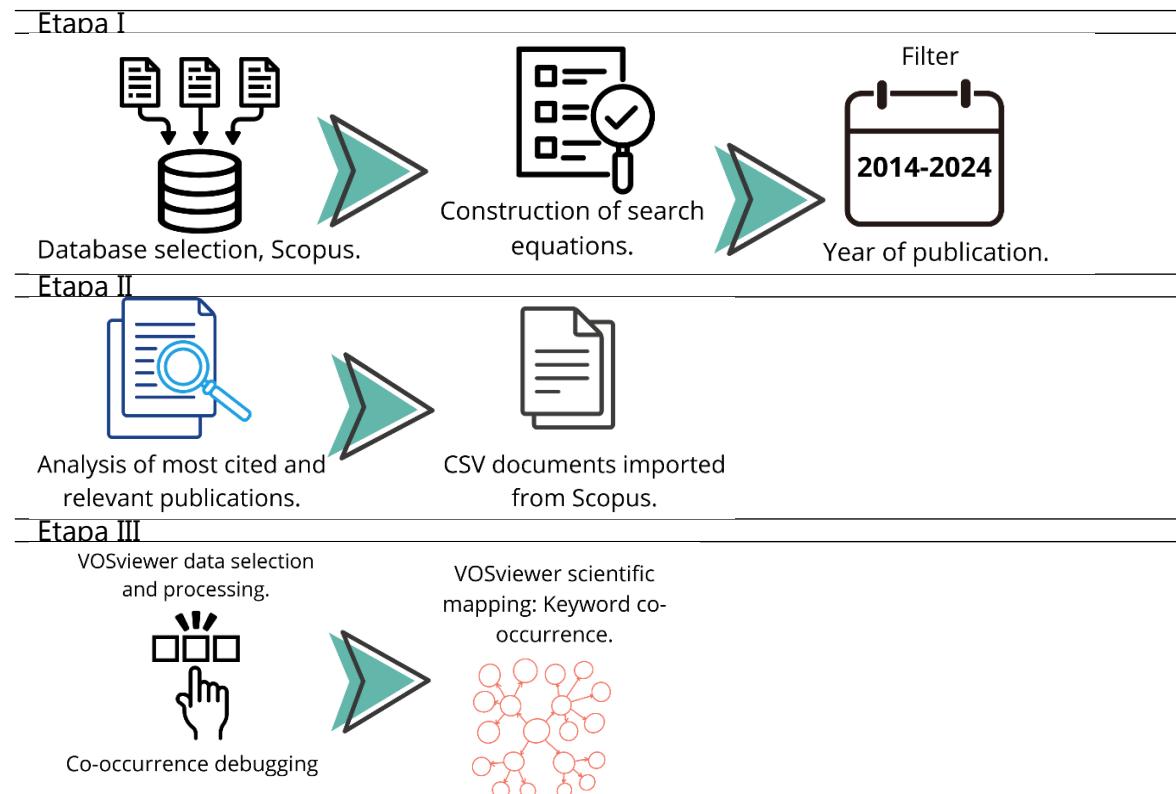
Los sistemas abiertos son los más extendidos para la producción de microalgas a nivel mundial, representando más del 90% de la producción global. Estos sistemas consisten en estanques poco profundos que facilitan la penetración de la luz y la productividad de biomasa, con ruedas de paletas que mantienen la circulación de cultivo (3). Sin embargo, presentan desventajas como fácil contaminación, control operativo limitado, pérdidas por evaporación, baja densidad celular y alta dependencia de las condiciones climáticas (15).

Sistemas cerrados como los fotobiorreactores se utilizan para cultivar cepas microalgales que no pueden soportar condiciones extremas presentes en sistemas abiertos. Estos sistemas son adecuados para producir compuestos de alto valor que justifican mayores costos operativos. Se han propuesto varios diseños de fotobiorreactores cerrados, incluyendo columnas de burbujas, sistemas helicoidales y paneles planos, siendo los fotobiorreactores tubulares los más comunes a escala comercial (3). Los sistemas cerrados ofrecen ventajas como la reducción de los requisitos de terreno, menor riesgo de contaminación y mayor flexibilidad en la producción (15).

Realizar un análisis bibliométrico de los sistemas de producción de Chlorella vulgaris es relevante ya que cuantifica y visualiza la producción científica, identificando temas clave de investigación, colaboraciones e instituciones líderes. Este enfoque revela tendencias temporales de investigación, como el creciente interés en tecnologías de cultivo eficientes y la utilización de residuos agroindustriales como sustratos alternativos (11), el fomento de la transferencia tecnológica del laboratorio a la industria y la promoción de sistemas de producción sostenibles y rentables.

Metodología

Se realizó un análisis bibliométrico de artículos científicos sobre los sistemas de cultivo y producción de *Chlorella vulgaris*, centrado en nutrientes, generación de biomasa y escalado de la producción. La base de datos Scopus se utilizó para identificar investigadores clave, áreas temáticas y palabras clave, recopilando información académica relevante (Figura 1).

**Figura 1.** Etapas metodológicas

Construcción y análisis de ecuaciones de búsqueda

Las ecuaciones de búsqueda se construyeron y configuraron utilizando los parámetros y herramientas permitidos por la base de datos científica Scopus. Estas ecuaciones permitieron identificar y recopilar información sobre la producción científica de los editores académicos más reconocidos, incluyendo Elsevier, Taylor & Francis, Wiley Blackwell, Springer Nature, Sage, Oxford, entre otros. Las ecuaciones se desarrollaron considerando palabras clave relacionadas con microalgas, producción de biomasa, sistemas de cultivo, *Chlorella vulgaris*, medios de cultivo y nutrientes, combinadas utilizando los operadores booleanos permitidos en Scopus: AND, OR y NOT (véase Tabla 1).

Tabla 1. Formación de ecuaciones de búsqueda

Buscar	Ecuaciones	Número de resultados
EB1	"Microalgas" Y "Cultivo Y Sistemas"	2.465
EB2	"Chlorella Y Vulgaris" Y "Cultura Y Sistemas"	600
EB3	"Chlorella Y Vulgaris" Y "Nutrientes O Microelementos O Macroelementos O Fósforo"	481
EB4	"Chlorella Y Vulgaris" Y ("Escala de producción" O "Gran Escala" O "Cultivo" O "Escala Industrial" O "Escala Piloto")	367
EB5	"Chlorella Y Vulgaris" Y ("Biomasa W/2 Producción" O "Biomasa W/2 Productividad")	451

Análisis de ecuaciones de búsqueda usando el software VOSviewer

La información obtenida a través de las ecuaciones de búsqueda también se procesó utilizando la versión 1.6.14 del software VOSviewer (acceso abierto). Se generaron mapas de coocurrencia para representar y establecer nodos, interacciones y conexiones entre el conjunto de palabras clave obtenidas como resultado de las ecuaciones de búsqueda en Scopus (16,17).

Los archivos CSV descargados desde Scopus se usaban e importaban en VOSviewer para su procesamiento. Se aplicaron filtros específicos para asegurar resultados de alta calidad, como el número mínimo de coincidencias de palabras clave (EB1: 25, EB2: 20, EB3: 20, EB4: 15, EB5: 15) y el tipo de documento (artículos de investigación). Utilizando el software, se generaron mapas de densidad y redes de coocurrencia por palabras clave, produciendo un conjunto de importantes "grupos" (grupos de palabras) para identificar temas de investigación relevantes, áreas temáticas emergentes y tendencias científicas relacionadas con el cultivo, la producción de biomasa y los procesos de ampliación de *Chlorella vulgaris*.

