

Análisis Bibliométrico de las bases lubricantes provenientes de diversos tipos de biomasa.

María Camila Perea Montañez y Valentina Medina Pinzón

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Químico

Director

Fredy A. Avellaneda Vargas

Doctor en Ingeniería Química

Codirector

Carlos Camargo

Magister en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímica

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, quien ha sido mi fuerza y pilar en cada momento, y a mis sobrinas, quienes son mi inspiración y motivación en la vida.

Valentina Medina

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, quien ha sido mi motor para perseguir mis sueños y mi fortaleza en los momentos más difíciles.

A mis padres, Ramón y Aidee, quienes han sido y serán siempre el pilar más importante en mi vida. Les agradezco infinitamente su apoyo incondicional, sus consejos y todas las enseñanzas que me han brindado. Todo lo que soy y todo lo que he logrado se lo debo a ustedes.

A mi hermano Sebastián, por llenar mis días de felicidad. Espero ser siempre su ejemplo y motivo de orgullo.

Agradezco a mi familia por compartir mis alegrías y por estar siempre a mi lado, especialmente a mi Tía Sonia, quien ha sido un apoyo incondicional para mí. También quiero honrar a mi angelito, cuyo amor sigue iluminando mi camino en cada nueva etapa de mi vida.

A Valentina, mi compañera y amiga de vida, a quien agradezco por su apoyo constante y por compartir conmigo este trayecto de aprendizaje y crecimiento académico.

Camila Perea

Agradecimientos

A Dios, por darnos la sabiduría y brindarnos la salud necesaria para culminar con éxito esta etapa.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Química por acogernos y formarnos como profesionales integrales.

Al director Fredy Avellaneda, por su dedicación, tiempo y apoyo incondicional. Asimismo, agradecemos al codirector, Carlos Camargo, por su colaboración y orientación fundamental para la realización de este proyecto.

Contenido

Introducción.....	11
1.1 Bases lubricantes.....	13
1.2 Propiedades de los lubricantes	13
1.2.1 Viscosidad	13
1.2.2 Índice de viscosidad.....	14
1.2.3 Punto de fluidez	14
1.2.4 Índice de acidez	14
1.3 Aditivos	15
1.4 Materias primas	15
1.5 Procesos de síntesis de base biolubricantes	16
1.5.1 Transesterificación.....	16
1.5.2 Epoxidación.....	18
1.5.3 Esterificación.....	19
2. Objetivos.....	20
2.1 Objetivo General.....	20
2.2 Objetivos Específicos	20
3. Estado del Arte	21
4. Metodología.....	24
4.1.1 Selección de Metodología (para lograr el objetivo específico 1)	24

4.1.2 Estrategia de Búsqueda (para lograr el objetivo específico 1)	25
4.2 Etapa II: Líneas más importantes (para lograr el objetivo específico 2)	25
4.3 Etapa III: Análisis y presentación de resultados (para lograr el objetivo específico 3)	25
5. Resultados.....	26
5.1 Selección de Metodología.....	26
5.1.1 Estrategia de Búsqueda.....	27
5.2 Tipos de Biomasa.....	28
5.2.1 Análisis de biolubricantes a base de aceites vegetales	28
5.2.2 Análisis de biolubricantes a base de grasas animales.....	33
5.4 Análisis de tendencias en la investigación.....	42
5.4.1 Autores destacados	43
5.4.2 Países Influyentes	44
5.3.3 Universidades a la Vanguardia	45
6. Conclusiones.....	46
7. Recomendaciones	47
Referencia.....	48

Lista de Tablas

Tabla 1. Comparación de la metodología de la investigación.....	26
Tabla 2. Propiedades claves de biolubricantes a base de aceites vegetales.....	28
Tabla 3. Comparación de propiedades de biolubricantes a base aceite vegetal y aceites minerales.....	33
Tabla 4. Propiedades claves de biolubricantes a base de grasas animales	33
Tabla 5. Comparación de propiedades de biolubricantes a base de grasas animales y aceites minerales.....	38
Tabla 6. Comparación de biolubricantes obtenidos a partir de aceites vegetales y grasas animales	39
Tabla 7. Propiedades claves de biolubricantes a base de aceites residuales.....	40

Lista de Figuras

Figura 1. Reacción de transesterificación.....	17
Figura 2. Transesterificación inversa de un metil éster con un poliol.....	18
Figura 3. Reacción de perácido	18
Figura 4. Reacción de epoxidación.....	19
Figura 5. Mapas de coautoría	43
Figura 6. Mapa de países influyentes	44
Figura 7. Gráfico de universidades a la vanguardia	45

Lista de Apéndices

Apéndice A. Cuadro comparativo de las diferentes rutas	54
Apéndice B. Diagrama descripción de la metodología.	55
Apéndice C. Selección de la literatura recopilada	56
Apéndice D. Resúmenes de los Artículos Abordados en el Estudio	57
Apéndice E. Tabla de costos de materias primas	78

Resumen

Título: Análisis Bibliométrico de las bases lubricantes provenientes de diversos tipos de biomasa*.

Autores: María Camila Perea Montañez, Valentina Medina Pinzón**.

Palabras Claves: Bases lubricantes, aceite vegetal, grasa animal, aceite residual, análisis bibliométrico.

Descripción:

En los últimos años, el interés en los biolubricantes ha experimentado un crecimiento exponencial debido a su carácter respetuoso con el medio ambiente y su capacidad de biodegradación, lo que representa un avance significativo en la búsqueda de soluciones sostenibles para la industria de la lubricación. Esta investigación se centra en evaluar y comprender el estado actual de las bases lubricantes, identificando las biomásas más apropiadas y los procesos clave para su obtención, con el propósito de fomentar la fabricación de lubricantes sostenibles. A través de la metodología PRISMA, se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura científica, dividiendo el proceso en tres etapas fundamentales: selección de metodología, identificación de líneas relevantes y análisis de resultados. Se observa que el aceite de palma y el de jatropha son destacados por su amplia disponibilidad, siendo el primero líder en producción y costo de materia prima. Los biolubricantes derivados de jatropha exhiben un índice de viscosidad de 292, indicando estabilidad frente a cambios de temperatura, mientras que los de palma registran 196. Los biolubricantes elaborados a partir de grasa de pollo muestran elevados índices de viscosidad (295.32), demostrando viabilidad económica debido a menores costos energéticos. Esta investigación identifica tres grupos de autores líderes en el campo, resaltando la colaboración internacional entre investigadores de China, Malasia e India. Estos resultados abren la puerta a un futuro prometedor en la producción y aplicación de biolubricantes, impulsando una transición hacia prácticas industriales más responsables con el medio ambiente.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas Escuela de Ingeniería Química.

Director: Fredy Augusto Avellaneda Vargas. Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Carlos Alfredo Vila. Magister en Ingeniería Química.

Abstract

Title : Bibliometric Analysis of Lubricant Bases from Various Types of Biomass*.

Author(s): María Camila Perea Montañez, Valentina Medina Pinzón**.

Key Words : Lubricant bases, vegetable oil, animal fat, residual oil, bibliometric analysis.

Description :

In recent years, interest in biolubricants has grown exponentially due to their environmentally friendly nature and biodegradation capabilities, representing a significant advance in the search for sustainable solutions for the lubrication industry. This research focuses on evaluating and understanding the current state of lubricant bases, identifying the most appropriate biomasses and the key processes for obtaining them, with the aim of promoting the manufacture of sustainable lubricants. Through the PRISMA methodology, a systematic review of the scientific literature was carried out, dividing the process into three fundamental stages : selection of methodology, identification of relevant lines and analysis of results. It is observed that palm oil and jatropha oil stand out for their wide availability, being the first leader in production and raw material cost. Biolubricants derived from jatropha exhibit a viscosity index of 292, indicating stability against temperature changes, while palm biolubricants have a viscosity index of 196. Biolubricants made from chicken fat show high viscosity indexes (295.32), demonstrating economic viability due to lower energy costs. This research identifies three groups of leading authors in the field, highlighting the international collaboration between researchers from China, Malaysia and India. These results open the door to a promising future in the production and application of biolubricants, driving a transition towards more environmentally responsible industrial practices.

* Degree Work

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas Escuela de Ingeniería Química Maestría en Ingeniería Química.
Director: Fredy Augusto Avellaneda Vargas. Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Carlos Alfredo Vila.
Magister en Ingeniería Química.

Introducción

En medio de una creciente preocupación por las devastadoras repercusiones del cambio climático, los combustibles fósiles y sus derivados han emergido como principales responsables, con métodos de extracción y procesamiento que plantean preocupaciones significativas. Entre estos productos, los lubricantes ocupan un lugar destacado, concebidos para mantener una capa de aceite entre superficies en contacto, previniendo el desgaste y la deformación, así como la oxidación, mientras actúan como barreras ante la suciedad, el agua y el polvo. Sin embargo, esta aparente solución conlleva una gran desventaja: al ser mayoritariamente derivados del petróleo, carecen de biodegradabilidad, contribuyendo así a la contaminación y, por consiguiente, los desafíos ambientales (Madankar et al., 2013).

La situación se agrava cuando estos lubricantes usados no son correctamente gestionados. Estudios revelan que aproximadamente el 20% de los lubricantes usados en Europa se liberan al medio ambiente, poniendo en riesgo recursos vitales como el agua, donde un solo kilogramo de estos puede contaminar hasta mil metros cúbicos (Meléndez, 2014). Esta problemática no es exclusiva de Europa, ya que, en Colombia, según el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), se consumen cerca de 1,8 millones de barriles de lubricantes cada año (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, n.d.), siendo aproximadamente un 90% obtenidos a partir de derivados del petróleo (Saboya et al., 2017).

Ante la problemática expuesta anteriormente, se ha despertado un creciente interés en la investigación y desarrollo de bases biolubricantes, las cuales son un componente esencial en la formulación de lubricantes, puesto que son las encargadas de proporcionar las principales propiedades como la viscosidad y la estabilidad térmica. Estas bases lubricantes

derivadas de diversas fuentes de biomasa, como aceites vegetales, grasas animales y aceites residuales, representan una prometedora alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente para la fabricación de biolubricantes (Manzanarez, 2022).

Si bien existen estudios sobre la síntesis y caracterización de estas bases biodegradables, no hay una revisión integral y sistemática del estado actual de conocimiento en este campo. Aspectos cruciales como las materias primas, las rutas de producción, el rendimiento y las posibles aplicaciones no han sido abordados de manera integral en la literatura especializada. Esta brecha representa una valiosa oportunidad para mapear el panorama global de investigación sobre bases biolubricantes mediante una exhaustiva revisión bibliográfica. Integrar descubrimientos sobre procesamiento, propiedades y usos finales en una base de datos unificada simplificaría enormemente la identificación de áreas deficientes y tendencias emergentes en este campo de creciente interés. Además, facilitaría la identificación de posibles colaboraciones entre investigadores y la optimización de recursos, lo que aceleraría el desarrollo y la adopción de biolubricantes como una alternativa ambientalmente sostenible en la industria (Ahuja et al., 2021).

Por consiguiente, el análisis bibliométrico de las bases lubricantes derivadas de diversas biomásas se convierte en una herramienta valiosa para abordar estos desafíos. En ese sentido, se propone la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuáles son las materias primas prometedoras para la obtención de bases lubricantes a partir de aceites vegetales, grasas animales y aceites residuales?.

1. Marco Teórico

1.1 Bases lubricantes

Las bases lubricantes, esenciales en la formulación de lubricantes, se dividen en minerales, sintéticas y vegetales/animales. Para un funcionamiento efectivo, deben poseer propiedades como viscosidad, índice de viscosidad, temperatura de fluidez, temperatura de ebullición, resistencia a la oxidación y corrosión. Estas sustancias, constituyendo alrededor del 70% del lubricante, son fundamentales para reducir la fricción y desgaste entre superficies en movimiento relativo. Su origen mineral, sintético, vegetal o animal se determina por la aplicación específica. Ampliamente empleadas en la lubricación de motores, maquinaria e industrias, las bases lubricantes desempeñan un papel crucial. Adicionalmente, se integran con aditivos que constituyen el restante 30%, mejorando significativamente su rendimiento y eficiencia en diversas aplicaciones (Repsol, 2024).

1.2 Propiedades de los lubricantes

En las próximas secciones, profundizaremos en detalle algunas de las propiedades clave de los lubricantes que son fundamentales para comprender su desempeño y su impacto en la eficiencia y protección de las máquinas y equipos. Estas propiedades son críticas para seleccionar el lubricante más adecuado y asegurar un funcionamiento óptimo en una amplia gama de aplicaciones industriales y mecánicas.

1.2.1 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad de los líquidos que mide su resistencia al flujo, donde menor viscosidad indica una mayor facilidad para fluir y viceversa. La temperatura afecta la viscosidad, disminuyéndola con el aumento de la temperatura. En los fluidos líquidos esta propiedad es crucial en aplicaciones de lubricación, ya que lubricantes con baja viscosidad

ofrecen un sellado óptimo y reducen el desgaste, mientras que los de alta viscosidad brindan una mayor protección contra la corrosión (Wiley & Sons, 2014).

1.2.2 Índice de viscosidad

El índice de viscosidad de un líquido es su capacidad para mantener una consistencia estable a pesar de cambios en la temperatura. Un índice de viscosidad más alto significa que la viscosidad del líquido cambia menos cuando la temperatura varía, lo que lo convierte en un lubricante más eficaz y protector. Este parámetro es crucial al elegir un lubricante, ya que un bajo índice de viscosidad podría llevar a una viscosidad adecuada a una temperatura determinada, pero esta podría disminuir significativamente a medida que aumenta la temperatura, lo que resultaría en un aumento de la fricción mecánica y un mayor desgaste debido a la pérdida de la película lubricante (Wiley & Sons, 2014).

1.2.3 Punto de fluidez

Esta característica es de gran relevancia en la evaluación de lubricantes. Se define como la temperatura mínima a la cual un líquido mantiene su capacidad de fluir, es decir, su comportamiento fluido (Sokolnikov et al., 2016). Su importancia radica en garantizar el funcionamiento óptimo de los lubricantes y su medición se realiza mediante pruebas estandarizadas de laboratorio.

1.2.4 Índice de acidez

El índice de acidez (IA) es una medida de la cantidad de ácidos grasos libres (AGF) presentes en un lubricante. Los AGF son ácidos que se forman por la oxidación de los lípidos, que son las moléculas que componen los lubricantes. El IA se expresa en miligramos de hidróxido de potasio (KOH) necesarios para neutralizar los AGF presentes en un gramo de lubricante. En los biolubricantes, el IA es una medida importante de la calidad del lubricante.

Un IA alto indica que el lubricante está degradado y que puede perder sus propiedades lubricantes. La norma ASTM D664 de la American Society for Testing and Materials (ASTM) especifica el procedimiento estándar para medir el índice de acidez en aceites lubricantes (Metrohm, 2020).

1.3 Aditivos

Los aditivos químicos, presentes en proporciones que oscilan entre el 3% y el 20% en volumen (según la relación en volumen), desempeñan un papel esencial al complementar las bases lubricantes y mejorar sus propiedades, las cuales varían en función del uso previsto para el aceite lubricante o la grasa. Una característica importante es que a medida que la calidad de la base lubricante aumenta, se reduce la necesidad de añadir aditivos para cumplir con los requisitos específicos de su aplicación (Chavez & Eduardo, 2023).

Entre sus funciones se encuentran la eliminación de residuos, cenizas y otras impurezas generadas durante la combustión del motor, el mantenimiento de la viscosidad para garantizar una película lubricante de espesor estable, la prevención de la formación de espuma mediante antiespumantes, la protección contra la degradación del lubricante causada por la agitación, la prevención de la contaminación debida a residuos de combustión mediante antioxidantes y la eliminación o limpieza de impurezas a medida que son transportadas hacia el filtro de aceite (Gil Lopez et al., 2014).

1.4 Materias primas

Las materias primas más utilizadas para la producción de bases lubricantes de biomasa son los aceites vegetales. Estos aceites se caracterizan por su buena lubricidad, estabilidad térmica y química, y resistencia al desgaste. Los principales aceites vegetales

utilizados para la producción de bases lubricantes son el aceite de soja, el aceite de girasol, aceite jatropha, aceite de ricino, aceite de colza y el aceite de palma (Anjana & Preeti, 2013).

