

Obtención de una base biolubricante a partir de aceites transesterificados de las grasas animales (sebos) provenientes de la industria bovina

Carlos Alfredo Camargo Vila

Trabajo de Grado presentado para optar al Título de Magíster en Ingeniería Química

Director:

Fredy Augusto Avellaneda Vargas

Codirector:

Héctor Joaquín Orozco Monroy

Universidad Industrial De Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Maestría en Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Primeramente, a Dios y la Virgen de Torcoroma porque nuevamente me dieron la oportunidad de seguir formándome como profesional, ahora como magíster.

A toda mi familia, especialmente a mi madre Luz Elena Vila Montaña, mi padre Carlos Hemel Camargo Quintero, quienes han sido mi motivación, y siempre han creído en mí, además de apoyarme en todo momento sin dudar, a ellos les debo mi vida.

A mi hermana María Alejandra Camargo Vila, un ser que me inspira a ser mejor persona y profesional cada día.

A todos los amigos que me acompañaron en este proceso profesional, desde aquellos donde compartí espacios académicos, como aquellos con quienes compartí deportivamente y momentos de ocio, especialmente a mis amigos Juan Criado, Fabián Jaime, Fabián Acuña, Tanía García, Ángel Salazar, Andrés Castillo y Luis Hernández.

Y finalmente, no olvidaré nunca agradecer a esas personas que, aunque no se encuentran físicamente conmigo, dejaron su esencia en mí con sus acciones y enseñanzas, de manera especial recordar, resaltar y dedicar este logro a mi hermosa abuela María Helena Montaña de Vila y mi tía Lucía Quintero, así como a mi tío Dago, tía Mao y mi profesora Myriam Amaya, además de muchas personas que siempre estarán en mi memoria.

¡Gracias a la vida!

Carlos Camargo

Agradecimientos

A Dios por brindarme la oportunidad de formarme como persona y profesional en esta institución.

A mis padres, mi hermana y toda mi familia por estar siempre apoyándome incondicionalmente a pesar de las dificultades.

A mi director, el profesor Fredy Augusto Avellaneda Vargas por su incondicional guía y soporte durante mi trabajo.

A mi codirector Héctor Joaquín Orozco Monroy por su colaboración y orientación durante las pruebas de experimentación y caracterización.

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión por su apoyo en el desarrollo del proyecto 9363.

A la Escuela de Ingeniería Química por disponer de sus instalaciones y personal profesional, especialmente a Don Guillermo.

Al grupo de investigación INTERFASE por acogerme y asesorarme durante mi trabajo, especialmente a la profesora Débora Nabarlatz por su amable disposición a colaborarme.

A mis evaluadores Jorge Alberto Albarracín y el profesor Luis Javier López por su contribución al mejoramiento del resultado final de mi tesis.

A todas las personas que hicieron parte de mi preparación profesional durante cada una de las fases de mi proyecto.

Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Marco Teórico.....	17
1.1 Bases lubricantes y aditivos	18
1.2 Propiedades de los lubricantes	19
1.2.1 Viscosidad.....	19
1.2.2 Índice de viscosidad.....	20
1.2.3 Análisis termogravimétrico.....	20
1.2.4 Punto de inflamación	21
1.2.5 Punto de fluidez	21
1.2.6 Estabilidad Oxidativa.....	21
1.2.7 Gravedad API.....	21
1.3 Lubricantes a base de aceite mineral	22
1.4 Problemas ambientales asociados	25
1.5 Biolubricantes como alternativa	26
1.6 Método general para la síntesis de polioles éster (biolubricantes)	29
1.7 Valorización de un biolubricante	31
2. Estado del Arte.....	32
3. Objetivos.....	37
3.1 Objetivo general.....	37

3.2 Objetivos específicos	37
4. Metodología	38
4.1 Desarrollo del objetivo 1.....	38
4.1.1 Análisis de la materia prima obtenida de un proveedor regional (Harinagro S.A.).....	39
4.1.2 Acondicionamiento del aceite de sebo	39
4.1.3 Producción de biodiesel a partir de aceite de sebo bovino	41
4.2 Desarrollo del objetivo 2.....	42
5.2.1 Análisis de las muestras de biodiesel obtenidas	42
4.2.2 Producción de bases biolubricantes a partir del biodiesel obtenido	43
4.3 Desarrollo del objetivo 3.....	45
4.3.1 Para el análisis de las muestras de bases biolubricantes obtenidos se determinaron las siguientes propiedades:	45
4.3.2 Evaluación de las propiedades físicas y químicas respecto a lubricantes comerciales.....	46
5. Resultados y Análisis.....	46
5.1 Análisis del sebo crudo	46
5.2 Análisis del sebo mejorado mediante pre-esterificación con catálisis ácida	49
5.3 Análisis del biodiésel de sebo bovino obtenido	57
5.4 Análisis de las muestras de bases biolubricantes obtenidas.....	60
5.4.1 Comparación de las propiedades de la base biolubricante líquida seleccionada con materias primas precursoras.....	68
5.4.2 Análisis termogravimétrico.....	69
5.4.3 Análisis de estabilidad oxidativa	72
5.4.4 Análisis infrarrojo	74

5.4.5 Comparación de las propiedades del biolubricante grasa con dos de origen mineral.	77
5.4.6 Comparación de las propiedades del biolubricante líquido con uno de origen mineral y otro vegetal.....	80
6. Conclusiones.....	82
7. Recomendaciones	83
Referencias Bibliográficas	85
Apéndices.....	98

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Transesterificación de un triglicérido con alcohol	30
Figura 2. Transesterificación inversa de un metil éster con un poliol	31
Figura 3. Metodología empleada en el proyecto de investigación.....	38
Figura 4. Imagen de referencia del montaje experimental.....	41
Figura 5. Imagen de referencia del montaje experimental para la obtención de bases biolubricantes.....	44
Figura 6. Rendimiento e índice de acidez de las muestras de sebo esterificado.....	52
Figura 7. Efecto de las variables principales en el índice de acidez del sebo esterificado.	54
Figura 8. Efecto de las variables principales en el rendimiento del sebo esterificado.....	55
Figura 9. Rendimiento de las muestras de biodiésel obtenidas.	60
Figura 10. Resultados de viscosidad, índice de viscosidad y clasificación ISO VG de las muestras de bases biolubricantes.	63
Figura 11. Efecto de las variables principales en el índice de viscosidad de la base biolubricante líquida.	64
Figura 12. Efecto de las variables principales en el rendimiento de la base biolubricante líquida.	65
Figura 13. Análisis TGA de las muestras obtenidas durante la experimentación.	70
Figura 14. Estabilidad oxidativa de la base biolubricante (líquida).....	73
Figura 15. Estabilidad oxidativa de la base biolubricante (grasa).	74

Figura 16. Análisis infrarrojo de la base biolubricante en fase líquida.	75
Figura 17. Análisis infrarrojo de la base biolubricante grasa.	76
Figura 18. Mecanismo de reacción de preesterificación.....	99

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Comparación de propiedades del sebo crudo con otras investigaciones.	48
Tabla 2. Resultados de rendimiento e índice de acidez de las pruebas de acondicionamiento de sebo.	50
Tabla 3. Comparación de las propiedades del sebo esterificado con otras investigaciones.	56
Tabla 4. Resultados de rendimiento, densidad e índice de acidez de las muestras de biodiésel. .	58
Tabla 5. Resultados de viscosidad, índice de viscosidad y clasificación ISO VG de las muestras de bases biolubricantes.	61
Tabla 6. Resultados de viscosidad, índice de viscosidad y clasificación ISO VG de las dos muestras de bases biolubricantes seleccionadas.	66
Tabla 7. Resultados de viscosidad, índice de viscosidad y clasificación ISO VG de la muestra de base biolubricante final seleccionada.	67
Tabla 8. Comparación de las propiedades de la base biolubricante con las materias primas precursoras y de otras investigaciones.	69
Tabla 9. Pérdida de peso de las muestras obtenidas durante experimentación.	71
Tabla 10. Comparación de propiedades de la muestra biolubricante grasa.	78
Tabla 11. Comparación de propiedades de las muestras lubricantes líquidas.	81
Tabla 12. Diseño experimental para la obtención del sebo esterificado.	98
Tabla 13. Diseño experimental para la obtención del biodiésel.	100
Tabla 14. Diseño experimental para la obtención de las bases biolubricantes.	101

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Diseño experimental, cálculo de referencia y mecanismo de reacción del acondicionamiento de sebo bovino.....	98
Apéndice B. Diseño experimental de la obtención de biodiésel.....	100
Apéndice C. Diseño experimental para la obtención de la base biolubricante.....	101
Apéndice D. Muestra de sebo crudo a 25°C.....	102
Apéndice E. Muestra de sebo esterificado a 25°C.....	103
Apéndice F. Muestra de biodiésel de sebo bovino a 25°C.	104
Apéndice G. Muestra de base biolubricante líquida a 25°C.	105
Apéndice H. Comparación de todas las muestras obtenidas durante la experimentación a 25°C.	107

Resumen

Título: Obtención de una base biolubricante a partir de aceites transesterificados de las grasas animales (sebos) provenientes de la industria bovina*.

Autor: Carlos Alfredo Camargo Vila**

Palabras clave: Sebo bovino, acondicionamiento de sebo bovino, biodiésel bovino, transesterificación inversa, base biolubricante.

La búsqueda actual de nuevas materias primas que sean renovables en el área de los biocombustibles ha hecho que varios subproductos de la agricultura industrial tomen mayor importancia. Tal es el caso de las grasas animales como el sebo bovino, el cual fue utilizado en esta investigación como materia prima para la obtención de una base biolubricante con el fin de generar una alternativa de elaboración de biolubricantes, así como el de proveer de mayor valor agregado y utilidad a un residuo agroindustrial. Se llevó a cabo un acondicionamiento del sebo bovino crudo (previamente analizado) en el que se logró disminuir su índice de acidez desde 3,98mgKOH/g sebo crudo hasta un valor de 0,51 mgKOH/g sebo esterificado, mejorando su calidad para su posterior utilización en la obtención de biodiésel. Se obtuvo un biodiésel con un %FAME > 90% (cantidad de metil ésteres) con rendimientos mayores al 94% (gramos de biodiésel bovino/gramos de sebo bovino esterificado), lo que lo hace una materia prima apta para la obtención de biolubricantes. Finalmente, mediante el método de transesterificación inversa se hizo reaccionar el biodiésel bovino obtenido en la etapa anterior con un poliol (trimetilolpropano -TMP-) con el objetivo de obtener una base biolubricante, para esto se implementó un diseño factorial central compuesto teniendo en cuenta la relación molar TMP: Biodiésel bovino, % de catalizador p/p (CH_3NaO) y tiempo de reacción. Se clasificaron las muestras obtenidas según su viscosidad e índice de viscosidad seleccionando la muestra con alto rendimiento (g biolubricante/g biodiésel bovino), bajo porcentaje de catalizador y mayor reproducibilidad, el cual fue la base elaborada con una relación molar 4 moles de TMP:1 mol de biodiésel bovino, 0,41% p/p de catalizador y 180 minutos de tiempo de reacción con un rendimiento del 88,53%. Se debe resaltar que se obtuvo una sustancia en dos fases (líquida y grasa), en la cual la líquida fue analizada arrojando una viscosidad de 12,74 cSt a 40°C, un índice de viscosidad de 196 por lo cual puede ser clasificada como un lubricante de tipo ISO VG 15 (lubricantes hidráulicos), presentando una temperatura de oxidación de 297°C, así como un punto de inflamación de 185°C y un punto de fluidez de 19°C, por lo que se debería añadir un aditivo depresor de punto de fluidez para brindar la posibilidad de realizar pruebas de lubricación en sistemas hidráulicos del sector automotriz, industrial o agrícola. Por otra parte, bajo las mismas condiciones de operación se obtuvo una base biolubricante grasa con una viscosidad de 300,17 cSt a 40°C clasificada como ISO VG 320, temperatura de oxidación de 263°C, punto de inflamación >200°C, punto de goteo >120°C y penetración de 270 (0,1mm) que la clasifica como grasa de grado NLGI 2, con posible aplicación en cojinetes de maquinarias industriales.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas Escuela de Ingeniería Química Maestría en Ingeniería Química. Director: Fredy Augusto Avellaneda Vargas. Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Héctor Joaquín Orozco Monroy. Químico.

Abstract

Title: Obtaining a biolubricant base from transesterified oils of animal fats (tallow) from the bovine industry*.

Author: Carlos Alfredo Camargo Vila**

Keywords: Bovine tallow, bovine tallow conditioning, bovine biodiesel, inverse transesterification, biolubricant base.

The current search for new raw materials that are renewable in biofuels has made several by-products of industrial agriculture take on greater importance. Such is the case of animal fats such as bovine tallow, which was used in this research as a raw material to obtain a biolubricant base to generate an alternative to produce biolubricants, as well as to provide greater value, aggregate and utility to an agro-industrial waste. A conditioning of the raw bovine tallow (previously analyzed) was carried out in which it was possible to reduce its acidity index from 3,98mgKOH / g crude tallow to a value of 0,51 mgKOH / g esterified tallow, improving its quality for its subsequent use in obtaining biodiesel. Biodiesel was obtained with a% FAME> 90% (amount of methyl esters) with yields greater than 94% (grams of bovine biodiesel / grams of esterified bovine tallow), which makes it a suitable raw material for obtaining biolubricants. Finally, through the inverse transesterification method, the bovine biodiesel obtained in the previous stage was reacted with a polyol (trimethylolpropane -TMP-) to obtain a biolubricant base, for this a composite central factorial design was implemented considering the TMP: bovine biodiesel molar ratio, % catalyst w/w (CH₃NaO) and reaction time. The samples obtained were classified according to their viscosity and viscosity index, selecting the sample with high yield (g biolubrocant/g bovine biodiesel), low percentage of catalyst and greater reproducibility, which was the base made with 4 moles of TMP: 1 mole of bovine biodiesel molar ratio, 0,41% w/w catalyst, and 180 minutes reaction time with a yield of 88,53%. It should be noted that a substance was obtained in two phases (liquid and grease), in which the liquid was analyzed by yielding a viscosity of 12,74 cSt at 40 ° C, a viscosity index of 196 for which it can be classified as a lubricant of the ISO VG 15 type (hydraulic lubricants), presenting an oxidation temperature of 297 ° C, as well as a flash point of 185 ° C and a pour point of 19 ° C, for which a pour point depressant should be added to provide the possibility of lubrication tests in hydraulic systems in the automotive, industrial or agricultural sectors. On the other hand, under the same operating conditions, a grease biolubricant base was obtained with a viscosity of 300,17 cSt at 40 ° C classified as ISO VG 320, oxidation temperature of 263 ° C, flash point> 200 ° C, dropping point> 120 ° C and penetration of 270 (0,1mm) that classifies it as NLGI grade 2 grease, with possible application in industrial machinery bearings.

* Degree Work

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas Escuela de Ingeniería Química Maestría en Ingeniería Química. Director: Fredy Augusto Avellaneda Vargas. Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Héctor Joaquín Orozco Monroy. Químico.

Introducción

En los últimos años ha incrementado la preocupación por las alarmantes consecuencias que está trayendo consigo el cambio climático, siendo los combustibles fósiles y sus derivados uno de los principales protagonistas debido a sus métodos de extracción y potenciales inconvenientes durante su obtención. Un producto particularmente destacado son los lubricantes, que tienen como propósito mantener una película de aceite entre dos superficies que se encuentran en contacto, evitando así el desgaste excesivo y la malformación de estas, además de prevenir la oxidación y actuar como aislantes de suciedad, agua y polvo (Dev Srivyas & Charoo, 2019)(Ibeawuchi, 2016)

No obstante, los lubricantes traen consigo una gran desventaja, y es que, al ser obtenidos a partir de destilados del petróleo, su principal característica es que no son degradables y, por lo tanto, contribuyen a la contaminación y las problemáticas ambientales que afectan el entorno de los seres vivos (Madankar et al., 2013). Esto ocurre cuando no se les da un uso adecuado a los aceites lubricantes usados, puesto que en este punto adquieren concentraciones elevadas de metales pesados como el plomo, que se originan durante el contacto de estos con las maquinarias, motores o combustibles en los cuales fueron trabajados (Naranjo et al., 2018). Asimismo, estudios reportan que cerca del 20% de los lubricantes usados en Europa son liberados al medio ambiente, teniendo en cuenta que un solo kilogramo de estos puede llegar a contaminar hasta mil metros cúbicos de agua, es indispensable que se presenten alternativas a este producto y sus residuos (McNutt & He, 2016)(Garcés et al., 2011). Con relación a la situación local, según el *DANE* (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), en Colombia 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., 2017a).