Resultados y discusión

El estudio de los procesos biotecnológicos y la utilización de biomasa microalgal abarca diversas áreas de conocimiento, que van desde las ciencias ambientales, donde las microalgas desempeñan un papel clave en la eliminación y remediación de aguas contaminadas, hasta cultivos especializados para la producción de bioproductos de alto valor. Esto refleja un creciente interés en mejorar las condiciones de cultivo, las estrategias de escalado y las tendencias asociadas al desarrollo de microalgas, especialmente *Chlorella vulgaris*.

Según el número de publicaciones

Se identificaron un total de 4.354 documentos como resultado de las cinco ecuaciones de búsqueda aplicadas en la base de datos Scopus para el periodo 2014–2024. Específicamente, EB1 registró 2.465 documentos, EB2 produjo un total de 600, EB3 identificó 481, EB4 produjo 366 y EB5 442 documentos. Las áreas temáticas de investigación identificadas (véase Figura 2) muestran que el 24% de las publicaciones corresponden a ciencias ambientales, destacando aplicaciones en la remediación de efluentes de diferentes industrias. Además, el 15% de las publicaciones se concentran en ciencias agrícolas y biológicas, con énfasis en el uso de *Chlorella vulgaris* en suplementación animal, biofertilizantes y producción de biomasa. Además, la ingeniería química representa el 15% y el sector energético el 12%, reflejando el interés en la optimización de cultivos, el desarrollo de productos de valor añadido y la producción de biocombustibles como alternativas innovadoras y sostenibles para abordar los retos energéticos y medioambientales actuales.

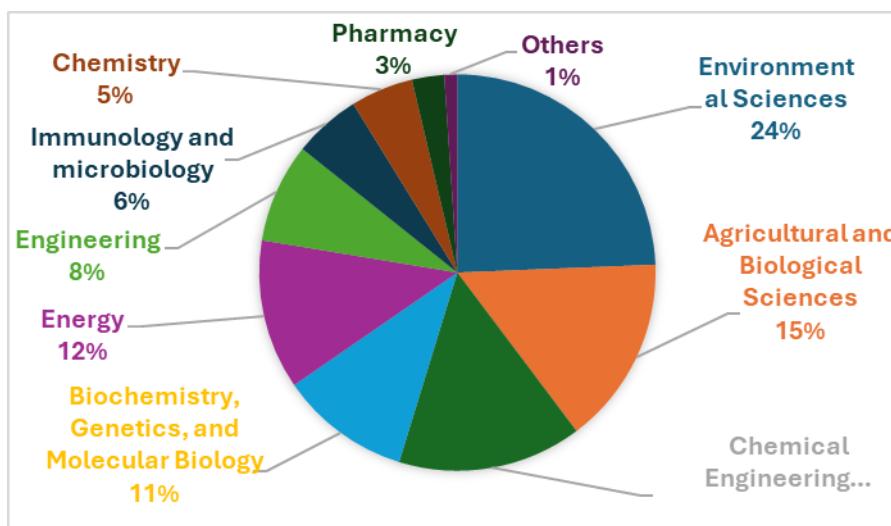


Figura 2. Áreas temáticas según publicaciones de las ecuaciones de búsqueda (EB)

Se observó un crecimiento del 78,44% en el número de publicaciones entre 2014 y 2024 para EB1 (véase Figura 3), lo que indica que los procesos relacionados con microalgas se espera que sigan siendo una tendencia creciente en la investigación en los próximos años. Esta tendencia está impulsada por la creciente consideración de la biomasa microalgal como una posible materia prima para la producción de productos químicos y biocombustibles (biodiésel, biogás), combinando el tratamiento de aguas residuales con sistemas simbióticos que involucran microalgas y/o bacterias para generar un modelo de negocio sostenible y eficiente que es clave para superar la actual crisis energética y medioambiental (16,17).

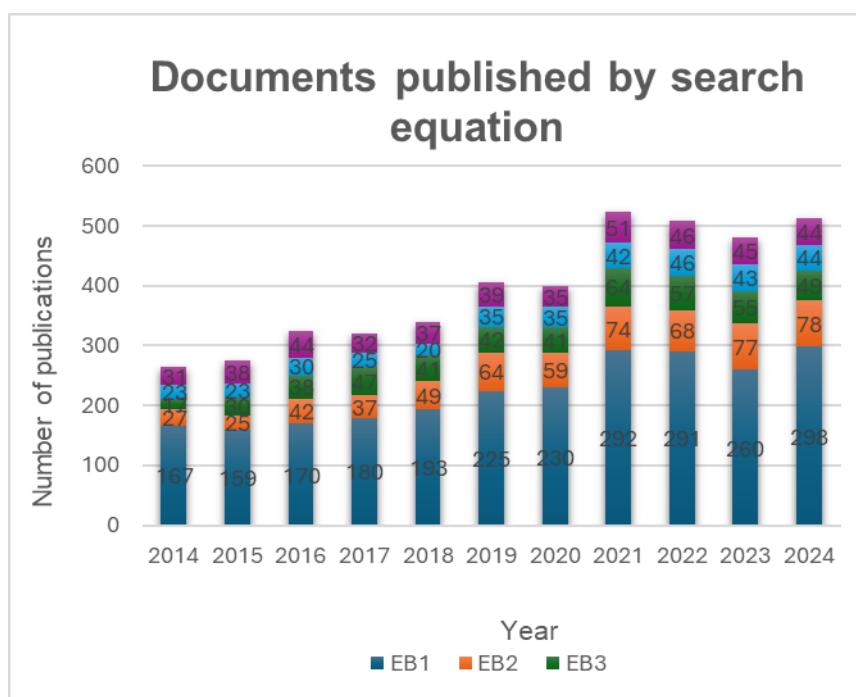


Figura 3. Documentos publicados entre 2014 y 2024 para cada ecuación de búsqueda

La tendencia de publicación de documentos publicados entre 2014 y 2024 correspondientes a EB2 muestra un crecimiento del 188,89%. La Figura 4 permite inferir una tendencia positiva en el aumento de publicaciones e investigaciones asociadas a la búsqueda de nuevas fuentes de energía sostenibles, siendo *Chlorella vulgaris* una materia prima importante en el desarrollo de la bioenergía. *Chlorella vulgaris* muestra una excelente capacidad para alcanzar altas productividades en diferentes sistemas de producción, dependiendo de las condiciones de cultivo. La cantidad de biomasa que se puede obtener de esta microalga varía entre 0,5–2,8 g/L en sistemas abiertos y 3,48–30 g/L en sistemas mixotróficos, con un contenido de lípidos de aproximadamente entre el 19% y el 50%. Esto permite proyectar la biomasa para aplicaciones en la producción de biodiésel y biolubricantes. Estos valores se correlacionan con la cinética de Monod, en la que la tasa de crecimiento depende directamente de la concentración de nutrientes. En sistemas abiertos, las limitaciones de la luz y la competencia microbiana explican las menores productividades observadas (18–22).

Se observó un crecimiento significativo del 188,24% en la producción documental entre 2014 y 2024 para EB3 (Figura 4), reflejando un fuerte interés en la búsqueda de estrategias para minimizar los costos de producción de nutrientes. En 2021 se observó un pico notable de crecimiento; en el contexto de la pandemia de COVID-19, la investigación sobre suplementación y productos nutracéuticos se intensificó para abordar este problema desde una perspectiva preventiva. Por ejemplo, se han reportado estudios centrados en la suplementación mineral en diferentes productos destinados a aumentar la resiliencia del sistema inmunitario frente al virus (23–27).

El cultivo a gran escala de microalgas requiere cantidades sustanciales de agua y nutrientes, lo que incrementa los costos de producción. Por esta razón, la investigación se ha centrado en el estudio de fuentes alternativas de nutrientes. Se han identificado diversas aguas residuales que cumplen con el perfil nutricional requerido para el crecimiento de *Chlorella vulgaris*, como los efluentes generados durante la producción de tofu y procesos relacionados con la ganadería, como la acuicultura. Estas fuentes han demostrado altas productividades de biomasa y eficiencias en la eliminación de nutrientes que oscilan entre el 42,2% y el 100% (28,29).

