

**Título de la revisión sistemática**

**Revisión sistemática sobre la producción de biodiésel a partir de microorganismos oleaginosos en Latinoamérica con énfasis en Colombia.**

**Datos de la propuesta**

Grupo de investigación	Grupo de Investigación en Micología (GIM)
Línea de investigación	Biotecnología

**Estudiante (s)**

Nombre:	Lina Natalia Quiñones Aguirre
Identificación	1.114.095.290
Correo:	<a href="mailto:lina.quinones02@usc.edu.co">lina.quinones02@usc.edu.co</a>
Teléfono:	3184058671

Nombre:

Identificación

Correo:

Teléfono:

**Director**

Nombre:	Paola Alzate Calderon
Identificación	53074002
Correo:	<a href="mailto:paola.alzate02@usc.edu.co">paola.alzate02@usc.edu.co</a>
Teléfono:	3103701493

**Codirector**

Nombre:	Jhon Eric Mellizo Cerón
Identificación	16376952
Correo:	<a href="mailto:jhon.mellizo00@usc.edu.co">jhon.mellizo00@usc.edu.co</a>
Teléfono:	3134047156

# **Revisión sistemática sobre la producción de biodiésel a partir de microorganismos oleaginosos en Latinoamérica con énfasis en Colombia.**

**LINA NATALIA QUIÑONES AGUIRRE**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Microbióloga**

**Directora**

Paola Alzate Calderón  
Microbiología, MSc., PhD.

**Director**

Jhon Eric Mellizo  
Ingeniero Químico, MSc, DSc.

**Línea de Investigación:**

Biotecnología

**Grupo de Investigación:**

Grupo de Investigación en Micología (GIM)

**Universidad Santiago de Cali  
Facultad de Ciencias Básicas  
Programa de Microbiología  
Cali, Colombia**

**2022**

**Producción de biodiésel a partir de microorganismos oleaginosos en Latinoamérica con énfasis en Colombia. Revisión sistemática.**

**RESUMEN**

En la actualidad, la producción de biodiésel es considerada la mejor alternativa para reducir entre otras cosas, los impactos ambientales causados por la producción y uso de combustibles fósiles. El uso de microorganismos oleaginosos como materia prima para la elaboración de biodiésel desencadena gran interés debido a que posee grandes ventajas en comparación como otro tipo de materias primas, entre estas la reducción de costos de producción. Es por esto, que se planteó la elaboración de una revisión sistemática de la literatura existente durante el periodo 2008-2022 sobre estudios relacionados con producción de biodiésel a partir de microorganismos oleaginosos en los países más representativos de América Latina (Brasil, Argentina, Colombia, Perú, Ecuador, México y Chile). Para esto, se elaboró una bitácora de búsqueda en la que se incluyeron bases de datos de tipo literatura gris, especializadas y multidisciplinarias. Los datos fueron analizados según algunos de los parámetros recomendados por la declaración PRISMA. En total se incluyeron 70 publicaciones, encontrándose que el tipo de microorganismo más empleado en los diferentes estudios fueron las microalgas (53) y que el país con más reportes para los diferentes microorganismos fue Brasil (31), así mismo se consignó información relevante como productividad lipídica, biomasa y ácidos grasos según la información suministrada en los diferentes estudios para cada caso. Se espera que esta revisión fortalezca futuros estudios para la producción de biodiésel, empleando como materia prima microorganismos oleaginosos en Colombia, aportando información consolidada y relevante con el fin de que la comunidad científica pueda desarrollar estudios relacionados y fomentar el uso de los microorganismos a nivel industrial y biotecnológico.

**Palabras Claves:** Biodiésel, Producción, Microalga, Hongo, Levadura, Bacteria, América Latina.

**ABSTRACT**

Currently, the production of biodiesel is considered the best alternative to reduce among other things the environmental impacts caused in the production and use of fossil fuels, the use of oily microorganisms as a raw material to produce biodiesel triggers great interest because it has great advantages compared to other types of raw materials, among these the reduction of production costs. That is why we proposed the elaboration of a systematic review of the existing literature during the period 2008-2022 on studies related to the production of biodiesel from oilseed microorganisms in the most representative countries of Latin America (Brazil, Argentina, Colombia, Peru, Ecuador, Mexico, and Chile). For this, a search log was prepared in which databases of gray literature type, specialized and multidisciplinary are included. The data were analyzed according to some of the parameters recommended by the PRISMA Declaration. In total, 70 publications were included, finding that the type of microorganism most used in the different studies were Microalgae (53) and that the country with the most reports for the different microorganisms was Brazil (31), as well as relevant information such as lipid productivity, biomass and fatty acids according to the information provided in the different studies for each case.

It is expected that this review will strengthen the studies for the production of biodiesel using oilseed microorganisms as raw material in Colombia, providing consolidated and relevant information so that the scientific community can develop related studies and promote the use of microorganisms at an industrial and biotechnological level.

**Keywords:** Biodiesel, Production, Microalgae, Fungus, Yeast, Bacteria, Latin America.

## **1 Introducción**

A principios del siglo XXI, el agotamiento de los recursos petroleros causantes del calentamiento global y la contaminación ambiental desbordó una gran preocupación que estimuló el interés por nuevas energías renovables como los biocombustibles. El origen del biocombustible, se presentó por primera vez en 1898 por Rudolf Diesel quién alimento un motor Diesel con aceite de Cacahuete con la visión de que ese tipo de combustibles obtenido a través de la biomasa fuera el verdadero futuro del motor (1).

El biodiésel puede definirse como una fuente de energía renovable, producido principalmente por aceites y grasas naturales que puede ser utilizado como sustituto del diésel de petróleo (2), su clasificación está dada generalmente en función del origen de la materia prima utilizada que puede ser el aceite de trigo, la cebada, el maíz, el coco y el girasol, los cuales son considerados como de primera generación, la materia prima de segunda generación, es sintetizada a partir de aceites de cocina usados, así como del aceite de salvado de arroz, aceite de jatropha, entre otros (3). Además, existe una materia prima de tercera generación, la cual se obtiene a partir de microorganismos oleaginosos, por ejemplo, las microalgas, los hongos, entre otros, que representan un gran potencial de producción lipídico (4).

El biodiésel, presenta una serie de ventajas sobre el petróleo diésel al tratarse de una sustancia biodegradable, no es explosiva, ni inflamable, no es tóxica, es renovable y su combustión genera bajos niveles de emisiones en gases de efecto invernadero y material particulado, lo que es amigable con el medio ambiente (5).

A nivel latinoamericano, Brasil, Argentina y Colombia son los únicos países que figuran entre los principales productores de bioetanol y biodiésel según datos del último estudio sobre biocombustibles publicado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (6), sin embargo, la publicación del IICA “Atlas de los biocombustibles líquidos 2020-2021” además de incorporar a los países ya mencionados, reflejan la participación importante en la producción de biodiésel por Perú y Ecuador (7).

Las materias primas más utilizadas para la producción de biodiésel en 2019 según el IICA fueron los aceites vegetales, de los cuales se destacan los de palma (29 %), soja (25 %) y colza (17 %). En Colombia el componente primario para la producción industrial de biodiésel es el aceite de palma y se estima que aproximadamente el 60% de la producción nacional de este aceite se destina al sector alimenticio, mientras que el 40% se utiliza para la producción de biocombustibles. Lo

anterior ha generado un panorama de competencia entre la seguridad alimentaria y el sector energético (8).

Considerando lo mencionado anteriormente, la producción de aceite microbiano podría contribuir a la reducción de los costos de la materia prima de biodiésel, además de que tienen ciclos de vida cortos, requieren menos mano de obra y son menos susceptibles a las variaciones ambientales, lo que los convierte en una materia prima ideal (9) que resultaría de utilidad en países subdesarrollados.

A nivel mundial, varios estudios respaldan el potencial de los microorganismos en la producción de biodiésel, por ejemplo, en la universidad de Tsinghua en China, se evaluó la producción de biodiesel de alta calidad a partir de prototocoides de la microalga *Chlorella sp* empleando crecimiento heterotrófico en fermentadores y determinaron un gran potencial en la producción industrial de combustible líquido a partir de este organismo (10) también en la universidad de Shanghái, China, en compañía con el centro de Arizona para la Tecnología e Innovación de Algas, EEUU, se desarrolló un procedimiento de producción de biodiesel directamente a partir de microalgas húmedas donde obtuvieron resultados favorables para la microalga *Chlorella vulgaris* (11) por otra parte, un estudio realizado en India, ilustra la importancia de la levadura oleaginosa *Rhodotorula pacifica* INDKK en un campo integrado de biorrefinería mediante la utilización de azúcares renovables generados a partir de biomasa lignocelulósica (12) así como la producción de combustible biodiesel por parte de células enteras de *Aspergillus niger* en Rusia (13).

Resultados similares pueden encontrarse en estudios realizados en países latinoamericanos, por ello se consideró importante recopilar y analizar las investigaciones sobre la producción de biodiésel a partir de microorganismos oleaginosos. La búsqueda bibliográfica se realizó en los países de América Latina que figuran como principales productores de biodiésel como se mencionó anteriormente los cuales son: Brasil, Argentina, Colombia, Perú y Ecuador y adicionalmente se añadieron los países Chile y México puesto que estos figuran entre las mayores economías de América Latina y el Caribe, según el producto interno bruto (PIB) registrado en 2021 (14).

En el análisis de la literatura, se hizo énfasis en Colombia, a partir de las publicaciones realizadas desde el año 2008 debido a que en ese año se promovió la producción sostenible de biocombustibles con la formulación del documento CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social) No. 3510 (15), mientras que, para el resto de países, en la búsqueda no se encontraron publicaciones anteriores al año 2008.

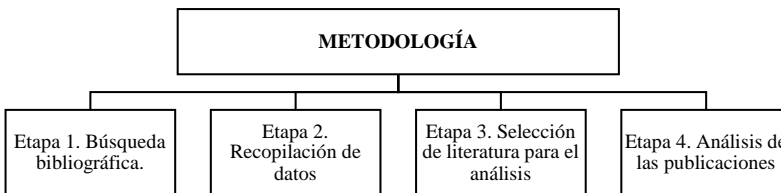
El objetivo de esta revisión fue analizar todas las investigaciones realizadas sobre el uso de microorganismos oleaginosos en la elaboración de biodiésel en algunos países de Latinoamérica con el propósito de reconocer los microorganismos de gran utilidad en dicha producción y así dar respuesta a la pregunta: ¿Cuáles son los microorganismos oleaginosos utilizados y cuáles de estos presentan mayor producción de biomasa, lípidos y ácidos grasos en la elaboración de biodiésel en algunos países de Latinoamérica con énfasis en Colombia?. Esto permitirá consolidar información de utilidad como punto de partida para que las comunidades académicas y científicas puedan plantear estrategias y protocolos de producción de biodiésel a partir de microorganismos oleaginosos, en Colombia.

### 1.1 Formulación de la pregunta de investigación

¿Cuáles son los microorganismos oleaginosos que presentan mayor producción de biomasa, lípidos y ácidos grasos en la elaboración de biodiésel en algunos países de Latinoamérica con énfasis en Colombia?

## 2 Metodología

Se realizó una investigación teórica basada en algunos de los criterios de la Declaración PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Para la recopilación y análisis, la revisión se fundamentó en la pregunta de investigación y para el esquema metodológico se acogió lo planteado por Rosero & Del Corral, 2008 que consta de cuatro etapas como se muestra en la **Figura 1**.



**Figura 1.** Esquema metodológico para la revisión sistemática

Fuente: Propia

### 2.1 Etapa 1. Búsqueda bibliográfica

Se realizó la búsqueda de los estudios relacionados con la producción de biodiésel a partir de microorganismos oleaginosos en siete países de Latinoamérica (*Colombia, Argentina, Brasil, Perú, Ecuador, México y Chile*). Las bases de datos propuestas fueron, especializadas: *SciElo* y *ScienceDirect*, multidisciplinares: *Springer Link* y *Scopus* y Literatura gris: *Google Scholar*.

Para definir las palabras claves, se realizó un sondeo inicial con relación al objetivo de estudio y a la pregunta de investigación con el fin de obtener los resultados más útiles, para lo cual se emplearon las siguientes palabras claves en los idiomas inglés y español: Microalga, levadura, hongo, bacterias, oleaginoso, microorganismo, biodiésel, oleoso, Latinoamérica, Colombia, Argentina, Chile, México, Brasil, Perú, Ecuador, América latina.

El diseño para la búsqueda se direccionó mediante el uso de un documento de Excel denominado *Bitácora de búsqueda* (Anexo 1) en la hoja de cálculo “*Búsqueda bibliográfica*” (Anexo 1) se plasmaron los siguientes aspectos: actividad, materia prima, matriz energética y ubicación.

Una vez determinado el diseño de búsqueda se utilizó la combinación de las palabras claves en inglés y español descritas a continuación:

Actividad: *Production*.

Materia prima: *Microalgae, Fungi, Yeast, Bacterium*.

Matriz energética: *Biodiesel*.