Por otro lado, otra situación que se une a la problemática ambiental es la inadecuada disposición de los residuos agroindustriales que se generan en plantas de sacrificio de ganado y mataderos, como es el caso del sebo bovino, que posee una baja calidad y utilidad, por lo que en su mayoría es vertido en rellenos sanitarios o en fuentes hídricas sin llevarle a cabo un correcto tratamiento que permita disminuir su impacto ecológico (McGlashan, 2016)(Saboya et al., 2017b). Estos residuos están compuestos en su mayoría por sangre, vísceras no comestibles, huesos, entre otros componentes; la reacción química que produce la mezcla de estos componentes da lugar a la generación de sustancias sulfurosas, así como olores desagradables debido a su acelerado o prolongado tiempo de descomposición (Teixeira et al., 2009). Y, aunque en algunos casos estos residuos son utilizados para la obtención de otro tipo de productos como abono, alimento para ganado o jabones (Nagappan et al., n.d.), en su mayoría son desechados e incinerados a cielo abierto, generando gases contaminantes como dioxinas o furanos (He, 2016)(Andrea Maritza, 2010). Adicionalmente, según FEDEGAN (Federación Colombiana de ganaderos) en Colombia se sacrificaron 3.257.033 cabezas de ganado bovino durante el año 2020 (*Sacrificio de Ganado Bovino Cerró al Alza En 2020, Lo Que Indica Mejores Cifras En 2021 | Fedegan*, n.d.); considerando que el peso promedio de una vaca varía entre 400 y 500kg, dentro de lo cual es posible extraer 90kg de sebo, se puede inferir que entre el 18% y 22,5% del total en peso corresponde a residuos grasos (Andrea Maritza, 2010).

Con el objetivo de presentar una alternativa que impulse la regulación y mitigación del impacto ambiental generado por este tipo de residuos, en los últimos años se ha estado fomentando

la búsqueda de procesos que permitan la obtención y fabricación de biolubricantes a partir de aceites vegetales y animales (Hernández-Cruz et al., 2017). Por lo que existen estudios en los cuales se ha intentado obtener biolubricantes a partir de la síntesis de polioles ésteres (siendo los polioles, alcoholes con más de dos grupos hidroxilo), utilizando como materias primas los aceites anteriormente mencionados (Saboya et al., 2017a). La propiedad singular que se espera explotar en estos productos es el aprovechamiento de su potencial biodegradabilidad, característica que aventajaría significativamente a aquellos derivados del petróleo (según ASTM, es aquella muestra que puede convertir en al menos un 60% en CO₂ durante un período de 28 días) (Hunaida Abd Elbage Abazar Ahmed, 2019), además de una baja toxicidad (están compuestos por sustancias no tóxicas a diferencia de los aceites minerales, tales como naftalenos o aromáticos) (Mobarak et al., 2014)(Luna et al., 2015). Asimismo, con base a las estipulaciones del mercado en cuanto a las propiedades físicas y químicas que deben tener los biolubricantes, las cuales se miden y son estipuladas según normas ISO o ASTM, estos estudios han arrojado que poseen buena fluidez a bajas temperaturas (Heikal et al., 2017) y alta estabilidad oxidativa (Chan et al., 2018).

Sin embargo, los resultados que se han podido obtener en estos estudios han sido a escala laboratorio y utilizando aceites vegetales como el de palma, soja, jatropha, entre otros (Mofijur et al., 2013). Esto debido a los altos costos de producción que se tendrían si se quisiera llevar a cabo a nivel industrial, puesto que la materia prima representa entre el 70 al 80% del costo total de producción, obteniendo que aquellos que se sintetizan a partir de aceites vegetales cuestan aproximadamente entre un 40 a 60% más que los lubricantes a base mineral (Attia et al., 2020). Por tal motivo, se ha contemplado la posibilidad de usar aceites animales (como aceite aviar o sebo bovino) para la obtención de biolubricantes, habiendo pocos o casi nulos estudios con relación a estos (Hernández-Cruz et al., 2017), a pesar de que no harían competencia a la industria alimenticia

y que su utilidad es más limitada (Wang et al., 2014). Por lo que la posibilidad de elaborar biolubricantes a partir de aceites animales residuales brindó la oportunidad de proyectar un trabajo de investigación que se centrara en la obtención de este tipo de productos con capacidad de competencia en el mercado tanto por sus propiedades fisicoquímicas como por el costo de la materia prima (Saboya et al., 2017b).

Es necesario resaltar que a pesar de que han sido pocas las investigaciones llevadas a cabo con relación al uso de grasa aviar para la obtención de biolubricantes, así como prácticamente inexistentes con sebo bovino. En el grupo de investigación INTERFASE de la Universidad Industrial de Santander se llevaron a cabo estudios exploratorios con ambas materias primas con el fin de obtener un análisis del procedimiento base que podría llevarse a cabo en futuras investigaciones. Se tuvo como resultado la obtención de una sustancia aparentemente lubricante a la cual se le determinó la viscosidad e índice de viscosidad; no obstante, no se llevó a cabo una evaluación de sus propiedades para concluir que se trataba de un biolubricante, dejando abierta la posibilidad de llevar a cabo estudios más profundos y concluyentes.

Cabe aclarar que la mayor dificultad que trae consigo la utilización del sebo bovino es su propiedad de ser sólido a temperatura ambiente, así como el alto índice de acidez que reduce su utilidad, y que depende también del lote de producción. Adicionalmente, en los estudios donde se utiliza el sebo bovino como materia prima, se reportan exigentes condiciones de operación, como lo son altas temperaturas, bajas presiones y prolongados tiempos de reacción, por lo que se tuvo como objetivo disminuir estas condiciones sin afectar las potenciales propiedades lubricantes de los productos obtenidos.

Por lo tanto, para el desarrollo del proyecto fue necesario encontrar las condiciones de operación para el mejoramiento del sebo bovino crudo mediante un pretratamiento de catálisis

ácida con el objetivo de disminuir su índice de acidez y aumentar su potencial utilidad para su posterior utilización en la obtención del biodiésel, precursor de las bases biolubricantes. Así como el planteamiento de las mejores condiciones de operación para la obtención de una base biolubricante, cualidad que fue evaluada mediante la determinación de algunas de sus características más importantes como lo son su viscosidad, índice de viscosidad, punto de fluidez, punto de inflamación, estabilidad oxidativa, entre otras. La idoneidad de estas propiedades fue estimada con base en las normas de clasificación ISO o ASTM según el caso (aceite o grasa) para bases biolubricantes y su posterior comparación con productos similares de base mineral y vegetal. Obteniendo resultados satisfactorios que brindan un panorama alentador con relación a la oportunidad de presentar una alternativa a los lubricantes convencionales mediante la utilización y valorización de una materia prima de bajo costo y de considerable impacto ambiental si no se le da el tratamiento adecuado.

1. Marco Teórico

Un lubricante tiene como función permitir un suave deslizamiento y/o rodadura entre dos superficies que interactúan, disminuir el desgaste y la fricción generada, así como el calor resultante de esta última, además de prevenir la oxidación y actuar como aislante de suciedad, polvo y agua (Naveed et al., 2021). Por lo general son obtenidos a partir de aceites minerales derivados del petróleo, por ello tienen un valor agregado considerable y son un producto que no compite con la industria alimenticia, sin embargo, son no renovables y tóxicos, puesto que

generalmente a sus residuos no se les da una adecuada disposición, llegando a ser vertidos a cuerpos de agua donde forman una película sobre la superficie ocasionando daños sobre las especies al afectar la transferencia de oxígeno, además de convertirla en agua no potable (S, 2013). En 2020 el consumo global de lubricantes alcanzó aproximadamente los 37 millones de toneladas métricas (*• Lubricants Demand Worldwide 2020 | Statista, n.d.*), así como un valor aproximado de 125,81 billones de dólares (*Lubricants Market Size, Share | Industry Report, 2021-2028, n.d.*), de los cuales se calcula que aproximadamente un 50% de estos son liberados al medio ambiente (Mobarak et al., 2014). Ante estos motivos, el interés por encontrar alternativas a los lubricantes convencionales ha ido incrementado, estudiando la posibilidad de utilizar otro tipo de materias primas para su elaboración y capacidad de competencia en el mercado, con especial atención en los aceites vegetales y animales (de Haro et al., 2018).

1.1 Bases lubricantes y aditivos

Los lubricantes están compuestos por la mezcla de dos sustancias, una es la base lubricante que es la encargada de dar las principales propiedades y la otra son los llamados aditivos, los cuales ayudan a mejorar ciertas propiedades de la base según vaya a ser su aplicación en el mercado, además de cumplir con las especificaciones técnicas necesarias. Por ejemplo, dos lubricantes pueden llegar a tener la misma base lubricante, pero su diferencia estaría en la composición final que le dé el tipo de aditivo que se les haya suministrado, puesto que dependen del uso final para el cual está destinado (Obasi et al., 2014).

La función de los aditivos es la de intervenir en la composición química de un lubricante con el objetivo de mejorar o reforzar las propiedades de este. Todos los lubricantes que hoy en día

son utilizados en diferentes áreas de las industrias deben pasar por un proceso de aplicación de aditivos, puesto que sin ellos no tendrían la capacidad de tener un rendimiento adecuado y ser útiles en las aplicaciones para las cuales fueron elaborados. Las principales finalidades de los aditivos son las de proteger las superficies metálicas, así como el de mejorar las propiedades de la base. Entre estos es posible destacar aquellos que cumplen las siguientes funciones: Mejoradores del índice de viscosidad, depresores del punto de fluidez, antioxidantes, inhibidores de la corrosión, dispersantes, entre otros (Fong Silva et al., 2017).

1.2 Propiedades de los lubricantes

Como se ha mencionado anteriormente, lo que define la utilidad de un lubricante más allá que solo su capacidad de lubricar, son las propiedades de este, puesto que es lo que determina el objetivo o el uso adecuado que se le debe dar a cada tipo de lubricante, algunos pueden ser más viscosos que otros, o tener un menor punto de fluidez, así como punto más altos de inflamación, propiedades indispensables al momento de evaluar su idoneidad según sea la aplicación que se les requiera dar; algunas de estas son las siguientes:

1.2.1 Viscosidad

Se define como la resistencia que presentan los líquidos a fluir. Esto nos indica hasta qué grado puede fluir un líquido según sea su temperatura de una manera inversa a el valor de dicho parámetro. Asimismo, entre menor sea la viscosidad de una sustancia, mayor desgaste tendrá la superficie que busca lubricar, y si es muy alta la viscosidad, mayor energía requerirá un

componente lubricado para llevar a cabo su función, por lo que es indispensable que posea las propiedades adecuadas (“Lubricant Properties,” 2014).

1.2.2 Índice de viscosidad

Nos indica la capacidad que posee un líquido para mantener su viscosidad ante cambios de temperatura. Entre mayor sea este índice, menos será el cambio en su viscosidad a medida que se modifica la temperatura, por lo que se considera como un lubricante con mejor protección y eficacia. Es quizá el parámetro de mayor importancia al momento de elegir un lubricante, debido a que si tiene un bajo índice de viscosidad podría tener la viscosidad apropiada a cierta temperatura, pero esta podría disminuir considerablemente a medida que aumenta la temperatura, resultando en el incremento de la fricción mecánica y desgaste por la pérdida de película lubricante (“Lubricant Properties,” 2014).

1.2.3 Análisis termogravimétrico

Este análisis se encarga de analizar los cambios de masa de una muestra mientras esta es calentada o enfriada en una atmósfera definida. Estos cambios en el % de peso pueden darse por descomposición, por deshidratación, entre otros (de Blasio, 2019).

1.2.4 Punto de inflamación

Es la temperatura más baja requerida a la que se debe calentar un lubricante para que al contacto con el aire este se encienda con la más mínima exposición a una flama. Ayuda a determinar las condiciones de seguridad a las que se debe transportar un lubricante, así como su rango máximo de temperatura (“Lubricant Properties,” 2014).

1.2.5 Punto de fluidez

Esta propiedad es un indicador muy importante en los lubricantes, se define como la mínima temperatura a la cual un líquido podría fluir, es decir, donde aún le es posible comportarse como un fluido (Sokolnikov et al., 2016).

1.2.6 Estabilidad Oxidativa

Indica la capacidad que tiene un aceite para resistir la degradación, especialmente en presencia de oxígeno, donde pueden llegar a intervenir la temperatura, el agua y otros catalizadores (“Lubricant Properties,” 2014).

1.2.7 Gravedad API

Es una medida de cuánto pesa un producto derivado del petróleo con relación al agua, es decir, se considera como una densidad relativa. Para los lubricantes conviene tener una densidad

baja en comparación a la del agua, puesto que entre menor sea, menor será el tiempo de sedimentación de partículas que se puedan encontrar en el lubricante, por lo tanto, menor tiempo de exposición del material a problemas de sedimentos, cavitación o corrosión (Ossman et al., 2015).

1.3 Lubricantes a base de aceite mineral

Hasta mediados del siglo XIX los aceites naturales eran utilizados como aceites lubricantes, es decir, las grasas animales, aceites vegetales y aceites marinos, eran los utilizados para lubricar, los cuales eran mezclas de ácidos grasos lineales de C₈-C₂₂. Estos aceites naturales presentaban buenas cualidades lubricantes para la época, tales como un alto índice de viscosidad, alto punto de inflamación, entre otros. No obstante, poseen ciertas limitaciones en su rango de viscosidad debido a su limitado rango estructura. Además de que poseen una baja temperatura de fluidez, poca estabilidad térmica y oxidativa, dando lugar a una rápida descomposición, así como subproductos no deseados o espesamiento de la sustancia, lo que impulsó el estudio de nuevas tecnologías para la formulación de productos más acordes a las necesidades. Sin embargo, cumplían su función satisfactoriamente ante la falta de procesos industriales y productos como los hoy conocidos a base de petróleo (Boyde, 2002).

Como se mencionó anteriormente, esto trajo como consecuencias la búsqueda de nuevas materias primas y procesos de obtención de lubricantes, además de que la demanda de estos comenzó a crecer con mayor rapidez que la oferta. Esto dio como resultado el descubrimiento de que, durante procesos de refinamiento del crudo, era posible obtener sustancias lubricantes con mayor estabilidad que los aceites naturales. No obstante, hasta finales del siglo XIX las

propiedades de estos productos no superaban las de los aceites naturales, comenzando por el hecho de que no todos los productos derivados del petróleo poseían las mismas características, esto debido a las diferencias entre los pozos de los cuales era extraídos, por ejemplo, algo que destacaba eran las distintas distribuciones de los pesos moleculares de sus componentes, puesto que a menor peso molecular, menor era el punto de inflamación, condición que no favorecía al material durante su uso (Boyde, 2002).

Durante el siglo XX, dado que se estaba viviendo un rápido crecimiento de la industria automotriz, así mismo creció la demanda de lubricantes, por lo que para el momento los avances tecnológicos habían podido contribuir a la mejora de los procesos de obtención de estos mediante el uso de aceites minerales, logrando así suplir la demanda mediante el mejoramiento de sus propiedades. Este objetivo fue cumplido mediante la implementación de un mejor control sobre la composición y las características del fluido mineral. A su vez, el desarrollo tecnológico permitió la utilización de agente químicos que mejoraban considerablemente las propiedades del material, además de tener la capacidad de especializarse en alguna de ellas, estos compuestos se denominan aditivos y son muy importantes en la actualidad, conformando entre el 10 al 20% del total de la composición de un lubricante (Bart et al., 2013).