Las grasas animales también se pueden utilizar para la producción de bases lubricantes de biomasa. Estas grasas se caracterizan por su alta viscosidad y estabilidad térmica. Las principales grasas animales utilizadas para la producción de bases lubricantes son la grasa de pollo, la grasa de cerdo, la grasa de bovino y vísceras de tilapia (Marques et al., 2022). Los residuos agrícolas, aceites de cocina usado y aceites residuales también se pueden utilizar para la producción de bases lubricantes de biomasa. Estos residuos se caracterizan por su bajo coste y su disponibilidad (Rojas & Gomez, 2010).

1.5 Procesos de síntesis de base biolubricantes

La producción de bases lubricantes a partir de fuentes renovables requiere de una serie de reacciones químicas para lograr las propiedades fisicoquímicas deseadas. En esta sección se exploran algunos de los procesos clave involucrados en la síntesis de bases biolubricantes. Estas rutas de transformación molecular permiten modificar la composición de aceites vegetales, grasas animales y otros derivados de la biomasa, generando intermediarios y compuestos finales con un mejor potencial para cumplir las necesidades de lubricación de maquinaria industrial, motores y otros equipos mecánicos. En el Apéndice A se incluye una tabla comparativa que destaca las diferencias entre las distintas rutas de síntesis. Se compara cómo se lleva a cabo la reacción, los catalizadores empleados y los productos obtenidos para ofrecer claridad.

1.5.1 Transesterificación

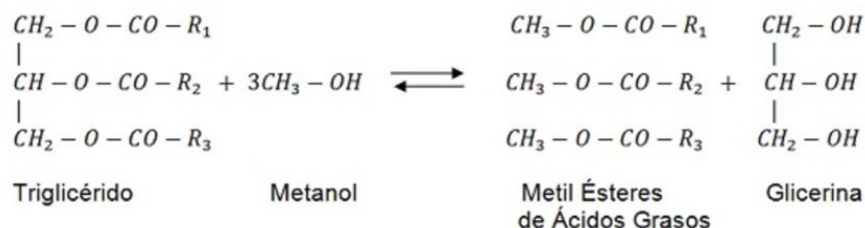
La transesterificación, también conocida como alcoholisis, es un proceso que implica el desplazamiento de un radical de alcohol por otro proveniente de un éster, generalmente

utilizando alcoholes de cadena corta como metanol o etanol. Este proceso se utiliza para reducir la alta viscosidad de los triglicéridos presentes en grasas animales o vegetales, como parte de la producción de biodiesel (Olivo, 2019).

Es importante destacar que la transesterificación es una reacción reversible, por lo que se requiere un exceso de alcohol para favorecer la formación de biodiesel y glicerina. Se utilizan catalizadores ácidos o alcalinos, como el hidróxido de sodio o el ácido sulfúrico, para facilitar la reacción. Después de la transesterificación, se obtiene una mezcla de ésteres, glicerol, alcohol, catalizador y diferentes glicéridos, que posteriormente se separan. Esta reacción es fundamental en la producción de biodiesel a partir de aceites usados y puede llevarse a cabo con metanol o etanol como reactantes principales (Alfonso & González, 2013).

Figura 1.

Reacción de transesterificación

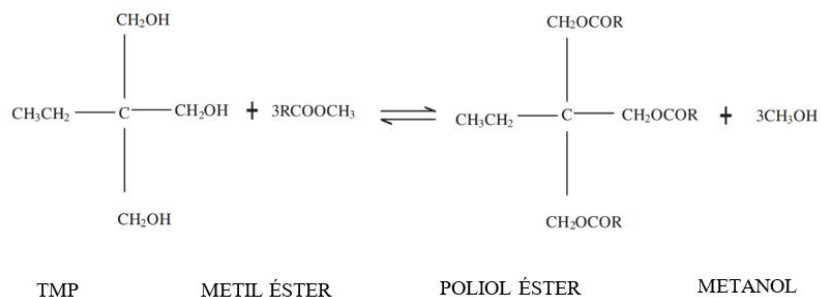


Nota. Tomado de: (García et al., 2018)

Terminada esta fase de la obtención del biodiésel, estos métil ésteres se hacen reaccionar con el polioli deseado (trimetilolpropano, neopentilglicol, entre otros) en presencia de catalizadores ácidos como el ácido sulfúrico, o catalizadores básicos como el hidróxido de potasio, metóxido de sodio, entre otros, obteniendo como producto un polioli éster ver figura 2 (Kamil et al., 2011).

Figura 2.

Transesterificación inversa de un metil éster con un poliol.



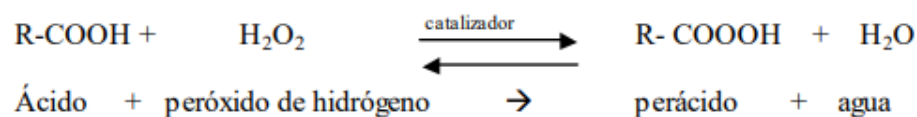
Nota. Tomado de: (Kamil et al., 2011)

1.5.2 Epoxidación

La epoxidación se puede definir como la transformación de un grupo de olefinas en un éter cíclico de tres miembros mediante agentes como el oxígeno activo. En esta situación, la ruptura del enlace doble se lleva a cabo mediante un agente oxidante, específicamente el perácido, el cual se obtiene a partir de la reacción del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) con un ácido. Las reacciones involucradas en la epoxidación de ácidos grasos insaturados, incluyendo la producción del perácido, se describen de la siguiente manera:

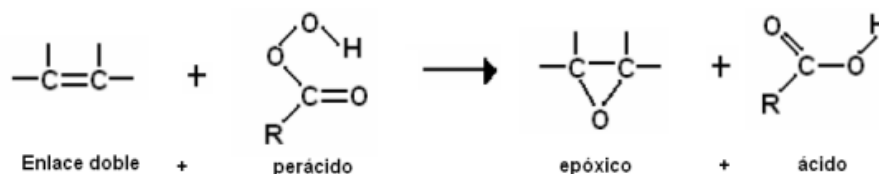
Figura 3.

Reacción de perácido



Nota. Tomado de: (Jimenez & Quintero, 2006)

Cuando esta reacción es catalizada por una resina de intercambio iónico y se realiza in situ, se requiere añadir un exceso de ácido para desplazar el equilibrio y garantizar una alta generación de perácido.

Figura 4.*Reacción de epoxidación*

Nota. Tomado de: (Jimenez & Quintero, 2006)

En este caso, uno de los oxígenos del perácido se une al enlace doble de la olefina, dando lugar a la formación de un éter cíclico. Al mismo tiempo, el ácido precursor del perácido se regenera. Los productos resultantes de esta reacción son compuestos que poseen propiedades lubricantes y pueden ser utilizados como tales. Este fenómeno se puede observar en la Figura 4. (Jiménez & Quintero, 2006).

1.5.3 Esterificación

1.5.3.1 Química

La esterificación es un proceso químico fundamental que implica la síntesis de ésteres, que son compuestos derivados de la reacción entre un ácido carboxílico y un alcohol. Los ésteres de ácidos carboxílicos se caracterizan por tener una estructura general de R-COOR', donde R y R' representan grupos alquilo. Además, esta reacción puede aplicarse en principio para crear ésteres a partir de una amplia variedad de oxiácidos inorgánicos (Qudah et al., 2021).

Este proceso es de particular relevancia en la producción de biolubricantes. En la esterificación utilizada en esta industria, un ácido carboxílico reacciona con un alcohol para formar un éster. Los ésteres son moléculas que contienen un grupo carboxilo (COOH) y un grupo hidroxilo (OH) unidos al mismo átomo de carbono (Ganesh & Kumar, 2021).

Es importante destacar que la esterificación es un proceso reversible, y el equilibrio tiende a desplazarse hacia la formación de los productos en presencia de un catalizador. Entre los catalizadores comunes para la esterificación se encuentran los ácidos minerales, como el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico (Biswas & Dey, 2020).

1.5.3.2 Enzimática

La esterificación enzimática es un enfoque alternativo y sostenible para la producción de biolubricantes de alta calidad. En este proceso, las enzimas, que son catalizadores biológicos, desempeñan un papel crucial. Las lipasas son un tipo de enzimas particularmente relevantes en la esterificación de ácidos grasos. Estas enzimas catalizan tanto la hidrólisis como la síntesis de lípidos, permitiendo la conversión de ácidos grasos y alcoholes en ésteres (Ganesh & Kumar, 2021).

La esterificación enzimática ofrece varias ventajas en comparación con la esterificación química. Estas incluyen la selectividad de las enzimas para sustratos específicos, la reducción de productos secundarios no deseados, la operación a temperaturas moderadas y condiciones suaves, y la producción de biolubricantes con menor impacto ambiental (Alves et al., 2019).

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar y comprender el estado actual de las bases lubricantes para establecer las biomasas más adecuadas y las características clave para su obtención en la fabricación de lubricantes sostenibles mediante un análisis bibliométrico.

2.2 Objetivos Específicos

Realizar una revisión de literatura científica sobre bases lubricantes de diversas biomásas, por medio de la base de datos proporcionada por la institución como Web Of Science (WoS) y Scopus.

Implementar una metodología bibliométrica para la evaluación detallada de las rutas de síntesis, métodos de obtención y materias primas empleadas en la fabricación de bases lubricantes sostenibles.

Determinar las posibles tendencias, tecnologías implementadas como los autores más citados, los países con artículos más influyentes y universidades a la vanguardia en la investigación de biolubricantes a nivel mundial, mediante la herramienta especializada para el análisis bibliométrico VOSviewer.

3. Estado del Arte

La producción anual de lubricantes alcanza los 38.8 millones de toneladas y se utilizan ampliamente en aplicaciones industriales para reducir la fricción, proteger contra la corrosión, transmitir energía y eliminar contaminantes, entre otros usos (Asociación Mundial del Petróleo (API), 2021). Se estima que entre el 50% y el 75% de la producción total de lubricantes se vierte sin control en el medio ambiente. Además, alrededor del 95% de los lubricantes se basa en aceite mineral derivado del petróleo, compuesto por una mezcla compleja de hidrocarburos no renovables y tóxicos. Estas formulaciones son perjudiciales para el ser humano y el medio ambiente debido a su baja biodegradabilidad y alta toxicidad, incluso algunos lubricantes se consideran cancerígenos (Cecilia et al., 2020).

En la revisión realizada por (Uzair et al., 2022), se analiza detalladamente la producción de biolubricantes a partir de diversas fuentes de aceite no comestible, así como el impacto de diferentes condiciones de operación en las propiedades fisicoquímicas de estos

biolubricantes. Los biolubricantes demuestran en algunos casos contar con características técnicas superiores en comparación con los aceites fósiles. Entre los beneficios destacados se encuentran su mayor lubricidad, propiedades anti-desgaste superiores, adecuada viscosidad, alta temperatura de ignición, mayor índice de viscosidad, mayor vida útil del equipo, alta capacidad de carga, bajas tasas de evaporación, excelente coeficiente de fricción, baja emisión de metales al medio ambiente y biodegradabilidad. El estudio enfatiza el potencial y las ventajas de los biolubricantes como una opción más sostenible y eficiente en comparación con los lubricantes convencionales. Sin embargo, también se reconoce que los biolubricantes pueden presentar ciertas limitaciones, como su costo inicial más elevado o su disponibilidad limitada en algunos mercados.

En su revisión (Nogales et al., 2023) muestran que existe un interés creciente en la producción de biolubricantes a base de aceites vegetales, con un aumento significativo en el número de artículos publicados sobre este tema en la última década. Se ha demostrado la viabilidad de la producción de biolubricantes a partir de aceites vegetales, obteniendo altos rendimientos de este producto independientemente de la ruta química seleccionada, y presentando algunas propiedades incluso mejores en comparación con los lubricantes tradicionales obtenidos a partir de aceite. La revisión destaca la importancia de la elección del catalizador en la producción de biolubricantes, ya que puede afectar la calidad y la eficiencia de la transesterificación. Además, se resalta la importancia de la búsqueda de materias primas adecuadas, el uso de catalizadores heterogéneos para mejorar la efectividad y eficiencia del proceso y la optimización de las condiciones químicas como líneas de investigación más interesantes según la literatura.

En su revisión, (Singh et al., 2017) analiza detalladamente la sostenibilidad de un biolubricante de base biológica discutiendo las propiedades, los beneficios y la aplicación de

biolubricantes a base de aceites vegetales no comestibles como alternativas. También incluye la descripción del mercado global de lubricantes y su alcance futuro. Los biolubricantes a base de aceites vegetales no comestibles tienen lubricidad mejorada, alta viscosidad, buenas propiedades antidesgaste, alto índice de viscosidad y aumentan la vida útil del equipo.

Por otro lado, Chiew et al., (2022) realizó un análisis bibliométrico sobre la investigación actual de los biolubricantes a base de aceite vegetal. En este análisis, se investigaron nuevas materias primas para la producción de biolubricantes y se buscó mejorar sus propiedades fisicoquímicas y tribológicas mediante modificación química y/o aditivación. Se destaca la introducción de aceites vegetales no comestibles junto con aditivos no tóxicos y biodegradables como una nueva etapa en la investigación de biolubricantes. Se observa que el biolubricante a base de aceite vegetal más estudiado es el de palma, seguido del aceite de ricino. Los valores informados de viscosidad e índice de viscosidad cubren un rango más amplio, lo que permite que los biolubricantes a base de aceite vegetal sean adoptados para una amplia gama de aplicaciones.

Según(Syahir et al., 2017) presenta un marco de análisis de cuatro etapas para revisar la literatura sobre lubricantes de base biológica. Se identificaron artículos, patentes y libros relevantes, seguido de una selección basada en criterios específicos. El análisis se enfocó en propiedades y tecnología de producción, destacando la importancia de estos lubricantes en términos de estructura molecular y propiedades fisicoquímicas. Se revisaron las propiedades fisicoquímicas, comportamiento tribológico y aplicaciones en diversas industrias. Se sugiere que futuras investigaciones se centren en mejorar la eficiencia de producción.

Esta revisión, basada en la investigación de (Zainal et al., 2018)ofrece un análisis detallado sobre los lubricantes de base biológica, abordando aspectos clave como los diversos aceites vegetales utilizados como materia prima, las propiedades fisicoquímicas, los procesos

de modificación química, y el papel crucial de los aditivos. Destacando la importancia de estos lubricantes como alternativas sostenibles, la revisión proporciona una visión completa de su potencial tecnológico.

Con base a los antecedentes descritos, el objetivo de esta investigación es llevar a cabo un análisis bibliométrico de las bases lubricantes de diversas biomásas, con el propósito de evaluar y comprender el estado actual de las bases lubricantes para establecer las biomásas más adecuadas y las características clave para su obtención en la fabricación de lubricantes sostenibles. En este análisis bibliométrico, utilizaremos criterios de selección como la ruta de síntesis, tipo de materia prima (grasas animales, aceites vegetales y aceites residuales) y los métodos de obtención. Además, nos enfocaremos en el índice de viscosidad como criterio de exclusión para seleccionar los lubricantes con mayores estándares de viscosidad y garantizar un comportamiento adecuado en diferentes temperaturas. La información seleccionada será analizada utilizando herramientas de análisis de datos como VOSviewer.

4. Metodología

Una representación gráfica de estas etapas se encuentra en el apéndice B, que ofrece un resumen visual de la metodología empleada.

4.1 Etapa I

4.1.1 Selección de Metodología (para lograr el objetivo específico 1)

Para llevar a cabo el estudio bibliográfico, es fundamental elegir una metodología de investigación que se ajuste de manera conveniente a los objetivos planteados. Se presentan dos enfoques bibliométricos para su consideración: PRISMA y la revisión sistemática exploratoria.

4.1.2 Estrategia de Búsqueda (para lograr el objetivo específico 1)

Para llevar a cabo la revisión bibliográfica, se construye una ecuación de búsqueda que se aplicó en la base de datos electrónica Web Of Science (WoS) y Scopus, disponible en el catálogo bibliográfico de la Universidad Industrial de Santander.

4.2 Etapa II: Líneas más importantes (para lograr el objetivo específico 2)

Se inicia revisando la información pertinente para simplificar el análisis posterior, seguido por la creación de una base de datos en Microsoft Excel. Se eliminan duplicados, revisan títulos y resúmenes para extraer datos relevantes. Este proceso evalúa criterios como ruta de síntesis, materia prima y excluye lubricantes que no cumplen con estándares de viscosidad y comportamiento en diferentes temperaturas.