Ubicación: *Colombia, Argentina, Brazil, Peru, Ecuador, Mexico, Chile*.

Los criterios de inclusión y exclusión se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Criterios de inclusión y exclusión.

Parámetro	Criterio de inclusión	Criterio de exclusión
Tipo de estudio	Artículos originales, Tesis y resúmenes.	Revisiones de tema, libros y resúmenes que no suministren datos
Población	Colombia, Argentina, Brasil, Perú, Ecuador, México y Chile.	Países diferentes a Colombia, Argentina, Brasil, Perú, Ecuador, México y Chile
Idiomas	Inglés - español	Idioma diferente a español, inglés o portugués
Años de Publicación	2008 – junio 2022	Años inferiores 2008 y publicaciones después de junio 2022
Materia prima	Microalga, Hongo, Levadura, Bacteria	Otro tipo de materia prima que no sea microorganismo oleaginoso
Matriz energética	Biodiésel	Otro tipo de matriz energética.

Fuente: Propia

## 2.2 Etapa 2. Recopilación de datos.

Los documentos recopilados fueron almacenados en carpetas como archivos PDF por país y se identificaron (ID) con el primer apellido del primer autor y el año de publicación, esta información está relacionada en la hoja de Excel “*Documentos preseleccionados*” incluida en la bitácora de búsqueda (Anexo 1), dónde incorporaron los siguientes campos: Fecha de búsqueda, Base de Datos, Palabras Claves, Número de Resultados, Número de documentos preseleccionados, Tipo de Documento, Identificación (ID), DOI (si era el caso) y País.

Una vez culminada la búsqueda, los documentos preseleccionados se consignaron cada uno en la hoja de Excel “*BD-Filtro (Base de datos-Filtro)*” Anexo 1, en la cual se incluye los siguientes campos: Fecha de búsqueda, ID del documento, Nombre del artículo, Nombre del Autor(es), año de publicación, Base de datos (donde se realizó la búsqueda), ¿Se incluye la publicación?, Motivo de exclusión, Materia prima, Nombre científico, País.

Posteriormente, los artículos fueron importados a Mendeley, lo que permitió realizar la comprobación de resultados duplicados. Luego, cada una de las publicaciones fueron exportadas

en formato RIS (Research Information Systems) y fueron guardadas en carpetas por país para posteriormente ser analizadas en el aplicativo Rayyan (<https://www.rayyan.ai/>).

### **2.3 Etapa 3. Análisis de la literatura.**

Inicialmente, la selección se realizó en base al título y el resumen disponible para cada uno de los documentos por medio del aplicativo Rayyan, de esta manera se identificaron los documentos potenciales para la revisión sistemática propuesta, teniendo en cuenta los criterios de inclusión y exclusión anteriormente mencionados en la **Tabla 1**.

Una vez terminada la revisión de los documentos, se realizó el flujograma para revisiones sistemáticas según la Declaración PRISMA donde se muestra el número de documentos identificados, cantidad de documentos incluidos o no y el motivo por el cual se excluyeron.

### **2.4 Etapa 4. Guías y materiales para el análisis crítico**

Finalmente, se tomaron los documentos obtenidos del aplicativo Rayyan que cumplieron con los criterios de inclusión y se realizó la extracción de datos de cada uno. La información se detalló en una hoja de Excel "*Análisis (y el país)*" por cada país del **Anexo 1** en la Bitácora de búsqueda mediante los siguientes campos: ID del documento, Nombre científico del microorganismo usado, Aislamiento, Compra o donación, Extracción de lípidos, Método, Acumulación de lípidos, Biodiésel (mg/l), Productividad de Biodiésel (mg/l\*d), Biomasa producida y porcentaje de ácidos grasos. Los datos suministrados sobre especie y/o genero se corroboraron en la base de datos *National Center for Biotechnology Information NCBI*.

Según la información obtenida y según los datos suministrados se examinó la elegibilidad final de los artículos. Todos los resultados fueron analizados de manera crítica, teniendo en cuenta los criterios establecidos para determinar la utilidad dentro del objetivo de la revisión y fueron presentados y discutidos de acuerdo con algunos de los criterios de la Declaración PRISMA.

## **3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

La búsqueda bibliográfica según la metodología propuesta arrojó un total de **104,844** documentos en los diferentes tipos de bases de datos como se muestra en la Tabla 2, donde también se especifican los resultados en los idiomas inglés y español para los tipos de bases de datos y se destaca que la base de datos con más resultados fue Google Scholar con un total de **86,171** publicaciones, estos resultados pueden estar ligados a que el rastreador de Google Scholar toma sus registros de sitios donde la información se encuentra en libre acceso como web académicas de universidades y centros de investigación, repositorios, entre otros y a que es un servicio gratuito (16). Estas búsquedas fueron realizadas entre los meses de junio y agosto de 2022.

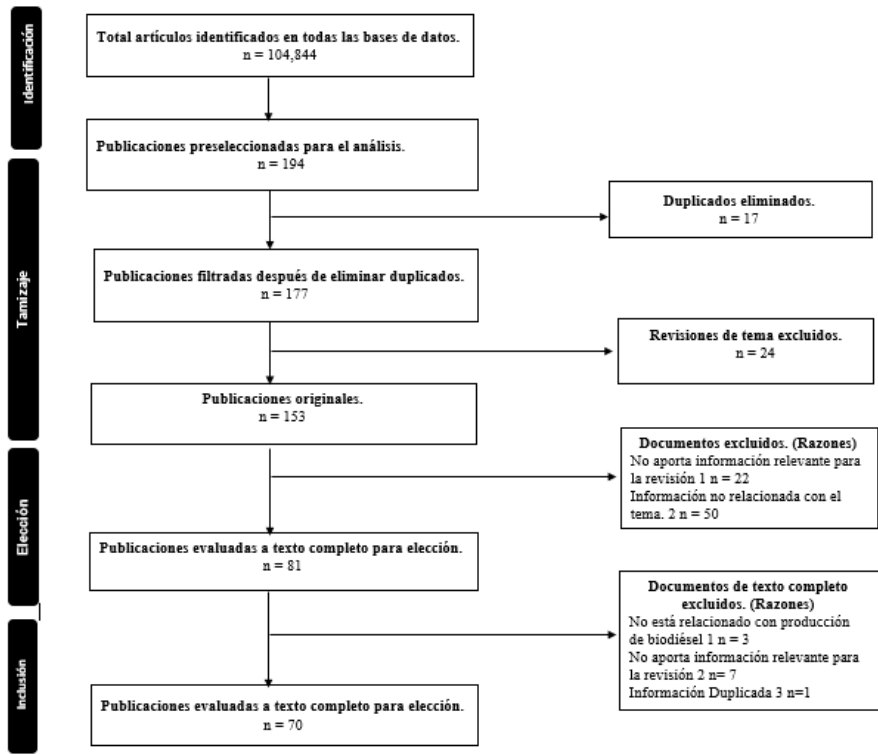
**Tabla 2.** Número de resultados obtenidos en la búsqueda por bases de datos

Bases de datos	Resultados por Idioma		Resultados por <input type="checkbox"/> de datos
	Español	Inglés	
<b>Especializadas:</b>			
SciElo	2	3	5
Science Direct	54	5,669	5,723
<b>Multidisciplinarias:</b>			
Springer Link	1	12,878	12,879
Scopus	0	66	66
<b>Literatura gris:</b>			
Google Scholar	3,787	82,384	86,171
<b>TOTAL</b>	<b>3,844</b>	<b>101,000</b>	<b>104,844</b>

Fuente: Propia

Comentado [JEMC1]: Puede cambiar el diseño

Una vez obtenidos los resultados contemplando los criterios de inclusión y exclusión mencionados en la tabla 1, se realizó el Diagrama de flujo propuesto por la Declaración PRISMA (Figura 1), en la cual se consignan cuatro etapas: Identificación, Tamizaje, Elección e Inclusión.



**Figura 2.** Diagrama de Declaración PRISMA

Fuente: Declaración PRISMA (Modificado)

En la etapa de identificación se relacionan los resultados obtenidos en total por todas las bases de datos **104,844**. Parte de la selección inicial se realizó con base a los títulos de cada publicación, obteniéndose **194** publicaciones preseleccionadas para análisis (**Figura 2**). La exclusión de documentos duplicados se identificó mediante el aplicativo y gestor de referencias Mendeley, dando un total de **177** documentos. Para la etapa de tamizaje, se eliminaron las revisiones de tema dejando un total de **153** publicaciones. Los resúmenes de estos fueron sometidos mediante el aplicativo Rayyan donde se examinaron los criterios de inclusión y exclusión para eliminar los documentos que no los cumplieran.

Las razones de exclusión fueron: “No aporta información relevante para la revisión” donde el documento no estaba relacionado con producción de biodiésel a partir de microorganismos e “Información no relacionada con el tema”, de esta manera se obtuvieron **81** documentos para evaluar a texto completo. En la etapa de elección se excluyeron documentos por: “No estar relacionado con producción de biodiésel” es decir se obtenía otro tipo de matriz energética, “no aportaba información relevante para la revisión” porque no aportaban datos relevantes e “Información duplicada” puesto que el documento presentaba la misma información que otro documento registrado. Finalmente, la revisión sistemática se realizó con **70** publicaciones originales los cuales cumplieron los criterios de inclusión y especificidad.

En la **Tabla 3**, se compilan las **70** publicaciones incluidas en la revisión sistemática.

**Tabla 3.** Publicaciones incluidas en la Revisión sistemática.

ID	Año	Nombre completo Publicación	País	Base de datos	Ref.
Alvear-2011	2011	Evaluación del pH y concentración del nitrógeno en el cultivo de las microalgas <i>Dunaliella</i> salina y <i>Chlorella</i> nativa como fuente de aceite vegetal para la producción de Biodiésel.	Colombia	Google Scholar	(17)
Jaimes-2012	2012	Characterization <i>Chlorophytas</i> microalgae with potential in the production of lipids for biofuels.	Colombia	Google Scholar	(18)
Gómez-2019	2019	Obtención de biomasa de microalgas en aguas residuales para la producción de biocombustibles.	Colombia	Google Scholar	(19)
Urbina-2021	2021	Cultivation of <i>Chlorella</i> sp. for biodiesel production using two farming wastewaters in eastern Colombia.	Colombia	Google Scholar	(20)
Popovich-2012.	2012	Lipid quality of the diatoms <i>Skeletonema costatum</i> and <i>Navicula gregaria</i> from the South Atlantic Coast (Argentina): evaluation of its suitability as biodiesel feedstock.	Argentina	Google Scholar	(21)
Donascimento-2012	2012	Bioprospecting for fast growing and biomass characterization of oleaginous microalgae from South-Eastern Buenos Aires, Argentina.	Argentina	Science Direct	(22)

**Revisión Sistemática**

Marquez-2012	2012	Association with an Ammonium-Excreting Bacterium Allows Diazotrophic Culture of Oil-Rich Eukaryotic Microalgae.	Argentina	Google Scholar	(23)
Salomón-2014	2014	Cultivo en efluentes urbanos del alga <i>Scenedesmus quadricauda</i> ( <i>Sphaeropleales: Scenedesmaceae</i> ) y su potencial para biodiesel: perfil de ésteres metílicos de ácidos grasos.	Argentina	Google Scholar	(24)
Popovich-2017	2017	Cultivo de microalgas: bases científicas para emprendimientos bioenergéticos en el estuario de bahía blanca (bs.as., argentina).	Argentina	Google Scholar	(25)
Martín-2017	2017	Hybrid two-stage culture of <i>Halamphora coffeaeformis</i> for biodiesel production: Growth phases, nutritional stages and biorefinery approach.	Argentina	Google Scholar	(26)
Maza-2020	2020	Growth and lipid production of <i>Rhodotorula glutinis</i> R4, in comparison to other oleaginous yeasts.	Argentina	Science Direct	(27)
Viñarta-2020	2020	Fatty acids profiles and estimation of the biodiesel quality parameters from <i>Rhodotorula spp.</i> from Antarctica.	Argentina	Springer Link	(28)
Maza-2021	2021	<i>Rhodotorula glutinis</i> T13 as a potential source of microbial lipids for biodiesel generation.	Argentina	Science Direct	(29)
Sergeva-2008	2008	Lipids of Filamentous Fungi as a Material for Producing Biodiesel Fuel.	Brasil	Springer Link	(30)
Francisco-2010	2010	Microalgae as feedstock for biodiesel production: Carbon dioxide sequestration, lipid production and biofuel quality.	Brasil	Google Scholar	(31)
Florisvaldo-2011	2011	Endophytic Fungi as a Source of Biofuel Precursors	Brasil	Google Scholar	(32)
Junior-2011	2011	Microalgae biodiesel via in situ methanolysis	Brasil	Google Scholar	(33)
Sydney-2011	2011	Screening of microalgae with potential for biodiesel production and nutrient removal from treated domestic sewage	Brasil	Google Scholar	(34)
Duarte-2013	2013	Influence of culture conditions on lipid production by <i>Candida sp.</i> LEB-M3 using glycerol from biodiesel synthesis	Brasil	Google Scholar	(35)
Menezes-2013	2013	Avaliação da potencialidade de microalgas dulcícolas como fonte de matéria-prima graxa para a produção de biodiesel	Brasil	Google Scholar	(36)
Nascimento-2013	2013	Screening Microalgae Strains for Biodiesel Production: Lipid Productivity and Estimation of Fuel Quality Based on Fatty Acids Profiles as Selective Criteria	Brasil	Springer Link	(37)
Sarpal-2014	2014	Biodiesel Potential of Oleaginous Yeast Biomass by NMR Spectroscopic Techniques	Brasil	Google Scholar	(38)
Soares-2014	2014	Comparative Analysis of the Fatty Acid Composition of Microalgae Obtained by Different	Brasil	Springer Link	(39)