El mercado de lubricantes ha crecido aún más en los años recientes, siendo el sector automotriz el responsable de aproximadamente un 60% del consumo global, siendo la producción anual de aproximadamente 40 millones de toneladas para el año 2018 (Amiril et al., 2018)(Hamdan et al., 2018). Sin embargo, el gran consumo de derivados del petróleo ha traído consigo una variedad de problemas para el medio ambiente, tales como contaminación de fuentes hídricas o incremento de las emisiones de dióxido de carbono. El proceso mediante el cual son obtenidos estos procesos se conoce como refinación (ya sea por destilación, desulfuración, refinación ácida,

entre otros) (Fernandes et al., 2018). Los aceites obtenidos por el procesamiento del petróleo son clasificados como refinados y compuestos residuales. Algunos de estos compuestos pueden llegar a poseer altos valores de viscosidad (mayor a 45cSt a 100°C) (Bart et al., 2013).

Estos aceites minerales están compuestos por mezclas de diferentes sustancias, las cuales poseen una amplia distribución de pesos moleculares, principalmente hidrocarburos C₂₀-C₅₀ que incluyen parafinas (alcanos o ceras lineales y alcanos ramificados, especies alicíclicas y olefínicas, aromáticas y aromáticas policíclicas (PCA) o hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), donde estos últimos presentan una alta toxicidad para el ambiente (Mangas et al., 2014). Debido a esta problemática, se ha limitado el uso de aceites de base nafténica a menos del 10% del total de aceites minerales. Por otra parte, estos aceites no renovables a base de petróleo, que están compuestos principalmente de hidrocarburos (estructuras parafínicas, nafténicas y aromáticas) carecen de funcionalidad química, es decir, no poseen características químicas semejantes en su totalidad. Estos aceites minerales tienen bajos índices de viscosidad, bajos puntos de inflamación y altos coeficientes de fricción límite en comparación con los aceites naturales (M. Srivastava et al., 2021).

La viscosidad de un aceite mineral depende en gran medida de su composición, puesto que una alta viscosidad puede ser asociada a mayores longitudes de las cadenas de sus componentes, así como la temperatura de procesamiento. Por ejemplo, las parafinas de largas cadenas no son idóneas en la composición de los lubricantes, dado que favorecen altos puntos de fusión, y, por lo tanto, alto puntos de fluidez (Hutchings & Shipway, 2017).

1.4 Problemas ambientales asociados

Los lubricantes comerciales sintetizados a partir del destilado del petróleo, los caracteriza el no ser degradables y perjudiciales tanto para el entorno como para los seres vivos (Chauhan et al., 2016). Estudios afirman que, en Europa cerca del 20% de las 5,2 millones de toneladas que se consumen anualmente en esta región son liberados al medio ambiente, donde un solo kilogramo de estos puede llegar a contaminar hasta mil metros cúbicos de agua (McNutt & He, 2016). Por otra parte, cabe resaltar que la demanda mundial de lubricantes en el año 2020 según *Statista* fue de 37,4 millones de toneladas (*• Lubricants Demand Worldwide 2020 | Statista, n.d.*), siendo cerca del 90% obtenidos a partir de derivados del petróleo (Saboya et al., 2017a) y de los cuales aproximadamente 50 al 60% llegan a tener contacto con el suelo, aire y agua (Madankar et al., 2013)(Parente et al., 2021).

Debido a esto, y a la lógica concientización que se ha generado recientemente respecto a los daños casi irreversibles que está sufriendo el medio ambiente la producción y uso indiscriminado de este tipo de productos y sus similares, los gobiernos han comenzado a ejercer presión mediante la regulación de la obtención de productos derivados del crudo. No obstante, en muchos casos se ha evidenciado que las industrias más allá de generar cambios en sus métodos de obtención y producción han optado por utilizar denominaciones confusas que les permita ocultar el hecho de que realmente no se han comprometido a ser amigables con el medio ambiente, llegando a reemplazar palabras en sus etiquetas y especificaciones como peligroso, perjudicial, tóxico por términos como amigable, aceptable, entre otros (Bart et al., 2013)(Zulkifli et al., 2013).

Al mismo tiempo, Bartz afirma que ningún lubricante podría llegar a considerarse como amigable o no tóxico para con el ambiente, sino que en la mejor de las situaciones podría llegar a

ser una sustancia neutral ante este. En otras palabras, lo máximo a lo que se podría aspirar es que, mediante tratamiento a los lubricantes usados, estos puedan llegar a causar el más mínimo daño ambiental (Bartz, 1998). Ahora bien, para que un lubricante sea amigable con el ambiente se debe analizar su ciclo de vida completo, desde que su producción no promueva el agotamiento de recurso, ni generación de residuos o emisiones tóxicas, así como que su disposición final no sea un problema, además de requerir un mínimo consumo de energía, altamente biodegradable y que no produzca riesgo a la salud. Evidentemente esta serie de exigencias no son sencillas de obtener, especialmente si se siguen utilizando materias primas derivadas del petróleo, por lo que el reto de disminuir el impacto y hallar nuevas alternativas genera cada vez mayor importancia, impulsando así la generación de más propuestas e investigaciones con el objetivo de mejorar los resultados y acercarse al equilibrio ambiental, dando la posibilidad de llevar a cabo la transición y mejorar las condiciones del entorno de todos los seres vivos (Bart et al., 2013).

1.5 Biolubricantes como alternativa

Ante la situación generada, ha aumentado la implementación de nuevas legislaciones con el propósito de regular y disminuir el impacto ambiental mediante la búsqueda de nuevas alternativas para la producción de lubricantes, tomando mayor importancia el estudio para la obtención y uso de biolubricantes (S. C. Shi & Jiang, 2020). Estos pueden ser obtenidos a partir de la síntesis de polioles ésteres, utilizando como materias primas aceites vegetales o animales (Saboya et al., 2017a), lo que les brinda la etiqueta de biodegradables y amigables con el medio ambiente debido a su baja toxicidad (S.-C. Shi & Jiang, 2020). Además, teniendo en cuenta las

exigencias del mercado, estos biolubricantes presentan buena fluidez a bajas temperaturas y alta estabilidad oxidativa (McNutt & He, 2016).

La presentación de estas alternativas se da debido a la gran preocupación que sigue generando los daños irreversibles que están causando gran variedad de productos industriales. Por tal motivo, uno de los principales objetivos es el de reemplazar paulatinamente los aceites minerales por una nueva generación de biolubricantes. Estos tienen el principal propósito de ser amigables con el medio ambiente y que destaquen por su degradabilidad, así como la capacidad de competir en el mercado por su costo y desempeño (Salih et al., 2011).

Esta postura está fuertemente ligada a los esfuerzos que están siendo llevados a cabo en paralelo en cuanto a la obtención de combustibles renovables debido a la falta de recursos y el alto precio que puede llegar a alcanzar el crudo. Esta puede ser una oportunidad que puede llegar a impactar directamente la economía de las naciones, puesto que innovar en este campo rápidamente podría traer consigo mayores inversiones e importancia en el mercado, siendo esencial promover las investigaciones para encontrar bases bio para lubricantes comerciales (Wilson et al., 2012)(Chauhan et al., 2016).

Muchas de estas investigaciones han tomado como punto de partida el uso de aceites vegetales, los cuales han ido encontrando su lugar como lubricantes y hacia aplicaciones de transporte. Poseen la ventaja de que son amigables con el medio ambiente y biodegradables, tal como se ha mencionado anteriormente. Estos biolubricantes son en su mayoría elaborados a partir de la formación de polioles ésteres utilizando aceites vegetales como materia prima, siendo los polioles más estudiados el trimetilolpropano (TMP), pentaeritritol (PE) y el neopentilglicol (NPG). Estas biobases ésteres proveen al biolubricante de una buena fluidez a bajas temperaturas, y aunque no es posible su aplicación a temperaturas extremadamente altas, sí pueden ser usados a

temperaturas no tan extremas (menores a 200°C) (Heikal et al., 2017)(Nagendramma & Kaul, 2012).

La mayoría de estas investigaciones se han llevado a cabo utilizando como materia prima aceites vegetales como el de palma, soja, colza, jatropha, entre otros (Bart et al., 2013). En el territorio colombiano predomina el uso de aceite de palma debido a su gran disponibilidad, siendo el mayor productor a nivel de América Latina (Pequeños palmicultores en Colombia ya tienen soluciones a la medida, para avanzar en su camino a la sostenibilidad | Solidaridad South America, n.d.). Mientras que otros aceites como el de cocina usados o grasas animales pueden ser considerados para su uso como materia prima para la obtención de biodiesel (Gautam & Kumar, 2020), habiendo pocos o casi nulos estudios con relación a estos últimos, a pesar de que sería una materia prima que no haría competencia a la industria alimenticia, además de presentar ventajas económicas en cuanto a su costo en comparación con los aceites vegetales (Antonio Alfonso Alvarez, n.d.)(Esteves et al., 2017). Esta consideración debe ser tomada en cuenta ya que, en la producción de biolubricantes la materia prima representa entre el 60 al 80% del costo de producción, resultando en que aquellos que se producen a partir de aceites vegetales terminan costando entre un 40 a 60% más que los hechos a base mineral (Attia et al., 2020).

A pesar de esto, la industria ha continuado con el apoyo a la búsqueda de métodos de síntesis más económicos para la obtención de biolubricantes a partir de aceites vegetales, centrándose en disminuir los costos de producción y explorando nuevos campos de aplicación (Heikal et al., 2017). Finalmente, en los últimos años ha estado tomando mayor interés el uso de aceites animales como el aceite aviar y el sebo bovino para la obtención de bioproductos como el biodiésel o biolubricantes, puesto que es una materia prima de baja calidad y utilidad(McGlashan, 2016)(Saboya et al., 2017b). Este último es generado en plantas de sacrificio animal y mataderos,

sin embargo, estos establecimientos en su mayoría vierten los desechos a fuentes hídricas o rellenos sanitarios sin llevarle a cabo ningún tipo de tratamiento, generando ciertas reacciones químicas que dan lugar a sustancias sulfurosas, con tiempos prolongados de descomposición y olores desagradables (Teixeira et al., 2009). Aunque en algunos casos estos residuos son utilizados para la obtención de abono, alimento para ganado, entre otros, en muchas ocasiones son desechados e incinerados en crematorios o a cielo abierto, generando así gases contaminantes como dioxinas y furanos, fomentando un negativo impacto ambiental, así como olores nocivos para la salud (He, 2016).

Sin embargo, con relación al uso de sebo bovino en la obtención de biolubricantes se han llevado a cabo estudios preliminares en el grupo de investigación INTERFASE de la Universidad Industrial de Santander, en los cuales se logró obtener una sustancia aparentemente lubricante en dos fases, una líquida y una sólida (grasa más específicamente), a las cuales no se les determinó nada más que su viscosidad y a la que se les realizó un mayor estudio durante el desarrollo de la actual investigación por medio de la manipulación de las variables de operación, así como la determinación de algunas de las propiedades más importantes que pueden ayudar a especificar la calidad del producto (Prasca Cuello & Ortega Díaz, 2018).

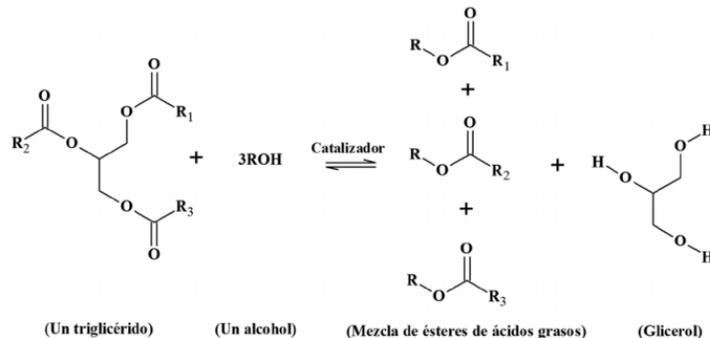
1.6 Método general para la síntesis de polioles éster (biolubricantes)

Para el proceso de elaboración de biolubricantes se debe llevar a cabo en primera instancia la obtención de metil ésteres (biodiésel), estos provienen de recursos renovables como los aceites vegetales, aceites animales, grasas animales o aceites de cocina usados como se ha mencionado anteriormente (Leung et al., 2010)(Castellar et al., 2014). Estas sustancias están formadas en su

mayoría de una gran variedad de triglicéridos que son sometidos a un proceso de transesterificación (la figura 1 muestra un ejemplo simplificado) (Castellar et al., 2014).

Figura 1.

Transesterificación de un triglicérido con alcohol



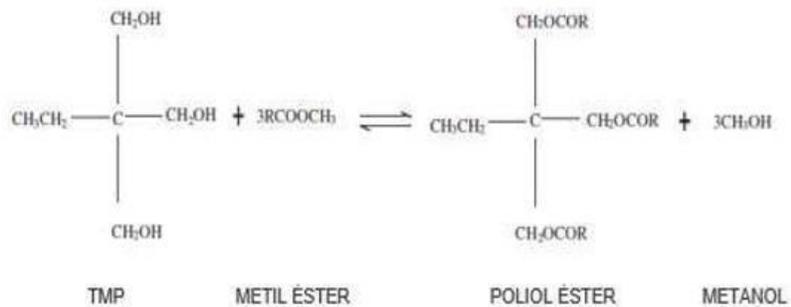
Nota. Tomado de: (Leung et al., 2010)(Castellar et al., 2014)

Como se indica en la reacción, esta es reversible, por lo que el alcohol escogido debe ser utilizado en exceso para desplazar el equilibrio de la reacción hacia el producto deseado. El metanol y el etanol son los alcoholes que comúnmente se usan debido a su bajo costo y sus características fisicoquímicas. La transesterificación podría simplificarse definiéndole como la conversión paso a paso de triglicéridos a diglicéridos, monoglicéridos y finalmente a glicerol, en donde en cada etapa se estaría generando un mol de alquiléster (Knothe & Razon, 2017).

Terminada esta fase de la obtención del biodiésel, estos metil ésteres se hacen reaccionar con el polirol deseado (TMP, NPG, 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 polirol 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).

Con relación a los aceites animales utilizados para la obtención de biolubricantes, el que ha sido más explorado es el aceite aviar, el cual tiene su origen en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de las industrias avícolas, el cual tiene un bajo costo y además no posee gran utilidad más allá de su uso como iniciador de fertilizante o suplemento alimenticio para ganado. Además, la oferta de esta materia prima es alta y no requiere de gran trabajo o inversión adquirirla (Hernández-Cruz et al., 2017)(Kirubakaran & Arul Mozhi Selvan, 2018).

1.7 Valorización de un biolubricante

Actualmente el panorama de los biolubricantes no es muy claro, puesto que su producción en masa sigue siendo aún más costosa que la de aquellos a base mineral. Ante esta situación, se siguen realizando análisis de las posibles causas que estarían afectando la inmersión total de los biolubricantes, siendo el costo de impuestos uno de los mayores obstáculos, por lo que es

indispensable el impulso de políticas públicas que permitan el desarrollo económico de este tipo de productos (Parente et al., 2021).

A pesar de las limitaciones económicas que trae consigo la elaboración de biolubricantes, recientemente se han realizado estudios que demuestran que actualmente el mercado está siendo dominado por ésteres, los cuales son hidrocarburos renovables y que tienen grandes ventajas debido a su mejorada estabilidad, así como compatibilidad de infraestructura y compatibilidad a los aditivos; lo cual motiva a continuar con su estudio y futura elaboración en masa teniendo en cuenta el costo que podría llegar a tener como producto (Ho et al., 2019). Por tanto, sumado a la capacidad de valorización que podría llegar a tener un biolubricante, está el potencial de una de las materias primas como lo sería el sebo de vaca, puesto que ronda los \$2.200 COP por kilogramo (según la Bolsa Mercantil de Colombia, 2021), por lo que la posibilidad de elaborar biolubricantes a partir de esta sustancia sería un gran avance a los objetivos propuestos económicamente (Bolsa Mercantil de Colombia, 2021).

2. Estado del Arte

Hasta finales del siglo XIX eran utilizados aceites vegetales y animales como lubricantes debido a su característica viscosa, los cuales están compuestos principalmente por ácidos grasos y sus triglicéridos. Estos lubricantes naturales eran obtenidos por métodos físicos en los cuales las semillas y frutos oleaginosos se sometían a procesos de prensado donde finalmente se extraía el aceite producto de este, el cual era llevado a un tratamiento de refinado. Es interesante resaltar que

para las necesidades lubricantes que se tenían para la época, los aceites cumplían satisfactoriamente con su propósito, esto teniendo en cuenta que no existía la tecnología necesaria para el mejoramiento de sus propiedades fisicoquímicas. Sin embargo, debido al creciente desarrollo industrial, estas necesidades comenzaron a ser más exigentes (Bart et al., 2013).