Finalmente, se realiza una lectura completa de los artículos seleccionados y se busca en las referencias de estos para identificar estudios relevantes que puedan haber sido pasados por alto en la búsqueda inicial en las bases de datos.

4.3 Etapa III: Análisis y presentación de resultados (para lograr el objetivo específico 3)

Para comenzar el análisis de resultados, se realiza una clasificación de las materias primas en grasas animales, aceites vegetales y aceites residuales. La información se organiza teniendo en cuenta los objetivos de la investigación, y se informan los resultados de cada artículo, incluyendo el título de la investigación, objetivo, rutas de obtención y resultados destacando la viscosidad e índice de viscosidad estos serán reportados como apéndices partir de estas clasificaciones.

Para cada materia prima se crea una tabla que incluye las propiedades reportadas por los estudios y su clasificación ISO VG correspondiente. Es importante destacar que las propiedades no reportadas por los autores se registran como (NR), lo que permite una

evaluación objetiva de cada tabla. Además, se elabora una tabla adicional que enumera las tres materias primas con mayor producción a nivel mundial y las mejores propiedades, las cuales se comparan con un lubricante mineral de acuerdo con su aplicación ISO VG.

Luego, se procede a construir una red bibliométrica utilizando la herramienta de análisis de datos VOSviewer. Esta red incluye todos los artículos seleccionados y permite analizar gráficamente aspectos como los autores más citados, los países con artículos más influyentes y las universidades destacadas en el campo de los biolubricantes.

5. Resultados

5.1 Selección de Metodología

La Tabla 1 se construyó tomando en cuenta diversas consideraciones relacionadas con la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), las cuales fueron fundamentales para su diseño y elaboración.

Tabla 1.
Comparación de la metodología de la investigación

Aspectos	PRISMA (Urrutia & Bonfill, 2010)	Revisión Sistemática Exploratoria (H. Fernández et al., 2020)
Propósito	Realizar revisiones sistemáticas en profundidad, incluyendo metaanálisis cuando sea posible.	Obtener una visión general de un tema de investigación, identificar tendencias y áreas de interés.
Protocolo	Se desarrolla un protocolo detallado con criterios de inclusión/exclusión y estrategia de búsqueda.	La búsqueda y selección de estudios puede ser más flexible y menos estructurada.
Búsqueda	Se realiza una búsqueda sistemática en múltiples bases de datos académicas siguiendo un protocolo predefinido.	La búsqueda puede ser más exploratoria y no sigue necesariamente un protocolo rígido.

Selección de estudios	Aplica criterios de inclusión/exclusión estrictos.	La selección puede ser más flexible y menos rigurosa en términos de criterios de inclusión.
Extracción de datos	Se extraen datos de manera detallada y estructurada de los estudios incluidos.	La extracción de datos puede ser más cualitativa y descriptiva.

Por estas razones se eligió la metodología PRISMA dado que tiene un sólido y estructurado marco para hacer revisiones sistemáticas y metaanálisis. Su diseño se enfoca en asegurar la máxima rigurosidad en el proceso de revisión.

Su aplicación demuestra los más elevados estándares de calidad en la investigación basada en evidencia, lo que puede mejorar la credibilidad del trabajo y su aceptación en destacadas revistas científicas. Además, PRISMA resulta especialmente adecuado cuando te enfrentas a una pregunta de investigación claramente definida y específica. (Urrutia& Bonfill, 2010).

5.1.1 Estrategia de Búsqueda

Nuestro enfoque implica la construcción de una ecuación de búsqueda, para lo cual es necesario identificar los términos clave que resumen el tema: "biolubricant, biodegradable lubricant, vegetable oil, animal grease, sustainability, synthesis, characterization". Utilizamos operadores booleanos ("AND" y "OR") junto con el operador de truncamiento ("*") para mejorar la precisión de la búsqueda.

El proceso de recopilación se centra en la selección de documentos específicos, limitando la búsqueda a artículos relacionados con los campos de la ingeniería e ingeniería química. Estos documentos debían haber sido publicados en el período comprendido entre 2013 y 2023, y estaban disponibles en los idiomas inglés y español.

En el apéndice C, se ilustra el procedimiento llevado a cabo para elegir la documentación recopilada acerca de las bases lubricantes derivadas de diversas fuentes de biomasa, lo cual constituye el fundamento de este proyecto.

En una primera etapa, se identificaron un total de 262 artículos. Posteriormente, se procedió a una selección rigurosa, optando por 68 de ellos para su inclusión en la revisión sistemática. Esta selección se basó en criterios estrictos que abordaron aspectos tales como la síntesis, el método de obtención y la caracterización. Tras un exhaustivo proceso de exclusión, donde se evaluaron indicadores como el índice de viscosidad, el punto de fluidez, el índice de acidez y el índice de oxidación, se logró identificar lubricantes que cumplieran con los más altos estándares de viscosidad, garantizando así un rendimiento óptimo en diversas condiciones de temperatura. Finalmente, se determinó que 44 documentos eran pertinentes para llevar a cabo la revisión bibliométrica.

5.2 Tipos de Biomasa

Los aceites vegetales, las grasas animales y aceites residuales desempeñan un papel crucial en la producción de lubricantes de base biológica. Los aceites vegetales, como los de colza, girasol y palma, varían según las regiones debido a factores climáticos y geográficos, mientras que las grasas animales provienen de fuentes como pescados y aves de corral, y los aceites residuales, como el aceite de cocina. En el apéndice D, se encuentran los resúmenes detallados de cada artículo de investigación, proporcionando una visión completa de los estudios y sus hallazgos relacionados con la producción de lubricantes de base biológica.

5.2.1 Análisis de biolubricantes a base de aceites vegetales

Tabla 2.

Propiedades claves de biolubricantes a base de aceites vegetales

Tipo de Biolubricante derivados de	Ruta de Síntesis	Viscosidad Cinemática 40°C[mm²/s]	Índice viscosidad [cSt]	Punto de Fluidéz[°C]	Índice de acidez [mg KOH/g]	Estabilidad oxidativa [min]	Clasificación ISO VG
Aceite de jatropha (Abdul et al., 2019)	Aditivo: líquidos iónicos al 10% p/p	21.05	292	1.7	0.078	NR	22
Aceite de jatropha de grafeno (Jamaluddin et al., 2020)	Transesterificación Aditivo: Grafeno 0.025%p/p	17	269	NR	NR	NR	15
	Transesterificación Aditivo: Nitruro de Boro 0.01%p/p	16	267	NR	NR	NR	15
Aceite de algas marinas(Roy et al., 2023a)	Hidrotratamiento	5.69	243.4	-12.5	1,96	NR	7
Aceite de dátíl del desierto (Singh et al., 2020)	Transesterificación Aditivo: Nanopartículas Cu 1.6%p/p	17.89	236	NR	0.38	NR	15
Aceite de brucea javanica (Singh et al., 2021)	Epoxidación Aditivo: Nanopartículas ZrO2 0.5%p/p	141.28	225	2.4	0.047	39	150
Aceite de palma (Chang et al., 2015)	Transesterificación	44.3	219	-30	0.28	NR	46
Aceite de aguacate (Reeves et al., 2018)	Aditivo: Fosfonio	66.39	210	NR	5.2	NR	68
Aceite de colza (Xu et al., 2019)	Esterificación Aditivo: Éster de colofonia de pentaeritritol 20% p/p	36.13	209	NR	<20	18	32
Aceite de palma (Abd Wafti et al., 2022)	Transesterificación enzimática	43.7	203	-37	NR	NR	46

Es relevante resaltar que en cada investigación de la tabla anterior se empleó el producto final como biolubricante. En los análisis siguientes, se llevarán a cabo comparaciones entre los biolubricantes con propiedades destacadas y aquellos que carecen de ellas, con el fin de ser específicos en las comparaciones y no extenderse demasiado, dado que las propiedades de cada biolubricante se encuentran detalladas en la tabla.

Teniendo en cuenta el índice de viscosidad, entre los biolubricantes estudiados, el derivado de *Jatropha* destaca con un índice de viscosidad de 292, lo que indica una estabilidad frente a variaciones de temperatura (Abdul et al., 2019). Por otro lado, el biolubricante a base de palma muestra un índice de viscosidad de 203, sugiriendo la necesidad de mejorar esta propiedad mediante aditivos como el grafeno o nanotubos de carbono (Abd Wafti et al., 2022).

En cuanto al punto de fluidez, se destaca el biolubricante a base de palma con una fluidez de $-37\text{ }^{\circ}\text{C}$, crucial para su funcionamiento en condiciones frías (Abd Wafti et al., 2022). Por el contrario, el biolubricante de *Brucea javanica* presenta limitaciones con un punto de fluidez de $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Singh et al., 2021). Se sugiere mejorar esta propiedad con aditivos depresores como los Copolímeros de etileno propileno, balanceando eficacia y costo.

Respecto al índice de acidez, el biolubricante de *Brucea javanica* muestra una notable estabilidad con un índice de 0.047 [mg KOH/g] (Singh et al., 2021), mientras que el de aceite de colza presenta un índice superior a 20 [mg KOH/g] (Xu et al., 2019). Para mejorar esta propiedad, se recomienda emplear preesterificación ácida e hidrogenación, aunque esto pueda incrementar los costos de producción.

Los biolubricantes presentan una debilidad notable debido a su propensión a degradarse rápidamente, lo que dificulta mantener una estabilidad adecuada a largo plazo.

Esta degradación es resultado de varios factores, entre ellos la presencia de ácidos grasos libres, la susceptibilidad a la oxidación y la degradación térmica. Es crucial señalar que la mayoría de los estudios sobre biolubricantes no incluyen mediciones de estabilidad oxidativa, principalmente debido al costo elevado de los equipos especializados necesarios para evaluarla y la complejidad inherente de esta propiedad, que está influenciada por múltiples factores.

Para abordar este vacío en la investigación, proponemos establecer una correlación entre el índice de acidez y la estabilidad oxidativa. Un índice de acidez elevado sugiere la presencia de ácidos que pueden acelerar el proceso de oxidación, reduciendo así la estabilidad del lubricante. En contraste, un índice de acidez bajo indicaría una menor cantidad de ácidos libres y, por ende, una mayor estabilidad oxidativa del biolubricante.

En los estudios analizados, se observa que el biolubricante obtenido de la brucea javanica sobresale por su notable estabilidad oxidativa, evidenciada por un índice de acidez de apenas 0.047 [mg KOH/g] (Singh et al., 2021). Por otro lado, el biolubricante elaborado a partir de aceite de colza exhibe una baja estabilidad oxidativa, presentando un índice de acidez superior a 20 [mg KOH/g] (Xu et al., 2019). Esta diferencia significativa entre los índices de acidez de los dos biolubricantes resalta la importancia de considerar el contenido de ácidos como un factor crucial para determinar la estabilidad oxidativa y, por ende, la calidad del lubricante biodegradable.

En los estudios realizados con la misma materia prima, es necesario identificar cuál fue la ruta de síntesis más eficiente y las razones que lo respaldan. En el caso de los estudios sobre la producción de biolubricantes a partir de aceite de jatropha y aceite de palma muestran diferentes enfoques y propiedades resultantes. En el caso de los biolubricantes derivados del aceite de jatropha, se destacan tres métodos de síntesis, siendo el más eficiente aquel que

incorpora aditivos líquidos iónicos al 10% en peso (Abdul et al., 2019). Este biolubricante exhibe un alto índice de viscosidad y se destaca por la simplicidad del proceso que solo requiere la adición de aditivos.

Por otro lado, los biolubricantes obtenidos a partir de aceite de palma mediante transesterificación y transesterificación enzimática exhiben propiedades distintas. La transesterificación produce un biolubricante con una mayor estabilidad de viscosidad a diferentes temperaturas (Chang et al., 2015). Por su parte, la transesterificación enzimática puede ser preferible en aplicaciones que operan a temperaturas muy bajas debido a su punto de fluidez inferior (Abd Wafti et al., 2022).

5.2.1.1 Tendencias prometedoras para los Biolubricantes a base de aceite vegetal

Para evaluar objetivamente, solo se considerarán los estudios que detallen completamente sus propiedades según lo registrado en la tabla 2 junto con los costos de materias primas indicados en el apéndice E.

En el análisis de propiedades, se destaca que el aceite de palma exhibe la viscosidad más alta, mientras que el aceite de jatropha presenta un índice de viscosidad superior, indicando una mejor estabilidad térmica, aunque con un punto de fluidez más alto, menos adecuado para climas fríos, y un índice de acidez más bajo, señalando mayor estabilidad química. Respecto a las materias primas, tanto el aceite de palma como el de jatropha son destacables por su disponibilidad, siendo el primero la opción más económica. En términos de costos, el aceite de palma lidera en costo de materia prima.

Tabla 3.*Comparación de propiedades de biolubricantes a base aceite vegetal y aceites minerales*

Tipo de Biolubricante derivados de	Clasificación ISO VG	Viscosidad Cinemática 40°C [mm²/s]	Índice de viscosidad [cSt]	Punto de Fluidez [°C]	Índice de acidez [mg KOH/g]
Aceite de jatropha (Abdul et al., 2019)	22	21.05	292	1.7	0.078
Mobil DTE 22 (Mobil, 2016)	22	21	98	-30	NR
Aceite de palma(Chang et al., 2015)	46	44.3	219	-30	0.28
Mobil Hydraulic Oil HLPD 46 (Mobil, 2016)	46	46	97	-27	NR

El análisis de la tabla 3 revela que los biolubricantes a base de aceite vegetal presentan propiedades comparables a los lubricantes minerales. Incluso, los biolubricantes superan a sus contrapartes en términos de biodegradabilidad, lo que se traduce en un menor impacto ambiental. Sin embargo, el precio de los biolubricantes aún no es competitivo. No obstante, se espera que esta brecha se cierre a medida que aumente la producción de estos productos y avance la tecnología. En este contexto, se observa un panorama prometedor para los biolubricantes.

5.2.2 Análisis de biolubricantes a base de grasas animales

Tabla 4.*Propiedades claves de biolubricantes a base de grasas animales*

Tipo de Biolubricante derivados de	Ruta de Síntesis	Viscosidad Cinemática 40°C [mm ² /s]	Índice viscosidad	Punto de Fluidez [°C]	Índice de acidez [mg KOH/g]	Estabilidad oxidativa [min]	Clasificación ISO VG
Grasas de pollo(Prathiba et al., 2022)	Esterificación Aditivo: TiO ₂ 0.05% p/v	16.85	295.32	6	4.38	1080	15
Grasas de pollo (Roy et al., 2023a)	Hidrotratamiento	12.66	254	-20	3.8	NR	10
Grasa de pescado(Angulo et al., 2018)	Transesterificación enzimas (vacío)	23.16	211	6	NR	NR	22
Grasa de pollo (Moreno, 2016)	Aditivo:Etileno-acetato de vinilo 4% p/p	174.78	197.43	NR	1.2	82.8	150
Grasa de pollo (Rivera, 2018)	Transesterificación Alcalina	38.1	201	NR	1.52	NR	32
Grasa de sebo bovino(Camargo, 2022)	Transesterificación Inversa	12.74	196	19	0.08	NR	10
Grasa de vísceras de tilapia(Moreira et al., 2022)	Esterificación	53.7	182	NR	NR	NR	46
Grasa de mosca domestica(Wu et al., 2017)	Esterificación	7.93	182	< -15	0.01	17	10
Grasa de sebo bovino (Prasca, 2018)	Transesterificación Inversa	31.04	177	NR	0.51	NR	32
Grasa de tilapia(Camila et al., 2018)	Epoxidación	15.8	135	NR	NR	NR	15

El biolubricante de pollo presenta un índice de viscosidad de 295.32, lo que indica una estabilidad relativamente alta frente a cambios de temperatura (Prathiba et al., 2022). En contraste, el biolubricante de tilapia muestra un índice de viscosidad más bajo, lo que lo hace más susceptible a las variaciones de temperatura (Camila et al., 2018). Para mejorar esta propiedad en el biolubricante de tilapia, se pueden explorar métodos de purificación de la grasa o la adición de aditivos modificadores.