*Revisión Sistemática*

		Oil Extraction Methods and Direct Biomass Transesterification			
Díaz-2015	2015	Cultivation of Microalgae <i>Monoraphidium</i> sp., in the Plant Pilot the Grand Valle Bio Energy, for Biodiesel Production	Brasil	Google Scholar	(40)
Francisco-2015	2015	Produção de biodiesel de terceira geração a partir de microalgas	Brasil	Google Scholar	(41)
Spider-2015	2015	Bioconversion of Raw Glycerol Generated from the Synthesis of Biodiesel by Different Oleaginous Yeasts: Lipid Content and Fatty Acid Profile of Biomass	Brasil	Springer Link	(42)
Menezes-2016	2016	Culture medium influence on growth, fatty acid, and pigment composition of <i>Choricystis</i> minor var. minor: a suitable microalga for biodiesel production	Brasil	Springer Link	(43)
Lemoes-2016	2016	Sustainable production of biodiesel from microalgae by direct transesterification	Brasil	Google Scholar	(44)
Siqueira-2016	2016	Third generation biodiesel production from microalgae. <i>Phormidium autumnale</i>	Brasil	Google Scholar	(45)
Souza-2016	2016	Waste Soybean Oil and Corn Steep Liquor as Economic Substrates for Bioemulsifier and Biodiesel Production by <i>Candida lipolytica</i> UCP 0998	Brasil	Google Scholar	(46)
Ramírez-2017	2017	The Oleaginous Yeast <i>Meyerozyma guilliermondii</i> BI281A as a New Potential Biodiesel Feedstock: Selection and Lipid Production Optimization	Brasil	Google Scholar	(47)
Pinho-2017	2017	Evaluating the Potential of Biodiesel Production through Microalgae Farming in Photobioreactor and High Rate Ponds from Wastewater Treatment	Brasil	Springer Link	(48)
Rinna-2017	2017	Wastewater treatment by microalgae can generate high quality biodiesel feedstock	Brasil	Google Scholar	(49)
Rivaldi-2017	2017	Assessing the Potential of Fatty Acids Produced by Filamentous Fungi as Feedstock for Biodiesel Production	Brasil	Google Scholar	(50)
Sassi-2017	2017	Cultivation of freshwater microalgae in biodiesel wash water	Brasil	Springer Link	(51)
Soccol-2017	2017	Pilot scale biodiesel production from <i>Rhodospiridium toruloides</i> DEBB 5533 microbial oil using sugarcane juice: Performance in diesel engine and preliminary economic study	Brasil	Google Scholar	(52)
Dalessandro-2018	2018	Viability of biodiesel production from a thermophilic microalga in conventional and alternative culture media	Brasil	Springer Link	(53)
Calixto-2018	2018	Productivity and fuel quality parameters of lipids obtained from 12 species of microalgae from the northeastern region of Brazil	Brasil	Springer Link	(54)
Dalessandro-2019	2019	Potential use of a thermal water cyanobacterium as raw material to produce biodiesel and pigments	Brasil	Google Scholar	(55)

*Revisión Sistemática*

Bredda-2019	2019	Mixture design as a potential tool in modeling the effect of light wavelength on <i>Dunaliella salina</i> cultivation: an alternative solution to increase microalgae lipid productivity for biodiesel production	Brasil	Google Scholar	(56)
Dejesus-2020	2020	Biodiesel production from microalgae by direct transesterification using green solvents	Brasil	Google Scholar	(57)
Vieira-2020	2020	Isolation of a new <i>Papiliotrema laurentii</i> strain that displays capacity to achieve high lipid content from xylose	Brasil		(58)
Dzuman-2022	2022	Microalgae Culture Medium Recycling: Improved Production of Biomass and Lipids, Biodiesel Properties and Cost Reduction	Brasil	Springer Link	(59)
Oliveira-2022	2022	Integrated use of microalgal biomass of <i>Choricystis minor</i> var. <i>minor</i> : a promising model for production of biodiesel and aquafeeds	Brasil	Springer Link	(60)
Pedro-2022	2022	Highly Wet <i>Chlorella minutissima</i> Biomass for In Situ Biodiesel Production and Residual Biomass Rich in Labile Carbohydrates	Brasil	Springer Link	(61)
Guizado-2012	2012	"Comparativo de tres fitohormonas en concentraciones de 25, 50 y 75 ppm en el crecimiento poblacional de <i>Scenedesmus acutus</i> meyen, para uso como biodiésel"	Perú	Google Scholar	(62)
Cobos-2014	2014	Potencial biotecnológico para la producción sustentable de biodiesel de microalgas oleaginosas aisladas del río itaya, loreto, Perú	Perú	Google Scholar	(63)
Cobos-2017	2017	Isolation and Characterization of Native Microalgae from the Peruvian Amazon with Potential for Biodiesel Production	Perú	Google Scholar	(64)
Arce-2018	2018	Caracterización fisicoquímica de biodiesel a partir de la microalga <i>Chlorella vulgaris</i> , obtenida en fotobiorreactor tubular.	Perú	Google Scholar	(65)
Teran-2019	2019	"Obtención de biodiesel de tercera generación a partir de la producción del contenido lipídico del cultivo de la microalga <i>Chlorella sp</i> de origen marino."	Perú	Google Scholar	(66)
Sanchez-2020	2020	"Cultivo de microalga <i>Chlorella sp</i> en un fotobiorreactor para la obtención de biodiesel"	Perú	Google Scholar	(67)
Oblitas-2020	2020	Nutrients effect on the performance of <i>Botryococcus braunii</i> biomass for the obtaining of biodiesel	Perú	Google Scholar	(68)
Bardales-2021	2021	Obtención de biodiesel a partir de lípidos de <i>Ankistrodesmis sp.</i> Bajo condiciones de ausencia de nitrógeno en la amazonia peruana	Perú	Google Scholar	(69)
Hinojosa-2015	2015	Producción de biodiesel a partir de microalgas nativas cultivadas en un fotobiorreactor a escala laboratorio	Ecuador	Google Scholar	(70)

**Revisión Sistemática**

Quintanilla-2016	2016	Production and characterization of biodiesel from microalgae cultivated in a photobioreactor at laboratory scale	Ecuador	Google Scholar	(71)
Franco-2015	2015	Síntesis de biodiésel a partir de aceite producido por microalgas antárticas	Ecuador	Google Scholar	(72)
Herrera-2011	2011	The Green Microalga <i>Chlorella saccharophila</i> as a Suitable Source of Oil for Biodiesel Production	México	Springer Link	(73)
Sacristan de alva-2014	2014	Producción de biodiésel a partir de microalgas y una cianobacteria cultivada en diferentes calidades de agua	México	Google Scholar	(74)
Tadeo-2014	2014	Producción de biodiésel por <i>Nannochloropsis sp.</i> bajo diferentes condiciones ambientales	México	Google Scholar	(75)
Reyna-2015	2015	Lipid Production by Pure and Mixed Cultures of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> and <i>Rhodotorula mucilaginosa</i> Isolated in Nuevo Leon, Mexico	México	Springer Link	(76)
Valdez-2015	2015	Characterization of five fresh water microalgae with potential for biodiesel production	México	Science Direct	(77)
Mendoza-2017	2017	Lipid extraction from the biomass of <i>Trichoderma koningiopsis</i> MX1 produced in a non-stirring culture for potential biodiesel production	México	Springer Link	(78)
Botton-2018	2018	Optimization of biodiesel synthesis by esterification using a fermented solid produced by <i>Rhizopus microsporus</i> on sugarcane bagasse	México	Springer Link	(79)
Montero-2018	2018	Mixotrophic cultivation of <i>Chlorococcum sp.</i> under non-controlled conditions using a digestate from pig manure within a biorefinery	México	Springer Link	(80)
Pineda-2019	2019	Effect of CO <sub>2</sub> on the generation of biomass and lipids by <i>Monoraphidium contortum</i> : A promising microalga for the production of biodiesel	México	Google Scholar	(81)
Casian-2020	2020	Bioprospección de microalgas con potencial para la producción de biodiésel	México	Google Scholar	(82)
Rodríguez-2022	2022	The cultivation of five microalgae species and their potential for biodiesel production	México	Springer Link	(83)
Cea-2015	2015	Screening transesterificable lipid accumulating bacteria from sewage sludge for biodiesel production	Chile	Science Direct	(84)
Torres-2017	2017	Direct transesterification of microalgae biomass and biodiesel refining with vacuum distillation	Chile	Science Direct	(85)

*Revisión Sistemática*

Branco-2017	2017	Potential of <i>Phaeodactylum tricorutum</i> for Biodiesel Production under Natural Conditions in Chile	Chile	Google Scholar	(86)
-------------	------	---	-------	----------------	------

Fuente: Propia.

Se analizó la relación de los estudios seleccionados entre los países que hicieron parte de la revisión. En la **Figura 3** se puede observar que el país con más publicaciones relacionados con producción de biodiésel a partir de microorganismos es Brasil, con **31** publicaciones, esto puede atribuirse a su postura frente a la producción de biodiésel, puesto que como se mencionó anteriormente, este es considerado potencia en producción y exportación de biodiesel a nivel mundial.



**Figura 3.** Número de publicaciones por país.

Fuente: Propia

Por otra parte, en la **Figura 4** se relacionan las publicaciones seleccionadas para el análisis encontradas entre los años 2008 y 2022 descritas en la **Tabla 3**, se observa que la tendencia en la

publicación de estudios relacionados con producción de biodiésel a partir de microorganismos iba en aumento hasta el año 2017, dónde se presenta el mayor número de publicaciones (12), sin embargo, después de ese año los resultados fluctúan, esto, puede estar relacionado con el cambio de políticas que redujeron significativamente la inversión para investigaciones científicas en países como Brasil (87), adicionalmente, la situación pandémica condujo a que las convocatorias y recursos a nivel nacional e internacional se enfocaron en proyectos relacionados con COVID-19 (88) aun así, es importante recalcar que se abarcaron todos los años del periodo evaluado a excepción del año 2009 donde no se encontraron publicaciones que cumplieran con los criterios de inclusión propuestos.

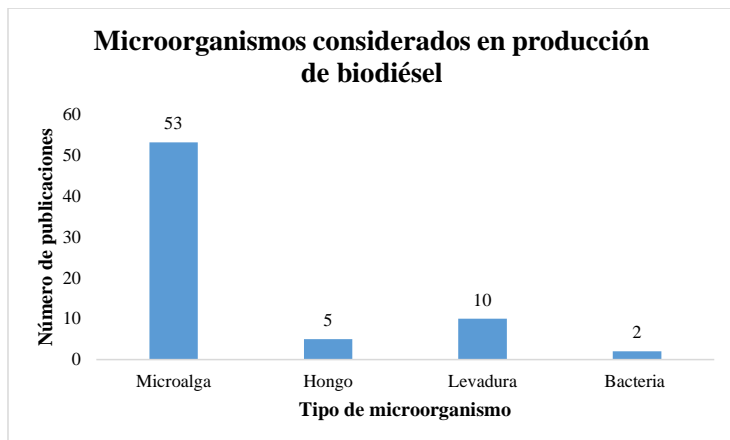


Figura 4. Número de publicaciones encontradas en el rango de años 2008-2022.

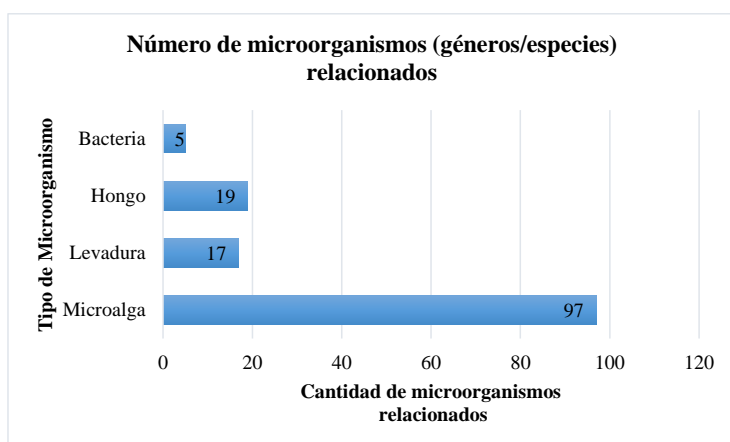
Fuente: Propia

### 3.1 Tipo de microorganismos considerados en la elaboración de Biodiésel.

En la Figura 5A, se observa que el tipo de microorganismo más usado para estudios relacionados con producción de biodiésel son las microalgas con 53 publicaciones, esto se puede atribuir a que las microalgas se producen utilizando luz solar, agua y sales minerales simples, presentan una alta tasa de crecimiento, fotosíntesis y capacidad de secuestro de dióxido de carbono lo que las convierten en una alternativa eficiente de biorrefinería (89). En la Figura 5B se relaciona el número total de microorganismo por género/especie que fueron incluidos en los diferentes documentos analizados.