Desde mediados del siglo pasado, los requerimientos fueron mayores por lo que los lubricantes pasaron a ser obtenidos en aproximadamente un 90% a partir de derivados del petróleo, los cuales tienen la ventaja de ser destilados y condensados sin sufrir ningún tipo de descomposición. Para su obtención se implementaron gran variedad de sofisticados sistemas de producción entre los cuales destacan la eliminación de compuestos sulfurados, eliminación de ceras, destilación al vacío, hidrogenación, extracción con solventes, entre otros. Estas bases tienen la particularidad de ser sencillas de elaborar, pero, por el contrario, tienen una duración más reducida y en algunos casos pueden no cumplir con la mayoría de los requisitos de regulación ambiental o disminución de contaminación (Bart et al., 2013)(Kermani & Ebadi, 2012).

Para finales del siglo XX comenzó a tomar mayor interés la búsqueda de métodos alternativos con el objetivo de reemplazar los combustibles fósiles debido a su evidente protagonismo en el aumento de la problemática del cambio climático. Ante esto, la atención se centró en el uso de fuentes de energía renovable como la biomasa para la obtención de bioproductos que permitieran reemplazar a mediano y largo plazo a los derivados del petróleo (Espinosa et al., 2009)(A. Srivastava & Prasad, 2000).

Durante el año 2000, Pasad et. al. resalta la importancia y la necesidad de la implementación de combustibles verdes con el objetivo de disminuir el impacto ambiental que genera el crudo. Por lo que resalta que los combustibles diésel derivados de los triglicéridos (aceites vegetales o animales), podrían ser una alternativa prometedora ante los combustibles

fósiles. Asimismo, concluye que aquellos productos sobre los que se estaban prestando más atención eran los ésteres metílicos de ácidos grasos, los cuales son obtenidos mediante transesterificación. Sin embargo, este tipo de procesos hasta el momento estaban arrojando productos altamente viscosos, con baja volatilidad y alto punto de fluidez, de manera que se hacía necesario continuar investigando en este campo de acción con el objetivo de mejorar los resultados y plantear una base para el futuro. Además, plantea con base en su investigación que las variables potencialmente indispensables a tener en cuenta serían la temperatura de reacción, tipo de catalizador, pureza de los reactivos, tiempo de reacción, entre otras (A. Srivastava & Prasad, 2000).

En el año 2002 es publicado un artículo en el cual se expone un interesante resumen sobre diversos estudios donde se discuten los beneficios que podría traer consigo la utilización de grasas vegetales para la obtención de biolubricantes, ya que, debido a su naturaleza química, triésteres de glicerol (triglicéridos, TAG) de ácidos grasos de cadena larga, esta propiedad les proporcionaría excelentes propiedades lubricantes como lo son alto índice de viscosidad, alto punto de inflamación y baja volatilidad. Se concluye en esta investigación que para considerar a los aceites vegetales como un fuerte candidato en la elaboración de biolubricantes, es necesario llevar a cabo un estudio que tenga como finalidad mejorar el comportamiento lubricante a bajas temperaturas, además de los temas relacionados con la oxidación, puesto que tienden a polimerizarse y degradarse (Kodali, 2002).

Posteriormente, en el año 2005 Yunus et. al. publicaron un estudio sobre el uso del aceite de palma como materia prima para la obtención de biolubricantes con un bajo punto de fluidez. En este se comienza a observar el uso del poliol trimetilolpropano (TMP), el cual hicieron reaccionar con un biodiésel de aceite de palma obteniendo excelentes resultados, puesto que lograron un

rendimiento mayor al 96%, así como reducir el punto de fluidez hasta -32°C . Demostrando el potencial de los aceites naturales (especialmente vegetales) para la producción de biolubricantes, sugiriendo su continua investigación y estudio (Yunus et al., 2005).

Para el año 2008 surge una publicación en la cual se llevó a cabo una revisión de diversas investigaciones en las cuales se han utilizado aceites naturales (tanto vegetales como animales) para la obtención de biolubricantes. En este se resaltó específicamente el potencial de las grasas animales debido a su contenido químico (triglicéridos), lo que las convierte en una materia prima apta para la obtención de bioproductos como el biodiésel o biolubricantes. Además, se destacó el aumento que ha tenido la producción de ésteres metílicos de ácidos grasos (biodiésel) en la última década, así como su estudio para la obtención de biolubricantes por medio de métodos de transesterificación (Petran, 2008).

Por otra parte, durante el año 2016 se reporta un estudio sobre la utilización de aceite de palma y jatropha para la obtención de biolubricantes mediante dos fases de transesterificación. La primera de estas se basó en la producción de biodiésel a partir de los aceites vegetales, y la segunda consistió en la reacción del biodiésel con un poliol (trimetilolpropano) en presencia de un catalizador (metóxido de sodio) para la producción de una base de aceite poliol éster (biolubricante). Se obtuvieron excelentes resultados avalados por análisis ASTM para lubricantes, encontrando que poseían altos índices de viscosidad (140), así como bajos puntos de fluidez (-3°C), los cuales encajaban en la clasificación para lubricantes de grado ISO VG46. Con esto, concluyen que el potencial de los ésteres de TMP es bastante prometedor debido a las propiedades obtenidas y se sugiere continuar con la investigación (Heikal et al., 2017).

Asimismo, en ese mismo año se realizó una investigación sobre la utilización de sebo bovino para la obtención de biodiésel en el grupo INTERFASE de la Universidad Industrial de

Santander. En ese trabajo las autoras buscaban disminuir el índice de acidez de un sebo de bovino residual mediante un proceso de preesterificación con ácido sulfúrico, sustentando así lo planteado por García Colomer en 2011 sobre tipos de catalizadores para procesos de esterificación y transesterificación (García Colomer, 2011). Se obtuvo un índice de acidez cercano a 1mg KOH/g sebo crudo y un rendimiento mayor al 90%, por lo que se utilizó para la obtención de biodiésel mediante una transesterificación alcalina, donde se obtuvo un porcentaje FAME del 90%. Y aunque fueron resultados exitosos basados en estudios anteriores, no es un biodiésel apto para su comercialización, surgiendo así la necesidad de encontrar alternativas de uso en otro tipo de procesos como por ejemplo la elaboración de biolubricantes (Ramírez García, 2016).

Para el año 2017 se realizan estudios preliminares para la obtención de una sustancia lubricantes a partir de grasa aviar (UIS). Esta investigación utilizó biodiésel obtenido a partir de aceite aviar como materia prima para la elaboración de biolubricantes, tomando como base estudios anteriores donde se sintetizaban polioles ésteres mediante el método de transesterificación inversa (André et al., 2015). Durante el proceso tuvieron en cuenta variables como el tiempo de reacción, temperatura y agitación de la muestra. Cabe resaltar que se obtuvo una sustancia en dos fases, una líquida y una sólida, habiendo sido caracterizada levemente la primera y que aparentemente según las propiedades que le fueron medidas (viscosidad e índice de viscosidad) podría considerarse como una sustancia lubricante, pero sin llevar a cabo un estudio más profundo de esta (Alejandra et al., 2018).

Por tal motivo, en el año 2018 se realizó un estudio exploratorio con el objetivo de evaluar la posibilidad de obtener un biolubricante a partir de biodiésel de sebo bovino (UIS). Se logró obtener una sustancia aparentemente lubricante, a la cual se le determinó nuevamente su viscosidad e índice de viscosidad, concluyendo que podría poseer propiedades lubricantes. No

obstante, no se realizaron mayores caracterizaciones (Prasca Cuello & Ortega Díaz, 2018), como otro tipo de propiedades (punto de fluidez, punto de inflamación, estabilidad oxidativa, entre otras), abriendo la posibilidad de llevar a cabo nuevas investigaciones respecto al uso de sebo bovino para la obtención de biolubricantes.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Obtener una base biolubricante (poliol éster) a partir de aceites transesterificados de las grasas residuales (sebos) provenientes de la industria bovina.

3.2 Objetivos específicos

Establecer las condiciones de operación para la obtención del biodiésel y la base biolubricante a partir del aceite de sebo bovino.

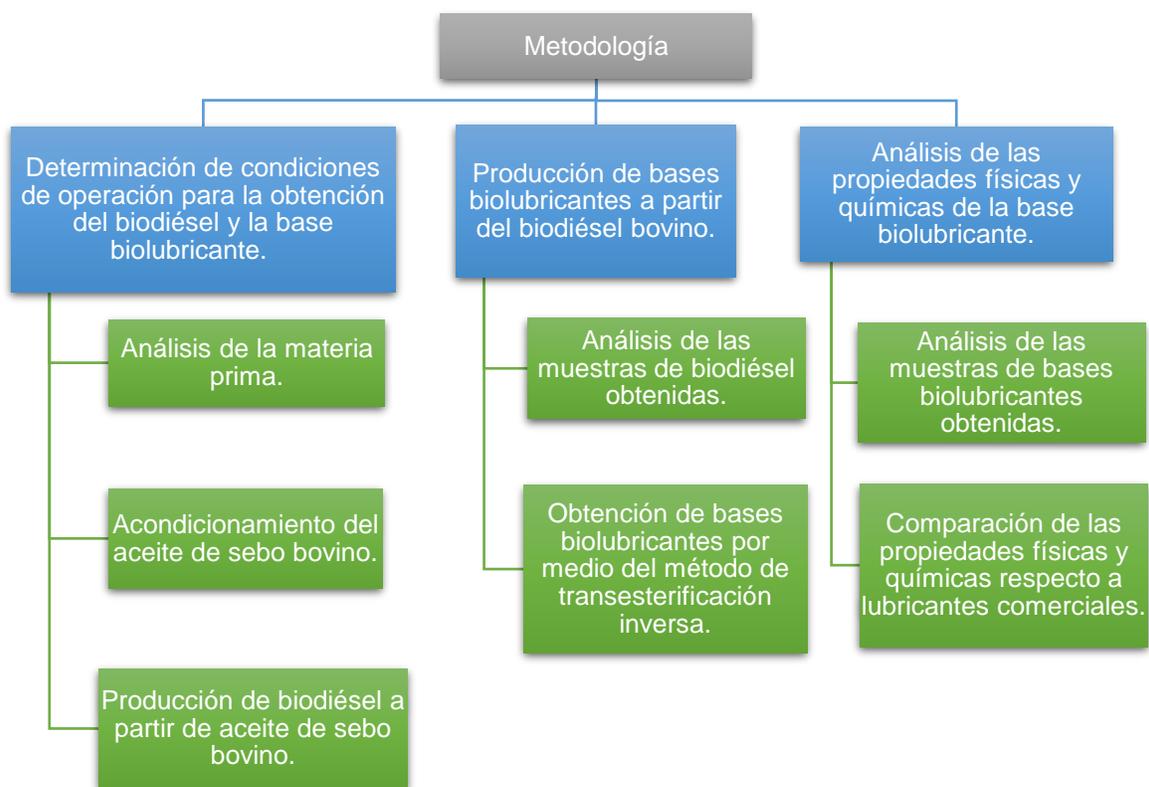
Obtener una base biolubricante a partir del biodiésel mejorado por medio del método de transesterificación inversa.

Comparar las propiedades físicas y químicas de las bases biolubricantes obtenidas con las de un tipo de base lubricante comercial a base de petróleo.

4. Metodología

Figura 3.

Metodología empleada en el proyecto de investigación.



Actividades: El avance de la metodología de investigación se llevó a cabo de acuerdo con el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos del proyecto:

4.1 Desarrollo del objetivo 1

Para el desarrollo del primero objetivo se realizaron las siguientes actividades:

4.1.1 Análisis de la materia prima obtenida de un proveedor regional (Harinagro S.A.)

El proveedor de sebo bovino fue la empresa HARINAGRO S.A. Entregaban las muestras de aproximadamente un kilogramo en envases de un litro de volumen. Previamente el sebo era acondicionado mediante calentamiento a 100-110°C, seguido de filtración al vacío para la separación del material particulado que podía venir con la muestra. El sebo fue analizado mediante la determinación de las siguientes propiedades:

- Índice de acidez (mg KOH/g sebo crudo) según norma UNE EN ISO 660 (versión 2021).
- Viscosidad cinemática (cSt) a 40°C y 100°C según norma ASTM D445 (versión 2018).
- Índice de viscosidad según norma ASTM D2270 (versión 2016).
- Análisis termogravimétrico mediante un 5500 DISCOVERY TA INSTRUMENTS utilizando nitrógeno como fluido inerte.

4.1.2 Acondicionamiento del aceite de sebo

Para disminuir el índice de acidez del aceite extraído de la grasa residual se aplicó un tratamiento de catálisis con ácido sulfúrico y metanol (ver Anexo A). Se implementó un diseño central compuesto con tres factores a evaluar: relación molar de moles de metanol: moles de sebo crudo, cantidad de catalizador %p/p (H₂SO₄) y tiempo de reacción (min) ver Anexo A. Evaluando

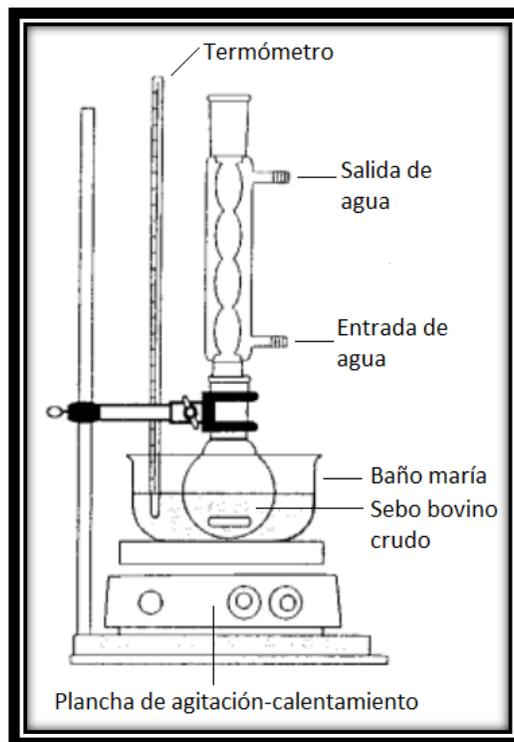
el índice de acidez y rendimiento (gramos de sebo esterificado/gramos de sebo crudo) como variables de respuesta y de determinación de las mejores condiciones.

Para la relación molar, siendo 7,5 moles de metanol: 1 mol de sebo crudo el punto central se escogieron puntos equidistantes (6,5 moles de metanol:1 mol de sebo crudo y 8,5 moles de metanol:1 mol de sebo crudo); con el porcentaje de catalizador de 1,25% p/p (1,1% p/p y 1,4% p/p); tiempo de reacción de 150 minutos (120 minutos y 180 minutos); con una temperatura fija de 60°C ya que según literatura y estudios previos en el grupo de investigación no es posible disminuirla en mayor medida, especialmente por la necesidad de calor del sebo bovino para derretirse adecuada y homogéneamente. El montaje (imagen de referencia) de reacción utilizado fue el mostrado en la figura 4.

Para cada muestra de sebo crudo se pesaron aproximadamente 50 gramos, los cuales eran calentados en un balón de fondo plano de 100ml en baño maría con un termómetro para controlar la temperatura. Esto se realizó sobre una plancha de calentamiento con agitación magnética de 500 revoluciones por minuto utilizando un condensador de reflujo total para evitar las pérdidas de metanol por evaporación.

Figura 4.

Imagen de referencia del montaje experimental.



Luego de finalizado el tiempo de reacción, se dejó enfriar la muestra de sebo esterificado durante dos horas con el objetivo de que este se solidificara y fuera posible remover el metanol en exceso junto al ácido sulfúrico que no reaccionó. Posteriormente se envasó para su análisis y se preparó para la obtención del biodiésel.

4.1.3 Producción de biodiesel a partir de aceite de sebo bovino

Con el fin de evaluar la producción de biodiésel, se implementó nuevamente un diseño central compuesto con dos variables de entrada: relación molar moles de metanol: moles de sebo esterificado y porcentajes de catalizador p/p (KOH) ver ANEXO B. Teniendo como variables a

evaluar el rendimiento y el porcentaje FAME (porcentaje de ésteres metílicos de ácidos grasos). Para la elaboración del biodiésel se realizó nuevamente el montaje de la figura 4 utilizando 50 gramos de muestra de sebo esterificado en un balón de fondo plano en baño maría, con un termómetro para controlar la temperatura de reacción. Se realizó sobre una plancha de calentamiento a 500 revoluciones por minuto y utilizando un condensador de reflujo total para impedir la evaporación del metanol.