En cuanto al punto de fluidez, el biolubricante de pollo tiene un punto de fluidez de -20°C , lo que lo hace adecuado para aplicaciones en condiciones de frío extremo (Roy et al., 2023a). Por otro lado, el biolubricante a base de grasa de bovino muestra un punto de fluidez más alto, lo que puede afectar su capacidad para fluir a temperaturas bajas (Prasca, 2018). Para mejorar el punto de fluidez en este lubricante, se pueden utilizar aditivos depresores del punto de fluidez, como los copolímeros de etileno acetato de vinilo.

En cuanto al índice de acidez, el biolubricante de grasa de mosca doméstica muestra una mínima presencia de ácidos grasos libres, lo que indica una mayor calidad y resistencia a la degradación (Wu et al., 2017). Por el contrario, el biolubricante de grasa de pollo presenta un índice de acidez más alto, lo que puede afectar su rendimiento y protección al equipo. Para mejorar esta propiedad en el biolubricante de pollo, se pueden implementar estrategias de neutralización con bases o desacidificación (Prathiba et al., 2022).

Teniendo en cuenta el análisis previo de la estabilidad oxidativa en los aceites vegetales, se procederá a realizar el mismo análisis con los criterios allí establecidos. En este contexto, el biolubricante obtenido a base de grasa de mosca doméstica se destaca por su estabilidad oxidativa, con un índice de acidez de 0.01 mg KOH/g (Wu et al., 2017) Sin embargo, es crucial señalar que esta materia prima posee una disponibilidad limitada y

conlleva costos elevados, lo que la descarta como una opción prometedora. En contraste, el biolubricante a base de grasa de pollo exhibe una baja estabilidad, presentando un índice de acidez de 4.38 mg KOH/g (Prathiba et al., 2022).

Finalmente, en los análisis llevados a cabo utilizando la misma materia prima, resulta crucial determinar la ruta de síntesis más viable y las razones que sustentan esta conclusión. En el contexto de los biolubricantes derivados de la grasa de pollo, se destacan diversos métodos de síntesis, siendo el más eficaz aquel que emplea grasa de pollo con un 4% p/p de etileno acetato de vinilo como aditivo (Moreno, 2016). Este biolubricante presenta un índice de viscosidad satisfactorio y se destaca por su simplicidad del proceso, que únicamente requiere la adición de aditivos. En comparación con los biolubricantes obtenidos a partir de grasa de pollo que utilizan otras rutas de síntesis, como la Esterificación con TiO₂ al 0.05% p/v como aditivo, el Hidrotratamiento y la Transesterificación Alcalina (Prathiba et al., 2022).

En lo referente a los biolubricantes a base de grasa de pescado, disponemos de tres estudios, entre los cuales sobresale aquel que utiliza la ruta de síntesis mediante esterificación con alto índice de viscosidad de 182, a diferencia de otros estudios que emplean rutas de síntesis como la transesterificación enzimática al vacío (Angulo et al., 2018) y la epoxidación que requieren temperaturas superiores a los 95 °C (Camila et al., 2018).

En cuanto al biolubricante a base de grasa de bovino, contamos con dos estudios que utilizan la misma ruta de síntesis, la transesterificación inversa. En el primer estudio, se observa un índice de viscosidad más elevado de 196 (Camargo, 2022) en comparación con el segundo estudio, que es de 177 (Prasca, 2018). Además, es notable que en el primer estudio la temperatura máxima de producción es de 60°C.

5.2.2.1 Tendencias prometedoras para los Biolubricantes a base grasas animales

Para una evaluación objetiva, se considerarán exclusivamente los estudios que presenten una descripción completa de las propiedades, como se detalla en la tabla 4, y también se incluirán los costos de materias primas indicados en el apéndice E, siguiendo el procedimiento establecido previamente para los biolubricantes elaborados a partir de aceites vegetales.

En cuanto a las propiedades de los biolubricantes, se destaca la grasa de pollo tratada con esterificación y la adición de TiO_2 al 0.05% p/v como aditivo debido a su elevado índice de viscosidad registrado en 295.32 (Prathiba et al., 2022). Asimismo, el biolubricante de grasa de pollo producido mediante la ruta de síntesis de hidrotratamiento exhibe un punto de fluidez notable de -20°C (Roy et al., 2023a). En lo que respecta al índice de acidez, sobresale el estudio basado en la grasa de mosca doméstica, con un valor registrado de 0.01 [mg KOH/g] (Wu et al., 2017).

En relación con la producción anual de estas materias primas y sus costos, destacan la grasa de bovino y la grasa de pollo. Por otro lado, es relevante mencionar que entre las menos producidas y más costosas se encuentra la grasa de mosca doméstica.

En conclusión, una evaluación objetiva de los biolubricantes debe considerar tanto sus propiedades como sus costos de materias primas. La grasa de pollo tratada con esterificación y adición de TiO_2 al 0.05 % p/v como aditivo, y la grasa de bovino, sobresalen por su viabilidad en propiedades y costos de producción.

Tabla 5.*Comparación de propiedades de biolubricantes a base grasas animales y aceites minerales*

Tipo de Biolubricante derivados de	Clasificación ISO VG	Viscosidad Cinemática 40°C [mm²/s]	Índice de viscosidad [cSt]	Punto de Fluidez [°C]	Índice de acidez [mg KOH/g]
Grasas de pollo(Prathiba et al., 2022)	15	16.85	295.32	6	4.38
Mobil DTE 10 Excel 15 (Mobil, 2016)	15	15.8	168	-54	NR
Grasa de sebo bovino(Camargo, 2022)	10	12.74	196	19	0.08
Mobil Velocite Oil No. 6 (Mobil, 2016)	10	10	86	-15	NR

De acuerdo con los datos de la tabla 5, los biolubricantes derivados de grasa animal ofrecen una mayor resistencia al desgaste gracias a su elevada viscosidad. Es importante considerar que pueden tener en cuenta problemas de fluidez en condiciones frías por su alto punto de congelación. Por otro lado, los lubricantes minerales son más fluidos y tienden a funcionar de manera óptima en un rango más amplio de temperaturas, aunque proporcionan una protección anti-desgaste inferior.

En la mayoría de los casos, se recomienda el uso de biolubricantes a base de grasa animal, como el derivado de pollo, debido a su equilibrio entre protección y fluidez. Además, desde una perspectiva medioambiental, estos biolubricantes son más favorables, ya que son biodegradables y provienen de fuentes renovables. Sin embargo, la elección final del lubricante debe basarse siempre en las necesidades específicas de cada aplicación.

5.2.2.2 Análisis Comparativo de biolubricantes obtenidos a partir de aceites vegetales y grasas animales

Tabla 6.

Comparación de biolubricantes obtenidos a partir de aceites vegetales y grasas animales

Tipo de Biolubricante derivados de	Viscosidad Cinemática 40°C [mm²/s]	Índice de viscosidad [cSt]	Punto de Fluidez [°C]	Índice de acidez [mg KOH/g]
Aceite de jatropha (Abdul et al., 2019)	21.05	292	1.7	0.078
Aceite de palma (Chang et al., 2015)	44.3	219	-30	0.28
Grasas de pollo (Prathiba et al., 2022)	16.85	295.32	6	4.38
Grasa de sebo bovino (Camargo, 2022)	12.74	196	19	0.08

De acuerdo con los resultados de la tabla 6, los aceites vegetales son considerados más adecuados como biolubricantes en comparación con las grasas animales debido a sus destacadas propiedades. Los aceites vegetales, especialmente aquellos que contienen ácidos grasos monoinsaturados, ofrecen niveles máximos de estabilidad y un comportamiento aceptable a bajas temperaturas. Además, la presencia de antioxidantes naturales en los aceites vegetales mejora aún más sus propiedades como lubricantes (Garces, 2011).

Por otro lado, las grasas animales presentan una desventaja debido a su baja estabilidad a la oxidación. Esta baja estabilidad impide que las grasas animales puedan almacenarse por tiempo prolongado debido al cambio en sus propiedades. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la elección entre aceites vegetales y grasas animales como biolubricantes dependerá de las necesidades particulares de la aplicación.

5.2.3 Análisis de biolubricantes a base de aceites residuales

Tabla 7.

Comparación de Propiedades Claves del Biolubricante a base de aceites residuales

Tipo de Biolubricante derivados de	Ruta de Síntesis	Viscosidad Cinemática 40°C [mm ² /s]	Índice de viscosidad	Punto de Fluidez [°C]	Índice de acidez [mg KOH/g]	Estabilidad oxidativa [min]	Clasificación ISO VG
Aceite de cocina usado (Borugadda & Goud, 2014)	Epoxidación	35	217	-30	3	NR	32
Aceite de cocina usado (Fernández et al., 2022)	Destilación Molecular	36.37	210	NR	NR	NR	32
Aceite vegetal residual(Avellan & Alfos, 2005)	Transesterificación Catalítica	49.4	200	-6	2	17	46
Aceite de cocina usado(Joshi et al., 2023)	Hidrólisis	47.5	186	-12	NR	NR	46
Aceite de residuos de confitería (Ésteres de C. curvatus)(Papadaki et al., 2018)	Hidrólisis Enzimática	5.3	183	2	12.1	252	5
Aceite de residuos de la industria de confitería (hidrolizados de R. toruloides)(Papadaki et al., 2018)	Hidrólisis Enzimática	22.7	181.1	3	10.4	198	22
Aceite de cocina usado(León & Pinzón, 2020)	Transesterificación	40.74	207	NR	2.07	NR	46
Aceite de cocina usado(Zhang et al., 2020)	Hidrólisis Enzimática	67.51	149	61	0.55	21	68
Aceite de cocina usado(Sarno et al., 2019)	Esterificación	28.7	179.5	-8.3	1.2	NR	22
Aceite de cocina usado(Bashiri et al., 2021)	Epoxidación	11.91	135.12	30	NR	NR	10

El análisis de los datos de la tabla 7 revela una amplia diversidad de biolubricantes obtenidos a partir de aceites residuales, con propiedades fisicoquímicas variables. Sin embargo, la revisión, lectura y análisis de resultados de dichos estudios sugieren que estas investigaciones pueden no ser factibles debido a la falta de reproducibilidad inherente a los aceites residuales como bases en biolubricantes. La mezcla heterogénea de compuestos presentes en los aceites residuales, así como su variabilidad en composición y calidad, dificultan la capacidad de reproducir consistentemente las propiedades y características deseadas en los biolubricantes resultantes. Esta limitación presenta importantes desafíos en la formulación y fabricación de biolubricantes, lo que indica la necesidad de realizar más investigaciones para abordar estos problemas y desarrollar métodos de procesamiento y formulación más efectivos. Una posible solución sería aplicar un acondicionamiento del aceite para ajustar sus propiedades a estándares deseables desde su origen como materia prima, utilizando técnicas como catálisis ácida, neutralización, entre otros procedimientos.

5.4 Análisis de tendencias en la investigación

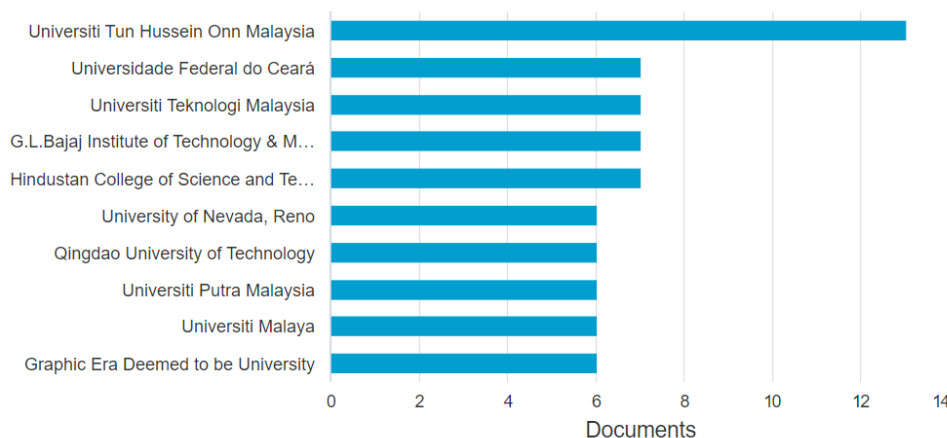
Mediante el uso de la herramienta VOSviewer, se llevó a cabo un análisis bibliométrico exhaustivo del campo para identificar las tendencias emergentes, incluyendo autores prominentes, países influyentes y universidades líderes. Este análisis permitió descubrir conexiones y patrones significativos que contribuyen a una comprensión más profunda del estado actual y las posibles direcciones futuras en este importante ámbito de estudio. Es relevante destacar que, en Colombia, específicamente en la Universidad Industrial de Santander, se han realizado investigaciones relevantes en este campo, algunas de las cuales también se han abordado en nuestra propia investigación. Sin embargo, en nuestro estudio,

La figura 6, se muestra el mapa de los países más influyentes en el análisis bibliométrico de las bases lubricantes provenientes de diversos tipos de biomasa muestra que China, Malasia e India son los países líderes en el desarrollo de la investigación sobre bases lubricantes provenientes de biomasa. Estos países cuentan con una sólida base científica y tecnológica en esta área.

5.3.3 Universidades a la Vanguardia

Figura 7.

Gráfico de universidades a la vanguardia



La figura 7, se presentan las universidades más influyentes, entre las cuales se destacan las tres siguientes: Universiti Tun Hussein Onn Malaysia, Universidade Federal do Ceará y Universidade Federal do Ceará.

Se llevó a cabo un análisis de las publicaciones de la universidad líder, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia. Esta universidad ha hecho publicaciones en varios periodos, excepto en 2015 y 2021. Este análisis revela que la universidad se mantiene actualizada en el tema, ya que presenta una alta frecuencia de publicaciones y ha participado en la investigación en el tiempo.

6. Conclusiones

La revisión de la literatura sobre bases lubricantes derivadas de diversas biomásas utilizando Web of Science (WoS) y Scopus resultó exitosa. Se encontraron estudios relevantes que cubrían una amplia gama de fuentes de biomasa. Estos estudios proporcionaron información detallada sobre propiedades fisicoquímicas, métodos de síntesis y condiciones óptimas para la producción de biolubricantes sostenibles.

Se consideró que los biolubricantes elaborados a partir de aceite de palma y de *Jatropha* destacan por sus propiedades, disponibilidad y costos de materias primas, es importante destacar que estos exhiben propiedades equiparables a las de los lubricantes minerales. En cuanto a los aceites residuales, se sugiere que este tipo de materias primas puede que no sean viables debido a su falta de reproducibilidad inherente como bases en biolubricantes.

La herramienta especializada VOSviewer nos ilustra la colaboración internacional entre investigadores de diversas naciones como China, Malasia e India, resaltando la globalización y la interconexión vital en este ámbito. Entre los autores sobresalientes en el tema se encuentran Zhang Yanbin, Masjuki Haji Hassan y Menezes Pradeep Lancy, y entre las universidades más influyentes se destacan la Universiti Tun Hussein Onn Malaysia y la Universidade Federal do Ceará.

7. Recomendaciones

Se recomienda continuar la investigación en este campo, explorando nuevas metodologías de producción de biolubricantes a partir de fuentes renovables y llevar a cabo un análisis exhaustivo sobre la viabilidad económica inherente a la producción de biolubricantes. Este análisis puede abarcar la evaluación minuciosa de los costos asociados a las materias primas, el proceso de producción. Además, sería pertinente comparar estos costos con aquellos relacionados a la producción de lubricantes convencionales.

Además, sería beneficioso aplicar un proceso de acondicionamiento a los aceites residuales, con el propósito de ajustar sus propiedades a estándares deseables. Esto podría lograrse mediante técnicas como la catálisis ácida, neutralización, entre otros procedimientos, asegurando así la reproducibilidad de los aceites residuales y garantizando su idoneidad para su uso como materias primas en la producción de biolubricantes.