**Figura 5A.** Incidencia de microorganismos relacionados con la producción de biodiésel  
Fuente: Propia



**Figura 5B.** Cantidad de microorganismos relacionados por cada tipo.  
Fuente: Propia

### Microalgas

A continuación, se relacionan los estudios en los que se utilizaron microalgas como materia prima en la elaboración de biodiésel **Tabla 4**, la cual incluye los siguientes campos; país, género o especie del microorganismo, productividad de biomasa, porcentaje de lípidos y porcentaje de ácidos grasos según la información suministrada en cada caso.

Tabla 4. Géneros y/o especies de microalgas empleadas en los diferentes estudios.

País	Género	Especie	Lípidos (%)	Biomasa (mg/L <sup>-1</sup> )	Ácidos Grasos (%) C16:0, C18:1 y C18:3			Ref.
CL	<i>Chlorella</i>		40,23	591,7		35	39,3	(17)
	<i>Dunaliella</i>	<i>Dunaliella Salina</i>	23,48	1078,4		27,79	18,32	
CL	<i>Chlorella</i> sp		14,27	1,68				(18)
	<i>Desmodesmus</i> sp		21,02	2				
CL	<i>Chlorella</i>		18,24					(19)
CL	<i>Chlorella</i>		21,76		12,40	14,42	25,10	(20)
Ag	<i>Skeletonema</i>	<i>Skeletonema costatum</i>	65		15,77	11,06	0,25	(21)
	<i>Navicula</i>	<i>Navicula gregaria</i>	76		28,74	2,86	0,13	
Ag	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella sorokiniana</i>	60,03	581,50	23,96	22,9	4,45	(22)
	<i>Desmodesmus</i> sp		43,82	451,00	20,62	49,08	3,83	
	<i>Pseudokirchneriella</i> sp		41,10	442,00	20,06	49,08	3,83	
Ag	<i>Scenedesmus</i>	<i>Scenedesmus obliquus</i>	32,05	635,70	21,03	59,60	7,41	(23)
	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella sorokiniana</i>						
	<i>Scenedesmus</i>	<i>Scenedesmus obliquus</i>						
Ag	<i>Scenedesmus</i>	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	7,89		15,87	8,66	13,22	(24)
Ag	<i>Halamphora</i>	<i>Halamphora coffeaeformis</i>	54,4	44,14				(25)
	<i>Navicula</i>	<i>Navicula gregaria</i>	30					
	<i>Skeletonema</i>	<i>Skeletonema costatum</i>	27,5					
	<i>Navicula</i>	<i>Navicula cincta</i>	41					
Ag	<i>Halamphora</i>	<i>Halamphora coffeaeformis</i>	33,4					(26)
Br	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	27		2,22	7,98	0,1	(31)
	<i>Dunaliella</i>	<i>Dunaliella tertiolecta</i>	17,1		1,16	0,18	0,67	
	<i>Phaeodactylum</i>	<i>Phaeodactylum tricorutum</i>	6,3		1,53	0,18	0,67	
	<i>scenedesmus</i>	<i>scenedesmus obliquus</i>	14,1		1,4		0,1	
Br	<i>Nannochloropsis</i>	<i>Nannochloropsis oculata</i>		1,37				(33)
Br	<i>Botryococcus</i>	<i>Botryococcus braunii</i>	36,14	0,48				(34)
	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	7,66	1,01				
Br	<i>Choricistis</i> sp				28,1	12,7	0,5	(36)
	<i>Kirchneriella</i>	<i>Kirchneriella lunaris</i>			24,7	2,1		
	<i>Kirchneriella</i>	<i>Kirchneriella irregularis</i>			27,7	46,0	14,4	
	<i>Monoraphidium</i>	<i>Monoraphidium komarkovae</i>			26,2	40,6	14,7	
	<i>Tetranephris</i>	<i>Tetranephris brasiliensis</i>			30,5	33,8	12,4	
Br	<i>Ankistrodesmus</i>	<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	16,49		30,23	24,12	26,49	(37)
	<i>Ankistrodesmus</i>	<i>Ankistrodesmus fusiformis</i>	20,66		26,95	18,80	26,28	
	<i>Kirchneriella</i>	<i>Kirchneriella lunaris</i>	17,3		25,28	18,50	39,66	

Revisión Sistemática

	<i>Chlamydomonas sp.</i>		15,07		50,77	7,28	1,94	
	<i>Chlamydocapsa</i>	<i>Chlamydocapsa bacillus</i>	13,52		24,51	7,01	20,96	
	<i>Coelastrum</i>	<i>Coelastrum microporum</i>	20,55		25,66	44,42		
	<i>Desmodesmus</i>	<i>Desmodesmus brasiliensis</i>	17,99		27,61	42,42	8,46	
	<i>Scenedesmu</i>	<i>Scenedesmus obliquus</i>	16,73		52,07	21,46		
	<i>Pseudokirchneriella</i>	<i>Pseudokirchneriella subcapitata</i>	28,43		28,00	46,51	9,27	
	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	28,07		40,31	29,29	1,57	
	<i>Botryococcus</i>	<i>Botryococcus braunii</i>	44,97		7,17	76,29	5,34	
	<i>Botryococcus</i>	<i>Botryococcus terribilis</i>	49,00		35,22	39,74	7,22	
Br	<i>Nannochloropsis</i>	<i>Nannochloropsis oculata</i>			30,6	20,4		(39)
	<i>Chaetoceros</i>	<i>Chaetoceros muellerii</i>			35,5	1,0		
	<i>Chlorella sp</i>				14,0	8,8	6,0	
Br	<i>Monoraphidium sp</i>		38,58		31,90	16,68	27,19	(40)
Br	<i>Choricystis</i>	<i>Choricystis minor var</i>		525,7	23,18	44,86	6,81	(43)
Br	<i>Chlorella sp</i>				22,59		25,91	(44)
Br	<i>Chlorella sp</i>		32	35,0	39,2			(48)
Br	<i>Botryococcus</i>	<i>Botryococcus braunii</i>		82,22	1,97	30,10	0,98	(49)
Br	<i>Monoraphidium</i>	<i>Monoraphidium contortum</i>			20,9	16,2	10,5	(51)
Br		<i>Acutodesmus obliquus</i>			27,08	36,02		(53)
Br	<i>Chlorella sp</i>		13,2	594	16,8	23,1	20,6	(54)
Br	<i>Dunaliella</i>	<i>Dunaliella salina</i>	50,89	105,06	18,31	36,52		(56)
Br	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>			62,16	5,07		(57)
Br	<i>Tetrademus</i>	<i>Tetrademus obliquus</i>	12,02	5,42	5,56	5,59	5,20	(59)
Br	<i>Choricystis</i>	<i>Choricystis minor var</i>	30,02		24,08	34,82	6,21	(60)
Br	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella minutissima</i>	20,29					(61)
Pr	<i>Scenedesmu</i>	<i>Scenedesmus acutus</i>	11,18					(62)
Pr	<i>Ankistrodesmus sp</i>		43	86				(63)
	<i>Chlorella sp</i>		22	180				
	<i>Scenedesmus sp</i>		28	127				
Pr	<i>Acutodesmus</i>	<i>Acutodesmus obliquus</i>	18,8		28,68	36,08	0,78	(64)
	<i>Ankistrodesmus sp</i>		39,5		22,61	40,47	0,54	
	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella lewinii</i>	13,2		21,23	23,26	1,00	
Pr	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>						(65)
Pr	<i>Chlorella sp</i>				10,06	11,39	7,59	(66)
Pr	<i>Chlorella sp</i>		11,68	77,0				(67)
Pr	<i>Botryococcus</i>	<i>Botryococcus braunii</i>		0,73 g/L				(68)
Pr	<i>Ankistrodesmus sp</i>		19,18		0,62	23,94	14,37	(69)
Ec	<i>Chlorella sp</i>		38	10,3				(70)
	<i>Chlorella sp</i>		34,01	42,58	12,71	24,49	6,00	(71)
Ec	<i>Anabaena sp</i> <i>Chlorella sp</i> <i>Chlorococcum sp</i> <i>Stichococcus sp</i>		1,27		30,62	35,21	17,2	(72)
Mx	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella saccharophila</i>	63,64	63,36	4,36	23,39		(73)

**Revisión Sistemática**

Mx	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	22,4	61,5				(74)
	<i>Scenedesmus</i>	<i>Scenedesmus acutus</i>	28,34					
Mx	<i>Nannochloropsis sp</i>		31,75	6,95	0,025	30,31	25,57	(75)
Mx	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	20,11		20,21	20,36	10,31	(76)
Mx	<i>Scenedesmus sp</i>			36				(77)
	<i>Scenedesmus</i>	<i>Scenedesmus obliquus</i>	48	69,6				
	<i>Desmodesmu</i>	<i>Desmodesmus spinosus</i>		29,3				
Mx	<i>Monoraphidium</i>	<i>Monoraphidium contortum</i>		37,52	63,65	43,98		(81)
Mx	<i>Amphora sp</i>				14,88	1,60	39,35	(82)
	<i>Cymbella sp</i>				8,97	2,29	0,16	
	<i>Tetraselmis</i>	<i>Tetraselmis suecica</i>			30,41	15,32	8,13	
	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella autotrophica</i>			31,11	7,63	1,08	
	<i>Dunaliella</i>	<i>Dunaliella bardawil</i>			8,19	0,53	0,14	
	<i>Heterococcus sp</i>				22,38	8,60	28,12	
Mx	<i>Chlorella</i>	<i>Chlorella miniata</i>						(83)
	<i>Coelastrella sp</i>		44					
	<i>Desmodesmus</i>	<i>Desmodesmus quadricauda</i>						
	<i>Neochloris</i>	<i>Neochloris oleoabundans</i>	35					
	<i>Verrucodesmus</i>	<i>Verrucodesmus verrucosus</i>	43					
Ch	<i>Nannochloropsis</i>	<i>Nannochloropsis gaditana</i>	64,98		22,06	2,45	3,90	(85)
Ch	<i>Phaeodactylum</i>	<i>Phaeodactylum tricorutum</i>	9,08			2,47		(86)

Cl: Colombia, Ag: Argentina, Brasil: Br, Pr: Perú, Ec: Ecuador, Mx: México, Ch: Chile.

Fuente: Propia

Se evidencia que todos los países incluidos en esta revisión han utilizado Microalgas como materia prima para producción de biodiésel (**Tabla 4**), fueron reportados un total de **18** géneros y más de **40** especies de microalgas, se destaca que de las **50** publicaciones **19** pertenecen a Brasil.

La microalga con mayor incidencia por diferentes autores según lo reportado fue el género *Chlorella* con **13** reportes en cuanto a género y **14** reportes en cuanto a especie, de los cuales **5** pertenecen a la especie *Chlorella vulgaris*.

De acuerdo con los resultados, las características de las microalgas del género *Chlorella* hacen de estas las más adecuadas para la producción de biodiesel, principalmente la especie *Chlorella vulgaris* debido a que poseen un crecimiento rápido, alta productividad, biomasa y contenido adecuado de lípidos, cultivo ambientalmente más fácil así como perfiles de ácidos grasos adecuados, con los compuestos de ácidos grasos más comunes como C16:0 y C18:1 (90).