Al finalizar el tiempo de reacción, se llevó la muestra a un embudo de decantación por 20 horas con el fin de separar la glicerina del biodiésel, además de realizar tres lavados de este último con agua acidulada y dos lavados con agua destilada. Posteriormente se llevó al horno a 105°C durante dos horas y luego se centrifugó a 4500 revoluciones durante 8 minutos para remover los excesos de agua que hayan podido permanecer, y finalmente se envasó para su análisis y utilización en la obtención de las bases biolubricantes.

4.2 Desarrollo del objetivo 2

Para el segundo objetivo se desarrollaron las siguientes actividades:

5.2.1 Análisis de las muestras de biodiesel obtenidas

Para el análisis de las muestras de biodiesel se puso a punto las siguientes técnicas:

- Índice de acidez (mg KOH/g biodiésel) según norma UNE EN ISO 660 (versión 2021).
- Determinación de los contenidos de ésteres metílicos de ácidos grasos (contenido FAME -lo cual indica su pureza-) según norma EN 14103 (versión 2011).

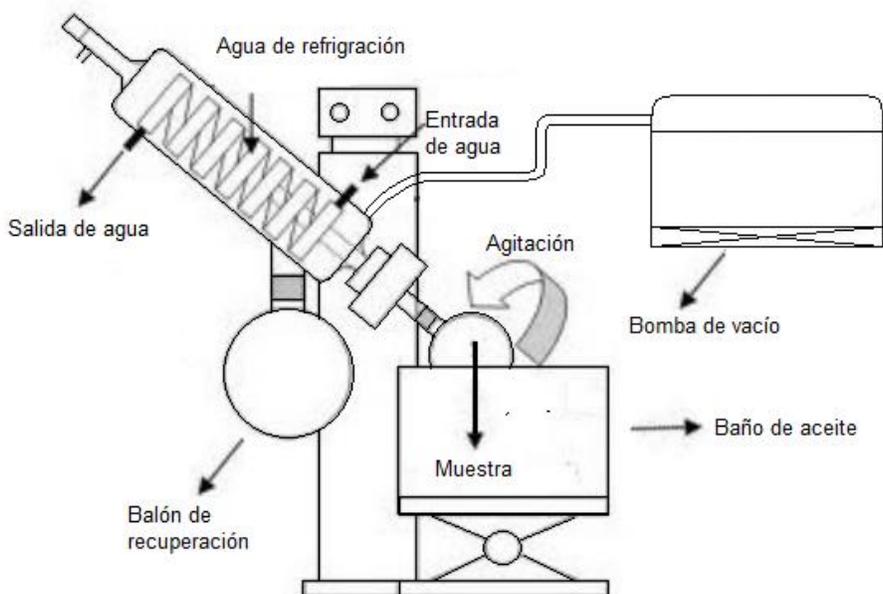
- Viscosidad cinemática (cSt) a 40°C y 100°C según norma ASTM D445 (versión 2018).
- Índice de viscosidad según norma ASTM D2270 (versión 2016).
- Análisis termogravimétrico (TGA).

4.2.2 Producción de bases biolubricantes a partir del biodiésel obtenido

En esta actividad se realizaron experimentos para la transesterificación del biodiésel de sebo bovino obtenido en la etapa anterior siguiendo un diseño factorial central compuesto (ver ANEXO C) tomando como referencias los valores de tiempo de reacción (3 horas), temperatura (120°C) y presión de vacío (50mbar) dados en estudios preliminares donde se obtuvieron mejores resultados lubricantes, teniendo como variables de entrada la relación molar moles de trimetilolpropano (TMP -poliol escogido-): moles de biodiésel y cantidad de catalizador % p/p (metóxido de sodio), los cuales fueron los que presentaron mejores resultados lubricantes en estudios anteriores con otras materias primas (aceite de pollo). El punto central de la experimentación fue la de una relación molar moles de TMP: moles de biodiésel bovino de 4:1, cantidad de catalizador %p/p (CH_3NaO) de 0,5% y tiempo de 180 minutos con puntos equidistantes de 3,5 moles de TMP:1 mol de biodiésel – 4,5 moles de TMP:1 mol de biodiésel, 0,45% p/p - 0,55% p/p y 160 minutos – 200 minutos respectivamente.

Figura 5.

Imagen de referencia del montaje experimental para la obtención de bases biolubricantes.



En la figura 5 se puede apreciar el montaje de reacción para la obtención de las bases biolubricantes. Se utilizaron muestras de 50 gramos de biodiésel bovino en un balón de evaporación de 250 ml para vacío en un rotoevaporador conectado a una bomba de vacío, además de un condensador para evitar pérdidas por evaporación. Se pesó la cantidad de poliol (TMP) requerido y volumen de catalizador (CH_3NaO), y se precalentaron hasta 60°C en el baño de aceite del rotoevaporador, cuando se alcanzó esta temperatura se mezcló con el biodiésel bovino que estaba siendo precalentado de igual manera a 60°C con el objetivo de evitar la formación de sustancias grumosas al inicio de la reacción. Luego se llevó toda la mezcla hasta una temperatura de 120°C donde se empezó a agitar a 80 rpm, luego se comenzó a aplicar el vacío cuidadosamente para evitar el reflujó de la muestra en el condensador hasta que se alcanzó la presión de vacío requerida (50 mbar) para dar comienzo al tiempo de reacción. Terminado el proceso, se envasó el

producto, el cual mediante centrifugación se separó en dos fases, una líquida y una grasa para su posterior análisis.

4.3 Desarrollo del objetivo 3

Finalmente, para alcanzar el tercer objetivo se llevaron a cabo las siguientes actividades:

4.3.1 Para el análisis de las muestras de bases biolubricantes obtenidos se determinaron las siguientes propiedades:

- Viscosidad cinemática (cSt) a 40°C según norma ASTM D445 (versión 2018).
- Viscosidad cinemática (cSt) a 100°C según norma ASTM D445 (versión 2018).
- Índice de viscosidad según norma ASTM D2270 (versión 2016).
- Análisis termogravimétrico (TGA).
- Punto de inflamación (°C) según norma ASTM D-92 (versión 2018).
- Estabilidad oxidativa (temperatura de oxidación) según norma EN 15751 (versión 2014).
- Punto de fluidez (°C) según norma ASTM D-97-17^a (versión 2017).
- Gravedad API según la norma ASTM D-287-12b (versión 2019).
- Índice de acidez (mg KOH/g base biolubricante) según norma UNE EN ISO 660 (versión 2021).

4.3.2 Evaluación de las propiedades físicas y químicas respecto a lubricantes comerciales

Se llevó a cabo una comparación de las propiedades físicas y químicas obtenidas previamente con las de un tipo de base lubricante comercial a base de petróleo y dos a partir de aceites vegetales (palma y jatropha) con el objetivo de elaborar un informe que permitiera determinar la idoneidad de la base dentro del mercado de lubricantes.

5. Resultados y Análisis

5.1 Análisis del sebo crudo

El sebo crudo bovino se encuentra en estado sólido a temperatura ambiente (ver ANEXO D), teniendo una consistencia dura y ligeramente viscosa, además de un color amarillo fuerte y un olor a grasa desagradable. Trabajar con esta materia prima fue un gran reto debido a la dificultad que presentaba para su manipulación por su consistencia compacta, por lo que era complejo extraer la cantidad exacta de muestra en cada prueba, además de contaminar en muchos casos los elementos de vidrio, aun así, la posibilidad de encontrar una utilidad para este residuo contribuyó al interés de continuar experimentando, teniendo siempre presente la experiencia que aportaría en el desarrollo profesional.

Los resultados de índice de acidez, densidad y viscosidad a 40°C se encuentran en la tabla 1. El índice de acidez promedio registrado para el sebo bovino crudo utilizado durante el desarrollo

del proyecto de investigación fue de 3,98 mgKOH/g sebo crudo, siendo este un valor bajo y que representa la buena calidad de materia prima que se adquiere del proveedor en comparación a estudios anteriores realizados en el grupo de investigación, en los que se contaba con valores de índice de acidez para el sebo crudo de 4,67 mgKOH/g sebo crudo (Prasca Cuello & Ortega Díaz, 2018) y 38,13 mgKOH/g sebo crudo (Ramírez García, 2016), así como los valores en estudios para la elaboración de biolubricantes a partir de aceite de palma con un valor de 6,35 mg KOH/ gramos de aceite de palma, aunque alto en comparación a los 1,5 mgKOH/gramos de sebo crudo en la implementación de una planta piloto para la obtención de biodiésel bovino ; estas diferencias se deben a los lotes desde los cuales es obtenido el sebo bovino, debido a que dependen en gran medida de las partes de la vaca de donde es extraído, como pueden ser sus vísceras, huesos, cuernos, entre otros, además del tipo de origen (animal o vegetal). Sin embargo, aunque era un sebo de buena calidad, fue necesario un tratamiento para disminuir su índice de acidez con el objetivo de obtener mejores resultados durante la obtención del biodiésel debido a la naturaleza de la reacción (transesterificación) el cual según norma EN 14104 el índice de acidez de este último debe estar por debajo de 0,5 mgKOH/g biodiésel, y de esta manera poder brindar la oportunidad de utilizar este sebo tratado en la obtención de otro tipo de productos como abono o alimento para ganado de mejor calidad.

Tabla 1.

Comparación de propiedades del sebo crudo con otras investigaciones.

Estudio	Tipo	Índice de Acidez (mgKOH/g grasa cruda)	Densidad (g/ml)	Viscosidad 40°C (cSt)	Índice de viscosidad
Esta investigación	Sebo bovino crudo	3,98	0,93	38,63	39,64
Estudio exploratorio (Prasca Cuello & Ortega Díaz, 2018)	Sebo bovino crudo	4,67	0,94	-	-
Biodiésel bovino (Ramírez García, 2016)	Sebo bovino crudo	38,13	0,92	35,78	-
Biodiésel planta piloto (da Cunha et al., 2009)	Sebo bovino crudo	1,5	-	-	-
Biolubricante aviar (Alejandra et al., 2018)	Aceite de pollo	15,10	0,99	38,38	293
Biolubricante vegetal (Heikal et al., 2017)	Aceite de palma	6,35	0,91	52,13	-

Por otra parte, se puede observar que el sebo bovino crudo no presenta mayores diferencias en sus propiedades (como la densidad o viscosidad) en comparación a otros sebos en otros estudios en los que también es utilizado, o, por ejemplo, en aquellos donde el aceite de pollo o el aceite de palma fue la materia prima. En otras palabras, se podría decir que la calidad del sebo bovino crudo es capaz de competir con otras materias primas, sin embargo, la propiedad de ser sólido a temperatura ambiente es lo que presenta una desventaja respecto a sus competidores debido a la dificultad que presenta su manipulación, además de su valor de índice de viscosidad en comparación al aceite de pollo crudo, que es mucho menor, lo que indica que su viscosidad varía considerablemente con los cambios de temperatura, siendo estas dos propiedades las razones por

las cuales un sebo bovino crudo no puede ser utilizado como lubricante. Por tanto, aunque es una materia prima con potencial, requiere de un acondicionamiento para mejorar sus propiedades, especialmente su índice de acidez, el cual se recomienda tenga un valor menor a 2 mg KOH/ g de sebo (Tacias Pascacio et al., 2016), esto debido a que, entre mayor sea el índice de acidez de un producto, mayor es su tendencia a la descomposición por la presencia de ácidos grasos libres saturados o insaturados, además de la formación de productos indeseados como jabones durante la reacción de transesterificación en la obtención del biodiésel.

5.2 Análisis del sebo mejorado mediante pre-esterificación con catálisis ácida

Con el fin de disminuir el índice de acidez de la grasa residual se aplicó un tratamiento de catálisis con ácido sulfúrico y metanol. Se llevó a cabo un diseño experimental mediante la implementación de un diseño central compuesto basado en el punto donde se obtuvo los mejores resultados en estudios previos, los cuales contemplaban una relación molar moles de metanol: moles de sebo crudo de 7,5:1; porcentaje de catalizador igual al 1,25% p/p, un tiempo de 150 minutos a una temperatura de 60°C (ver ANEXO B). Esto se realizó con el objetivo de disminuir las condiciones de operación y/o masa de reactivos manteniendo un bajo índice de acidez, así como un alto rendimiento de reacción.

Los resultados obtenidos para cada uno de los experimentos se encuentran expuestos en la tabla 2, en la cual es posible observar subrayado en azul (experimentos 7 y 9) las condiciones escogidas como punto central en esta experimentación, y por lo cual se puede comprobar la excelente reproducibilidad que tienen estas, puesto que presentan los valores más bajos de índice de acidez, así como altos rendimientos (sebo esterificado/sebo crudo). No obstante, uno de los

objetivos trazados para el acondicionamiento del sebo bovino crudo fue el de disminuir las condiciones de operación. Por tal motivo, el experimento 4 subrayado en amarillo fue el seleccionado para continuar con el desarrollo del proyecto, dado que reportó una disminución de la relación molar metanol: sebo crudo de 7,5:1 a 6,5:1, así como el porcentaje de catalizador (H_2SO_4) de 1,25% a 1,10% y tiempo de reacción de 150 minutos a 130 minutos, además de que no presentaba gran variación en su valor de índice de acidez (0,64 mgKOH/g sebo esterificado), al igual que en su rendimiento (98,29%, el cual es incluso mayor), siendo aun así apto para su utilización en la obtención del biodiésel bovino, el cual sería el precursor de las bases biolubricantes.

Tabla 2.

Resultados de rendimiento e índice de acidez de las pruebas de acondicionamiento de sebo.

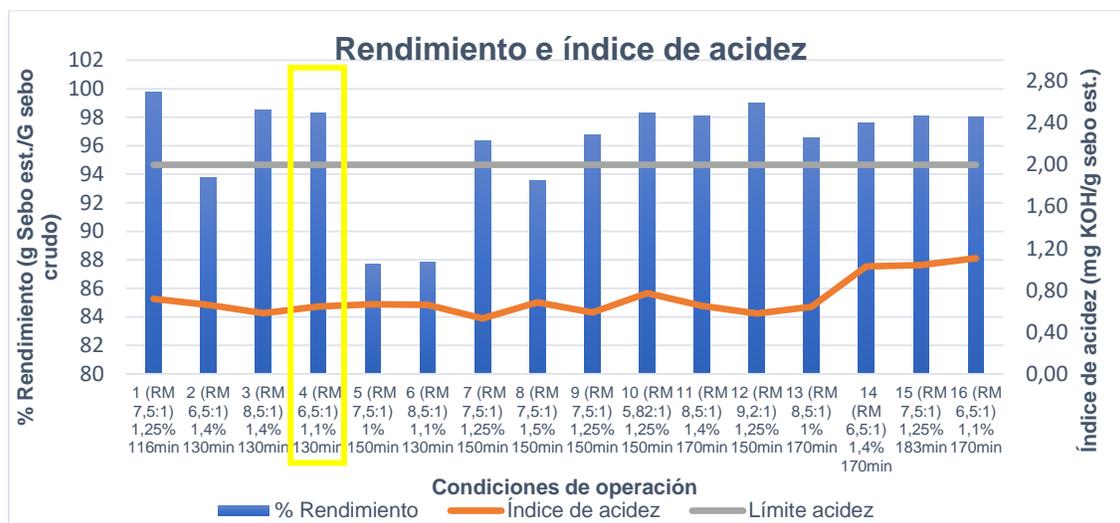
#	Relación molar (metanol: sebo crudo)	% p/p Catalizador (H_2SO_4)	T (°C)	Tiempo (min)	% Rendimiento (sebo est/sebo crudo)	Índice de acidez (mgKOH/g sebo est.)
1	7,50	1,25	60,00	116,36	99,77	0,72
2	6,50	1,40	60,00	130,00	93,79	0,66
3	8,50	1,40	60,00	130,00	98,50	0,58
4	6,50	1,10	60,00	130,00	98,29	0,64
5	7,50	1,00	60,00	150,00	87,69	0,67
6	8,50	1,10	60,00	130,00	87,84	0,66
7	7,50	1,25	60,00	150,00	96,37	0,53
8	7,50	1,50	60,00	150,00	93,54	0,68
9	7,50	1,25	60,00	150,00	96,79	0,59
10	5,82	1,25	60,00	150,00	98,31	0,77
11	8,50	1,40	60,00	170,00	98,06	0,65
12	9,18	1,25	60,00	150,00	99,02	0,58
13	8,50	1,00	60,00	170,00	96,55	0,64
14	6,50	1,40	60,00	170,00	97,59	1,03
15	7,50	1,25	60,00	183,64	98,12	1,04

#	Relación molar (metanol: sebo crudo)	% p/p Catalizador (H ₂ SO ₄)	T (°C)	Tiempo (min)	% Rendimiento (sebo est/sebo crudo)	Índice de acidez (mgKOH/g sebo est.)
16	6,50	1,10	60,00	170,00	98,02	1,11

Cabe resaltar que, aunque, los valores de 1-1,10 mg KOH/g sebo esterificado (muestras 14,15 y 16) no son altos en comparación al índice de acidez del sebo crudo, sí presentan un mayor valor respecto a los mejores resultados (0.53-0.66 KOH/g sebo esterificado). Se puede inferir que la razón de estos resultados se debe a los prolongados tiempos de operación, teniendo en cuenta que la reacción es reversible, por lo que puede suceder que a estos tiempos se comience a inclinar nuevamente hacia los compuestos iniciales (ácidos grasos libres y metanol), aumentando así el índice de acidez. Aun así, se cumple con obtener un índice de acidez menor a 2 mgKOH/g sebo esterificado (Tacias Pascacio et al., 2016), el cual era lo esperado para continuar con la obtención del biodiésel, el cual según norma EN 14214 el índice de acidez de este último debe estar por debajo de 0,5 mgKOH/g biodiésel.