La Figura 4 también muestra un crecimiento del 91,30% entre 2014 y 2024 para EB4, destacando la importancia de investigar la ampliación del cultivo a grandes volúmenes y/o sistemas industriales capaces de producir biomasa en grandes cantidades. La capacidad de predecir con precisión la productividad de algas en una amplia gama de condiciones ambientales, geometrías de reactores y regímenes operativos es crucial para evaluar la viabilidad de la producción de algas a gran escala. Por ello, la investigación está explorando modelos matemáticos y simuladores que incorporan parámetros de cultivo como temperatura, pH, régimen operativo y luz. Este enfoque de modelado y simulación aborda los principales desafíos asociados a la predicción precisa de la productividad algal a escala real (30).

Además, se observó un crecimiento del 41,94% en las publicaciones entre 2014 y 2024 para EB5. Esta tendencia refleja el enfoque de la investigación en abordar desafíos relacionados con la aplicación comercial, siendo uno de los principales problemas el logro y mantenimiento de altos niveles de producción. Para ello, es esencial proporcionar a las microalgas condiciones de

crecimiento adecuadas (temperatura, fotoperíodo y pH). Las condiciones óptimas de cultivo para *Chlorella vulgaris* se encuentran en un rango de temperatura de 25–30 °C y un pH entre 6,5 y 8,0. En estas condiciones, es posible obtener biomasa con una productividad máxima de concentración de biomasa de 2,37 g·L⁻¹, así como acumulación de lípidos que varía desde 0,36 g·L⁻¹·d⁻¹ a 0,47 g·L⁻¹·d⁻¹ de biomasa seca, dependiendo del tiempo de cultivo. Este rango corresponde a la estabilidad de las enzimas fotosintéticas y a la máxima actividad de Rubisco, cuyo óptimo térmico se sitúa entre 28 y 30 °C. A valores de pH más altos, la disponibilidad de CO₂ disuelto disminuye, afectando la eficiencia fotosintética (25–27).

Los estudios e investigaciones asociados a EB1 (véase la Tabla 2) están orientados a los avances en el cultivo de microalgas, centrándose en la consideración de diferentes tipos de medios de cultivo (agua dulce, agua salina y aguas residuales) y los sistemas de cultivo más eficientes. Aunque el uso de aguas residuales es prometedor desde una perspectiva sostenible, una limitación son los rendimientos relativamente bajos de biomasa obtenidos (0,01–0,5 g/L) y los altos costos de cosecha, que representan entre el 20% y el 50% del costo total de producción. Los modelos matemáticos también se analizan como herramientas para realizar simulaciones orientadas a la optimización de procesos, junto con sistemas de co-cultivo que involucran otros microorganismos y que pueden mejorar los rendimientos y reducir costos. Además, también se revisan temas como las estrategias de policultura para mejorar la producción y la industrialización de compuestos orgánicos volátiles (COVs) producidos por microalgas (31–39).

Tabla 2. Documentos más citados EB1

Título	Autor	# Citas
Una revisión sobre el uso de consorcios de microalgas para el tratamiento de aguas residuales	(31)	598
Cultivo heterotrófico de microalgas para la producción de pigmentos: una revisión	(32)	334
Aplicaciones industriales potenciales y comercialización de microalgas en las industrias alimentaria y de piensos funcionales.	(33)	302
Modelos de crecimiento cinético para el cultivo de microalgas: una revisión	(34)	289
Una mini reseña: fotobiorreactores para el cultivo a gran escala de algas	(35)	248
Cultivo de microalgas heterotróficas para la sinterización de la producción de biodiésel con remediación de residuos: progreso y perspectivas	(36)	235
Uso de microalgas marinas como chasis para la degradación de tereftalato de polietileno (PET)	(37)	233
Eliminación de microcontaminantes en un sistema de tratamiento de algas alimentado por corrientes de aguas residuales separadas por fuentes	(38)	229
Efectos de la relación C/N en el desarrollo de bioflocs, calidad del agua y rendimiento de <i>Litopenaeus vannamei</i> juveniles en un sistema de tanques exteriores de alta densidad y intercambio cero a base de bioflocs	(39)	227

Los estudios analizados bajo EB2 (véase Tabla 3) destacan avances en el cultivo de *Chlorella vulgaris* y su desempeño en el tratamiento de aguas residuales, la producción de biomasa y la generación de bioproductos. Se evalúan sistemas de cultivo sostenible, como consorcios con bacterias y lodos activados, que mejoran la eliminación de nutrientes, reducen la producción de lodos y mejoran la captura de carbono. Además, se optimizan las condiciones de cultivo autotróficas, heterotróficas y mixtotróficas, y se desarrollan tecnologías innovadoras como las pilas de combustible microbianas que incorporan microalgas. Estos estudios demuestran el potencial para integrar bioenergía, biorremediación y valoración de residuos (40–44).

Tabla 3. Documentos más citados EB2

Título	Autor	# Citas
Interacción entre <i>Chlorella vulgaris</i> y lodos activados enriquecidos con nitrificación en el tratamiento de aguas residuales con baja relación C/N	(40)	524
Microalgas para productos de alto valor para la salud y nutrición humana	(41)	464
Las interacciones del sistema simbiótico algas-bacterias y sus efectos en la eliminación de nutrientes de aguas residuales sintéticas	(42)	243
Tratamiento centralizado de aguas residuales con <i>Chlorella vulgaris</i> : mejora simultánea de la eliminación de nutrientes, biomasa y producción de lípidos	(43)	148
El efecto de diferentes intensidades de luz y regímenes luz/oscuridad en el rendimiento de las células de combustible microbianas microalgales fotosintéticas (44)		130

La microalga *Chlorella vulgaris* ha demostrado excelentes capacidades para el tratamiento de aguas residuales, la captura de CO₂ y la producción de bioenergía, entre otras aplicaciones. La investigación se ha centrado en su capacidad para eliminar nutrientes (N y P), metales pesados y compuestos orgánicos, tanto en cultivos puros como en consorcios microbianos (véase la Tabla 4). Aunque se han explorado diferentes modos de cultivo (autótrofos, heterotróficos y mixtotróficos), configuraciones celulares (libres e inmovilizadas) y modos operativos (por lotes y semicontinuos), se han implementado ciertas estrategias de cultivo —como el estrés nutricional— para potenciar la acumulación de lípidos y carbohidratos. *Chlorella vulgaris* integra un modelo de producción sostenible, ya que la incorporación de la biotecnología en los sistemas de cultivo y el uso del tratamiento industrial de efluentes como fuente de nutrientes para la producción de productos de alto valor representan un eslabón importante en la búsqueda de nuevas fuentes de productos verdes (45–49).

Tabla 4. Documentos más citados EB3

Título	Autor	# Citas
Crecimiento y eliminación de nutrientes de algas verdes libres e inmovilizadas en cultivos por lotes y semicontinuos que tratan aguas residuales reales	(45)	571
Possible fijación de dióxido de carbono por microalgas de importancia industrial	(46)	464
Comparación de los rendimientos del producto y el contenido inorgánico en los arroyos de proceso tras hidrólisis térmica y procesamiento hidrotermal de microalgas, estiércol y digesto.	(47)	211
La producción de bioetanol a partir de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i> , inducida por estrés nutricional mediante hidrólisis enzimática y fermentación con levaduras inmovilizadas	(48)	210
Eliminación de metales pesados (cobre y zinc) en efluentes secundarios de plantas de tratamiento de aguas residuales por microalgas	(49)	137

En la Tabla 5, los estudios abordan principalmente las barreras en la producción de *Chlorella vulgaris* relacionadas con la ampliación de la cultivación, ya que aumentar el volumen del sistema reduce la eficiencia de la transferencia de luz y gas, limitando así la obtención de mayores rendimientos de biomasa. Este fenómeno puede explicarse mediante la ley de Lambert–Beer, que establece que la intensidad de la luz disminuye exponencialmente con la profundidad y la densidad celular en el medio, afectando directamente a la tasa fotosintética y a la productividad. Por esta razón, se han desarrollado configuraciones a escala piloto, como fotobiorreactores de 150 L con consorcios de microalgas, que optimizan la distribución de la luz y logran eficiencias de eliminación de nitrógeno y fósforo superiores al 90%, mejorando la conversión de energía y la utilización de nutrientes (50–51). Al escalar a niveles industriales, se requieren instalaciones adecuadas y grandes cantidades de nutrientes; Por ello, se han explorado métodos y estrategias de pretratamiento de aguas residuales para optimizar la acumulación de lípidos y carbohidratos en estos sistemas. Finalmente, los modelos tecnoeconómicos han demostrado la viabilidad de producir bioetanol a partir de microalgas en contextos tropicales, consolidando su papel como una solución sostenible y rentable para el tratamiento ambiental y la generación de bioproductos (50–53).