Referencia

- Abd Wafti, N. S., Yunus, R., Lau, H. L. N., Choong, T. S. Y., & Abd-Aziz, S. (2022). *Enzymatic synthesis of palm oil-based trimethylolpropane ester as biolubricant base stock catalyzed by Lipozyme 435*. *Energy*, 260, 125061. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125061>
- Abdul, A. S., Rahim, E. A., Sharif, S., & Sasahara, H. (2019). *The influence of modified vegetable oils on tool failure mode and wear mechanisms when turning AISI 1045*. *Tribology International*, 129, 347–362. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.038>
- Ahmad, U., Raza Naqvi, S., Ali, I., Saleem, F., Taqi Mehran, M., Sikandar, U., & Juchelková, D. (2022). *Biolubricant production from castor oil using iron oxide nanoparticles as an additive: Experimental, modelling and tribological assessment*. *Fuel*, 324, 124565. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124565>
- Ahuja, R., Mula, S., & Joshi, P. (2021). *A bibliometric analysis of research on bio-based lubricants*. *Petroleum Science and Technology*, 39(1), 90–99.
- Alfonso, J., & González, G. (2013). *Obtención de biodiesel a partir de aceites usados en casa habitación de la comunidad del Refugio* [Tesis de Maestría, Centro de Investigación en Materiales Avanzados]. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/349/1/Tesis%20Juan%20Antonio%20Alfonso%20Alvarez.pdf>
- Alves, R. P., Souza, A., & Oliveira, E. B. (2019). *Esterificación enzimática de ácidos grasos para la producción de biolubricantes: un enfoque catalítico*. *Revista Internacional de Biotecnología*, 22(2), 1–10.
- Angulo, B., Fraile, J. M., Gil, L., & Herrerías, C. I. (2018). *Bio-lubricants production from fish oil residue by transesterification with trimethylolpropane*. *Journal of Cleaner Production*, 202, 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.260>
- Anjana, S., & Preeti, S. (2013). *Vegetable oils as lube basestocks: A review*. *African Journal of Biotechnolog*, 12(9), 880–891.
- Asociación Mundial del Petróleo (API). (2021). *Servicios para la industria*. World Lubricants Demand and Supply Report. <https://www.api.org/products-and-services/es/standards>
- Avellan, A.-V., & Alfós, C. (2005). *Valorisation non alimentaire des huiles de friture usagées en tant que lubrifiants biodégradables*. *Oléagineux, Corps Gras, Lipides*, 12(4), 290–294. <https://doi.org/10.1051/ocl.2005.0290>
- Basha, G. A., Harish, D., Saranya, R., Chandrasatheesh, C., & Jayapriya, J. (2024). *Biolubricants derived from poultry waste oil and its methyl esters by epoxidation and epoxide ring-opening—a comparative study*. *Biomass Conversion and Biorefinery*,

14(2), 2621–2628. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02771-z>

- Bashiri, S., Ghobadian, B., Dehghani Soufi, M., & Gorjian, S. (2021). *Chemical modification of sunflower waste cooking oil for biolubricant production through epoxidation reaction*. *Materials Science for Energy Technologies*, 4, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2021.03.001>
- Biswas, M., & Dey, S. (2020). *Esterificación de ácidos grasos para la producción de biolubricantes: un estudio de revisión*. *Revista Internacional de Investigación Ambiental y Ciencias de La Tierra*, 8(1), 57–66.
- Borugadda, V. B., & Goud, V. V. (2014). *Synthesis of Waste Cooking Oil Epoxide as a Bio-Lubricant Base Stock: Characterization and Optimization Study*. *Journal of Bioprocess Engineering and Biorefinery*, 3(1), 57–72. <https://doi.org/10.1166/jbeb.2014.1077>
- Camargo, C. (2022). *Obtención de una base biolubricante a partir de aceites transesterificados de las grasas* [Tesis de Maestría en Ingeniería Química]. Universidad Industrial De Santander.
- Camila, P., Rodrigues, J. S., Fechine, L. M. U. D., Cunha, A. P., Queiroz Malveira, J., Luna, F. M. T., & Ricardo, N. M. P. S. (2018). *Chemical modification of Tilapia oil for biolubricant applications*. *Journal of Cleaner Production*, 191, 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.062>
- Chang, T. S., Yunus, R., Rashid, U., Choong, T. S. Y., Awang Biak, D. R., & Syam, A. M. (2015). *Palm Oil Derived Trimethylolpropane Triesters Synthetic Lubricants and Usage in Industrial Metalworking Fluid*. *Journal of Oleo Science*, 64(2), 143–151. <https://doi.org/10.5650/jos.ess14162>
- Chavez, Z., & Eduardo, O. (2023). *Plan de negocios para producir y comercializar bases lubricantes obtenidas de aceites lubricantes usados* [Universidad ESAN]. https://repositorio.esan.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12640/3446/2023_MATP-TAL_20-1_02_TI.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Egbuna, S., Nwachukwu, U., Agu, C., Asadu, C., & Okolo, B. (2021). *Production of biolubricant samples from palm kernel oil using different chemical modification approaches*. *Engineering Reports*, 3(11). <https://doi.org/10.1002/eng2.12422>
- Encinar, J., Nogales, S., & Álvez, C. (2022). *High oleic safflower biolubricant through double transesterification with methanol and pentaerythritol: Production, characterization, and antioxidant addition*. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(5), 103796. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103796>
- Fernández, S., Delgado, M., Ruiz-Méndez, M. V., Giráldez, I., & García-Morales, M. (2022). *Potential valorization of waste cooking oils into sustainable bio-lubricants*. *Industrial Crops and Products*, 185, 115109.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115109>

- Ganesh, S., & Kumar, S. (2021). *Esterificación de ácidos grasos para la producción de biolubricantes*. *Revista Internacional de Ingeniería Química*, 15(1), 1–10.
- Garces, R. (2011). *Grasas y aceites*. *Sinc*, 21–28.
- García, A., Sánchez, A., Vázquez, B., & Pérez, F. (2018). *Cinética de la reacción de transesterificación para la producción de biodiesel a partir del aceite de *Jatropha curcas**. *Scielo*, 38(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852018000200007&script=sci_arttext
- Gil Lopez, L., Peñalosa, M., & Gordillo, L. (2014). *Mejora en el procedimiento de recolección del aceite usado para minimizar el impacto ambiental generado en area de lubricación de la empresa multiservicio automotor* [Tesis de Pregrado]. Escuela Colombiana de Carreras Industriales.
- He, C., Yan, Y., Li, S., Zhang, L., Zhao, X., Deng, Z., & Zhang, X. (2023). *Modification of cottonseed oil with lipases and ionic liquid catalysts to prepare highly branched lubricant with low pour point and high viscosity*. *Biochemical Engineering Journal*, 192, 108815. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.108815>
- Jamaluddin, N., Talib, N., & Abdul, A. (2020). *Tribological Analyses of Modified Jatropha Oil with hBN and Graphene Nanoparticles as An Alternative Lubricant for Machining Process*. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 76(2), 1–10. <https://doi.org/10.37934/arfmts.76.2.110>
- Jimenez, I., & Quintero, M. (2006). *Factibilidad Técnica de la Epoxidación Quimio-Enzimática de Aceite de Palma* [Tesis de Maestría, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/9203/u276488.pdf>
- Joshi, J. R., Bhandari, K. K., & Patel, J. V. (2023). *Waste cooking oil as a promising source for bio lubricants. A review*. *Journal of the Indian Chemical Society*, 100(1), 100820. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100820>
- Kamil, R. N. M., Yusup, S., & Rashid, U. (2011). *Optimization of polyol ester production by transesterification of Jatropha-based methyl ester with trimethylolpropane using Taguchi design of experiment*. *Fuel*, 90(6), 2343–2345. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.02.018>
- Kapucu, N., Gurkaya, K., & Bahar, K. (2022). *Enzymatic Synthesis of Trimethylolpropane-Bases Biolubricants from Waste Edible Oil Biodiesel Using Different Types of Biocatalysis*. *Chem Eng*, 41(9).
- León, G., & Pinzón, K. (2020). *Evaluación del proceso para la obtención de un biolubricante partiendo de residuos de aceites de cocina para una empresa dedicada al tratamiento de aceites usados*. Fundación Universidad de América.

- Madankar, C., Dalai, A. K., & Naik, S. (2013). *Green synthesis of biolubricant base stock from canola oil*. *Industrial Crops and Products*, 44, 139–144. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.11.012>
- Manzanarez, L. (2022). *Alternativas de recuperación para los aceites lubricantes usados*. *EPISTEMUS*, 16(32). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v16i32.222>
- Marques, E., Guimaraes, V., Ferreira, M., & Boloy, R. (2022). *Renewable energy in sustainable supplychain: A review*. Universidad de Antioquia.
- Metrohm, H. (2020). *Índice de acidez y ácidos grasos libres en aceites comestibles*. https://www.metrohm.com/es_es/applications/application-notes/aa-t-001-100/an-t-112.html
- Mobil. (2016). *Lubricantes Industriales Catálogo de Productos MobilTM*.
- Moreira, D. R., Ferreira, E. N., Neto, J., Bezerra, L. L., Monteiro, N., do Valle, C. P., Arruda, T. B. M. G., de Lima Neto, P., Rodrigues, J. S., Rodrigues, F. E. A., Petzhold, C. L., Maier, M. E., & Ricardo, N. M. P. S. (2022). *Green lubricants production from Nile tilapia waste and prediction of physical properties through molecular dynamics simulations*. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 99(4), 341–352. <https://doi.org/10.1002/aocs.12580>
- Moreno, M. (2016). *Utilización de grasa de pollo y productos derivados para su uso como biolubricante*. Instituto tecnológico de Tuxla
- Nogales, S., Encinar, J. M., & González, J. F. (2023). *A Review on Biolubricants Based on Vegetable Oils through Transesterification and the Role of Catalysts: Current Status and Future Trends*. *Catalysts*, 13(9), 1299. <https://doi.org/10.3390/catal13091299>
- Olivo, S. (2019). *Efecto de dos procesos de transesterificación del aceite de sachá inchi, sobre el método de cuantificación de los ésteres metílicos*. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/77496/1152443294.2019.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Opia, A. C., Abdollah, M. F. Bin, Mamah, S. C., Hamid, M. K. B. A., Syahrullail, S., Audu, I. A., Johnson, C., & Basiron, J. (2023). *Lubricity effectiveness of bio-lubricant modified with multi-wall carbon nanotube and organic polymer*. *Wear*, 528–529, 204974. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204974>
- Papadaki, A., Fernandes, K. V., Chatzifragkou, A., Aguiéiras, E. C. G., da Silva, J. A. C., Fernandez-Lafuente, R., Papanikolaou, S., Koutinas, A., & Freire, D. M. G. (2018). *Bioprocess development for biolubricant production using microbial oil derived via fermentation from confectionery industry wastes*. *Bioresource Technology*, 267, 311–318. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.016>

- Prasca, Y. (2018). *Estudio exploratorio de la obtención de biolubricantes a partir de biodiesel de sebo bovino*. Universidad Industrial De Santander.
- Prathiba, S., Vaishnavi, A., Saranya, R., Chandrasatheesh, C., & Jayapriya, J. (2022). *Synthesis of hydroxyl ether based biolubricant from poultry waste and to evaluate the friction performance with titania nanoparticles*. *Chemical Engineering Research and Design*, 185, 291–300. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.07.020>
- Qudah, M., Khateeb, A., & Abed, S. (2021). *Esterificación química de ácidos grasos para la producción de biolubricantes*. *Applied Sciences*, 11(13), 584.
- Reeves, C. J., Siddaiah, A., & Menezes, P. L. (2018). *Tribological study of imidazolium and phosphonium ionic liquid-based lubricants as additives in carboxylic acid-based natural oil: Advancements in environmentally friendly lubricants*. *Journal of Cleaner Production*, 176, 241–250. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.099>
- Repsol. (2024). *Bases lubricantes*. <https://www.repsol.com/es/productos-y-servicios/especialidades/productos/gama-aceites/bases-lubricantes/index.cshtml>
- Rivera, D. (2018). *Obtención de un biolubricante a partir de una grasa residual de la industria avícola*. Universidad Industrial de santander.
- Rojas, J., & Gomez, C. (2010). *Análisis bibliométrico de las publicaciones científicas mexicanas en la categoría de ingeniería química*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 9(3), 231–240.
- Roy, P., Rahman, T., Jackson, R. L., Jahromi, H., & Adhikari, S. (2023a). *Hydrocarbon biolubricants from hydrotreated renewable and waste derived liquid intermediates*. *Journal of Cleaner Production*, 409, 137120. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137120>
- Saboya, R. M. A., Cecilia, J. A., García-Sancho, C., Sales, A. V., de Luna, F. M. T., Rodríguez-Castellón, E., & Cavalcante, C. L. (2017). *Assessment of commercial resins in the biolubricants production from free fatty acids of castor oil*. *Catalysis Today*, 279, 274–285. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.02.020>
- Sarno, M., Iuliano, M., & Cirillo, C. (2019). *Optimized procedure for the preparation of an enzymatic nanocatalyst to produce a bio-lubricant from waste cooking oil*. *Chemical Engineering Journal*, 377, 120273. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.210>
- Scopus. (2024). *This author profile is generated by Scopus*.
- Singh, Y., Rahim, E. A., Singh, N. K., Sharma, A., Singla, A., & Palamanit, A. (2022). *Friction and wear characteristics of chemically modified mahua (madhuca indica) oil based lubricant with SiO₂ nanoparticles as additives*. *Wear*, 508–509, 204463. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204463>

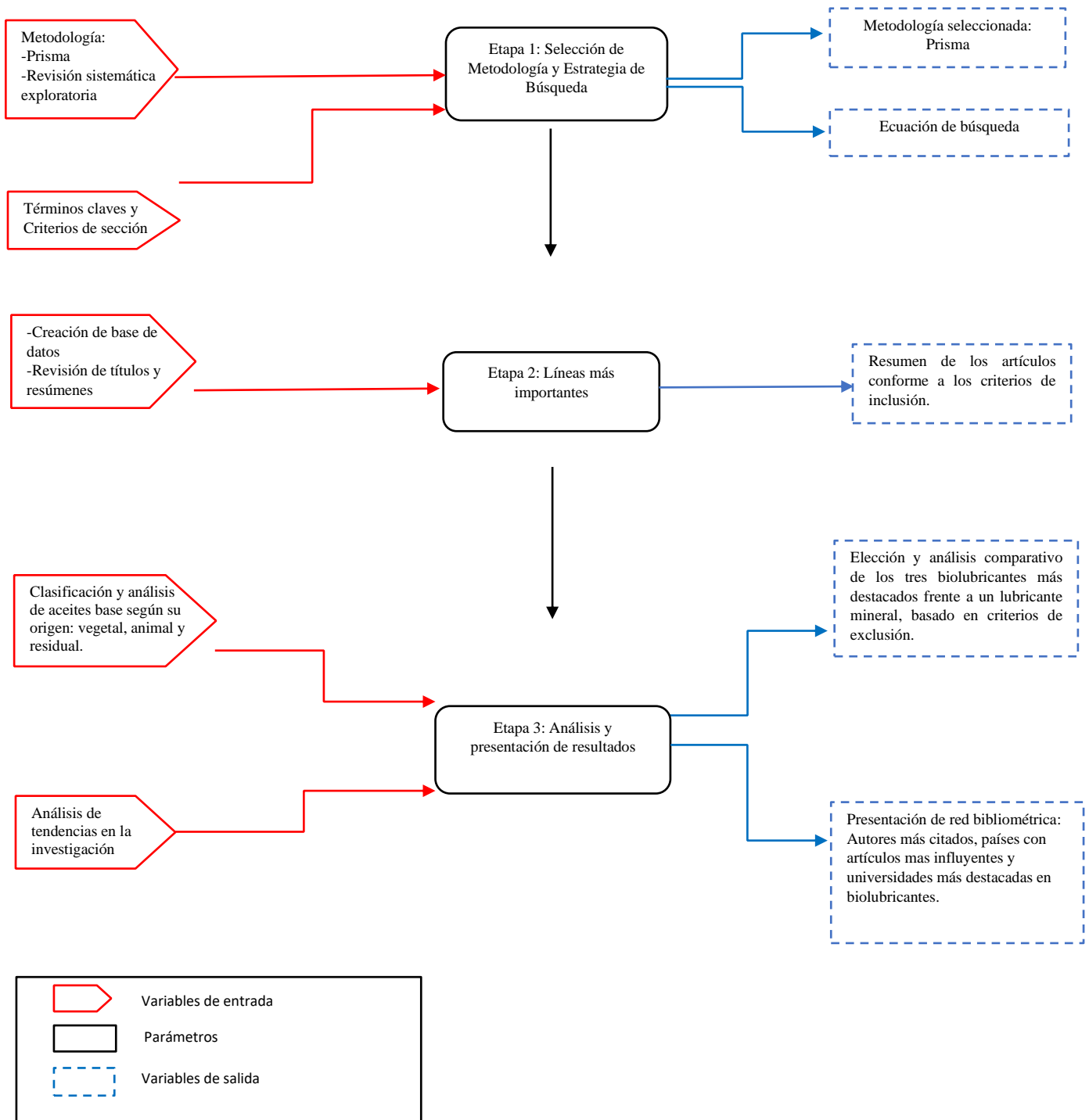
- Singh, Y., Sharma, A., Singh, N. K., & Chen, W.-H. (2020). *Development of bio-based lubricant from modified desert date oil (balanites aegyptiaca) with copper nanoparticles addition and their tribological analysis*. *Fuel*, 259, 116259. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116259>
- Singh, Y., Singh, N. K., Sharma, A., Lila, M. K., Singla, A., & Chinnasamy, V. (2021). *Brucea Javanica: A novel nonedible feedstock for bio-based lubricant application with the effect of ZrO nanoparticles*. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 40(4). <https://doi.org/10.1002/ep.13602>
- Syahir, A. Z., Zulkifli, N. W. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Alabdulkarem, A., Gulzar, M., Khuong, L. S., & Harith, M. H. (2017). *A review on bio-based lubricants and their applications*. *Journal of Cleaner Production*, 168, 997–1016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.106>
- Urrutia, G., & Bonfill, X. (2010). *Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis*. *El Sevier*, 135(11), 507–511. https://es.cochrane.org/sites/es.cochrane.org/files/uploads/PRISMA_Spanish.pdf
- Wiley, J., & Sons, L. (2014). *Lubricant Properties*. In *Lubricants*, 14–44. <https://doi.org/10.1002/9781118799734.ch2>
- Wu, S., Cai, Z., Niu, Y., Zheng, D., He, G., Wang, Y., & Yang, D. (2017). *A renewable lipid source for biolubricant feedstock oil from housefly (Musca domestica) larva*. *Renewable Energy*, 113, 546–553. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.094>
- Xu, Z., Lou, W., Zhao, G., Zhang, M., Hao, J., & Wang, X. (2019). *Pentaerythritol rosin ester as an environmentally friendly multifunctional additive in vegetable oil-based lubricant*. *Tribology International*, 135, 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.038>
- Zainal, N. A., Zulkifli, N. W. M., Gulzar, M., & Masjuki, H. H. (2018). *A review on the chemistry, production, and technological potential of bio-based lubricants*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 80–102. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.004>
- Zhang, W., Ji, H., Song, Y., Ma, S., Xiong, W., Chen, C., Chen, B., & Zhang, X. (2020). *Green preparation of branched biolubricant by chemically modifying waste cooking oil with lipase and ionic liquid*. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122918. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122918>