En esta sección, aunque para la presente revisión no se incluyeron dentro de los criterios y palabras claves las Cianobacterias, se encontraron documentos dentro del análisis que las usaron como materia prima, cabe resaltar que cada uno de los datos en cuanto a género y especie se corroboró en la base de datos *National Center for Biotechnology Information* NCBI y pese a las controversias

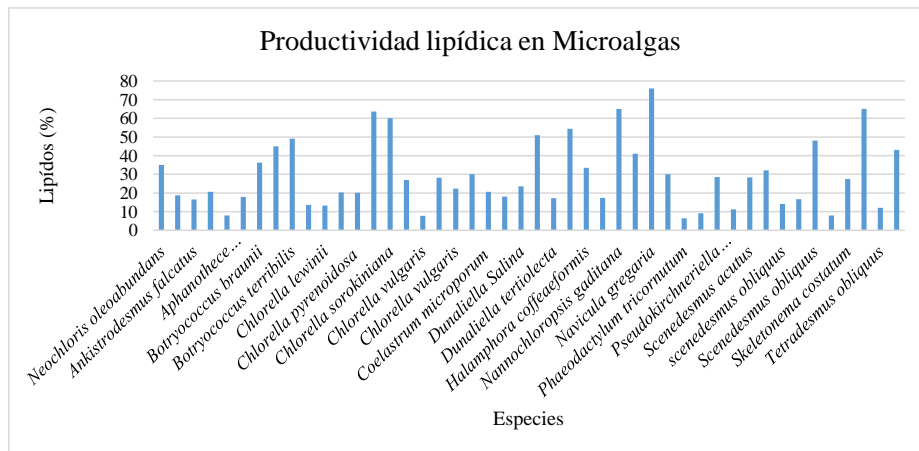
generadas sobre si se deben incluir o no las Cianobacterias como microalgas debido a que algunos autores así las relacionan, se debe mencionar que las cianobacterias son procariontes Gram-negativos que aunque originalmente estaban incluidos dentro de las algas, también conocidas como algas azuladas, se definen por su capacidad para llevar a cabo procesos de fotosíntesis oxigénica posteriormente pasaron a formar parte del dominio de las bacterias (91,92) en la **Tabla 5** se describen los resultados obtenidos para estas, se evidencia que se reportaron en **7** documentos de los cuales 3 hacen énfasis en Cianobacterias, los demás las incluyeron entre su experimentación con el termino microalgas.

**Tabla 5.** Géneros y/o especies de Cianobacterias empleadas en los diferentes estudios.

País	Género	Especie	Lípidos (%)	Biomasa (mg/L <sup>-1</sup> )	Ácidos Grasos (%) C16:0, C18:1 y C18:3			Ref.
Br	<i>Aphanothece</i>	<i>Aphanothece microscopica</i> Nagel	8,0		1,58		3,13	(31)
	<i>Phormidium</i> sp.		11,7					
Br	<i>Phormidium</i> sp		14,86	50,72		23,88		(41)
Br	<i>Phormidium</i>	<i>Phormidium autumnale</i>	20,7		22,5	26,2	17,8	(45)
Br	<i>Synechocystis</i> sp		13,9	129	35,8	7	0,2	(54)
	<i>Synechococcus</i>	<i>Synechococcus nidulans</i>	13,6	560	23,8	6,8	21,5	
Br	<i>Geitlerinema</i>	<i>Geitlerinema amphibium</i>			28,07	0,79		(55)
Mx	<i>Arthrospira</i>	<i>Arthrospira maxima</i>	17,78	64				(74)
Mx	<i>Aphanocapsa</i>	<i>Aphanocapsa marina</i>			28,27	14,69	8,75	(82)
	<i>Geitlerinema</i>	<i>Geitlerinema lemernanii</i>			35,30	2,67	35,61	
	<i>Komvophoron</i> sp.				27,08	16,37	8,37	
	<i>Phormidium</i> sp.				22,76	8,66	28,13	

Brasil: Br, Mx: México.

Fuente: Propia



**Figura 6.** Productividad lipídica en porcentaje para las diferentes especies de microalga.

Fuente: propia

En la **Figura 6** se relacionan sólo los datos en los que se reportó el porcentaje lipídico de la microalga utilizada en cada estudio, se observa que, aunque el género *Chlorella* fue el más utilizado, la especie que alcanzó un mayor contenido lipídico fue *Nannochloropsis gaditana* con **64,98%**, *Nannochloropsis* es un género de picoplancton del medio marino que tiene gran capacidad de producción de biomasa y contenido de lípidos (alrededor del 30 %) en comparación con otros productores de biodiesel de microalgas y puede alcanzar hasta un 60 % en ausencia de nitrógeno (93).

### Levaduras

En la **tabla 6**, se relacionan los estudios en los que se utilizaron levaduras como materia prima en la elaboración de biodiésel por país, así como el género, especie, la productividad de biomasa, el porcentaje de lípidos y porcentaje de ácidos grasos.

**Tabla 6.** Géneros o especies de levaduras empleadas en los diferentes estudios.

País	Género	Especie	Lípidos (%)	Biomasa (mg/L <sup>-1</sup> )	Ácidos Grasos (%)			Ref.
					C16:0	C18:1	C18:3	
Ar	<i>Rhodotorula</i>	<i>Rhodotorula glutinis</i>	6,80		16,78	57,64	4,86	(27)
	<i>Rhodotorula</i>	<i>Rhodotorula toruloides</i>	48,93					
	<i>Rhodotorula</i>	<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	2,68					
	<i>Rhodotorula</i>	<i>Rhodotorula lipolytica</i>	1,18					
Ar	<i>Rhodotorula</i>	<i>Rhodotorula glacialis</i>	69,51	6,61	26,53	52,29	3,54	(28)
Ar	<i>Rhodotorula</i>	<i>Rhodotorula glutinis</i>	40		24,52	37,6	3,58	(29)
Br	<i>Candida</i> sp		50,18		19,2	56,43	0,85	(35)
Br	<i>Cryptococcus</i>	<i>Cryptococcus curvatus</i>	27,9		17,3	18,0	10,6	(42)
	<i>Candida</i>	<i>Candida cylindracea</i>	14,11		30,0	7,3	23,1	
	<i>Rhodotorula</i>	<i>Rhodotorula glutinis</i>	40,85		20,4	1,1	4,0	
	<i>Lipomyces</i>	<i>Lipomyces starkeyi</i>	50,49		39,3	7,8	4,2	
	<i>Lipomyces</i>	<i>Lipomyces lipafer</i>	8,62		35,1	8,2	3,7	
Br	<i>Candida</i>	<i>Candida lipolytica</i>			28,4	42,8		(46)

Revisión Sistemática

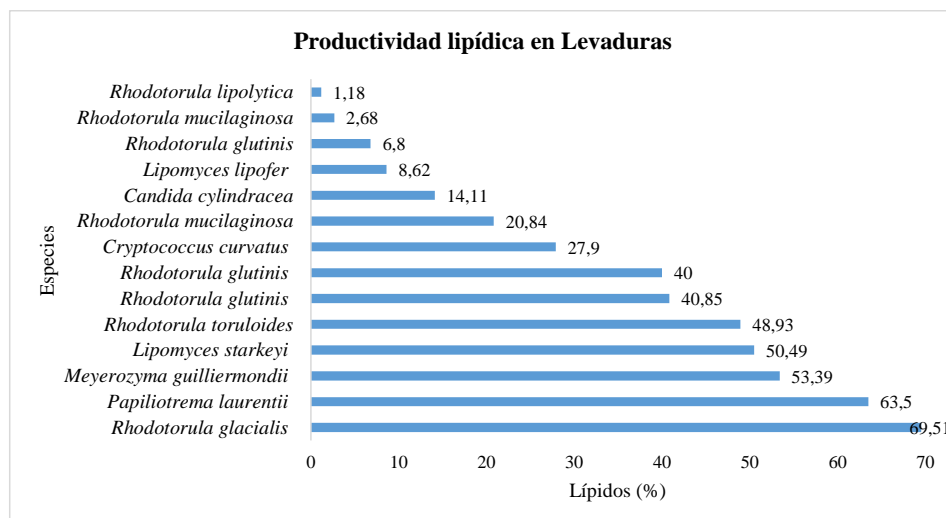
Br	<i>Meyerozyma</i>	<i>Meyerozyma guilliermondii</i>	53,39		24,35			(47)
Br	<i>Rhodospidium</i>	<i>Rhodospidium toruloides</i>			22,6	63,7	9,6	(52)
Br	<i>Papiliotrema</i>	<i>Papiliotrema laurentii</i>	63,5	9,31	29,4	59,3		(58)
Mx	<i>Rhodotorula</i>	<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>	20,84		9,81	75,73		(76)

Ag: Argentina, Br: Brasil, Mx: México.

Fuente: Propia.

En el caso de levaduras se relacionan **11** reportes de diferentes autores como se evidencia en la **Tabla 6**, los cuales pertenecen sólo a los países Brasil, Argentina y México.

Se relacionan **7** géneros y **14** especies de levaduras de las cuales se destaca el género de *Rhodotorula* con **8** reportes de diferentes especies. El género *Rhodotorula* se ha identificado como un candidato prometedor para la producción de lípidos microbianos, entre las cuales destaca *R. glutinis* la cual es capaz de acumular cantidades de hasta el 72 % de su peso seco celular como lípidos microbianos (94,95), en la **Figura 7** se puede apreciar el porcentaje de productividad lipídica según los datos reportados en los diferentes estudios, donde se destaca la levadura *Rhodotorula glutinis* con un porcentaje lipídico de **69,51**.



**Figura 7.** Productividad lipídica en porcentaje por las diferentes especies de levadura.

Fuente: propia

## Hongos

En la **Tabla 7**, se relacionan los estudios en los que se utilizaron Hongos como materia prima en la elaboración de biodiésel por país, así como el género, especie, la productividad de biomasa, el porcentaje de lípidos y porcentaje de ácidos grasos según la información suministrada en cada caso.

**Tabla 7.** Géneros y/o especies de hongos empleadas en los diferentes estudios.

País	Género	Especie	Lípidos (%)	Biomasa (mg/L <sup>-1</sup> )	Ácidos Grasos (%)			Ref.
					C16:0	C18:1	C18:3	
Br	<i>Absidia</i>	<i>Absidia cerulea</i>	12,8					(30)
	<i>Cunninghamella</i>	<i>Cunninghamella echinulata</i>	43,07					
	<i>Cunninghamella</i>	<i>Cunninghamella echinulata</i>	48,06					
	<i>Cunninghamella</i>	<i>Cunninghamella japónica</i>	50,7					
	<i>Aspergillus</i>	<i>Aspergillus niger</i>	11,2	10				
	<i>Penicillium</i>	<i>Penicillium chrysogenum</i>	11,02					
Br	<i>Xylaria</i>		66,70		21,60	22,40	5,28	(32)
	<i>Penicillium</i>		83,1		32,25	13,80	2,94	
	<i>Penicillium</i>	<i>Penicillium brasilianum</i>	50,8		26,40	13,90	0,94	
	<i>Penicillium</i>	<i>Penicillium griseoroseum</i>	40,5		29,90	10,10	2,10	
	<i>Xylaria</i>		91		15,50	26,50	7,78	
	<i>Trichoderma</i>		67,8		53,05	10,66	0,92	
	<i>Trichoderma</i>		11,6		31,20	28,55	4,73	
	<i>Trichoderma</i>		40,1		30,94	21,74	0,34	
Br	<i>Mucor</i>	<i>Mucor circinelloides</i>			40,3	20,7	13,8	(50)
	<i>Mucor</i>	<i>Mucor winter</i>			44,1	24,1	5,5	
	<i>Penicillium</i>	<i>Penicillium citrinum</i>			37,1	31,1	6,1	
Mx	<i>Trichoderma</i>	<i>Trichoderma koningiopsis</i>	18,4		25,91	24,99	3,03	(78)
Mx	<i>Rhizopus</i>	<i>Rhizopus microsporus</i>				33,4	44,2	(79)

Br: Brasil, Mx: México.

Fuente: Propia.

Las investigaciones enfocadas a la producción de biodiesel utilizando lípidos de hongos filamentosos son escasas, se evidencia que sólo se relacionan 5 reportes sobre su uso y estos pertenecen a los países de Brasil y México, entre los reportes se destacan los géneros *Penicillium* (5) en el que se especifican las especies *P. brasilianum*, *griseoroseum* y *P. citrinum* y el género *Trichoderma* (4) donde se especifica la especie *T. koningiopsis*, en la **Figura 8**, se observa que la especie con el mayor porcentaje lipídico fue *Penicillium brasilianum* con **50,08**, aun así, en la literatura no se obtuvo otro estudio específico con esta especie con el cual se pueda realizar una comparación, sin embargo, algunos autores destacan el uso de los hongos oleaginosos como

materia prima en la elaboración de biodiésel, en especial los géneros *Trichoderma* y *Penicillium* por su gran capacidad de producción lipídica (96,97).

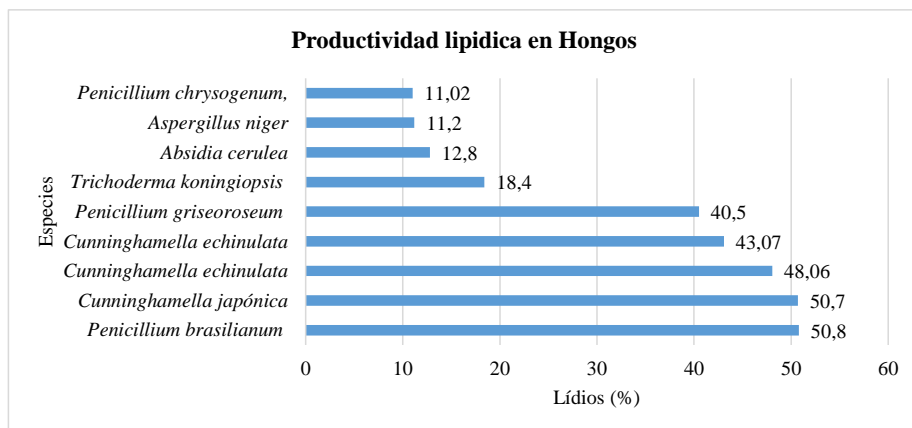


Figura 8. Productividad lipídica en porcentaje por las diferentes especies de hongo.