Figura 6.

Rendimiento e índice de acidez de las muestras de sebo esterificado.



Con el fin de comprobar la reproducibilidad de las nuevas condiciones de operación para el acondicionamiento del sebo encontradas en la muestra 4 (ver gráfica 1), se llevó a cabo una nueva prueba de preesterificación en la cual se obtuvo un índice de acidez de 0,53 mgKOH/g sebo esterificado, donde nuevamente se obtuvo un lote para las pruebas preliminares en la elaboración del biodiésel, el cual arrojó un índice de acidez de 0,51 mg KOH/g sebo esterificado, observando que entre mayor era la cantidad de muestra de sebo crudo esterificado, mejores resultados en el índice de acidez eran obtenidos; esto puede ser debido a al aumento del volumen del recipiente, así como la longitud del agitador, lo que produce una mayor homogeneidad en la mezcla durante la reacción.

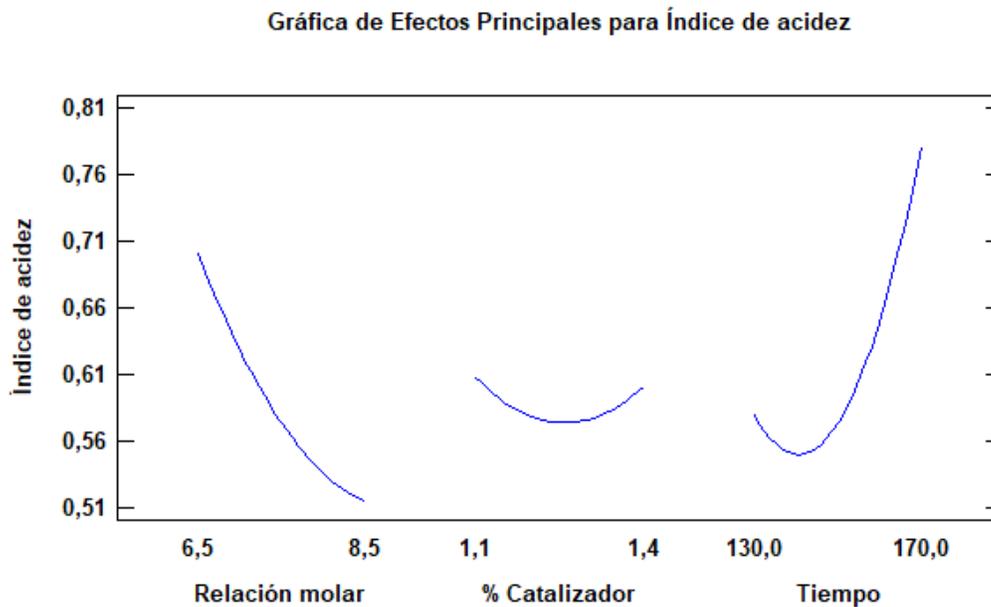
Por otra parte, con ayuda de la herramienta estadística *Statgraphics* (ver gráfica 2) se puede observar la influencia de las distintas condiciones de operación en el valor de índice de acidez del sebo esterificado. Según estos resultados se puede observar que a menor relación molar moles de metanol: moles de sebo crudo se aumenta el índice de acidez lo que puede deberse a que el exceso

de metanol utilizado no es suficiente y se está afectando el equilibrio de la reacción (la cual es reversible) llevando a que posiblemente no se lleve a cabo una conversión mayor de ácidos grasos libres a metil ésteres, aunque continúe presentando bajos valores de índice de acidez. Por otra parte, observando el comportamiento de la línea de tendencia podría afirmarse que a menores valores de relación molar seguirá aumentando el índice de acidez, por lo que se recomendaría no continuar disminuyendo este valor, aunque se podría considerar 6,5:1 el valor mínimo de moles de metanol que se podría utilizar con el fin de mantener los costos de producción más económicos sin perder calidad basados en el índice de acidez, el cual sigue teniendo un bajo valor que permite su utilización para la elaboración de otros productos.

Asimismo, respecto a los porcentajes p/p de catalizador (H_2SO_4), se puede observar que se encuentran en un rango que podría considerarse óptimo, debido a que los valores de índice de acidez no se ven afectados en gran medida con el cambio en el porcentaje, por lo cual se puede recomendar mantener este en 1,1% p/p con el mismo objetivo del caso anterior, el de disminuir los costos de operación. Cabe resaltar que respecto al tiempo sí se confirmó que a prolongados tiempos de reacción (teniendo en cuenta nuevamente que es reversible) la efectividad de esta se ve afectada aumentando el índice de acidez.

Figura 7.

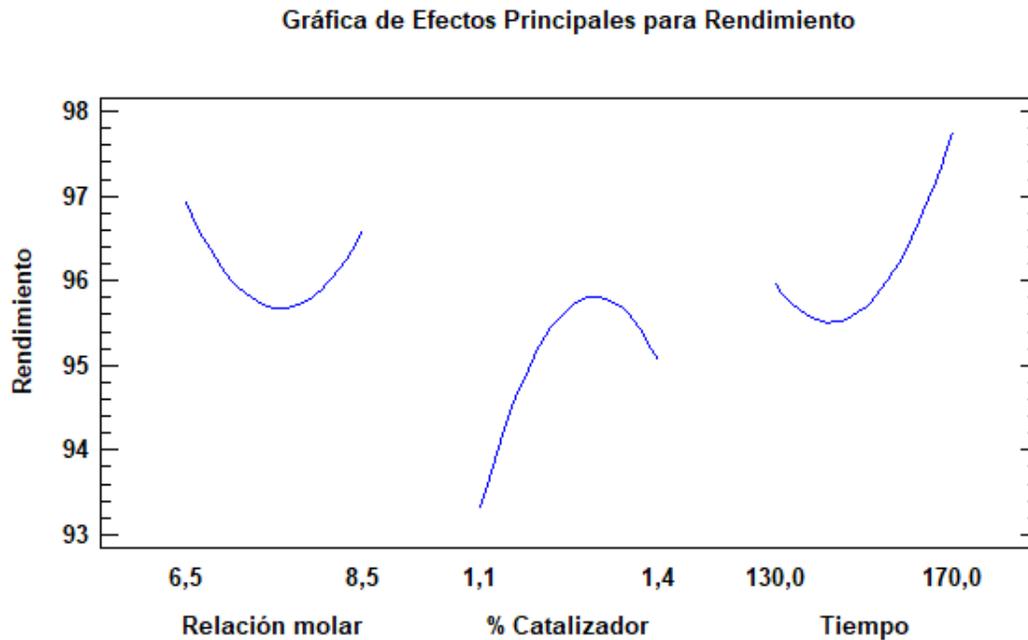
Efecto de las variables principales en el índice de acidez del sebo esterificado.



Por otro lado, respecto a la gráfica 3 que muestra el efecto de las condiciones de operación sobre el rendimiento, se puede confirmar la tendencia a disminuir la efectividad de la reacción a menores porcentajes de catalizador p/p (H_2SO_4) y tiempo de reacción donde se observa que el rendimiento disminuye, aunque en este caso a menores valores de relación molar se da un aumento del rendimiento y ratifica la posibilidad de mantener ese valor mínimo como el adecuado para la reacción de esterificación. Con relación al tiempo se da un efecto contrario debido a que a mayores tiempos de reacción se obtienen mejores rendimientos, pero lo cual no puede ser considerado por el aumento del índice de acidez que genera.

Figura 8.

Efecto de las variables principales en el rendimiento del sebo esterificado.



Por otra parte, en la tabla 3 se observan nuevamente los valores de índice de acidez, densidad, viscosidad para el sebo esterificado y sebo crudo de esta investigación, así como los de otros estudios en los que se utilizó sebo bovino, aceite de pollo y aceite de palma, ya sea para la elaboración de biodiésel o biolubricantes. Es necesario resaltar que, durante los experimentos de reproducibilidad a las condiciones escogidas con anterioridad por sus menores condiciones de operación, se logró disminuir el índice de acidez desde un valor de 3,98 mgKOH/g sebo crudo a 0,51 mgKOH/g sebo esterificado.

Tabla 3.

Comparación de las propiedades del sebo esterificado con otras investigaciones.

Estudio	Tipo	Índice de Acidez (mgKOH/gSebo)	Densidad (g/ml)	Viscosidad 40°C (cSt)	Índice de viscosidad
Esta investigación	Sebo bovino esterificado	0,51	0,92	28,52	49,48
Esta investigación	Sebo bovino crudo	3,98	0,93	38,63	39,64
Estudio Exploratorio (Prasca Cuello & Ortega Díaz, 2018)	Sebo bovino esterificado	0,50	-	-	-
Biodiésel Bovino (Ramírez García, 2016)	Sebo bovino esterificado	1,05	-	21,49	-
Biolubricante aviar (Alejandra et al., 2018)	Aceite de pollo esterificado	0,58	0,95	26,79	472
Biolubricante vegetal (Heikal et al., 2017)	Aceite de palma	6,35	0,91	52,13	-

En comparación al estudio llevado a cabo para la obtención de biodiésel a partir de sebo bovino en el grupo de investigación INTERFASE (Ramírez García, 2016), se obtuvo mejores valores de índice de acidez, comprobando la confiabilidad y reproducibilidad de los procedimientos llevados a cabo con anterioridad. A su vez, se obtiene un mejor índice de acidez que el aceite de pollo esterificado utilizado en la obtención de un biolubricante, estudio llevado a cabo de igual manera en el grupo de investigación (Alejandra et al., 2018), además de un valor aún más bajo que el índice de acidez del aceite de palma, que, aunque no fue sometido a un tratamiento, sí fue utilizado para la obtención de un biolubricante (Heikal et al., 2017). Respecto al índice de viscosidad, se observa que aumentó respecto al del sebo bovino crudo, lo cual es un indicativo

favorable de que las propiedades lubricantes están mejorando, pero aún sigue un índice bajo para ser considerado como una sustancia lubricante, debido a que sufriría cambios significativos en su viscosidad en función de la temperatura, siendo la razón principal que a temperatura ambiente el sebo esterificado sigue siendo sólido, con una consistencia más blanda que el sebo bovino crudo y un color amarillo más claro (ver ANEXO E). Por lo que se puede asegurar que aún es necesario aplicar otros procedimientos para obtener un producto de mayor calidad que pueda ser enfocado en la obtención de productos industriales como los lubricantes.

5.3 Análisis del biodiésel de sebo bovino obtenido

Con el fin de evaluar la producción de biodiésel de sebo, se realizaron experimentos para la transesterificación del aceite de sebo acondicionado en la etapa anterior, en la cual se logró reducir las condiciones de operación respecto a estudios anteriores, además de un bajo índice de acidez y alto rendimiento (Ramírez García, 2016)(Soldi et al., 2009). Para este caso también se implementó un diseño central compuesto donde se tuvieron como variables de entrada la relación molar moles de metanol: moles de sebo esterificado y cantidad de catalizador % p/p de KOH (debido a que sobre las variables temperatura y tiempo de reacción se ha llevado un mayor control en estudios anteriores, por lo cual se esperaba obtener un resultado variando las ya mencionadas condiciones de operación). Se evaluó el rendimiento (medido como los gramos de biodiésel obtenidos por cada 100 gramos de sebo esterificado utilizado). Como base se tomó el punto donde se registraron mejores resultados en estudios anteriores, como lo son las condiciones fijas de temperatura de 60°C y tiempo de reacción de 120min, así como las variables para tener en cuenta de relación molar de 7,5 metanol: sebo pre-esterificado y 0,75% de catalizador (KOH). Se esperaba

disminuir nuevamente las condiciones de operación para esta etapa, manteniendo un alto rendimiento y porcentaje FAME. Se tomaron puntos equidistantes a los puntos centrales, para el caso del catalizador fueron de 0,6% y 0,9%, para la relación molar fue de 6,5 y 8,5 (ver ANEXO C).

Se decidió analizar solo dos muestras (10 y 11) teniendo en cuenta los porcentajes de rendimiento (ver gráfica 2) gramos de biodiésel / gramos de sebo esterificado obtenidos, debido a que se observaron bajos valores en aquellas muestras que no fueron elaboradas bajo las condiciones utilizadas en estudios previos (relación molar moles de metanol : mol de sebo esterificado de 7,5:1 y 0,75% p/p de catalizador KOH), donde arrojaron resultados de %FAME >90% (Prasca Cuello & Ortega Díaz, 2018), siendo este un parámetro fundamental con relación a la cantidad de materia prima inicial que sería necesaria, y que permitía continuar con la experimentación y objetivo el cual era la elaboración de bases biolubricantes, además, por ser el punto central, fueron repetidas estas condiciones dando resultados similares de FAME de 90,70% para la muestra 10 y 91,88% para la muestra 11, y aunque no es un biodiésel apto para su comercialización como biocombustible en el sector transporte, sí puede ser utilizado como materia prima para la obtención de bases biolubricantes; estas muestras tenían el olor característico del biodiésel sin perder el de su origen animal (olor a grasa -ver Anexo G-).

Tabla 4.

Resultados de rendimiento, densidad e índice de acidez de las muestras de biodiésel.