Tabla 5. Documentos más citados EB4

Título	Autor	# Citas
Producción de biomasa microalgal a partir de aguas residuales: tratamiento y costos: consideraciones de ampliación	(50)	215
Cultivo de Chlorella vulgaris en aguas residuales lácteas pretratadas con irradiación UV e hipoclorito de sodio	(51)	80
Análisis tecnoeconómico y de sensibilidad de las microalgas como materia prima comercial para la producción de bioetanol	(52)	78
Producción sostenible de biomasa microalgal a partir de aguas residuales de la industria alimentaria para productos de biorrefinería de bajo coste: una revisión	(53)	60

Se han logrado avances significativos en el cultivo de microalgas, especialmente *Chlorella vulgaris*, para aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales y la producción de biocombustibles (véase la Tabla 6). Varios estudios destacan sistemas eficientes como fotobiorreactores, biofilms y co-cultivo con bacterias, que logran productividad de biomasa de hasta 0,9 g/L·d y eficiencias en la eliminación de nutrientes superiores al 85%. Estas mejoras se atribuyen a la optimización de la transferencia de gases y nutrientes, así como a la simbiosis metabólica entre microalgas y bacterias, lo que mejora la utilización de carbono, nitrógeno y fósforo. La aplicación de estas tecnologías ha incrementado la rentabilidad y la productividad lipídica hasta en un 50%, consolidándolas como una estrategia clave para el desarrollo de biorrefinerías sostenibles (54–57).

Tabla 6. Documentos más citados EB5

Título	Autor	#Citations
Cultivo continuo de microalgas en aguas residuales de acuicultura utilizando un fotobiorreactor de membrana para la producción de biomasa y la eliminación de nutrientes.	(54)	276
Un novedoso fotobiorreactor de membrana de biofilm algal para el crecimiento de microalgas adheridas y la eliminación de nutrientes de efluentes secundarios.	(55)	221
Cuantificación rápida de lípidos microalgales en medios acuosos mediante un método colorimétrico sencillo	(56)	127
Investigación sistemática de la productividad de biomasa y lípidos por microalgas en fotobiorreactores para aplicaciones en biodiésel.	(56)	119
Mejorar la productividad de la biomasa microalgal mediante la creación de una comunidad microalgal-bacteriana	(57)	98

Basado en interacciones con palabras clave

El análisis de coocurrencia mostró que este es un tema de investigación con un amplio espectro de áreas de estudio y una tendencia creciente en la producción científica. Para obtener resultados más

precisos alineados con los objetivos del estudio, se aplicaron filtros de coocurrencia mínima a cada una de las ecuaciones de búsqueda: se estableció un umbral de 25 para EB1, 20 para EB2 y EB3, y 15 para EB4 y EB5.

La Figura 4 presenta la clasificación de los cúmulos obtenida del análisis de coocurrencia. El Grupo I (rojo) generalmente aborda ciertas especies de microalgas, aspectos bioquímicos y algunos parámetros ambientales de cultivo. El Grupo II (verde) incluye palabras clave relacionadas con el tratamiento de aguas residuales, procesos biológicos y variables ambientales. El Grupo III (azul) relaciona palabras clave asociadas a sistemas de cultivo, técnicas de cultivo, procesos biológicos e industriales, y aspectos técnicos de producción, como fotobioreactores y medios de cultivo para la producción de biomasa. El Grupo IV (amarillo) sintetiza palabras clave relacionadas con la valorización energética de microalgas, especialmente como materia prima para la producción de biocombustibles y biorrefinerías.

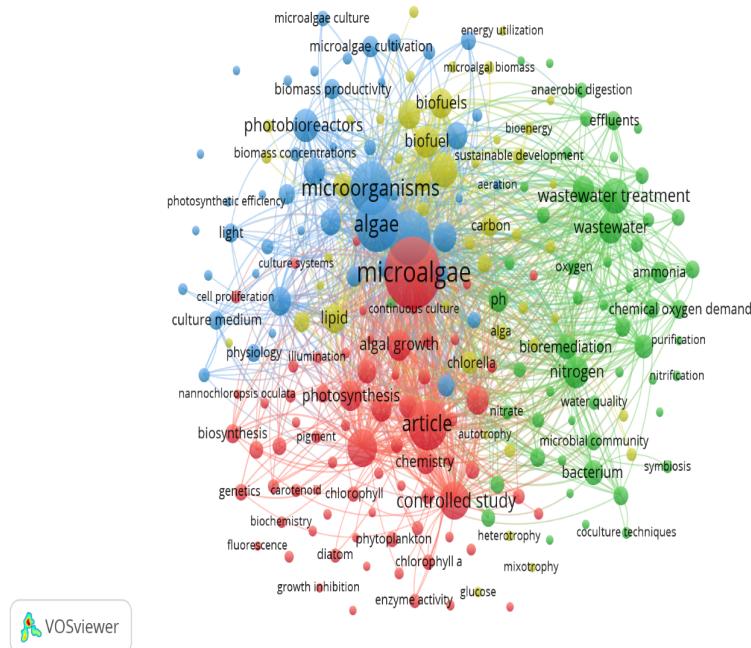


Figura 4. Publicaciones en red de coocurrencia para: "Microalgas" Y "Cultivo Y Sistemas" (EB1)

En la Figura 5, se presenta la clasificación de los grupos a partir del análisis de coocurrencia en diferentes áreas temáticas según investigaciones sobre *Chlorella vulgaris*. El Grupo I (en rojo) aborda en términos generales la combinación de temas medioambientales y bioquímicos y aplicaciones prácticas en la industria. El Grupo II (verde) se centra directamente en el tratamiento de aguas residuales utilizando *Chlorella vulgaris*, destacando los procesos de tratamiento y ciertos contaminantes que sirven como nutrientes en el metabolismo de la microalga. El Grupo III (azul) relaciona factores ecológicos y tecnológicos que influyen en la productividad de la biomasa algal, como las tecnologías de producción, los fotobioreactores y las condiciones de cultivo asociadas a la producción de biocombustibles. El Grupo IV (amarillo) sintetiza palabras clave relacionadas con la generación de biocombustibles a partir de los lípidos y proteínas de la biomasa producida por *Chlorella vulgaris*.