Fuente: propia

### Bacterias

Finalmente, en la **Tabla 8** se relacionan los estudios en los que se utilizaron bacterias y cianobacterias como materia prima en la elaboración de biodiésel por país, así como el género, especie, la productividad de biomasa, el porcentaje de lípidos y porcentaje de ácidos grasos según la información suministrada en cada caso.

Tabla 7. Géneros y/o especies de bacterias empleadas en los diferentes estudios.

País	Género	Especie	Lípidos (%)	Biomasa (mg/L <sup>-1</sup> )	Ácidos Grasos (%)			Ref.
					C16:0	C18:1	C18:3	
Br	Geitlerinema	Geitlerinema amphibium		90	28,07	0,79		(55)
Ch	<i>Acinetobacter</i>		3,0					(84)
Ch	<i>Pseudomonas</i>		3,6					
Ch	<i>Pseudomonas</i>		4,8					
Ch	<i>Bacillus</i>		7,4					

Br: Brasil, Ch: Chile.

Fuente: Propia

En el caso de las Bacterias, sólo se relacionan 2 reportes pertenecientes a los países Brasil y Chile, las investigaciones enfocadas a la producción de biodiesel utilizando bacterias oleaginosas son aún

más escasas en comparación con los demás microorganismos analizados, la tasa de crecimiento en las bacterias suele ser más alta, pero su acumulación de lípidos más baja en comparación con los hongos y las microalgas (98). Estos lípidos difieren por su composición y contenido, dependiendo de las vías de síntesis bioquímica y al igual que para los demás macroorganismos están ligados a diferentes factores que afectan las vías de síntesis de lípidos, como las condiciones de cultivo, las fuentes de carbono, la temperatura, el pH y la disponibilidad de nutrientes (99).

Es importante señalar que la productividad de los diferentes microorganismos reportados para elaboración de biodiésel está sujeta a los tipos de metodologías que fueron empleadas por los diferentes autores, puesto que cada uno de ellos utilizó diferente tipo de sustrato, como por ejemplo, xilosa o glucosa (47,58), diferente medio de cultivo, como medio líquido GMY o enriquecimiento con agua residual o agua tratada (18,20,27), entre otros, la relación C/N también varió, algunos artículos reportaron un mayor porcentaje lipídico en ausencia de nitrógeno (22,64,69) así mismo, las condiciones en las que se mantuvieron según los requerimientos de cada microorganismo, como la temperatura o el pH, tiempo de experimentación, etc., los cuales no se especifican en esta revisión debido a su variabilidad.

La información detallada sobre ácidos grasos sólo relaciona los ácidos grasos; ácido palmítico (C16:0), ácido oleico (C18:1) y ácido linolénico (C18:3), esto teniendo en cuenta que los estándares utilizados actualmente como referencia son la norma ASTM D6751 de Estados Unidos (100) la cual precisa un biodiésel enriquecido en ácidos grasos de cadena larga con elevado grado de saturación preferentemente los ácidos palmitoleico (16:0), oleico (18:1) y linolénico (18:3).

En cuanto a la extracción de lípidos, las metodologías más utilizadas por los diferentes autores fueron extracción con Equipo Soxhlet y el método Blihg y Dyer o Folch para la extracción y separación de lípidos de microorganismos y tejidos biológicos utilizando cloroformo/metanol/agua, estos se han utilizado decenas de veces y son considerados “patrones de oro” para el análisis de lípidos extraídos (101).

Por otro lado, el biodiésel requiere de ciertos parámetros que establezcan una buena calidad además de su contenido de ácidos grasos, uno de estos es el índice de cetano el cual es indicativo del tiempo de retardo de encendido de los combustibles para motores diésel, por lo tanto, refleja la calidad de encendido del combustible. Cuanto mayor sea el número de cetano, menor será el tiempo de encendido. La norma de calidad americana, establece el índice de cetano para el diésel en 40, mientras que para el biodiésel se establece en 47 (método D 613), algunos de los estudios reportaron el índice de cetano en **56,7, 51, 71, 59** (31,54,57,81) respectivamente, lo que indica que se encuentran dentro de lo establecido por la norma.

Otro parámetro importante a tener en cuenta es la viscosidad cinemática que representa la resistencia del líquido a fluir y es la más importante característica del combustible, de esta manera la composición de los ácidos grasos de cadenas largas, grados de insaturación, orientación del doble enlaces y tipo de grupo funcional del éster pueden influenciar la viscosidad cinemática del biodiésel (102) según la norma ASTM D6751 este parámetro debe estar entre 1,9 y 6,0 mm<sup>2</sup>/s,

#### Revisión Sistemática

dentro de los documentos revisados, se reportaron niveles de viscosidad de; **4.66, 5.03, 4.12, 4.4**, entre otros (24,57,77,81), respectivamente, que cumplen con los requerimientos especificados, así mismo la densidad ( $\text{kg/m}^3$ ), la cual influye en la eficiencia de la atomización del combustible, en general, el biodiesel independiente de la materia prima usada para su elaboración son densos y menos compresibles que el combustible Diesel y según los estándares de la norma ASTM D675, estos puede ser entre  $860 \text{ kg/m}^3$ - $900 \text{ kg/m}^3$  para un biodiesel estándar, entre otros parámetros, lo anterior precisa que la producción de biodiésel usando como materia prima microorganismos es viable.

A pesar de que los países de América Latina y el Caribe, como Colombia, Argentina, Chile, Ecuador, México y Brasil, están ubicados en regiones con radiación solar suficiente para el cultivo de microalgas y cuentan con potencial importante para establecerse como productores de biocombustibles de tercera generación (103) no se ha probado que la producción de biodiésel a partir de microorganismos oleaginosos sea económicamente viable para ser implementados a gran escala, lo que indica un espacio para la investigación, el desarrollo y la optimización de los procesos de obtención, siendo esencial la presencia de instituciones públicas y privadas direccionadas a la generación de conocimiento para la expansión productiva de los biocombustibles.

De los 70 documentos analizados en esta revisión, sólo el 4% pertenecen a Colombia con un total de 4 investigaciones, propias de los departamentos Norte de Santander y Bolívar, estos departamentos están relacionados con la producción de biodiésel actualmente según reportes de FedeBiocombustibles (104), se espera que con las nuevas políticas de ciencia, tecnología e innovación (CTI) aprobadas por el CONPES con el propósito de incrementar de forma sostenida la financiación de actividades de Investigación y Desarrollo (105), Colombia pueda incrementar las investigaciones relacionadas con producción de biodiésel de tercera generación.

#### 4 Conclusiones

propuestos como materia prima, por otro lado en Colombia se relacionan el 4%, sólo 4 investigaciones, pertenecientes a los departamentos Norte de Santander y Bolívar, se espera que con las nuevas El uso de microorganismos oleaginosos ha demostrado tener alta efectividad en la producción de biodiésel, en particular las microalgas de género *Chlorella* donde destaca la especie *Chlorella vulgaris* y levaduras del género *Rhodotorula* que se han identificado como un candidato prometedor para la producción de lípidos microbianos, entre las cuales destaca *R. glutinis*, los cuales son considerados materias primas promisorias en procesos biotecnológicos de biorrefinería.

Entre los países incluidos en esta revisión, Brasil destacó en cuanto a investigaciones reportadas sobre producción de biodiésel a partir de microorganismos con **31** publicaciones que representan el 44%, de las cuales **21** son de microalgas, **6** de levaduras, **3** de hongos y **1** de bacterias, fue el único país que abarcó todos los tipos de macroorganismos políticas de inversión en tecnología,

ciencia e investigación, Colombia pueda incrementar las investigaciones relacionadas con producción de biodiésel de tercera generación.

Hasta el momento, no se ha probado que la producción de biodiésel a partir de microorganismos oleaginosos sea económicamente viable para ser implementados a gran escala, lo que indica un espacio para la investigación, el desarrollo y la optimización de los procesos de obtención, siendo esencial la presencia de instituciones públicas y privadas direccionadas a la generación de conocimiento para la cadena productiva de los biocombustibles.

La información recopilada permitirá que los futuros trabajos realizados con microorganismos oleaginosos tengan un punto de partida para el planteamiento y desarrollo de estudios relacionados que sean empleados a nivel industrial y biotecnológico en el país, conociendo que tipos de microorganismos presentan una mayor productividad de lípidos, biomasa y ácidos grasos.

## **5 Referencias bibliográficas**

1. DPCHIP Diesel power [Internet]. Historia Diesel. Disponible en: <https://www.dpchip.com/diesel-history>
2. Demirbas A. Biodiesel A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines. 1.<sup>a</sup> ed. Springer London; 2008. X, 208.
3. Sharif SK, Nageswara Rao B, Jagadish D. Comparative performance and emission studies of the CI engine with Nodularia Spumigena microalgae biodiesel versus different vegetable oil derived biodiesel. SN Appl Sci [Internet]. 2020;2(5):1-9. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2697-0>
4. Rafael B, Moreira DA, Raquel C, Viana DA, Cruz VH, Renato P, et al. Meta-Analytic Review on Third-Generation Biodiesel. Bioenergy Res. 2022;27-45.
5. Mishra VK, Goswami R. A review of production, properties and advantages of biodiesel. Biofuels [Internet]. 4 de marzo de 2018 [citado 21 de septiembre de 2022];9(2):273-89. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17597269.2017.1336350>
6. Dufey A, Stange D. Estudio regional sobre la economía de los biocombustibles en 2010: temas clave para los países de América Latina y el Caribe [Internet]. CEPAL. 2011. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11362/3906>
7. Torroba A, Carvalho A. Atlas de los biocombustibles líquidos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2020. 8-13 p.
8. Madrid De la Rosa JM, Mendoza Meza D FGM. Biodiesel Production From Almond Oil Extracted From the Corozo Bactris Guineensis Assisted by Direct Probe Ultrasound. 2021; Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/15809>
9. Phukan MM, Bora P, Gogoi K, Konwar BK. Biodiesel from Saccharomyces cerevisiae: fuel property analysis and comparative economics. SN Appl Sci [Internet]. 2019;1(2):1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0159-3>
10. Xu H, Miao X, Wu Q. High quality biodiesel production from a microalga Chlorella protothecoides by heterotrophic growth in fermenters. J Biotechnol. 1 de diciembre de 2006;126(4):499-507.
11. Ma Y, Liu S, Wang Y, Adhikari S, Dempster TA, Wang Y. Direct biodiesel production

- from wet microalgae assisted by radio frequency heating. *Fuel*. 15 de noviembre de 2019;256:115994.
12. Deeba F, Kiran Kumar K, Ali Wani S, Kumar Singh A, Sharma J, Gaur NA. Enhanced biodiesel and  $\beta$ -carotene production in *Rhodotorula pacifica* INDKK using sugarcane bagasse and molasses by an integrated biorefinery framework. *Bioresour Technol*. 1 de mayo de 2022;351:127067.
  13. Almyasheva NR, Shuktueva MI, Petrova DA, Kopitsyn DS, Kotelev MS, Vinokurov VA, et al. Biodiesel fuel production by *Aspergillus niger* whole-cell biocatalyst in optimized medium. *Mycoscience*. 1 de marzo de 2018;59(2):147-52.
  14. Campillo F. Análisis de prefactibilidad para la implementación de una planta de producción de biomasa a partir de microalgas en Colombia. *Portal Rev Peru*. 2013;2:1-47.
  15. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Internet]. Biocombustible. Disponible en: <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/sostenibilidad-sectores-productivos/biocombustible>
  16. Torres-Salinas D, Ruiz-Pérez R, Delgado-López-Cózar E. Google Scholar como herramienta para la evaluación científica. *Prof la Inf [Internet]*. 1 de septiembre de 2009 [citado 29 de septiembre de 2022];18(5):501-10. Disponible en: <https://socialmediaeninvestigacion.com/google-scholar-buscador-academico/>
  17. Alayon Alvear MR, Castillo Saldarriaga CR, Hena Argumedo DL. Evaluación del pH y Concentración del Nitrógeno en el cultivo de microalgas *Dunaliella salina* Y *Chlorella* nativa como fuente de aceite vegetal. Universidad de Cartagena; 2011.
  18. Jaimes-Duarte DL, Soler-Mendoza W, Velasco-Mendoza J, Muñoz-Peñaloza Y, Urbina-Suárez NA. Characterization chlorophytas microalgae with potential in the production of lipids for biofuels. *CTyF - Ciencia, Tecnol y Futur*. 2012;5(1):93-102.
  19. Gómez J, Rodríguez L. Obtención De Biomasa De Microalgas En Aguas Residuales Para La Producción De Biocombustibles. *RenovaT*. 2019;3(2):21-36.
  20. Urbina-Suarez NA, Barajas-Solano AF, Garcia-Martinez JB, Lopez-Barrera GL, Gonzalez-Delgado AD. Cultivation of *Chlorella* sp. For biodiesel production using two farming wastewaters in eastern Colombia. *J Water L Dev*. 2021;50:141-9.
  21. Popovich CA, Damiani C, Constenla D, Leonardi PI. Lipid quality of the diatoms *Skeletonema costatum* and *Navicula gregaria* from the South Atlantic Coast (Argentina): Evaluation of its suitability as biodiesel feedstock. *J Appl Phycol*. 2012;24(1):1-10.
  22. Do Nascimento M, Ortiz-Marquez JCF, Sanchez-Rizza L, Echarte MM, Curatti L. Bioprospecting for fast growing and biomass characterization of oleaginous microalgae from South-Eastern Buenos Aires, Argentina. *Bioresour Technol [Internet]*. 2012;125:283-90. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.057>
  23. Ortiz-Marquez JCF, Nascimento M Do, Dublan M de los A, Curatti L. Association with an ammonium-excreting bacterium allows diazotrophic culture of oil-rich eukaryotic microalgae. *Appl Environ Microbiol*. 2012;78(7):2345-52.
  24. Salomon R, Crevero M, Rost E, Carstens M, Parra A, Albarracín I. Cultivo en efluentes urbanos del alga *Scenedesmus quadricauda* (Sphaeropleales: Scenedesmaceae) y su potencial para biodiesel: perfil de ésteres metílicos de ácidos grasos. *UNED Res J*. 2014;6(2):213-21.
  25. Popovich C, Leonardi PI. Cultivo de microalgas: bases científicas para emprendimientos bioenergéticos en el estuario de Bahía Blanca (Bs.As., Argentina) [Internet]. Universidad Nacional del Sur; 2017. Disponible en: <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/6683>