#	RM (metanol: sebo est.)	% Cat. (KOH)	% Rendimiento (g Biod/G Sebo est.)	Densidad (g/ml)	Índice de acidez (mgKOH/g Biod.)	% FAME
1	6,50	0,60	75,91	0,92	0,16	-
2	6,50	0,90	72,68	0,92	0,10	-

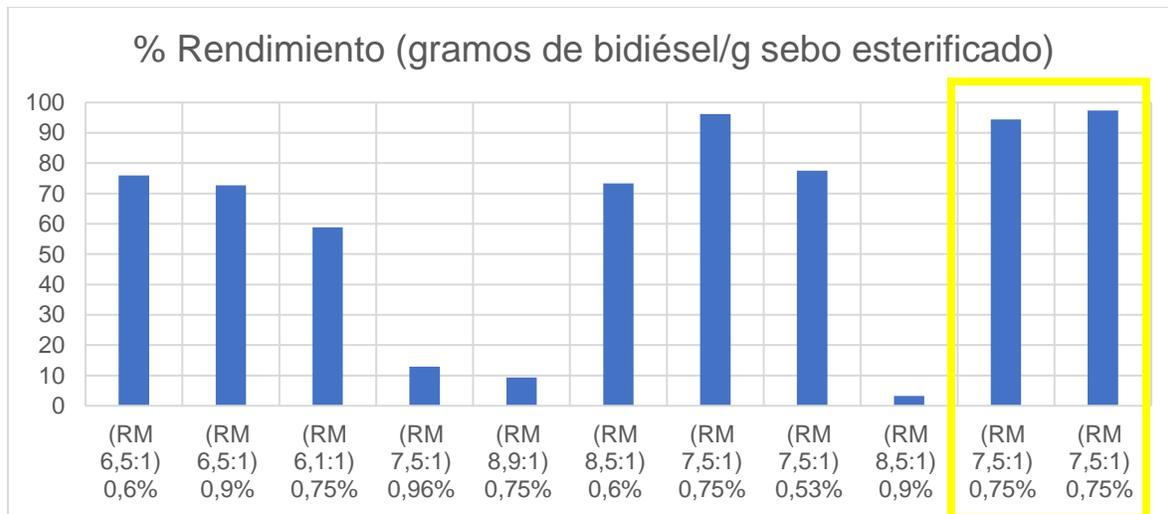
#	RM (metanol: sebo est.)	% Cat. (KOH)	% Rendimiento (g Biod/G Sebo est.)	Densidad (g/ml)	Índice de acidez (mgKOH/g Biod.)	% FAME
3	6,09	0,75	58,80	0,92	0,17	-
4	7,50	0,96	12,85	-	-	-
5	8,91	0,75	9,33	-	-	-
6	8,50	0,60	73,33	0,92	0,33	-
7	7,50	0,75	96,23	0,91	0,28	-
8	7,50	0,53	77,48	0,92	0,27	-
9	8,50	0,90	3,25	-	-	-
10	7,50	0,75	94,42	0,92	0,32	90,70
11	7,50	0,75	97,36	0,92	0,29	91,88

Además, se puede observar que en tres casos (4,5 y 9) se obtuvo un rendimiento muy bajo (ver gráfica 4), ya que se generaba una sustancia grumosa en el producto obtenido, condición que no es característica del biodiésel por lo que se infiere que no se completó la reacción correctamente. Existe la posibilidad de que se formara otro tipo de productos como jabones o ceras, situación que se puede dar debido a la alta concentración de metanol y/o catalizador, condiciones que se dan en los tres casos. Por su parte, el índice de acidez de las muestras se redujo en mayor medida en esta etapa del proceso, llegando a valores de incluso 0,10 mgKOH/g biodiésel, condición muy deseada y favorables para el biodiésel como lo indica la norma EN 14104 que estipula un índice de acidez <0,50 mgKOH/g biodiésel, llegando incluso a superar los resultados obtenidos por Espinosa da Cunha et. al. quienes obtuvieron valores promedio de índice de acidez para su biodiésel de 0,64 mgKOH/ gramos de biodiésel (Espinosa et al., 2009) o lo realizado por Frohlich et. al. quienes obtuvieron un valor de 1,45 mgKOH/ gramos de biodiésel (Fröhlich et al., 2010), lo que además indica que los ácidos grasos libres presentes en las muestras disminuyen a través del proceso y que en su mayoría se habrá formado metil ésteres, y que, aunque no era el objetivo principal de la

investigación, sí se logra obtener una materia prima de calidad para la obtención de las bases biolubricantes.

Figura 9.

Rendimiento de las muestras de biodiésel obtenidas.



5.4 Análisis de las muestras de bases biolubricantes obtenidas

En esta actividad se realizaron experimentos para la transesterificación inversa del biodiésel de sebo bovino obtenido en la etapa anterior siguiendo un diseño factorial central compuesto tomando como referencias los valores de tiempo de reacción (3 horas) y temperatura (120°C), teniendo como variables de entrada la relación molar moles trimetilolpropano (TMP - polioliol escogido-) a moles de biodiésel y cantidad de catalizador %p/p (metóxido de sodio), los cuales fueron los que presentaron mejores resultados lubricantes en estudios anteriores con otras materias primas como aceite de jatropha por Kamil et. al. (Kamil et al., 2011), aceite de palma por Heikal et. al. (Heikal et al., 2017) o aceite de pollo (Alejandra et al., 2018). El punto central de la

experimentación fue la de una relación molar TMP: biodiésel bovino de 4:1, cantidad de catalizador (CH_3NaO) de 0,5% y tiempo de 180 minutos con puntos equidistantes de 3,5:1 – 4,5:1, 0,45% - 0,55% y 160 minutos – 200 minutos respectivamente. Los resultados de esta experimentación para los cuales se prepararon 50 gramos por cada muestra (biodiésel bovino) se presentan en la tabla 5.

Tabla 5.

Resultados de viscosidad, índice de viscosidad y clasificación ISO VG de las muestras de bases biolubricantes.

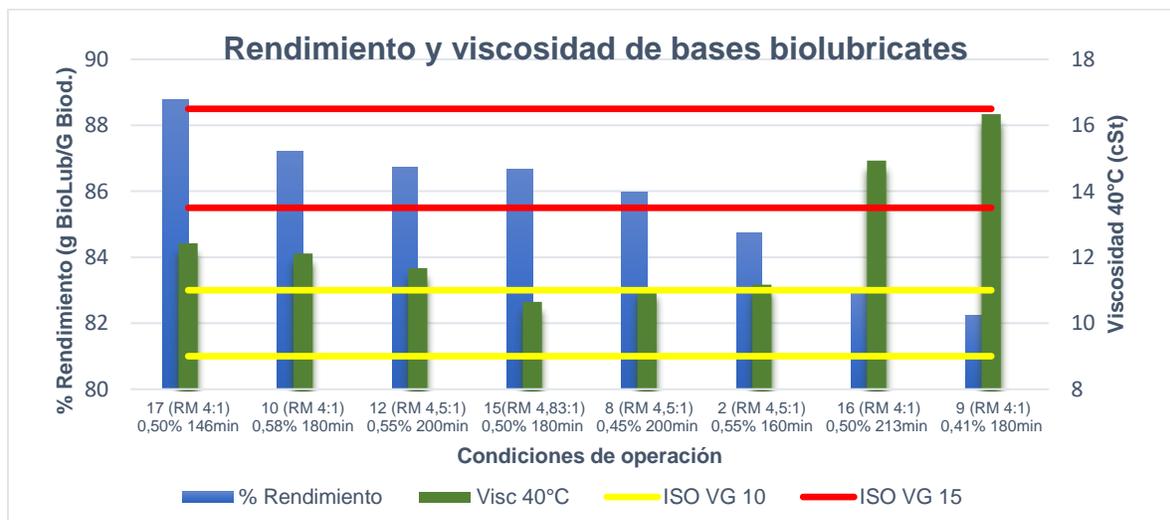
#	RM (TMP: Biod.)	% Cat. (CH_3NaO)	Tiempo (min)	Grasa/líquido (%)	% Rend. (g BioLub/g Biod.)	V 40°C (cSt)	V 100°C (cSt)	Índice de Visc. LÍq.	ISO VG
17	4,00	0,50	146,53	58,90/41,10	88,79	12,42	3,42	139,87	15
10	4,00	0,58	180,00	70,00/30,00	87,21	12,11	3,48	159,07	15
12	4,50	0,55	200,00	26,69/73,31	86,73	11,67	3,42	164,70	15
15	4,83	0,50	180,00	34,33/65,67	86,67	10,65	3,82	289,16	10
8	4,50	0,45	200,00	34,12/65,88	85,98	11,06	3,57	217,10	10
2	4,50	0,55	160,00	44,67/55,33	84,73	11,17	3,42	183,80	10
16	4,00	0,50	213,46	22,95/77,05	82,91	14,93	4,05	164,60	15
9	4,00	0,41	180,00	28,41/71,59	82,24	16,34	4,38	175,36	15
3	3,50	0,55	160,00	40,23/59,77	79,60	18,13	2,90	N/A	
6	3,50	0,55	200,00	11,46/88,54	77,94	16,75	2,70	N/A	
13	4,50	0,45	160,00	21,07/78,93	76,86				
5	4,00	0,50	180,00	14,58/85,42	75,62				
4	4,00	0,50	180,00	29,88/70,12	73,60				
1	3,50	0,45	160,00	26,17/73,83	73,21				
7	4,00	0,50	180,00	29,86/70,14	72,28				
14	3,50	0,45	200,00	38,19/61,81	69,76				
11	3,16	0,50	200,00	19,71/80,29	65,04				

En la tabla de resultados se puede observar los resultados de rendimiento, el cual está dividido en dos partes, puesto que se obtiene una sustancia lubricante en dos fases, una grasa y una

líquida (ver ANEXO G). En esta etapa se consideró caracterizar solo la fase líquida, a la cual se le halló la viscosidad a 40°C y 100°C con el objetivo de determinar su índice de viscosidad y clasificarlas según normas para lubricantes ISO VG (American Society for Testing and Materials, n.d.). Asimismo, se escogieron las 10 mejores muestras según su rendimiento para considerarlas como viables para su posterior elaboración; cabe aclarar que se tuvo en cuenta tanto la fase líquida como la grasa para lo relacionado al rendimiento, dado que la grasa tiene una consistencia aparentemente lubricante también. Por su parte, las muestras 3 y 6 fueron descartadas debido a que sus valores de viscosidad hacían que el índice de viscosidad fuera negativo, lo que puede ser señal de que su índice es inferior al valor utilizado como referencia, es decir, el valor cero (American Society for Testing and Materials, n.d.). Por su parte, según la viscosidad de cada muestra y la clasificación ISO VG para lubricantes, se pudo determinar que las muestras 15, 8 y 2 podrían ser clasificadas dentro de la norma ISO VG 10, la cual requiere cumplir con una viscosidad a 40°C de entre 9,00 y 11,0 cSt (American Society for Testing and Materials, n.d.). Asimismo, las muestras 17, 10, 12, 16 y 9 pueden ser clasificados como lubricantes de grado ISO VG 15, el cual exige una viscosidad a 40°C entre 13,5 y 16,5 cSt (American Society for Testing and Materials, n.d.) (ver gráfica 5). Todas las muestras poseen un alto índice de viscosidad, propiedad indispensable en los lubricantes que demuestra qué tanto variará la viscosidad con los cambios de temperatura, por lo cual, entre mayor sea este índice, menor será el cambio de viscosidad en función de la temperatura. Se debe resaltar que según la clasificación que obtuvieron estas muestras, podrían tener una potencial aplicación dentro del mercado de lubricantes hidráulicos (Crown Oil, 2021)(Petroleum Service, 2021), aunque es necesario llevar a cabo un estudio más profundo de sus propiedades como se hace a continuación.

Figura 10.

Resultados de viscosidad, índice de viscosidad y clasificación ISO VG de las muestras de bases biolubricantes.

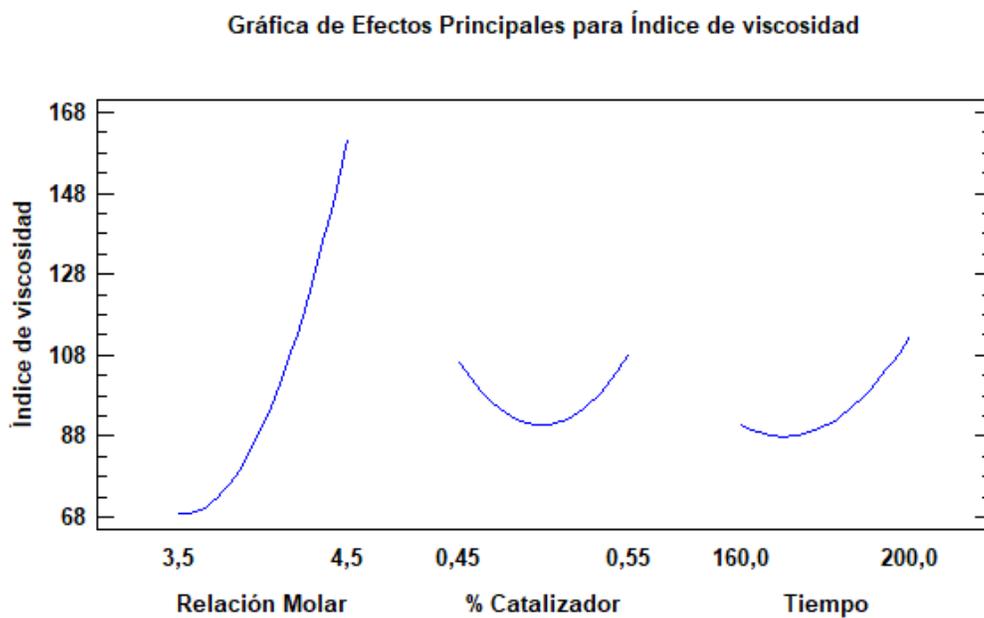


En esta etapa se realizó nuevamente un análisis de las gráficas de efectos de las condiciones de operación sobre los resultados de índice de viscosidad y rendimiento de las bases biolubricantes. Para el caso del índice de viscosidad (ver gráfica 6) se observa que a mayor valor de relación molar moles de TMP: moles de biodiésel bovino se obtienen mejores valores de índice de viscosidad, la cual es quizá la propiedad más importante de un lubricante, esto puede ser que, debido al exceso de TMP existe una mayor conversión de este a polioles ésteres al entrar en contacto con el biodiésel bovino y el catalizador, teniendo en cuenta que esta también es una reacción reversible, por lo que el exceso podría estar favoreciendo la inclinación de la reacción hacia el producto deseado. Respecto al porcentaje de catalizador p/p de CH_3NaO se observa que según la línea de tendencia que se genera a menores cantidades, podría estudiarse la posibilidad de disminuir el porcentaje de catalizador suponiendo que se obtendrán mayores valores de índice de viscosidad. Finalmente, evaluando la incidencia del tiempo sobre el índice de viscosidad se percibe un leve incremento a

medida que aumenta la duración de la reacción, pero así mismo lo harían los costos de producción, por lo que debería realizarse un estudio económico que ayude a determinar la viabilidad de priorizar un alto índice de viscosidad sobre un prolongado tiempo de reacción según sean los requerimientos del producto.

Figura 11.

Efecto de las variables principales en el índice de viscosidad de la base biolubricante líquida.

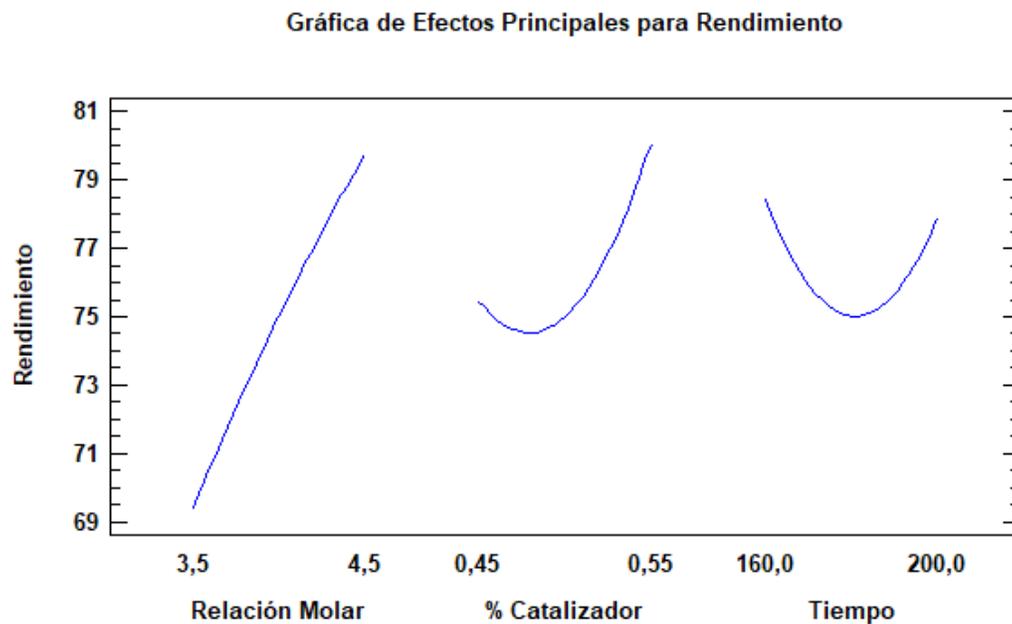


Por otro lado, con relación al efecto de las variables de operación en el rendimiento se obtienen los resultados dados en la gráfica 7. Se observa nuevamente que la variable que tiene mayor incidencia es la relación molar moles de TMP: moles de biodiésel bovino, presentando las mayores variaciones según cambian sus valores, lo cual puede deberse de igual manera a la necesidad de exceso de TMP que incline la reacción hacia los productos deseados (polioles éster), por lo que a mayores cantidades de TMP, se obtienen mejores rendimientos. Respecto al porcentaje

de catalizador (% p/p de CH_3NaO) se observa que a mayores valores se obtienen mejores rendimientos, pero que, según la línea de tendencia a menores concentraciones de catalizador podrían encontrarse mejores rendimientos de igual manera, abriendo la posibilidad de continuar estudiando esta variable. Por otra parte, el tiempo de reacción indica que a menores tiempos se favorece el parámetro de rendimiento, por lo que se recomienda ser estudiado en investigaciones posteriores.