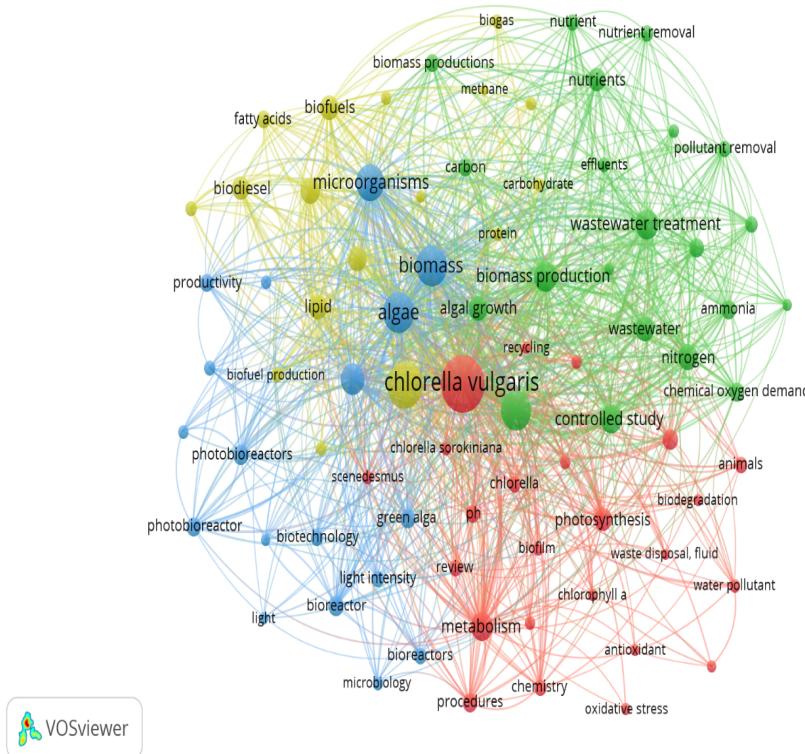


Figura 5.Red de coocurrencia de publicaciones para; "Chlorella Y vulgaris" Y "Cultivo Y Sistemas" (EB2).

En la Figura 6 se presenta la clasificación de los racimos a partir del análisis de coocurrencia, con un enfoque principal en las ciencias ambientales, donde los efluentes contaminados se utilizan como medios de cultivo para microalgas. El Grupo I (rojo) aborda en términos generales la producción de biomasa y biocombustibles a partir de *Chlorella vulgaris*, abarcando aspectos como el cultivo, el crecimiento y la productividad. El Grupo II (verde) incluye palabras clave relacionadas con *Chlorella vulgaris* en sistemas de tratamiento de aguas residuales destinados a reducir las cargas orgánicas mientras simultáneamente producen biomasa, con un fuerte componente ecológico y biotecnológico. El Grupo III (azul) relaciona palabras clave asociadas a procesos biotecnológicos y microbiológicos aplicados a la eliminación de nutrientes y contaminantes en sistemas controlados (fotobioreactores y biorreactores) para la estandarización de condiciones de cultivo. El Grupo IV (amarillo) sintetiza palabras clave relacionadas con la eliminación de compuestos nitrogenados, principalmente amonio.

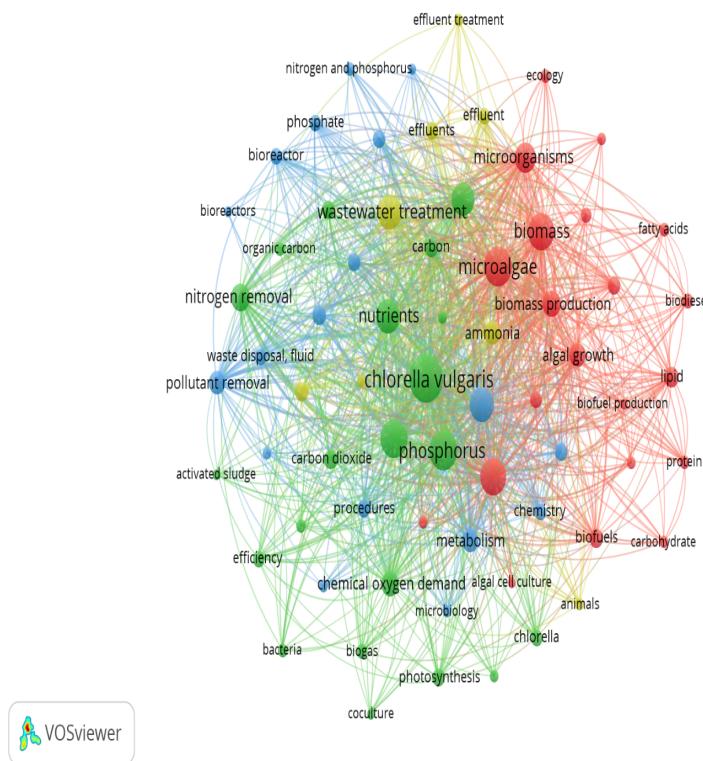


Figura 6. Red de coocurrencia de publicaciones para; "Chlorella Y Vulgaris" Y "Nutrientes O Microelementos O Macroelementos O Phosforus" (EB3)

En la Figura 7 se presenta la clasificación de los racimos a partir del análisis de coocurrencia, centrándose principalmente en la ampliación del cultivo. El Grupo I (rojo) aborda en términos generales la producción de biocombustibles, incluyendo las etapas del proceso desde la cosecha y extracción hasta el almacenamiento de lípidos y biomoléculas, así como análisis de eficiencia y costos. El Grupo II (verde) aborda la producción de biomasa a partir de procesos anaeróbicos, con énfasis en la remediación y la valoración de residuos orgánicos para reducir los costos de ampliación. El Grupo III (azul) relaciona palabras clave asociadas con la optimización de sistemas de cultivo de microalgas en biorreactores, particularmente la escalada de procesos desde laboratorio hasta planta industrial. El Grupo IV (amarillo) se centra en la producción de biocombustibles desde una perspectiva celular, haciendo hincapié en la acumulación de ácidos grasos durante el cultivo.

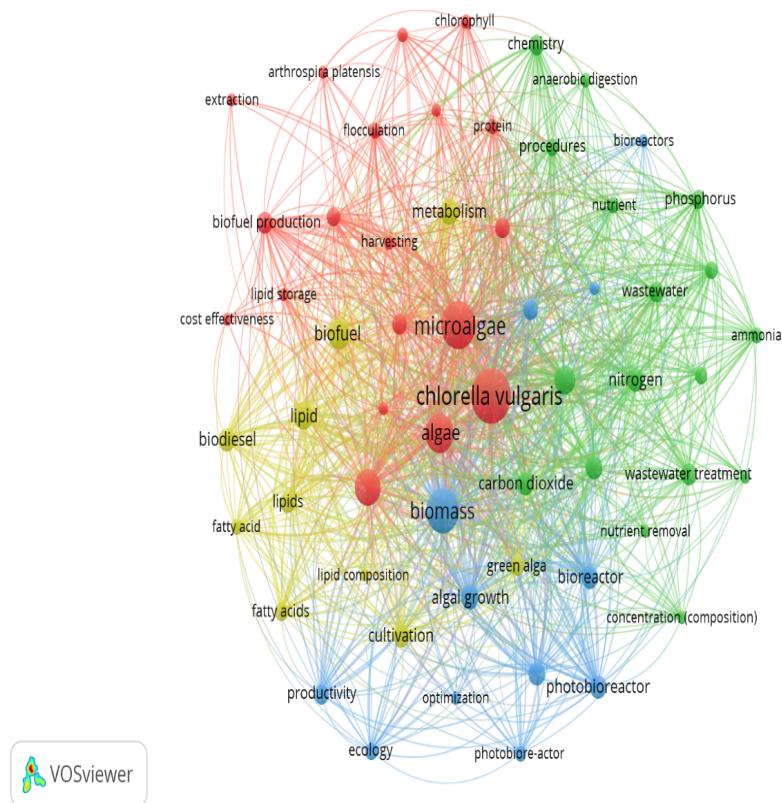


Figura 7. Red de coocurrencia de publicaciones para; "Chlorella Y vulgaris" Y "Escala de producción O cultivo a gran escala O Escala industrial O escala piloto" (EB4)

En la Figura 8 se presenta la clasificación de los grupos a partir del análisis de coocurrencia, centrándose principalmente en la productividad de la biomasa algal dentro de los sistemas de cultivo. El Grupo I (rojo) aborda la producción de biomasa algal bajo condiciones mixotróficas en entornos controlados, considerando nutrientes y entornos de cultivo variados. El Grupo II (verde) se centra en la producción de *Chlorella vulgaris* mediante la optimización del cultivo, los procesos de producción y los rendimientos. El Grupo III (azul) destaca los aspectos técnicos y biotecnológicos del cultivo de algas bajo condiciones controladas, utilizando principalmente biorreactores con parámetros operativos variados, orientados a determinar la productividad de la biomasa. El Grupo IV (amarillo) abarca directamente la producción eficiente de biomasa, ya sea en términos de rendimientos, costos o utilización de recursos (luz, carbono o nutrientes).