Apéndices

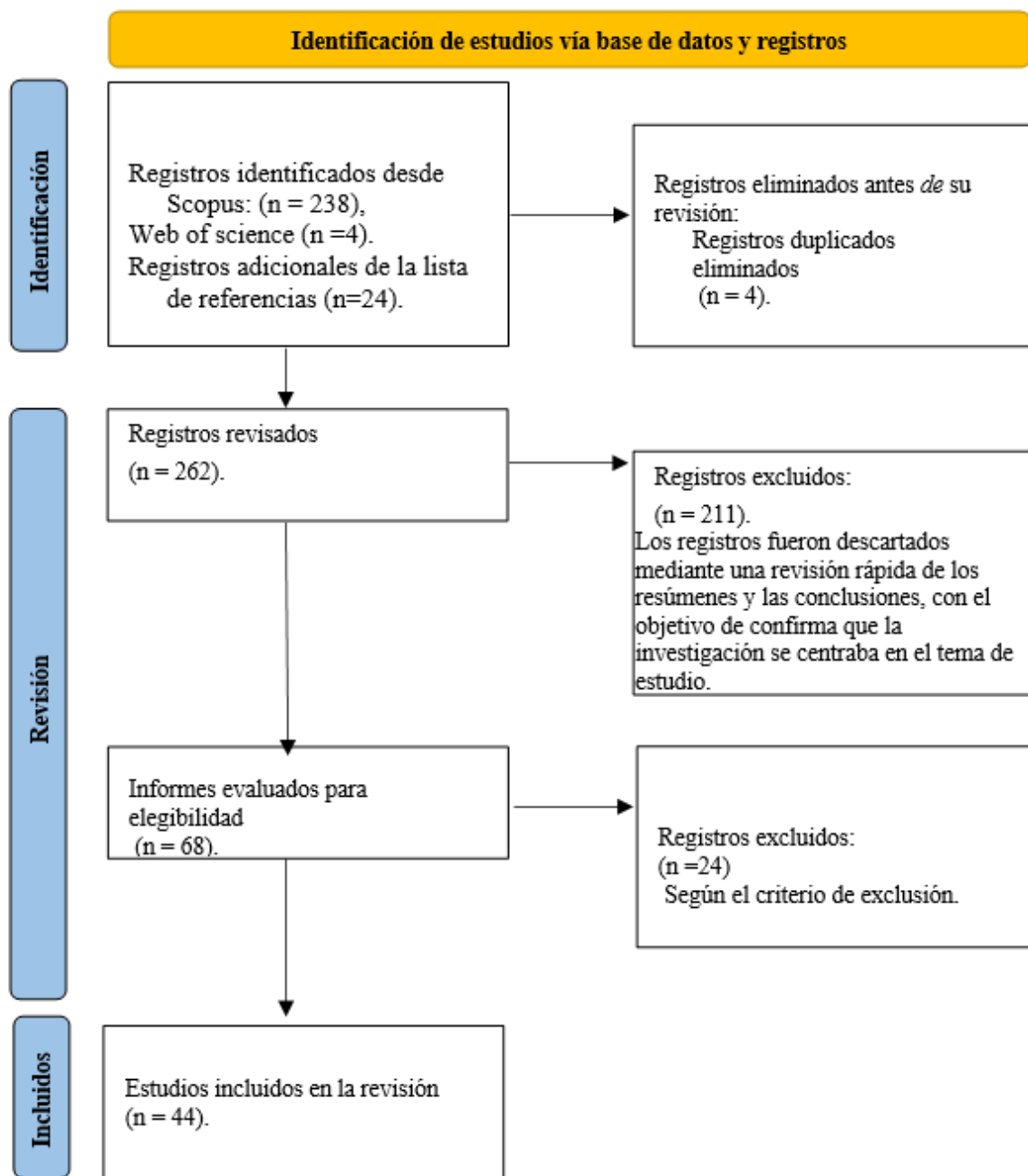
Apéndice A. Cuadro comparativo de las diferentes rutas

Aspecto	Transesterificación	Transesterificación Inversa	Epoxidación	Esterificación Química	Hidrólisis	Esterificación Enzimática
Proceso	Reacción entre un triglicérido y un alcohol, generalmente un alcohol de cadena corta, para producir ésteres de ácidos grasos y glicerol.	Reacción entre un éster y un alcohol para producir otro éster y otro alcohol.	Reacción en la que se añade un oxígeno a una doble unión en una molécula insaturada para formar un epóxido.	Reacción entre un ácido carboxílico y un alcohol para producir ésteres y agua.	Reacción en la cual un éster se divide en un ácido y un alcohol debido a la adición de agua y un catalizador, como un ácido o una base.	Reacción de esterificación catalizada por enzimas, generalmente lipasas.
Catalizador	Puede utilizar catalizadores ácidos, básicos o enzimáticos.	Utiliza típicamente un catalizador ácido o básico.	Utiliza un agente oxidante, como peróxidos o permanganatos.	Utiliza un catalizador ácido, como ácido sulfúrico o ácido clorhídrico.	Puede ser catalizada por ácidos (hidrólisis ácida) o bases (hidrólisis básica), o también puede ser enzimáticamente catalizada.	Utiliza enzimas, generalmente lipasas.
Productos	Produce ésteres de ácidos grasos y glicerol.	Produce otro éster y otro alcohol.	Produce un epóxido.	Produce ésteres y agua.	Produce un ácido carboxílico y un alcohol.	Produce ésteres y agua.

Apéndice B. Diagrama descripción de la metodología.



Apéndice C. Selección de la literatura recopilada



Apéndice D. Resúmenes de los Artículos Abordados en el Estudio**1. Aceites vegetales**

Aceite de Aguacate

(Reeves et al., 2018) En el marco de su investigación sobre el "Estudio tribológico de lubricantes a base de líquidos iónicos de imidazolio y fosfonio como aditivos en aceites naturales a base de ácido", el objetivo principal fue mejorar el rendimiento tribológico del aceite de aguacate mediante la adición de líquidos iónicos de imidazolio y fosfonio. En el transcurso de la investigación, se llevó a cabo la preparación de líquidos iónicos a base de metilimidazolio mediante reacciones de metátesis de aniones convencionales o síntesis de microondas. Posteriormente, se realizaron mezclas de diferentes proporciones de líquidos iónicos con aceite de aguacate (fluido base) para examinar su eficacia como aditivo. Los resultados arrojaron un lubricante con propiedades notables, incluyendo una viscosidad de 67.51 a 40 °C, un índice de viscosidad de 149, una disminución del coeficiente de fricción de hasta un 68.88%, y una reducción del volumen de desgaste en un 73.37%.

Aceite de ricino

ROBIS (Ahmad et al., 2022) en su investigación "Producción de biolubricantes a partir de aceite de ricino utilizando nanopartículas de óxido de hierro como aditivo: evaluación experimental, modelización y tribología", el objetivo es producir biolubricantes a partir de aceite de ricino utilizando nanopartículas de óxido de hierro como aditivo y evaluar su rendimiento tribológico. El proceso comenzó con la transesterificación del aceite crudo de semilla de ricino mediante la presencia de un catalizador de hidróxido de potasio (KOH al 1% p/v) a 60°C, generando ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) que se separaron del

glicerol. Luego, se introdujeron nanopartículas de óxido de hierro (Fe_3O_4) al 0,5% en el FAME resultante. Finalmente, se llevó a cabo una segunda transesterificación a 120°C con la adición de las nanopartículas de Fe_3O_4 al 0,5%. Los resultados mostraron que la incorporación que la adición de nanopartículas de óxido de hierro mejoró significativamente sus propiedades tribológicas, como la reducción de la fricción y el desgaste condujo a mejoras en las propiedades fisicoquímicas, destacándose con una viscosidad cinemática de 280 cSt y un índice de viscosidad de 159.

Aceite de jatropha

(Jamaluddin et al., 2020) en su investigación “Análisis tribológico de aceite de jatrofa modificado con hBN y nanopartículas de grafeno como lubricante alternativo para proceso de mecanizado” su objetivo es desarrollar una nueva formulación de nanofluidos en aceite de jatrofa modificado (MJO) agregando nitruro de boro hexagonal (hBN) y aditivos de nanopartículas de grafeno en la concentración más baja (0.01, 0.025. y 0.05 wt. %). El proceso se lleva a cabo mediante una transesterificación catalítica de dos pasos. En el primer paso, se convierte el aceite crudo en éster metílico de jatrofa mediante una reacción química con metanol y un catalizador ácido. Luego, en el segundo paso, el éster metílico de jatrofa se transforman en triéster de trimetilolpropano a través de una reacción con trimetilolpropano y metóxido de sodio (NaOCH_3) como catalizador. Finalmente, se mezcla con el aditivo de nitruro de boro hexagonal y nanopartículas de grafeno, en diversas concentraciones, para mejorar las propiedades térmicas y la estabilidad del lubricante. Los lubricantes varían según sus aditivos: el lubricante con 0.05% de nitruro de boro hexagonal tiene una viscosidad de 16 a 40°C y 7 a 100°C , con un índice de viscosidad de 270. Mientras que el lubricante con 0.05% de grafeno muestra una viscosidad de 17 a 40°C y 5.5 a 100°C , también con un índice de viscosidad de 270.

(Abdul et al., 2019) en su investigación La influencia de los aceites vegetales modificados en el modo de falla y el desgaste de las herramientas, el propósito principal fue evaluar cómo los aceites vegetales modificados afectan el modo de falla y el desgaste de las herramientas utilizadas en el mecanizado de acero. El procedimiento constó de dos fases distintas. En la primera fase, se midieron la fuerza de corte, la temperatura de corte y la rugosidad de la superficie. En la segunda fase, se analizó el modo o mecanismo de desgaste de la herramienta de corte, así como la progresión de la vida útil de dicha herramienta. Para llevar a cabo estas evaluaciones, se utilizó una barra de acero de medio carbono junto con diversas muestras de lubricante a base de jatrofa. La experimentación se realizó en una máquina de torno NC (Alpha Harrison 400). Los resultados obtenidos revelaron que los lubricantes a base de jatrofa tienen la capacidad de mejorar la calidad superficial del mecanizado. Asimismo, se observó una reducción en la fricción y el desgaste, acompañada de una disminución en el área de contacto aparente entre los materiales deslizantes, así como una baja en la temperatura de corte. De manera adicional, se identificó que una concentración del 5% de aceite de jatrofa en el lubricante MQL (MJO) resulta ser la más adecuada para mejorar la maquinabilidad del acero, se logró una viscosidad cinemática de 21.05 cSt a 6.41 cSt a 100°C, y un índice de viscosidad de 292.

Aceite de Algas

(Roy et al., 2023b) en el estudio titulado "Biolubricantes de hidrocarburos de intermedios líquidos renovables y de desechos hidrotratados", el objetivo del mejoramiento fue desarrollar biolubricantes mediante un proceso de hidrotratamiento. La mezcla se realizó sometiendo el aceite de algas a un proceso de hidrotratamiento a 400°C durante 5 horas, utilizando una relación de 70:1 en masa entre el aceite y el catalizador CoMo/Al. Los biolubricantes resultantes presentan características como una viscosidad de 2.14 cSt, un

índice de viscosidad de 243.4 y un coeficiente de fricción bajo. En conclusión, este estudio demuestra que es posible obtener biolubricantes de hidrocarburos ecológicos a partir de intermedios líquidos renovables y desechos hidrotratados.

Aceite de cártamo

(Encinar et al., 2022) el estudio de Biolubricante de cártamo alto oleico mediante doble transesterificación con metanol y pentaeritritol: producción, caracterización y adición de antioxidantes ". El objetivo la investigación fue obtener un biolubricante estable mediante una doble transesterificación con metanol y pentaeritritol a partir de aceite de cártamo alto oleico, y añadiendo antioxidantes para mantener los parámetros de calidad durante el almacenamiento. La mezcla se realizó en dos etapas de transesterificación, convirtiendo los aceites vegetales en ésteres metílicos o etílicos, y luego combinando estos ésteres con alcoholes de poliol y catalizadores. Las características del lubricante incluyen una viscosidad de 77.7 cSt a 40°C y 12.3 cSt a 100°C, y un índice de viscosidad de 155. En conclusión, se obtuvieron altos rendimientos de biolubricante, y se demostró que la adición de antioxidantes como la terc-butilhidroquinona mantuvo la estabilidad del biolubricante durante las condiciones de oxidación. Esta investigación muestra el potencial de la doble transesterificación en la producción de biolubricantes a partir de aceites vegetales.

Aceite de semilla de algodón

(He et al., 2023) en el estudio titulado Modificación del aceite de semilla de algodón con lipasas y catalizadores líquidos iónicos para preparar un lubricante altamente ramificado con bajo punto de fluidez y alta viscosidad. Cuyo objetivo fue modificar el aceite de semilla de algodón para convertirlo en un lubricante de base biológica con propiedades mejoradas. La mezcla se realizó en tres etapas: hidrólisis, esterificación y epoxidación. En la hidrólisis, se utilizó la lipasa *Candida sp.* 99-125 como catalizador para hidrolizar el aceite de semilla

de algodón. En la esterificación, se convirtió el ácido nonanoico y el isodecanol en ésteres isodeclicos ramificados de nonilo utilizando la lipasa Novozym 435 y un líquido iónico como catalizadores. En la etapa de epoxidación, se utilizó peróxido de hidrógeno y ácido acético glacial para epoxidar los ésteres isodeclicos ramificados de nonilo. El lubricante resultante tiene propiedades destacadas de fluidez y viscosidad a diferentes temperaturas, con una viscosidad cinemática de 200.3 cSt a 40°C, 23 cSt a 100°C e índice de viscosidad de 141. En conclusión, este lubricante de base biológica tiene el potencial de reemplazar los lubricantes minerales, y el método de síntesis proporciona una referencia para la producción de lubricantes similares.