26. Martín LA, Popovich CA, Martínez AM, Scodelaro Bilbao PG, Damiani MC, Leonardi PI. Hybrid two-stage culture of *Halamphora coffeaeformis* for biodiesel production: Growth phases, nutritional stages and biorefinery approach. *Renew Energy* [Internet]. 2018;118:984-92. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.086>
27. Maza DD, Viñarta SC, Su Y, Guillamón JM, Aybar MJ. Growth and lipid production of *Rhodotorula glutinis* R4, in comparison to other oleaginous yeasts. *J Biotechnol* [Internet]. 2020;310(October 2019):21-31. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2020.01.012>
28. Viñarta SC, Angelicola MV, Van Nieuwenhove C, Aybar MJ, de Figueroa LIC. Fatty acids profiles and estimation of the biodiesel quality parameters from *Rhodotorula* spp. from Antarctica. *Biotechnol Lett.* 2020;42(5):757-72.
29. Maza DD, Viñarta SC, García-Ríos E, Guillamón JM, Aybar MJ. *Rhodotorula glutinis* T13 as a potential source of microbial lipids for biodiesel generation. *J Biotechnol.* 2021;331(July 2020):14-8.
30. Sergeeva YE, Galanina LA, Andrianova DA, Feofilova EP. Lipids of filamentous fungi as a material for producing biodiesel fuel. *Appl Biochem Microbiol.* 2008;44(5):523-7.
31. Francisco EC, Neves DB, Jacob-Lopes E, Franco TT. Microalgae as feedstock for biodiesel production: Carbon dioxide sequestration, lipid production and biofuel quality. *J Chem Technol Biotechnol.* 2010;85(3):395-403.
32. Santos-Fo FC, Fill TP, Nakamura J, Monteiro MR, Rodrigues-Fo E. Endophytic fungi as a source of biofuel precursors. *J Microbiol Biotechnol.* 2011;21(7):728-33.
33. Carvalho Júnior RM, Vargas JVC, Ramos LP, Marino CEB, Torres JCL. Microalgae biodiesel via in situ methanolysis. *J Chem Technol Biotechnol.* 2011;86(11):1418-27.
34. Sydney EB, da Silva TE, Tokarski A, Novak AC, de Carvalho JC, Woiciechowski AL, et al. Screening of microalgae with potential for biodiesel production and nutrient removal from treated domestic sewage. *Appl Energy* [Internet]. 2011;88(10):3291-4. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.024>
35. Duarte SH, Ghiselli G, Maugeri F. Influence of culture conditions on lipid production by *Candida* sp. LEB-M3 using glycerol from biodiesel synthesis. *Biocatal Agric Biotechnol* [Internet]. 2013;2(4):339-43. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.bcab.2013.07.001>
36. Menezes RS, Leles MIG, Soares AT, Brandão PI, Franco M, Filho NRA, et al. Avaliação da potencialidade de microalgas dulcícolas como fonte de matéria-prima graxa para a produção de biodiesel. *Quim Nova.* 2013;36(1):10-5.
37. Nascimento IA, Marques SSL, Cabanelas ITD, Pereira SA, Druzian JI, de Souza CO, et al. Screening Microalgae Strains for Biodiesel Production: Lipid Productivity and Estimation of Fuel Quality Based on Fatty Acids Profiles as Selective Criteria. *Bioenergy Res.* 2013;6(1):1-13.
38. Pandey RK, Shukla SS, Vyas A, Jain V, Jain P, Saraf S. Biodiesel Potential of Oleaginous Yeast Biomass by NMR Spectroscopic Techniques. *energy & fuels.* 2018;113-9.
39. Soares AT, da Costa DC, Silva BF, Lopes RG, Derner RB, Antoniosi Filho NR. Comparative Analysis of the Fatty Acid Composition of Microalgae Obtained by Different Oil Extraction Methods and Direct Biomass Transesterification. *Bioenergy Res.* 2014;7(3):1035-44.
40. Díaz GC, Cruz YR, Carliz RG, Paula RCV de, Aranda DAG, Dario MAG, et al. Cultivation of Microalgae *Monoraphidium* sp., in the Plant Pilot the Grand Valle Bio Energy, for Biodiesel Production. *Nat Sci.* 2015;07(07):370-8.

41. Francisco ÉC, Franco TT, Maroneze MM, Zepka LQ, Jacob-Lopes E. Produção de biodiesel de terceira geração a partir de microalgas. *Cienc Rural*. 2015;45(2):349-55.
42. Spier F, Buffon JG, Burkert CAV. Bioconversion of Raw Glycerol Generated from the Synthesis of Biodiesel by Different Oleaginous Yeasts: Lipid Content and Fatty Acid Profile of Biomass. *Indian J Microbiol*. 2015;55(4):415-22.
43. Menezes RS, Soares AT, Marques Júnior JG, Lopes RG, da Arantes RF, Derner RB, et al. Culture medium influence on growth, fatty acid, and pigment composition of *Choricystis minor* var. minor: a suitable microalga for biodiesel production. *J Appl Phycol* [Internet]. 2016;28(5):2679-86. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s10811-016-0828-1>
44. Lemões JS, Alves Sobrinho RCM, Farias SP, De Moura RR, Primel EG, Abreu PC, et al. Sustainable production of biodiesel from microalgae by direct transesterification. *Sustain Chem Pharm* [Internet]. 2016;3:33-8. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scp.2016.01.002>
45. Siqueira SF, Francisco EC, Queiroz MI, De Menezes CR, Zepka LQ, Jacob-Lopes E. Third generation biodiesel production from microalgae *phormidium autumnale*. *Brazilian J Chem Eng*. 2016;33(3):427-33.
46. Souza AF, Rodriguez DM, Ribeaux DR, Luna MAC, Lima e Silva TA, Silva Andrade RF, et al. Waste soybean oil and corn steep liquor as economic substrates for bioemulsifier and biodiesel production by *Candida lipolytica* UCP 0998. *Int J Mol Sci*. 2016;17(10):1-18.
47. Ramírez-Castrillón M, Jaramillo-García VP, Rosa PD, Landell MF, Vu D, Fabricio MF, et al. The oleaginous yeast *Meyerozyma guilliermondii* BI281A as a new potential biodiesel feedstock: Selection and lipid production optimization. *Front Microbiol*. 2017;8(SEP).
48. Pinho DMM, Oliveira RS, Dos Santos VML, Marques WF, Pinto AC, Rezende MJC, et al. Evaluating the potential of biodiesel production through microalgae farming in photobioreactor and high rate ponds from wastewater treatment. *J Braz Chem Soc*. 2017;28(12):2429-37.
49. Rinna F, Buono S, Cabanelas ITD, Nascimento IA, Sansone G, Barone CMA. Wastewater treatment by microalgae can generate high quality biodiesel feedstock. *J Water Process Eng* [Internet]. 2017;18(May):144-9. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.06.006>
50. Rivaldi JD, Carvalho AKF, da Conceição LR V., de Castro HF. Assessing the potential of fatty acids produced by filamentous fungi as feedstock for biodiesel production. *Prep Biochem Biotechnol*. 2017;47(10):970-6.
51. Sassi PGP, Calixto CD, da Silva Santana JK, Sassi R, Costa Sassi CF, Abrahão R. Cultivation of freshwater microalgae in biodiesel wash water. *Environ Sci Pollut Res*. 2017;24(22):18332-40.
52. Soccol CR, Dalmas Neto CJ, Soccol VT, Sydney EB, da Costa ESF, Medeiros ABP, et al. Pilot scale biodiesel production from microbial oil of *Rhodospiridium toruloides* DEBB 5533 using sugarcane juice: Performance in diesel engine and preliminary economic study. *Bioresour Technol* [Internet]. 2017;223:259-68. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.055>
53. D'Alessandro EB, Soares AT, Pereira J, Antoniosi Filho NR. Viability of biodiesel production from a thermophilic microalga in conventional and alternative culture media. *Rev Bras Bot*. 2018;41(2):319-27.
54. Calixto CD, da Silva Santana JK, Tibúrcio VP, de Pontes L de FBL, da Costa Sassi CF, da Conceição MM, et al. Productivity and fuel quality parameters of lipids obtained from 12

- species of microalgae from the northeastern region of Brazil. *Renew Energy*. 2018;115:1144-52.
55. D'Alessandro EB, Soares AT, de Oliveira D'Alessandro NC, Antoniosi Filho NR. Potential use of a thermal water cyanobacterium as raw material to produce biodiesel and pigments. *Bioprocess Biosyst Eng* [Internet]. 2019;42(12):2015-22. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00449-019-02196-5>
  56. Bredda EH, Da Silva AF, Silva MB, Da Rós PCM. Mixture design as a potential tool in modeling the effect of light wavelength on *Dunaliella salina* cultivation: an alternative solution to increase microalgae lipid productivity for biodiesel production. *Prep Biochem Biotechnol* [Internet]. 2020;50(4):379-89. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10826068.2019.1697936>
  57. de Jesus SS, Ferreira GF, Moreira LS, Filho RM. Biodiesel production from microalgae by direct transesterification using green solvents. *Renew Energy*. 2020;160:1283-94.
  58. Vieira NM, dos Santos RCV, Germano VK de C, Ventorim RZ, de Almeida ELM, da Silveira FA, et al. Isolation of a new *Papiliotrema laurentii* strain that displays capacity to achieve high lipid content from xylose. *3 Biotech* [Internet]. 2020;10(9):1-14. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02373-4>
  59. Dzuman MJ, Severo IA, Moreira MAC, de Lima Luz Junior LF, Mitchell DA, Vargas JVC, et al. Microalgae Culture Medium Recycling: Improved Production of Biomass and Lipids, Biodiesel Properties and Cost Reduction. *Bioenergy Res* [Internet]. 2022;(0123456789). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10395-4>
  60. Oliveira CYB, Nader C, Silva MFO, Fracalossi DM, Gálvez AO, Lopes RG, et al. Integrated use of microalgal biomass of *Choricystis minor* var. *minor*: a promising model for production of biodiesel and aquafeeds. *Biomass Convers Biorefinery*. 2022;12(5):1565-73.
  61. Pedro GA, Amaral MS, Pereira FM, Flumignan DL, Da Rós PCM, Reis CER, et al. Highly Wet *Chlorella minutissima* Biomass for In Situ Biodiesel Production and Residual Biomass Rich in Labile Carbohydrates. *Bioenergy Res*. 2022;15(1):154-65.
  62. Jesus L, Orlando L, Nuñez L, Huaman C, Santiago L, Perú P, et al. «Comparativo de tres fitohormonas en concentraciones de 25, 50 y 75 ppm en el crecimiento poblacional de *scenedesmus acutus meyen*, para uso como biodiésel». Universidad nacional de Ucayali. Universidad Nacional de Ucayali; 2012.
  63. Ruiz CG, Castro M, Carlos J, Gutierrez C, Alexander L. Potencial biotecnológico para la producción sustentable de biodiesel de microalgas oleaginosas aisladas del río itaya, loreto, Perú. *Ecol ...* [Internet]. 2014;13. Disponible en: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20153178263>
  64. Cobos M, Paredes JD, Maddox JD, Vargas-Arana G, Flores L, Aguilar CP, et al. Isolation and characterization of native microalgae from the Peruvian Amazon with potential for biodiesel production. *Energies*. 2017;10(2).
  65. Arce Portugal JA. Caracterización fisicoquímica de biodiesel a partir de la microalga *Chlorella vulgaris*, obtenida en fotobiorreactor tubular. Univ Nac San Agustín Fac Ciencias Nat Y Formales Esc Prof Quim Caracter. 2018;
  66. Terán Aguilera DM, Posada Espinoza MW. Obtención de biodiesel de tercera generación del contenido lipídico del cultivo de la microalga *chorella* sp de origen marino. Universidad de Guayaquil. Universidad de guayaquil; 2019.
  67. Herrera Sanchez SE. Cultivo de microalga *chlorella* sp en un fotobiorreactor para la