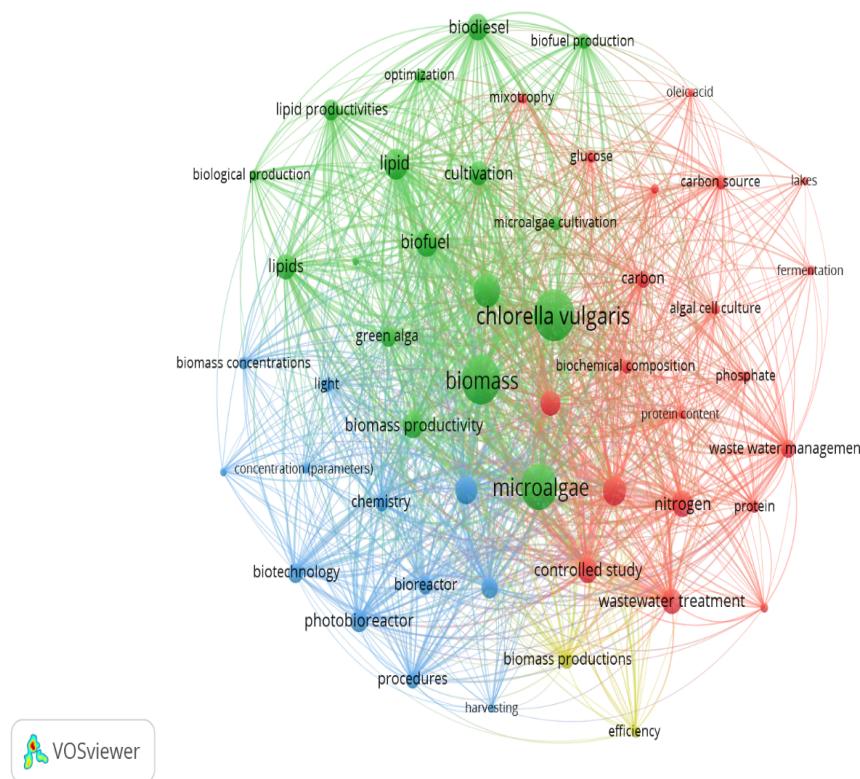


Figura 8. Publicaciones red de coocurrencia para "Chlorella Y vulgaris" Y "Biomasa W/2 Producción O Biomasa W/2 Productividad" (EB5)

Conclusiones

El estudio bibliométrico evidenció un notable crecimiento en la investigación sobre microalgas, especialmente *Chlorella vulgaris*, durante el periodo 2014–2024, orientada hacia alternativas tecnológicas y sostenibles. Las cinco ecuaciones de búsqueda aplicada produjeron un total de más de 4.354 documentos, principalmente artículos científicos. Específicamente, la ecuación de búsqueda 1 registró 2.465 documentos, la ecuación 2 arrojó 600, la ecuación 3 identificó 481, la ecuación 4 produjo 366 y la ecuación 5 442 documentos. La proporción de artículos oscilaba entre el 68% y el 92%, siendo un porcentaje menor correspondiente a revisiones y otros tipos de publicaciones. Estos resultados reflejan una expansión temática y metodológica en el campo, posicionando a las microalgas como un recurso estratégico en diversas aplicaciones industriales sostenibles. En conjunto, los hallazgos ofrecen una visión clara de las tendencias actuales en biotecnología microalgal y su relevancia para investigaciones futuras.

Según las publicaciones analizadas, se identifican varios campos multidisciplinares importantes dentro del área de investigación. De todos los documentos, el 25% pertenece a ciencias ambientales, destacando la recuperación de nutrientes en la remediación de efluentes de diferentes industrias. Además, el 14,4% de las publicaciones se concentran en ciencias agrícolas y biológicas, con énfasis en el uso de *Chlorella vulgaris* en suplementación animal, biofertilizantes

y producción de biomasa. Además, la ingeniería química (15,6%) y el sector energético (13,6%) reflejan un fuerte interés en la optimización del cultivo, el desarrollo de productos de valor añadido y la producción de biocombustibles como alternativas innovadoras y sostenibles para abordar los retos energéticos y medioambientales actuales.

Las fuentes alternativas de nutrientes para el cultivo de microalgas representan uno de los pilares principales para superar las barreras asociadas a los costos de producción durante la ampliación de la producción. El uso de aguas residuales como fuente de nutrientes reduce aproximadamente un 50% de los costos asociados a los nutrientes. Además de su impacto económico, este enfoque se alinea con los principios de economía circular y balance de masas, donde la recuperación de nitrógeno (NH_4^+) y fósforo (PO_4^{3-}) cierra los ciclos biogeoquímicos, contribuyendo a la sostenibilidad de los procesos. En estas condiciones, se logra una productividad lipídica media del 25% (138,79 mg/L), junto con una biorremediación eficaz del nitrógeno entre el 80% y el 90%, fósforo entre el 75% y el 90%, y una reducción de la demanda química de oxígeno (COD) de hasta el 100%, contribuyendo a la prevención de la eutrofización.

La elección del sistema de cultivo influye directamente en la composición bioquímica de la biomasa de *Chlorella vulgaris*. En los sistemas mixotróficos, la utilización simultánea de CO₂ y fuentes de carbono orgánico permite una mayor acumulación de lípidos (19–56%), resultado del exceso de carbono disponible y la desviación del metabolismo hacia la síntesis de ácidos grasos, haciendo que estos sistemas sean aptos para la producción de biodiésel. En condiciones autotróficas, la fijación exclusiva del carbono inorgánico bajo luz favorece la síntesis de proteínas (38–48%) al priorizar las vías anabólicas fotosintéticas, aunque con riesgo de contaminación en sistemas abiertos. En contraste, los cultivos heterotróficos, basados en la asimilación de carbono orgánico bajo condiciones de luz controladas, promueven la formación de pigmentos, biocompuestos y polisacáridos estructurales, constituyendo una alternativa biotecnológica eficaz para la producción de metabolitos de alto valor añadido.

Declaración de contribución de autoría de CrediT

Conceptualización - Ideas: Sebastian Guaza Lasso, Jorge Luis Sánchez Ortega. Curación de datos: Sebastian Guaza Lasso. Análisis formal: Sebastian Guaza Lasso. Investigación: Sebastian Guaza Lasso. Metodología: Jorge Luis Sánchez Ortega. Gestión del proyecto: Jorge Luis Sánchez Ortega. Recursos: Jorge Luis Sánchez Ortega. Software: Sebastian Guaza Lasso, Jorge Luis Sánchez Ortega. Supervisión: Jorge Luis Sánchez Ortega. Validación: Sebastian Guaza Lasso. Redacción - borrador original - Preparación: Sebastian Guaza Lasso. Redacción - revisión y edición - Preparación: Sebastian Guaza Lasso, Jorge Luis Sánchez Ortega.

Financiamiento: no declara.

Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara.