Aceite de mahua

(Singh et al., 2022) En el estudio titulado Características de fricción y desgaste del lubricante a base de aceite de mahua (madhuca indica) modificado químicamente con nanopartículas de SiO₂ como aditivos, el objetivo principal fue mejorar la calidad de los ácidos grasos insaturados en el aceite de mahua mediante el proceso químico de epoxidación. La mezcla se llevó a cabo adicionando nanopartículas de SiO₂, lo que resultó en un aumento del punto de inflamación del aceite, aunque con una reducción en su punto de congelación. La adición de un 0.8% en peso de SiO₂ mostró una notable disminución en la fricción y el desgaste, destacando la eficacia de estas nanopartículas como aditivos lubricantes. El lubricante resultante exhibió una viscosidad de 87.03 cSt a 40°C, 11.03 cSt a 100°C, junto con un índice de viscosidad de 115. Se observó una distribución más uniforme del SiO₂ en el aceite epoxidado, contribuyendo a una mejora general en sus propiedades. En conclusión, este estudio respalda la eficacia de la modificación química con nanopartículas de SiO₂ para mejorar las características de fricción y desgaste del lubricante a base de aceite de mahua.

Aceite de Colza

(Opia et al., 2023) En el artículo titulado Efectividad de la lubricidad del biolubricante modificado con nanotubos de carbono de paredes múltiples y polímero orgánico, se buscó mejorar la eficacia lubricante mediante un proceso de dos pasos. El objetivo del mejoramiento se alcanzó mediante la aplicación de irradiación ultrasónica en suspensiones con diferentes concentraciones de nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT) y nano aditivos de polímeros orgánicos EC-CMC. Esta etapa de ultrasonido, realizada durante una hora, garantizó una mezcla uniforme sin afectar la estructura debido a la cavitación. La neutralización del aumento de temperatura resultante se llevó a cabo mediante un baño termostático. Posteriormente, se evaluó la viscosidad de los nanolubricantes en un rango de temperaturas entre 40 y 100°C utilizando un reómetro rotacional. Estos resultados fueron comparados con la viscosidad de un lubricante comercial (SAE 5W-30), dicho biolubricante presentó una viscosidad de 54.0 cSt a 40°C y 10.1 cSt a 100°C y un índice de viscosidad de 178, alineándose con el comportamiento típico de los lubricantes sintéticos. En conclusión, este estudio demuestra la efectividad del biolubricante modificado con nanotubos de carbono y polímero orgánico, destacando su potencial para mejorar la lubricidad en comparación con lubricantes convencionales.

(Xu et al., 2019) En la investigación llamada, Éster de colofonia de pentaeritritol como multifuncional respetuoso con el medio ambiente aditivo en lubricante a base de aceite vegetal, se empleó como aditivo el éster de colofonia de pentaeritritol, obtenido mediante la reacción de esterificación entre el ácido abiético y el pentaeritritol. El objetivo del mejoramiento fue lograr una mejora significativa en la estabilidad térmica y la resistencia a la oxidación en comparación con el aceite de colza puro. La mezcla se realizó mediante la incorporación de este aditivo, cuyo efecto se tradujo en notables características del lubricante.

Los datos de viscosidad revelaron un aumento significativo, alcanzando viscosidades de 36,13 cSt a 40°C y 8,12 cSt a 100°C, junto con un índice de viscosidad de 209. En conclusión, este estudio demuestra la efectividad del éster de colofonia de pentaeritritol como aditivo multifuncional respetuoso con el medio ambiente, mejorando las propiedades térmicas y de viscosidad del lubricante a base de aceite vegetal.

Aceite de Brucea javanica

(Singh et al., 2021) En el documento titulado Brucea Javanica: una nueva materia prima no comestible para la aplicación de lubricantes de base biológica con el efecto de nanopartículas de ZrO₂, se llevó a cabo la epoxidación del aceite de Brucea Javanica con el objetivo de mejorar sus propiedades para su aplicación como biolubricante. La epoxidación se realizó utilizando peróxido de hidrógeno y ácido acético glacial como catalizadores a una temperatura de 60°C durante 6 horas. Esta modificación química resultó en un aceite epoxidado con características fisicoquímicas mejoradas en comparación con el aceite sin tratar. El aceite epoxidado exhibió una densidad de 0,92 g/cm³, una viscosidad cinemática de 22,5 cSt a 40°C y un índice de viscosidad de 225. Estas propiedades superiores indican la efectividad del aceite epoxidado como biolubricante, lo cual se ve respaldado por el potencial de aplicación en situaciones de lubricación mejorada. En conclusión, este estudio sugiere que la Brucea Javanica y su aceite epoxidado son materias primas prometedoras para la producción de lubricantes de base biológica, especialmente cuando se incorporan nanopartículas de ZrO₂.

Aceite Dátil del desierto

(Singh et al., 2020) En el marco de este estudio titulado "Desarrollo de un Lubricante de Base Biológica a partir de Aceite de Dátil del Desierto Modificado (Balanites aegyptiaca) con Adición de Nanopartículas de Cobre y su Análisis Tribológico", se llevó a cabo la síntesis

de un lubricante de base biológica utilizando como base el aceite de dáttil del desierto. El proceso de transesterificación de dos pasos comprendió la mezcla inicial del aceite con metanol y ácido sulfúrico, seguido por la combinación del éster metílico resultante con trimetilolpropano y metóxido de sodio. La incorporación de nanopartículas de cobre en concentraciones variables reveló mejoras tribológicas significativas, con un rendimiento superior a los lubricantes convencionales. Estas mejoras se reflejaron no solo en la eficacia de la película lubricante límite, sino también en propiedades fisicoquímicas mejoradas. El biolubricante resultante, enriquecido con nanopartículas de cobre hasta un 0,9% en peso, mostró una viscosidad cinemática de 22,5 cSt a 40°C y un índice de viscosidad de 225. Estos datos respaldan su eficacia como alternativa respetuosa con el medio ambiente al aceite mineral, con beneficios evidentes en términos de reducción del coeficiente de fricción y características tribológicas mejoradas.

Aceite de semilla de palmiste

(Egbuna et al., 2021) En el marco de este estudio titulado Producción de Muestras de Biolubricantes a partir de Aceite de Palmiste utilizando Diferentes Enfoques de Modificación Química, se llevó a cabo una exhaustiva síntesis química y caracterización del aceite de palmiste con el objetivo de producir biolubricantes mediante la transesterificación del éster metílico de palmiste con trimetilolpropano y métodos de epoxidación-esterificación. La extracción del aceite de palmiste se realizó mediante el método de extracción con disolventes, y las características fisicoquímicas de las muestras de aceite de palmiste y del biolubricante producido se determinaron mediante métodos estándar. Utilizando análisis de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier y cromatografía de gases, se identificaron los grupos funcionales predominantes y los ácidos grasos en el aceite de palmiste y las muestras de biolubricante, respectivamente. Con rendimientos destacados del 49,82% de aceite de pepita

a 55°C durante 150 minutos y un tamaño de partícula de 0,5 mm, los biolubricantes resultantes, denominados PKBLT y PKBLE, exhibieron propiedades físicas y químicas conformes a la norma ISO VG 32. Estos biolubricantes, producidos mediante enfoques de transesterificación y epoxidación-esterificación, mostraron características prometedoras, como viscosidades de 42.53 cSt y 44.69 cSt a 40°C, índices de viscosidad de 139. El estudio también resalta la influencia significativa del tiempo, la relación molar y la temperatura en los procesos de transesterificación y epoxidación, concluyendo que las muestras de PKBLE y PKBLT poseen el potencial de ser aplicadas como bases de biolubricantes, respaldando la sostenibilidad y viabilidad ambiental de estos productos.

2. Aceites animales

Grasas de vísceras de tilapia

(Moreira et al., 2022) En la primera etapa, se produce la esterificación del aceite de tilapia con trimetilolpropano (TMP) o pentaeritritol (PE) en presencia de un catalizador de ácido sulfúrico. Esta reacción se lleva a cabo a una temperatura de 150 °C durante 4 horas. En la segunda etapa, se produce la transesterificación de los ésteres obtenidos en la primera etapa con metanol en presencia de un catalizador de ácido sulfúrico. Esta reacción se lleva a cabo a una temperatura de 60 °C durante 2 horas. La composición del aceite de tilapia es notable por su abundancia de ácidos grasos saturados, lo que conduce a la obtención de productos con viscosidades elevadas, que oscilan entre 53.70 y 131.60 a 40°C, y de 10.23 a 18.03 a 100°C. Esto se refleja en índices de viscosidad de 182 a 153, respectivamente. Asimismo, la presencia de una fracción insaturada rica en ácido oleico y linoleico confiere

al aceite de tilapia del Nilo un gran potencial como materia prima en la producción de biolubricantes.

Grasas de tilapia

(Camila et al., 2018) El artículo titulado "Modificación química del aceite de tilapia para aplicaciones biolubricantes" se propuso investigar la viabilidad de emplear el aceite de tilapia como materia prima en la producción de lubricantes biodegradables y evaluar su rendimiento en comparación con los lubricantes convencionales. El proceso de producción de los lubricantes biodegradables comprendió tres etapas consecutivas: transesterificación, epoxidación y reacción de apertura de anillo. En la transesterificación, se empleó KOH como catalizador para convertir el aceite de tilapia en ésteres metílicos. Posteriormente, se llevó a cabo la epoxidación de los ésteres metílicos utilizando ácido fórmico y peróxido de hidrógeno. Finalmente, se realizó la reacción de apertura de anillo para obtener ésteres metílicos epoxidados ramificados. Los ésteres metílicos epoxidado obtenidos fueron caracterizados mediante técnicas de espectroscopia (FT IR, RMN H y 13C) y se evaluaron sus propiedades fisicoquímicas, incluyendo la estabilidad térmica y la biodegradabilidad. Los resultados revelaron la obtención de ésteres metílicos epoxidado ramificados a partir del aceite de tilapia, con un rendimiento del 94,0%. Estos ésteres metílicos epoxidado exhibieron una destacada estabilidad térmica y alta biodegradabilidad, convirtiéndolos en lubricantes biodegradables aptos para aplicaciones específicas. Entre las propiedades, el biolubricante demostró una viscosidad de 10.9 cSt a 40°C, con un índice de viscosidad superior a 117. Las conclusiones más relevantes destacaron la viabilidad del aceite de tilapia como materia prima para la producción de lubricantes biodegradables, presentando una alternativa más sostenible

y amigable con el medio ambiente en comparación con los lubricantes convencionales. Además, la síntesis eficiente y rentable de los EME ramificados a partir del aceite de tilapia subraya el potencial de este proceso en aplicaciones medioambientales y sostenibles.

Grasas de pescado

(Angulo et al., 2018) En el estudio titulado "Producción de biolubricantes a partir de residuos de aceite de pescado mediante transesterificación con trimetilolpropano" se busca explorar la valorización de los residuos de aceite de pescado con el objetivo de obtener biocombustibles y bioproductos específicos de alta calidad. La síntesis de biolubricantes implica la transesterificación de los residuos de aceite de pescado con trimetilolpropano (TMP), utilizando etóxido de sodio como catalizador. La reacción se lleva a cabo a temperaturas entre 100-140°C bajo vacío, generando mezclas de mono, di y triésteres de TMP con una mejora en la estabilidad en comparación con los triglicéridos análogos. Los resultados indican que la transesterificación con TMP es un método eficaz, logrando una conversión de ésteres etílicos de ácidos grasos (FAEE) a triésteres de TMP del 84%, con una selectividad del 96%. Estos biolubricantes presentan viscosidades cinemáticas de 23.16 a 40°C y 5.81 a 100°C, con un índice de viscosidad de 211.

Grasas de pollo

(Roy et al., 2023) En la investigación llamada Biolubricantes de hidrocarburos a partir de productos intermedios líquidos renovables y derivados de residuos hidrotratados, se llevaron a cabo la fabricación y mejora de biolubricantes mediante un proceso de hidrotratamiento. Este proceso se ejecutó en un reactor de mesa Parr 4598 de 100 ml, utilizando grasas de pollo como materia prima. El hidrotratamiento se realizó a 400°C durante 5 horas, con una relación de 70:1 en masa entre la materia prima y el catalizador

(equivalente a 35 g de aceite y 0,5 g de catalizador). Los biolubricantes resultantes exhibieron una viscosidad de 4.01 cSt y un índice de viscosidad de 254, confirmando su idoneidad para aplicaciones en mezclas de biolubricantes con un amplio potencial de aplicación. En resumen, este estudio demuestra la viabilidad y eficacia del proceso de hidrotreamiento para la producción de biolubricantes a partir de productos intermedios líquidos renovables, destacando sus propiedades mejoradas para diversas aplicaciones lubricantes.

(Moreno, 2016) En el estudio titulado “Utilización de grasa de pollo y productos derivados para su uso como biolubricante”, La investigación se centra en la creación de biolubricantes a partir de grasa de pollo y sus derivados, empleando aditivos para cumplir con estándares de calidad. Se utilizó EVA y SBS como aditivos para aumentar la viscosidad, y el antioxidante BHT para mejorar la estabilidad oxidativa. Los resultados destacan el éxito en la formulación de biolubricantes, logrando un índice de viscosidad de 197.43 y estabilidad oxidativa. EVA se destaca como un eficaz mejorador de viscosidad, mientras que la adición de BHT prolonga la vida útil, evitando la oxidación temprana. Se subraya la importancia de mantener una temperatura constante de 120 °C y se desaconseja el uso de SBS con grasa de pollo debido a su nula solubilidad en dicho componente.

(Prathiba et al., 2022) En este estudio, titulado Síntesis de biolubricante a base de éter hidroxilo a partir de desechos de aves y evaluación del comportamiento de fricción con nanopartículas de titania, se desarrollaron biolubricantes mediante un proceso de dos etapas utilizando grasa de pollo. En la primera etapa, los triglicéridos de la grasa se convirtieron en ésteres metílicos de ácidos grasos mediante transesterificación con metanol y un catalizador ácido, a una temperatura de 50°C, con una relación molar de 1:12 de metanol a grasa de pollo y un 1% de catalizador. En la segunda etapa, estos ésteres metílicos fueron sometidos a epoxidación a 50°C durante 2 horas y reacciones de apertura de anillo para obtener éteres

hidroxilo, es decir, biolubricantes. La mejora en el rendimiento tribológico se logró mediante la adición de nanopartículas de titanio (0,05% p/v), reduciendo el coeficiente de fricción en un 25% y aumentando la viscosidad en 1,1 veces. Las características notables del biolubricante incluyen una viscosidad cinemática de 16,85 cSt a 40°C, 5,35 cSt a 100°C, un alto índice de viscosidad de 295,32, y una destacada estabilidad oxidativa y térmica. En resumen, este estudio demuestra la viabilidad de aprovechar desechos de aves para producir biolubricantes mejorados, ofreciendo una perspectiva sostenible y eficaz para la optimización de las propiedades lubricantes.

(Basha et al., 2024) Del estudio comparativo titulado "Biolubricantes derivados de aceite de desecho de aves y sus ésteres metílicos mediante epoxidación y apertura de anillo de epóxido" tenía como objetivo principal la formulación de un biolubricante a partir de aceite de desecho de pollo y sus ésteres metílicos. El proceso incluyó la extracción de aceite de pollo, la epoxidación con ácido peracético formado in situ, la transesterificación directa para la conversión de triglicéridos en biodiesel, y la medición de la viscosidad de los biolubricantes para evaluar su idoneidad en diversas aplicaciones. Los resultados revelaron un biolubricante con viscosidades cinemáticas específicas a 40 °C y 100 °C, junto con valores de acidez que subrayaron la necesidad de lubricantes con menor acidez para aplicaciones antifricción y antidesgaste. Este biolubricante exhibió una viscosidad de 29.50 cSt a 40°C, un índice de viscosidad de 111.32 y un punto de fluidez de -2°C. En conclusión, se enfatiza la importancia de reconsiderar la ruta biológica para la epoxidación de aceites, con el fin de evitar el aumento en el valor ácido del biolubricante, y se destaca la relevancia de evaluar las propiedades a baja temperatura para determinar su idoneidad en diversas aplicaciones. Este estudio proporciona información valiosa para el desarrollo y perfeccionamiento de biolubricantes derivados de aceites de desecho de aves.