- obtención de biodiesel. Vol. 2019. 2019.
68. Oblitas J, Vilchez K, Morales J, Cieza Y, Castro W. Nutrients effect on the performance of *Botryococcus braunii* biomass for the obtaining of biodiesel. Proc LACCEI Int Multi-conference Eng Educ Technol. 2020;(July 2020):27-31.
  69. Bardales K, Castillo P. Obtención de biodiesel a partir de lípidos de *Ankistrodesmis* sp. Bajo condiciones de ausencia de nitrógeno en la amazonia peruana. Universidad Nacional de Trujillo; 2021.
  70. Hinojosa Campoverde VS. Producción de biodiesel a partir de microalgas nativas cultivadas en un fotobiorreactor a escala laboratorio. Vol. 1999, Universidad San Francisco de quito USFQ. Universidad San Francisco de Quito USFQ; 2006.
  71. Quitanilla Ribadeneira FX. Production and characterization of biodiesel from microalgae cultivated in a photobioreactor at laboratory scale. UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ; 2016.
  72. Franco Pallo JT. Síntesis de biodiésel a partir de aceite producido por microalgas antárticas. Universidad central del Ecuador. Universidad central del Ecuador; 2019.
  73. Herrera-Valencia VA, Contreras-Pool PY, López-Adrián SJ, Peraza-Echeverría S, Barahona-Pérez LF. The Green Microalga *Chlorella saccharophila* as a Suitable Source of Oil for Biodiesel Production. Curr Microbiol. 2011;63(2):151-7.
  74. Sacristán-de Alva M, Luna-Pabello VM, Cadena-Martínez E, Alva-Martinez AF. Producción de biodiésel a partir de microalgas y una cianobacteria cultivadas en diferentes calidades de agua. Agrociencia. 2014;48(3):271-84.
  75. Tadeo-sánchez LL, Puentes-cárdenas IJ, Flores-ortiz ICM. Producción de biodiésel por *Nannochloropsis* sp. bajo diferentes condiciones ambientales Biodiesel. Revista Cubana de Química. 2014;XXVI(3):276-99.
  76. Reyna-Martínez R, Gomez-Flores R, López-Chuken UJ, González-González R, Fernández-Delgadillo S, Balderas-Rentería I. Lipid Production by Pure and Mixed Cultures of *Chlorella pyrenoidosa* and *Rhodotorula mucilaginosa* Isolated in Nuevo Leon, Mexico. Appl Biochem Biotechnol. 2015;175(1):354-9.
  77. Valdez-Ojeda R, González-Muñoz M, Us-Vázquez R, Narváez-Zapata J, Chavarria-Hernandez JC, López-Adrián S, et al. Characterization of five fresh water microalgae with potential for biodiesel production. Algal Res [Internet]. 2015;7:33-44. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.algal.2014.11.009>
  78. Mendoza-López MR, Velez-Martínez D, Argumedo-Delira R, Alarcón A, García-Barradas O, Sánchez-Viveros G, et al. Lipid extraction from the biomass of *Trichoderma koningiopsis* MX1 produced in a non-stirring culture for potential biodiesel production. Environ Sci Pollut Res. 2017;24(33):25627-33.
  79. Botton V, Piován L, Meier HF, Mitchell DA, Cordova J, Krieger N. Optimization of biodiesel synthesis by esterification using a fermented solid produced by *Rhizopus microsporus* on sugarcane bagasse. Bioprocess Biosyst Eng [Internet]. 2018;41(4):573-83. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s00449-018-1892-5>
  80. Montero E, Olgún EJ, De Philippis R, Reverchon F. Mixotrophic cultivation of *Chlorococcum* sp. under non-controlled conditions using a digestate from pig manure within a biorefinery. J Appl Phycol. 2018;30(5):2847-57.
  81. Pineda-Camacho G, Guillén-Jiménez F de M, Pérez-Sánchez A, Raymundo-Núñez LM, Mendoza-Trinidad G. Effect of CO<sub>2</sub> on the generation of biomass and lipids by *Monoraphidium contortum*: A promising microalga for the production of biodiesel.

- Bioresour Technol Reports. 2019;8(August).
82. Casian Gonzáles K. Bioprospección de microalgas con potencial para la producción de biodiésel. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California Maestría; 2020.
  83. Rodríguez-Palacio MC, Cabrera-Cruz RBE, Rolón-Aguilar JC, Tobías-Jaramillo R, Martínez-Hernández M, Lozano-Ramírez C. The cultivation of five microalgae species and their potential for biodiesel production. *Energy Sustain Soc* [Internet]. 2022;12(1):1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00337-5>
  84. Cea M, Sangaletti-Gerhard N, Acuña P, Fuentes I, Jorquera M, Godoy K, et al. Screening transesterifiable lipid accumulating bacteria from sewage sludge for biodiesel production. *Biotechnol Reports* [Internet]. 2015;8:116-23. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.btre.2015.10.008>
  85. Torres S, Acien G, García-Cuadra F, Navia R. Direct transesterification of microalgae biomass and biodiesel refining with vacuum distillation. *Algal Res*. 2017;28(September):30-8.
  86. Branco-Vieira M, Martin SS, Agurto C, Dos Santos MA, Freitas MAV, Mata TM, et al. Potential of *Phaeodactylum tricornutum* for biodiesel production under natural conditions in Chile. *Energies*. 2018;11(1):1-15.
  87. Shalders A. Brasil tem menor investimento em ciência dos últimos 12 anos [Internet]. *Terra Notícias*. 2021 [citado 19 de octubre de 2022]. Disponible en: <https://www.terra.com.br/byte/ciencia/brasil-tem-menor-investimento-em-ciencia-dos-ultimos-12-anos,ca770e530e1e1de2553c2389f90b2c8idkybgug.html>
  88. Sheiner L, Campbell S. How much is COVID-19 hurting state and local revenues? *Hutchins Cent Explain* [Internet]. 2020 [citado 19 de octubre de 2022];1-6. Disponible en: <https://www.brookings.edu/blog/up-front/2020/09/24/how-much-is-covid-19-hurting-state-and-local-revenues/>
  89. Sarwer A, Hamed SM, Osman AI, Jamil F, Al-Muhtaseb AH, Alhajeri NS, et al. Algal biomass valorization for biofuel production and carbon sequestration: a review [Internet]. Vol. 20, *Environmental Chemistry Letters*. Springer International Publishing; 2022. 2797-2851 p. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01458-1>
  90. Saeedi Dehaghani AH, Pirouzfard V. Investigation on the Effect of Microalgae *Chlorella* sp. and *Spirulina* on Biodiesel Production. *Pet Chem* 2018 588 [Internet]. 17 de julio de 2018 [citado 28 de septiembre de 2022];58(8):702-8. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0965544118080042>
  91. Llopiz A. Active compounds from cyanobacteria and microalgae: Properties and potential applications in biomedicine [Internet]. Vol. 1, *Bionatura*. Centro de Biotecnología y Biomedicina, Clinical Biotec. Universidad Católica del Oriente (UCO), Univesidad Yachay Tech; 2016 [citado 27 de octubre de 2022]. Disponible en: <http://revistabionatura.com/cianobacterias-y-microalgas.html>
  92. Cyanobacteria - NCBI - NLM [Internet]. [citado 27 de octubre de 2022]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/data-hub/taxonomy/1117/>
  93. Liu J. Optimisation of biomass and lipid production by adjusting the interspecific competition mode of *Dunaliella salina* and *Nannochloropsis gaditana* in mixed culture. *J Appl Phycol* [Internet]. 1 de febrero de 2014 [citado 5 de octubre de 2022];26(1):163-71. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-013-0099-z>
  94. Mast B, Zöhrens N, Schmidl F, Hernandez R, French WT, Merkt N, et al. Lipid Production

- for Microbial Biodiesel by the Oleagenious Yeast *Rhodotorula glutinis* Using Hydrolysates of Wheat Straw and Miscanthus as Carbon Sources. *Waste and Biomass Valorization* [Internet]. 1 de diciembre de 2014 [citado 28 de septiembre de 2022];5(6):955-62. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-014-9312-9>
95. Saenge C, Cheirsilp B, Suksaroge TT, Bourtoom T. Efficient concomitant production of lipids and carotenoids by oleaginous red yeast *Rhodotorula glutinis* cultured in palm oil mill effluent and application of lipids for biodiesel production. *Biotechnol Bioprocess Eng* 2011 161 [Internet]. 13 de abril de 2011 [citado 28 de septiembre de 2022];16(1):23-33. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12257-010-0083-2>
96. Bardhan P, Gohain M, Daimary N, Kishor S, Chattopadhyay P, Gupta K, et al. Microbial lipids from cellulolytic oleaginous fungus *Penicillium citrinum* PKB20 as a potential feedstock for biodiesel production. *Ann Microbiol* [Internet]. 1 de noviembre de 2019 [citado 6 de octubre de 2022];69(11):1135-46. Disponible en: <https://link.springer.com/articles/10.1007/s13213-019-01494-3>
97. Abdelhamid SA, Hussein AA, Asker MS, El Sayed OH, Mohamed SS. Optimization of culture conditions for biodiesel production from Egyptian isolate *Penicillium commune* NRC2016. *Bull Natl Res Cent* 2019 431 [Internet]. 29 de enero de 2019 [citado 6 de octubre de 2022];43(1):1-9. Disponible en: <https://link.springer.com/articles/10.1186/s42269-019-0045-6>
98. Qadeer S, Khalid A, Mahmood S, Anjum M, Ahmad Z. Utilizing oleaginous bacteria and fungi for cleaner energy production. *J Clean Prod*. 1 de diciembre de 2017;168:917-28.
99. Koreti D, Kosre A, Jadhav SK, Chandrawanshi NK. A comprehensive review on oleaginous bacteria: an alternative source for biodiesel production. *Bioresour Bioprocess* 2022 91 [Internet]. 22 de abril de 2022 [citado 4 de octubre de 2022];9(1):1-19. Disponible en: <https://link.springer.com/articles/10.1186/s40643-022-00527-1>
100. Knothe G. Calidad del combustible biodiesel y la norma ASTM. *Palmas*. 2010;31(especial):162-71.
101. Breil C, Abert Vian M, Zemb T, Kunz W, Chemat F. “Bligh and Dyer” and Folch Methods for Solid–Liquid–Liquid Extraction of Lipids from Microorganisms. Comprehension of Solvation Mechanisms and towards Substitution with Alternative Solvents. *Int J Mol Sci* [Internet]. 1 de abril de 2017 [citado 29 de septiembre de 2022];18(4). Disponible en: [/pmc/articles/PMC5412294/](https://pmc/articles/PMC5412294/)
102. Turinayo YK, Kalanzi F, Mudoma JM, Kiwuso P, Asiimwe GM, Esegu JFO, et al. Physicochemical properties of oil and biodiesel produced from *Jatropha curcas* L. in the province of Manabí, Ecuador. *J Sustain Bioenergy Syst*. 2015;05(03):104-13.
103. TANNER Simon. Biocombustibles de tercera generación: ¿Las microalgas resuelven el problema energético? [citado 19 de octubre de 2022]; Disponible en: <https://www.petroenergia.info/post/biocombustibles-de-tercera-generación-el-potencial-de-las-microalgas>
104. Biocombustibles FN de. Bioactualidad – Federación Nacional de Biocombustibles [Internet]. 2022 [citado 21 de octubre de 2022]. Disponible en: <https://fedebiocombustibles.com/bioactualidad/>
105. Departamento Nacional de Planeación. CONPES aprobó política de ciencia, tecnología e innovación (CTI) [Internet]. Departamento Nacional de Planeación. 2021 [citado 21 de octubre de 2022]. Disponible en: <https://www.dnp.gov.co/Paginas/CONPES-aprobó-política-de-ciencia-tecnología-e-innovación-CTI.aspx>

## 6 ANEXOS

### ANEXO I. Bitácora de búsqueda RSL.

Incluye: estrategia de búsqueda de palabras clave, listado de criterios de inclusión y exclusión, base de datos general, descripción y análisis de resultados.

### ANEXO II. Lista de chequeo propuesta por la Declaración PRISMA

Incluye: Los criterios seleccionados para la RSL.

### ANEXO III. Revistas donde se publican revisiones sistemáticas de la temática

**Tabla 1. Posibles revistas donde se podría publicar la revisión sistemática**

Revista	ISSN	Índice de impacto SCOPUS	País
Hechos microbiológicos	2145-8898		Colombia