Referencias

- (1) Khan MI, Shin JH, Kim JD. 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* 2018;17:1 2018;17:36-. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-0879-x>.
- (2) Tormos-Cedeño L, Ortega-Díaz Y. Cultivo y aplicaciones de Chlorella vulgaris: principales tendencias y potencialidades en la agricultura. *Tecnología Química* 2022. <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/5224/4693>
- (3) Gabriel F, Fernández A, María J, Sevilla F, Molina Grima E. Contribución de las microalgas al desarrollo de la bioeconomía. *Mediterráneo Económico*, ISSN 1698-3726, N° 31, 2018 (Ejemplar Dedicado a: Bioeconomía y Desarrollo Sostenible), Págs 309-331 2018:309–31. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6648783>
- (4) Guayara-Artunduaga JA. Producción de biomasa microalgal en fotobioreactores tubulares al aire libre utilizando fertilizantes como medio de cultivo (tesis de maestría). Medellín: Universidad Nacional de Colombia; 2018. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76275>.
- (5) Adochite C, Andronic L. Aquatic Toxicity of Photocatalyst Nanoparticles to Green Microalgae Chlorella vulgaris. *Water* 2021, Vol 13, Page 77 2020;13:77. <https://doi.org/10.3390/W13010077>.
- (6) Canelli G, Neutsch L, Carpine R, Tevere S, Giuffrida F, Rohfritsch Z, et al. Chlorella vulgaris in a heterotrophic bioprocess: Study of the lipid bioaccessibility and oxidative stability. *Algal Res* 2020;45:101754. <https://doi.org/10.1016/J.AL GAL.2019.101754>.
- (7) Garcia-Ihuaraqui OR. Aislamiento e identificación de microalgas con potencial biotecnológico, Loreto 2021 (tesis de grado). Iquitos: Universidad Científica del Perú; 2024. <https://repositorio.ucp.edu.pe/items/ec3015b6-5175-4410-9852-5b84ec537006>
- (8) Jacob-Lopes E, Zepka LQ, Queiroz MI. Energy from Microalgae: A Brief Introduction. *Green Energy and Technology* 2018;0:1–4. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69093-3_1
- (9) Safi C, Zebib B, Merah O, Pontalier PY, Vaca-Garcia C. Morphology, composition, production, processing and applications of Chlorella vulgaris: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014;35:265–78. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.04.007>.
- (10) Koutra E, Tsafrikidou P, Sakarika M, Kornaros M. Microalgal Biorefinery. *Microalgae Cultivation for Biofuels Production* 2020:163–85. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817536-1.00011-4>
- (11) Matos ÂP, Feller R, Moecke EHS, Sant'Anna ES. Biomass, lipid productivities and fatty acids composition of marine *Nannochloropsis gaditana* cultured in desalination concentrate. *Bioresour Technol* 2015;197:48–55. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2015.08.041>.
- (12) Udayan A, Sirohi R, Sreekumar N, Sang BI, Sim SJ. Mass cultivation and harvesting of microalgal biomass: Current trends and future perspectives. *Bioresour Technol* 2022;344:126406. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.126406>.
- (13) Lee YK. Microalgal mass culture systems and methods: Their limitation and potential. *J Appl Phycol* 2001;13:307–15. <https://doi.org/10.1023/A:1017560006941>
- (14) Kumar Y, Kaur S, Kheto A, Munshi M, Sarkar A, Om Pandey H, et al. Cultivation of microalgae on food waste: Recent advances and way forward. *Bioresour Technol* 2022;363:127834. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127834>
- (15) Rendon Castrillon LJ, Ramirez Carmona ME, Salazar YV: Microalgas para la industria alimenticia. Medellín: Editorial Universidad Pontificia Bolivariana; 2015

- (16) Wei J, Huang J, Wang Z, Zhao C, Zhao Y, Zhang H. Performance of different microalgae-based technologies for integral biogas slurry nutrient removal and biogas upgrading in response to various 5-deoxystrigol concentrations. *Journal of Applied Phycology* 2024;36:6 2024;36:3381–92. <https://doi.org/10.1007/S10811-024-03357-0>.
- (17) Xu Z, Wang H, Cheng P, Chang T, Chen P, Zhou C, et al. Development of integrated culture systems and harvesting methods for improved algal biomass productivity and wastewater resource recovery – A review. *Science of The Total Environment* 2020;746:141039. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.141039>.
- (18) Wei ZJ, Li X, Wang HN, Yin YH, Xi LJ, Ge BS. Enhanced Biomass Production and Lipid Accumulation by Co-cultivation of Chlorella vulgaris with Azotobacter Mesorhizobium sp. *China Biotechnology* 2019;39:56–64. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20219962332>
- (19) Mohammad Mirzaie MA, Kalbasi M, Mousavi SM, Ghobadian B. Statistical evaluation and modeling of cheap substrate-based cultivation medium of Chlorella vulgaris to enhance microalgae lipid as new potential feedstock for biolubricant. *Prep Biochem Biotechnol* 2016;46:368–75. <https://doi.org/10.1080/10826068.2015.1031398>.
- (20) Grubišić M, Peremin I, Djedović E, Šantek B, Ivančić Šantek M. Cultivation of a Novel Strain of Chlorella vulgaris S2 under Phototrophic, Mixotrophic, and Heterotrophic Conditions, and Effects on Biomass Growth and Composition. *Fermentation* 2024;10:270. <https://doi.org/10.3390/FERMENTATION10060270>
- (21) Yan X, Shan S, Li X, Xu Q, Yan X, Ruan R, et al. Carbon and energy metabolism for the mixotrophic culture of Chlorella vulgaris using sodium acetate as a carbon source. *Front Microbiol* 2024;15:1436264. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2024.1436264>
- (22) Sirajunnisa AR, Surendhiran D. Algae – A quintessential and positive resource of bioethanol production: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016;66:248–67. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.07.024>.
- (23) Dehghani J, Movafeghi A, Mathieu-Rivet E, Mati-Baouche N, Calbo S, Lerouge P, et al. Microalgae as an Efficient Vehicle for the Production and Targeted Delivery of Therapeutic Glycoproteins against SARS-CoV-2 Variants. *Marine Drugs* 2022, Vol 20, Page 657 2022;20:657. <https://doi.org/10.3390/MD20110657>.
- (24) Tarsitano M, Liu Chung Ming C, Bennar L, - al, Chen Y, Wang C, et al. Chlorella vulgaris Supplementation as Mineral Source of Zinc and Selenium to Improve the Quality of Goat Milk as Health Drink in COVID-19 Pandemy. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 2021;757:012051. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/757/1/012051>.
- (25) Hawrot-Paw M, Sasiadek M. Optimization of Microalgal Biomass Production in Vertical Tubular Photobioreactors. *Energies* 2023, Vol 16, Page 2429 2023;16:2429. <https://doi.org/10.3390/EN16052429>.
- (26) Lois-Milevicich J, Casá N, Alvarez P, Mateucci R, Bustos V, de Escalada Pla M. Chlorella vulgaris biomass production using brewery wastewater with high chemical oxygen demand. *J Appl Phycol* 2020;32:2773–83. <https://doi.org/10.1007/S10811-020-02163-8>.
- (27) de Farias Silva CE, Sforza E. Carbohydrate productivity in continuous reactor under nitrogen limitation: Effect of light and residence time on nutrient uptake in Chlorella vulgaris. *Process Biochemistry* 2016;51:2112–8. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2016.09.015>.
- (28) Hamidah U, Ajijah N, Widyanari, Sintawardani N. Cultivation of Chlorella vulgaris in non-sterilized tofu wastewater anaerobic digestion effluent. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 2022;1017. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1017/1/012030>.