(Rivera, 2018) En el estudio titulado "Obtención de un biolubricante a partir de una grasa residual de la industria avícola", el objetivo fue obtener un biolubricante utilizando trimetilolpropano (TMP) y neopentilglicol (NPG) como polioles a partir de la grasa residual de la industria avícola. La síntesis del biolubricante se realizó mediante un proceso de transesterificación inversa (RTI). Se llevó a cabo un pretratamiento de la grasa residual avícola, primero con una esterificación ácida y luego con una transesterificación alcalina para producir un biodiesel de bajo índice de acidez. Posteriormente, este biodiesel reaccionó con trimetilolpropano para obtener el biolubricante. Los resultados indican que es posible obtener biolubricantes a partir de la grasa residual avícola mediante el proceso de RTI. Se encontró que el TMP fue el polioliol óptimo, mostrando valores más altos en viscosidad a 40°C (38.1 cSt) y a 100°C (8.27 cSt), así como un índice de viscosidad de 201, siendo más resistente a la degradación térmica según el análisis termogravimétrico (TGA) en comparación con el NPG.

Grasa de Sebo de Bovino

(Camargo, 2022) La tesis "Obtención de una base biolubricante a partir de aceites transesterificados de las grasas animales (sebos) provenientes de la industria bovina" tiene como objetivo principal el desarrollo de una base biolubricante utilizando aceites transesterificados de grasas animales provenientes de la industria bovina. El proceso abarca la adquisición de materia prima de un proveedor regional, el acondicionamiento del aceite de sebo bovino, la producción de biodiésel a partir de este aceite y la obtención de bases biolubricantes a partir del biodiésel obtenido. Los resultados destacan la exitosa obtención de la base biolubricante a partir de los aceites transesterificados de las grasas animales. Las conclusiones resaltan el logro significativo de desarrollar esta base biolubricante, subrayando el análisis detallado de sus propiedades físicas y químicas en comparación con lubricantes

comerciales. Entre las propiedades mencionadas, el biolubricante exhibió una viscosidad de 29.50 cSt a 40°C, un índice de viscosidad de 196 y un punto de fluidez de 19°C. Estos detalles resumen de manera concisa el enfoque, el proceso y los resultados clave de la investigación sobre la obtención de una base biolubricante a partir de aceites transesterificados de grasas animales.

(Prasca, 2018) En esta investigación exploratoria sobre la obtención de biolubricantes a partir de biodiesel de sebo bovino, se busca producir un biolubricante a partir de este subproducto de la industria ganadera y evaluar sus propiedades fisicoquímicas. El proceso se divide en tres etapas: esterificación, utilizando metanol con un 1.75% p/p de catalizador (H₂SO₄) a 60°C durante 150 minutos; transesterificación, con sebo esterificado y un 0.75% de catalizador (KOH) a 60°C durante 120 minutos para obtener biodiesel; y síntesis del biolubricante, con una relación molar de 4:1 de biodiesel:TMP y un 0.51% de catalizador (CH₃NaO), llevada a cabo a 120°C y 50 mbar durante 180 minutos. Los resultados indican que el biolubricante cumple con los requisitos de viscosidad establecidos por la norma ISO VG 32, con valores de 31.04 cSt a 40°C y 8.99 cSt a 100°C. Además, se obtuvo un índice de viscosidad de 177, indicando una estabilidad relativamente constante de la viscosidad ante cambios de temperatura.

Grasa de mosca domestica

(Wu et al., 2017) El estudio titulado "Una Fuente Renovable de Lípidos para el Aceite como Materia Prima de Biolubricantes Provenientes de Mosca Doméstica" tiene como objetivo desarrollar un eficiente método para la producción de ésteres de ácidos grasos 2-etilhexilo (ésteres 2 EH) de alta pureza a partir de lípidos crudos de larvas de mosca doméstica. El proceso implica la extracción de lípidos de larvas alimentadas con desechos de cocina, seguida de la purificación de los ácidos grasos libres mediante destilación molecular.

Posteriormente, se realiza una esterificación catalizada por ácido bencenosulfónico, utilizando 2-etilhexanol (2 EHOH). La eliminación del exceso de 2 EHOH se lleva a cabo mediante destilación molecular y refinación alcalina. Los resultados indican un éxito del método, con una tasa de esterificación del 98.6% utilizando BSA como catalizador, y los ésteres 2 EH resultantes muestran una pureza superior al 99.7%, así como propiedades destacadas de lubricidad, bajo punto de fluidez ($<15^{\circ}\text{C}$) y alto índice de viscosidad 182, junto con estabilidad a diversas temperaturas y resistencia a la corrosión y oxidación

3. Aceites residuales

Aceite de cocina Usado

(Zhang et al., 2020) Se emplea aceite de cocina reciclado obtenido de desechos de cocina o la industria alimentaria como materia prima. El proceso comprende tres fases: hidrólisis enzimática, esterificación y epoxidación. La hidrólisis enzimática convierte el aceite en ácidos grasos insaturados, mediante una reacción de 72 horas a 35°C y 350 rpm. La esterificación utiliza una lipasa como catalizador a 350 rpm y 50°C durante 12 horas. La epoxidación mejora el rendimiento a bajas temperaturas en una etapa de 500 rpm y 150°C durante 24 horas. Esto resulta en un biolubricante altamente eficiente, específico, reciclable y superior a los lubricantes tradicionales, con una viscosidad de 67.51 cSt a 40°C y un índice de viscosidad de 149. El uso de aceite de cocina reciclado es más económico que los aceites animales y vegetales en un factor de 2-3.

(Sarno et al., 2019) en su investigación “Procedimiento optimizado para la preparación de un nano catalizador enzimático para producir un biolubricante a partir de

aceite de cocina usado”, el objetivo es desarrollar un biolubricante ecoamigable a partir de aceite de cocina usado mediante el uso de un nano catalizador enzimático. El proceso implica la preparación de nanopartículas de óxido de hierro, su mezcla con etilenglicol y sonicación, seguido de la adición de ácido cítrico para mejorar la inmovilización de la lipasa. La hidrólisis ácida del aceite de cocina usado produce ácidos grasos libres (FFA), que se combinan con alcoholes en presencia del nanocatalizador, resultando en la producción del biolubricante. Los resultados mostraron una eficiente inmovilización de la lipasa, con propiedades similares a los lubricantes comerciales convencionales: viscosidad de 68,5 cSt a 40°C, 10,5 cSt a 100°C e índice de viscosidad de 141.

(Joshi et al., 2023)En el estudio titulado "Aceite de cocina usado como fuente prometedora de biolubricantes: revisión", se busca analizar las propiedades físicas y tribológicas de los biolubricantes derivados de aceite de cocina usado, comparándolos con los lubricantes convencionales. La síntesis de estos biolubricantes implica varias etapas. Inicialmente, el aceite usado se somete a purificación mediante filtración y tratamiento químico para eliminar impurezas y residuos. Posteriormente, se realiza la transesterificación, en la que el aceite purificado reacciona con un alcohol y un catalizador para producir ésteres metílicos o etílicos, los componentes esenciales de los biolubricantes. Estas etapas culminan en la obtención de biolubricantes con propiedades mejoradas para diversas aplicaciones. Los resultados revelaron que los biolubricantes obtenidos a partir de aceite de cocina usado exhiben propiedades físicas y tribológicas prometedoras, como alta biodegradabilidad, lubricidad significativa y elevados puntos de inflamación, destacándolos como adecuados para distintas aplicaciones de lubricación, con un índice de viscosidad de 186.

(Fernández et al., 2022)El artículo titulado "Síntesis de epóxido de aceite de cocina usado como base de biolubricante: Estudio de Caracterización y Optimización" tuvo como

objetivo investigar la síntesis de epóxido a partir de aceite de cocina usado con el propósito de utilizarlo como base para biolubricantes, centrándose en la optimización de las condiciones de reacción para mejorar las propiedades fisicoquímicas del producto final. Durante el proceso de epoxidación, se exploraron las condiciones óptimas, como la relación molar de peróxido de hidrógeno, la carga de catalizador, la temperatura y la relación molar de insaturación etilénica. La aplicación de un diseño experimental permitió evaluar y optimizar estas variables, empleando análisis de regresión múltiple y ANOVA para modelar y evaluar su influencia en la síntesis. Los resultados revelaron la obtención de un epóxido de aceite de cocina usado con propiedades fisicoquímicas mejoradas en comparación con el aceite no tratado, destacando condiciones óptimas que maximizaban el contenido de oxígeno del oxirano, indicando su potencial uso como base de biolubricante. El biolubricante resultante exhibió un índice de viscosidad de 217. En conclusión, el estudio demostró la prometedora viabilidad de la síntesis de epóxido de aceite de cocina usado para la producción de biolubricantes con propiedades mejoradas, resaltando la importancia de la optimización de las condiciones de reacción para obtener un producto final con las características deseadas.

Aceite de cocina usado

(S. Fernández et al., 2022) En el estudio "Potencial de Valorización de Aceites de Cocina Usados en Biolubricantes Sostenibles", se investiga la posibilidad de utilizar aceites de cocina usados como ecolubricantes. La síntesis de biolubricantes se logra mediante métodos como la hidrólisis enzimática y esterificación química, que descompone los triglicéridos en ácidos grasos libres y forma ésteres. Otros enfoques incluyen la epoxidación y transesterificación de ésteres metílicos. Los resultados indican que los aceites de cocina usados son adecuados para ecolubricantes, exhibiendo resistencia a la oxidación, capacidad mejorada de reducción de la fricción y un índice de viscosidad de 210.

Aceite comestible residual

(Kapucu et al., 2022) El estudio titulado "Síntesis enzimática de bases de trimetilolpropano Biolubricantes a partir de biodiésel de aceite comestible residual usando diferentes tipos de biocatálisis" tiene como objetivo principal la síntesis de biolubricantes a partir de aceites comestibles residuales mediante diversos catalizadores de lipasa, como Novozyme 435 y Lipozyme TL IM, y la evaluación de sus propiedades físicas y químicas para determinar su idoneidad como lubricantes respetuosos con el medio ambiente. La transesterificación de ácidos grasos metílicos (FAME) con trimetilolpropano (TMP) se llevó a cabo, analizando la influencia de la cantidad de lipasa, la relación molar FAME/TMP y la temperatura en la conversión de FAME a biolubricante. Los productos resultantes se caracterizaron con análisis FT IR y cromatografía de gases. Se logró la obtención de biolubricantes con propiedades destacadas, como alto punto de inflamación, bajo punto de fluidez y elevado índice de viscosidad. La conversión de FAME a biolubricante varió entre el 83% y el 99%, dependiendo del catalizador y las condiciones de reacción. Este biolubricante demostró una viscosidad de 33.6 cSt a 40°C, un índice de viscosidad de 170 y un punto de fluidez de -18°C. La síntesis enzimática de biolubricantes a partir de aceites comestibles residuales mediante catalizadores de lipasa se presenta como una alternativa prometedora para la producción de lubricantes ambientalmente amigables, cumpliendo con los estándares ISO VG3237. Este proceso sostenible podría reducir la dependencia de los lubricantes convencionales a base de petróleo, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental.

Aceite de cocina residual de girasol

(Bashiri et al., 2021) El artículo "Modificación química de aceite de cocina residual de girasol para la producción de biolubricantes" se propuso investigar la mejora de

propiedades del aceite de cocina residual de girasol mediante modificación química, con el objetivo de convertirlo en un biolubricante avanzado. El estudio se enfocó en la reacción de epoxidación del aceite, seguida de la síntesis de diéster a partir de monoéster, con el fin de evaluar la viabilidad del producto resultante como biolubricante y mejorar sus características fisicoquímicas. El proceso experimental involucró la aplicación de diversos reactivos y condiciones, utilizando el método de superficie de respuesta (RSM) para optimizar las variables independientes. Los resultados revelaron la obtención exitosa de un biolubricante modificado con propiedades mejoradas, destacando una eficiencia del 82,91% en la reacción de epoxidación. El biolubricante presentó una viscosidad de 11.91 cSt a 40°C y un índice de viscosidad de 135.12, subrayando su promisorio potencial en comparación con lubricantes tradicionales. Las conclusiones resaltaron la viabilidad de la modificación química del aceite de cocina residual de girasol para la producción de biolubricantes, la relevancia del método RSM para optimizar las condiciones de reacción, y el valor sostenible de estos productos como alternativas a los aceites minerales. En conjunto, este estudio contribuye significativamente a la investigación sobre biolubricantes derivados de fuentes renovables, ofreciendo información crucial sobre el proceso de modificación química y las propiedades del aceite de cocina residual de girasol, con potenciales aplicaciones en la industria de lubricantes y beneficios para la sostenibilidad ambiental.

Residuos de aceite de fritura usado

(Avellan & Alfós, 2005) El estudio titulado "Recuperación no alimentaria de aceites de fritura usados como lubricantes biodegradables" tuvo como objetivo principal desarrollar una nueva forma de valorizar los aceites de fritura usados recolectados en Europa, convirtiéndolos en lubricantes biodegradables para diversas aplicaciones, como agentes desmoldeantes, aceites para cajas de cambios industriales y fluidos hidráulicos. El proceso

de síntesis de las bases lubricantes biodegradables a partir de estos aceites implicó dos etapas: metanolisis seguido de transesterificación en presencia de un poliol, trimetilolpropano. Se llevaron a cabo pruebas de formulación y rendimiento para evaluar el desempeño de las bases lubricantes resultantes. Los resultados indicaron que las bases lubricantes sintetizadas presentaban las características fisicoquímicas necesarias para ser utilizadas como lubricantes biodegradables. Las pruebas de rendimiento revelaron un comportamiento superior a las especificaciones en la prueba de cuatro bolas, comparándolos con aceites hidráulicos tipo HEES. Además, se identificaron dos perfiles típicos de aceites para freír usados durante la determinación del índice de yodo, la acidez oleica y el análisis de los compuestos formados durante el proceso de fritura. Dichas bases lubricantes exhibieron viscosidades cinemáticas de 49.4 a 40°C, un índice de viscosidad de 200 y un punto de fluidez de -6°C. En conclusión, el estudio destacó la viabilidad de valorizar aceites de fritura usados como lubricantes biodegradables, demostrando que las bases lubricantes sintetizadas a partir de estos aceites son aptas para aplicaciones específicas y subrayando la influencia de los perfiles de los aceites de freír usados en el comportamiento de las bases lubricantes resultantes.

Aceite microbiano derivado de la fermentación de residuos de la industria de confitería

(Papadaki et al., 2018) El artículo titulado "Desarrollo de bioprocesos para la producción de biolubricantes utilizando aceite microbiano derivado de la fermentación de residuos de la industria de confitería" aborda la producción de biolubricantes mediante biocatálisis enzimática a partir de aceites microbianos. El objetivo principal fue generar ésteres de poliol con propiedades lubricantes, sustituyendo así a los lubricantes convencionales derivados del petróleo. Se empleó una lipasa comercial como biocatalizador para la hidrólisis de triglicéridos en ácidos grasos libres, que luego se convirtieron en ésteres

de poliol mediante reacciones de esterificación, variando las condiciones como la relación molar de los reactivos, la concentración de enzima y la temperatura. Los ésteres de poliol resultantes mostraron propiedades fisicoquímicas adecuadas para su uso como lubricantes, destacando una viscosidad cinemática de 23.8 cSt a 40°C y un índice de viscosidad de 181.1 para los hidrolizados de *R. toruloides*, y 5.3 cSt a 40°C con un índice de viscosidad de 183 para los ésteres de *C. curvatus*. Este estudio demuestra la viabilidad de la biocatálisis enzimática para la producción de biolubricantes a partir de aceites microbianos, sugiriendo su potencial aplicación en la industria de alimentos y bebidas como lubricantes de calidad alimentaria en equipos y maquinaria utilizados en la producción.

Apéndice E. Tabla de costos de materias primas

Biolubricantes a base de aceites vegetales

Tipo de Biolubricante derivados de	Costo de materia prima	
	Producción [Millones de toneladas]	COSTO [USD]
Aceite de jatropha	1.5	0.10 - 0.25
Aceite de algas marinas	28	10
Aceite de brucea javanica	No se cultiva comercialmente a gran escala	100
Aceite de palma	78	0.50 - 1.00

Biolubricantes a base de aceite animal

Tipo de Biolubricante derivados de	Costo de materia prima	
	Producción [Millones de toneladas]	COSTO [USD]
Grasas de pollo	1.5	110-200
	1.5	110-200
Grasa de sebo bovino	2	100-200
Grasa de mosca domestica	0.1	500-1000