- (29) Ramos R, Pizarro R. Crecimiento y capacidad de biorremediación de *Chlorella vulgaris* (Trebouxiophyceae, Chlorophyta) cultivada en aguas residuales generadas en el cultivo del pez dorado *Seriola lalandi* (Perciformes: Carangidae). *Rev Biol Mar Oceanogr* 2018;53:75–86. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572018000100075>.
- (30) Béchet Q, Chambonnière P, Shilton A, Guizard G, Guieyssse B. Algal productivity modeling: A step toward accurate assessments of full-scale algal cultivation. *Biotechnol Bioeng* 2015;112:987–96. <https://doi.org/10.1002/BIT.25517>.
- (31) Gonçalves AL, Pires JCM, Simões M. A review on the use of microalgal consortia for wastewater treatment. *Algal Res* 2017;24:403–15. <https://doi.org/10.1016/J.AL GAL.2016.11.008>.
- (32) Hu J, Nagarajan D, Zhang Q, Chang JS, Lee DJ. Heterotrophic cultivation of microalgae for pigment production: A review. *Biotechnol Adv* 2018;36:54–67. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2017.09.009>.
- (33) Camacho F, Macedo A, Malcata F. Potential industrial applications and commercialization of microalgae in the functional food and feed industries: A short review. *Mar Drugs* 2019;17. <https://doi.org/10.3390/MD17060312>.
- (34) Lee E, Jalalizadeh M, Zhang Q. Growth kinetic models for microalgae cultivation: A review. *Algal Res* 2015;12:497–512. <https://doi.org/10.1016/J.AL GAL.2015.10.004>.
- (35) Gupta PL, Lee SM, Choi HJ. A mini review: photobioreactors for large scale algal cultivation. *World J Microbiol Biotechnol* 2015;31:1409–17. <https://doi.org/10.1007/S11274-015-1892-4>.
- (36) Venkata Mohan S, Rohit M V., Chiranjeevi P, Chandra R, Navaneeth B. Heterotrophic microalgae cultivation to synergize biodiesel production with waste remediation: Progress and perspectives. *Bioresour Technol* 2015;184:169–78. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.10.056>.
- (37) Moog D, Schmitt J, Senger J, Zarzycki J, Rexer KH, Linne U, et al. Using a marine microalga as a chassis for polyethylene terephthalate (PET) degradation. *Microb Cell Fact* 2019;18:1–15. <https://doi.org/10.1186/S12934-019-1220-Z>.
- (38) de Wilt A, Butkovskyi A, Tuantet K, Leal LH, Fernandes T V., Langenhoff A, et al. Micropollutant removal in an algal treatment system fed with source separated wastewater streams. *J Hazard Mater* 2016;304:84–92. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2015.10.033>.
- (39) Xu WJ, Morris TC, Samocha TM. Effects of C/N ratio on biofloc development, water quality, and performance of *Litopenaeus vannamei* juveniles in a biofloc-based, high-density, zero-exchange, outdoor tank system. *Aquaculture* 2016;453:169–75. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2015.11.021>.
- (40) Sepehri A, Sarrafzadeh MH, Avateffazeli M. Interaction between *Chlorella vulgaris* and nitrifying-enriched activated sludge in the treatment of wastewater with low C/N ratio. *J Clean Prod* 2020;247:119164. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119164>.
- (41) Barkia I, Saari N, Manning SR. Microalgae for High-Value Products Towards Human Health and Nutrition. *Marine Drugs* 2019, Vol 17, Page 304 2019;17:304. <https://doi.org/10.3390/MD17050304>.
- (42) Ji X, Jiang M, Zhang J, Jiang X, Zheng Z. The interactions of algae-bacteria symbiotic system and its effects on nutrients removal from synthetic wastewater. *Bioresour Technol* 2018;247:44–50. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.09.074>.
- (43) Ge S, Qiu S, Tremblay D, Viner K, Champagne P, Jessop PG. Centrate wastewater treatment with *Chlorella vulgaris*: Simultaneous enhancement of nutrient removal, biomass and lipid production. *Chemical Engineering Journal* 2018;342:310–20. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2018.02.058>.

- (44) Bazdar E, Roshandel R, Yaghmaei S, Mardanpour MM. The effect of different light intensities and light/dark regimes on the performance of photosynthetic microalgae microbial fuel cell. *Bioresour Technol* 2018;261:350–60. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2018.04.026>.
- (45) Ruiz-Marin A, Mendoza-Espinosa LG, Stephenson T. Growth and nutrient removal in free and immobilized green algae in batch and semi-continuous cultures treating real wastewater. *Bioresour Technol* 2010;101:58–64. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2009.02.076>.
- (46) Sydney EB, Sturm W, de Carvalho JC, Thomaz-Soccol V, Larroche C, Pandey A, et al. RETRACTED: Potential carbon dioxide fixation by industrially important microalgae. *Bioresour Technol* 2010;101:5892–6. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.02.088>.
- (47) Ekpo U, Ross AB, Camargo-Valero MA, Williams PT. A comparison of product yields and inorganic content in process streams following thermal hydrolysis and hydrothermal processing of microalgae, manure and digestate. *Bioresour Technol* 2016;200:951–60. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTEC.2015.11.018>.
- (48) Kim KH, Choi IS, Kim HM, Wi SG, Bae HJ. Bioethanol production from the nutrient stress-induced microalga Chlorella vulgaris by enzymatic hydrolysis and immobilized yeast fermentation. *Bioresour Technol* 2014;153:47–54. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTEC.2013.11.059>.
- (49) Chan A, Salsali H, McBean E. Heavy metal removal (copper and zinc) in secondary effluent from wastewater treatment plants by microalgae. *ACS Sustain Chem Eng* 2014;2:130–7. <https://doi.org/10.1021/sc400289z>
- (50) Gouveia L, Graça S, Sousa C, Ambrosano L, Ribeiro B, Botrel EP, et al. Microalgae biomass production using wastewater: Treatment and costs: Scale-up considerations. *Algal Res* 2016;16:167–76. <https://doi.org/10.1016/J.AL GAL.2016.03.010>.
- (51) Qin L, Shu Q, Wang Z, Shang C, Zhu S, Xu J, et al. Cultivation of chlorella vulgaris in dairy wastewater pretreated by UV irradiation and sodium hypochlorite. *Appl Biochem Biotechnol* 2014;172:1121–30. <https://doi.org/10.1007/S12010-013-0576-5>.
- (52) Hossain N, Mahlia TMI, Zaini J, Saidur R. Techno-economics and Sensitivity Analysis of Microalgae as Commercial Feedstock for Bioethanol Production. *Environ Prog Sustain Energy* 2019;38:13157. <https://doi.org/10.1002/EP.13157>.
- (53) Ummalyma SB, Sirohi R, Udayan A, Yadav P, Raj A, Sim SJ, et al. Sustainable microalgal biomass production in food industry wastewater for low-cost biorefinery products: a review. *Phytochemistry Reviews* 2022 22:4 2022;22:969–91. <https://doi.org/10.1007/S11101-022-09814-3>.
- (54) Gao F, Li C, Yang ZH, Zeng GM, Feng LJ, Liu J zhi, et al. Continuous microalgae cultivation in aquaculture wastewater by a membrane photobioreactor for biomass production and nutrients removal. *Ecol Eng* 2016;92:55–61. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2016.03.046>.
- (55) Gao F, Yang ZH, Li C, Zeng GM, Ma DH, Zhou L. A novel algal biofilm membrane photobioreactor for attached microalgae growth and nutrients removal from secondary effluent. *Bioresour Technol* 2015;179:8–12. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTEC.2014.11.108>.
- (56) Mishra SK, Suh WI, Farooq W, Moon M, Shrivastav A, Park MS, et al. Rapid quantification of microalgal lipids in aqueous medium by a simple colorimetric method. *Bioresour Technol* 2014;155:330–3. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTEC.2013.12.077>.
- (57) Cho DH, Ramanan R, Heo J, Lee J, Kim BH, Oh HM, et al. Enhancing microalgal biomass productivity by engineering a microalgal–bacterial community. *Bioresour Technol* 2015;175:578–85. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTEC.2014.10.159>.