Figura 12.

Efecto de las variables principales en el rendimiento de la base biolubricante líquida.



Por otra parte, con el fin de evaluar la reproducibilidad de la experimentación, aunque todas las muestras seleccionadas anteriormente presentaban valores similares de viscosidad y altos índices de viscosidad, se escogieron dos muestras, la de menor tiempo de reacción (muestra 17 con 143,53 minutos) y la de menor % de catalizador (muestra 9 con 0,41%), esto con el fin de

priorizar la disminución de las condiciones de operación y/o masa de reactivos. Por lo tanto, se realizaron nuevamente experimentos para la obtención de bases biolubricantes bajo estas condiciones con muestras de 200 gramos de biodiésel bovino, dando como resultados los valores presentados en la tabla 6:

Tabla 6.

Resultados de viscosidad, índice de viscosidad y clasificación ISO VG de las dos muestras de bases biolubricantes seleccionadas.

#	RM TMP: Biod.	% Cat (CH ₃ NaO)	Tiempo (min)	% Grasa/Líqu	% Rend. (g BioLub/g Biod.)	V 40°C (cSt)	V 100°C (cSt)	Índice de Visc. Líqu.	ISO VG
9L	4,00	0,41	180,00	36,48/63,52	87,46	14,67	4,30	202,62	15
17L	4,00	0,50	146,53	56,45/43,55	79,16	27,16	6,85	218,80	22

En esta etapa se obtuvo nuevamente dos sustancias lubricantes en dos fases, una líquida y una grasa, siendo la primera a la cual se le halló nuevamente viscosidad a 40°C y 100°C con el fin de obtener su índice de viscosidad, presentando una clasificación similar a los de la primera experimentación para estas mismas condiciones de operación, conservando un alto índice de viscosidad, además, la muestra 9 continuó bajo la clasificación ISO VG 15, pero subiendo de escala la muestra 17 a la clasificación ISO VG 22, esto debido a los valores cercanos de viscosidad para esta clasificación. Sin embargo, según la clasificación ISO VG estos productos se pueden seguir catalogando dentro de la potencial aplicación como aceites hidráulicos a pesar de subir un grado ISO VG en el caso de la muestra 17.

Finalmente, se decidió llevar a cabo una última experimentación en la cual se escogieron las condiciones de la muestra 9L, dado que fueron las condiciones de operación más consistentes (resultados similares) en cuando a sus valores de viscosidad e índice de viscosidad, además de la

necesidad de obtener mayor cantidad de sustancia para un análisis más profundo del biolubricante, por lo que trataron 375 g de biodiésel bovino; los resultados de esta prueba (9F) fueron los siguientes (Tabla 7):

Tabla 7.

Resultados de viscosidad, índice de viscosidad y clasificación ISO VG de la muestra de base biolubricante final seleccionada.

#	RM TMP: Biod.	% Cat (CH ₃ NaO)	Tiempo (min)	% Grasa/líqu	% Rend. (g BioLub/g Biod.)	V 40°C (cSt)	V 100°C (cSt)	Índice de Visc. de Visc. Líqu.	ISO VG
9F	4	0,41	180	37,38/62,62	88,53	12,74	3,71	196,84	15

Es destacable que una vez más se obtuvo valores de viscosidad similares a los de experimentaciones previas, por lo que es factible asegurar que las condiciones de operación reproducen satisfactoriamente los resultados de viscosidad a 40°C y 100°C, además de mantener un alto índice de viscosidad, el cual ha ido en aumento a medida que aumenta la cantidad de muestra utilizada, siendo la posible razón el hecho de que a mayor cantidad, mejor es la homogeneidad de la mezcla y, por lo tanto, la efectividad de la reacción. Es posible clasificar de nuevo esta sustancia lubricante (fase líquida) dentro de la clasificación ISO VG 15 para lubricantes, además, según los resultados de su gravedad específica posee un grado API de 25,72, por lo que si se analizara desde una perspectiva de la clasificación para crudos estaría situado en la categoría de crudo medio o liviano, el cual contiene concentraciones medias de cadenas hidrocarbonadas y se utiliza para obtener combustibles y como materia prima para la obtención de parafinas y polímeros, lo que genera otro potencial campo de aplicación (Monteiro dos Santos et al., 2018).

5.4.1 Comparación de las propiedades de la base biolubricante líquida seleccionada con materias primas precursoras

Como se describió en la metodología, se llevó a cabo la determinación del índice de acidez y la viscosidad a 40°C a cada uno de los productos que se iban obteniendo a medida que se avanzaba en el proceso (ver ANEXO H), dando como resultado la siguiente comparación (ver tabla 8). Se observa en primera instancia cómo siguió disminuyendo el índice de acidez de las muestras a medida que se sometían a los procesos de conversión, siendo el de la base biolubricante seleccionada menor que el obtenido para el biolubricante a base de aceite de jatropha elaborado por Heikal et. al. el cual fue de 0,52 mg KOH/g de biolubricante e incluso el del biolubricante aviar el cual fue de 0,28 mg KOH/g de biolubricante.

Por otra parte, aunque en la densidad no se dan diferencias significativas, sí ocurre con los valores de viscosidad, puesto que va disminuyendo a medida que se transforma la materia prima, donde para el biodiésel se tiene un valor de viscosidad de 5,18 cSt, el cual aumenta al ser transformado en base biolubricante, que, aunque es bajo en comparación a los demás estudios, es posible clasificar como lubricante de grado ISO VG 15 debido a su viscosidad y alto índice de viscosidad. Estas diferencias solo determinan el posible uso que podría llegar a tener un lubricante, más no se refiere a la calidad de este, por lo que no descarta su aplicación como tal, la cual estaría enfocada como aceite hidráulico. Ante dicha situación, cabe resaltar el alto índice de viscosidad (196,84) que se obtuvo para la base biolubricante de sebo bovino en esta investigación, siendo esta mayor que la de la sustancia lubricante del estudio exploratorio y la del biolubricante a partir de aceite de jatropha, confirmando así que se están obteniendo propiedades lubricantes en la base biolubricante a partir de sebo bovino.

Tabla 8.

Comparación de las propiedades de la base biolubricante con las materias primas precursoras y de otras investigaciones.

Estudio	Tipo	Índice de Acidez (mgKOH/gSebo)	Densidad (g/ml)	Viscosidad 40°C (cSt)	Índice de viscosidad
Esta investigación	Sebo bovino crudo	3,98	0,93	38,63	39,64
Esta investigación	Sebo bovino esterificado	0,51	0,92	28,52	49,48
Esta investigación	Biodiésel bovino	0,30	0,92	5,18	358
Esta investigación	Base biolubricante	0,08	0,90	12,74	196,84
Estudio Exploratorio (Prasca Cuello & Ortega Díaz, 2018)	Sustancia lubricante	-	-	31,04	177
Biolubricante aviar (Alejandra et al., 2018)	Biolubricante Aviar	0,28	0,97	31,30	341
Biolubricante vegetal (Heikal et al., 2017)	Biolubricante de jatropha	0,52	0,90	51,89	140

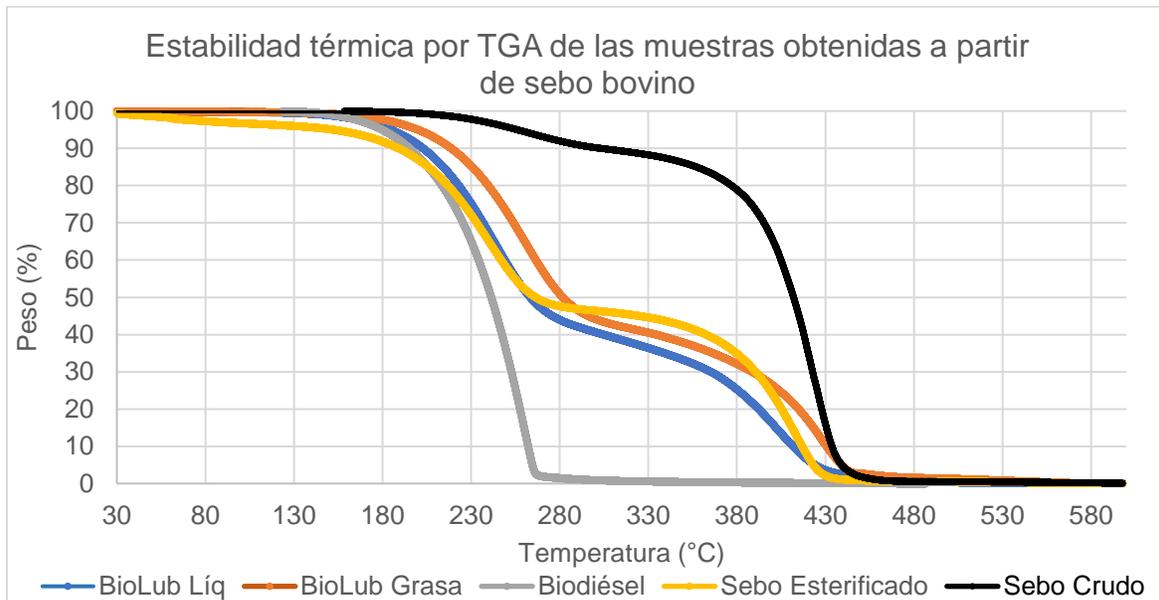
5.4.2 Análisis termogravimétrico

A continuación, en la figura 6 se presentan los resultados del análisis termogravimétrico que se realizó a las muestras que se obtuvieron durante el desarrollo de la experimentación, desde el sebo crudo, así como el sebo esterificado, biodiésel y finalmente las muestras de bases biolubricantes líquida y grasa. Se observa una resistencia térmica similar entre las muestras de

bases biolubricantes y el sebo esterificado, sin embargo, el sebo esterificado comienza a perder peso a una menor temperatura (ver tabla 9), mientras que el sebo crudo presenta una mayor resistencia al comenzar con una descomposición del 7,5% alrededor de los 275°C, además de mantener la mayoría de su composición (80%) hasta la temperatura más alta (380°C) en comparación a las demás muestras, siendo el biodiésel el menos resistente (temperatura de descomposición total de 280°C), siendo esta razón por la cual el biodiésel no podría ser considerado como una sustancia lubricante al tener tan baja resistencia a la descomposición por cambios de temperatura, esto a pesar de poseer un alto índice de viscosidad (358) como se observó en la tabla 8.

Figura 13.

Análisis TGA de las muestras obtenidas durante la experimentación.



Estas diferencias en la resistencia térmica de los productos obtenidos en cada paso demuestran que su estructura ha estado variando conforme se ha llevado a cabo las reacciones de

esterificación, transesterificación y transesterificación inversa, puesto que, aunque son compuestos derivados de la misma materia prima (sebo bovino), presentan distintos comportamientos de descomposición. El sebo bovino crudo sobresale debido a su estructura química, debido a que presenta gran cantidad de ácidos grasos compuestos de cadenas carbonadas de mayor longitud, las cuales presentan mayor dificultad de rompimiento, mejorando la resistencia térmica.

Tabla 9.

Pérdida de peso de las muestras obtenidas durante experimentación.

% Perdida	S Crudo	S Est.	Biod.	BBLíqu.	BBGrasa
7,5% (°C)	275	175	185	193	216
50% (°C)	412	268	240	265	280
100% (°C)	570	530	360	540	550

Por el contrario, el biodiésel al estar compuesto por cadenas más cortas (mezcla de ésteres de ácidos grasos) presenta la mayor susceptibilidad a descomponerse por acción de la temperatura, por lo que, a pesar de su alto índice de viscosidad, no podría ser utilizado como lubricante. Asimismo, los resultados de la descomposición aproximada de 7,5% de las muestras de bases biolubricantes líquida y grasa (193°C y 187°C respectivamente) presentan resultados similares comparadas con los obtenidos por Abdelkhalik et. al. en los cuales se estudiaron cuatro tipos de lubricantes comerciales (Mobil, Shell, Total y Rheinol) (Abdelkhalik et al., 2018), así como ocho tipos de bases lubricantes minerales, en estos se comenzó a reportar una pérdida de este mismo porcentaje (7,5%) aproximadamente en el rango de temperaturas de 170°C a 240°C, así como una descomposición del 100% a 545°C aproximadamente para las bases biolubricantes de este estudio y un rango de 240°C a 323°C para las del estudio por Abdelkhalik et. al. Por lo que podría afirmarse que la estabilidad térmica de las bases biolubricantes líquida y grasas obtenidas en este estudio

pueden compararse e incluso superar la de lubricantes y bases comerciales a partir de aceites minerales, brindando un panorama satisfactorio en este ámbito.

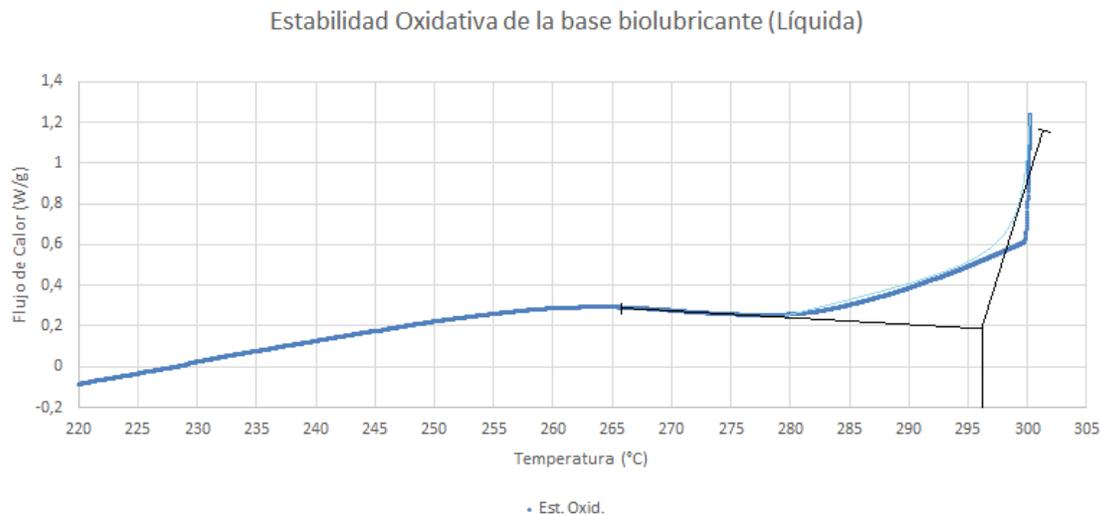
5.4.3 Análisis de estabilidad oxidativa

Con el fin de realizar un estudio de la estabilidad oxidativa de las muestras de base biolubricante obtenidas (líquida y grasa), se utilizó un DSC que llevó las muestras desde temperatura ambiente hasta 140°C en atmósfera de nitrógeno (25 mL/min) con una rampa de calentamiento de 20°C/min, a esta temperatura se cambiaba automáticamente a atmósfera de aire (50 mL/min) hasta una temperatura de 300 °C a 5°C/min (Abdelkhalik et al., 2018), los resultados obtenidos durante este análisis se muestran en las figuras 7 (líquida) y 8 (grasa).

El dato que se debía hallar era la temperatura a la cual se comenzaba a presentar la descomposición por oxidación de la muestra, la cual es posible determinar mediante el cruce de las tangentes a la primera curva moderada de decrecimiento, la cual se logra percibir desde una temperatura aproximada de 267°C hasta una de 280°C, temperatura a la cual comienza un crecimiento de la curva, indicando que el proceso de oxidación de la muestra ha comenzado y a la cual se le debe trazar nuevamente una tangente que corte con la primera y así encontrar el valor de temperatura de oxidación (Tonset) (Delgado & Aperador, 2014).

Figura 14.

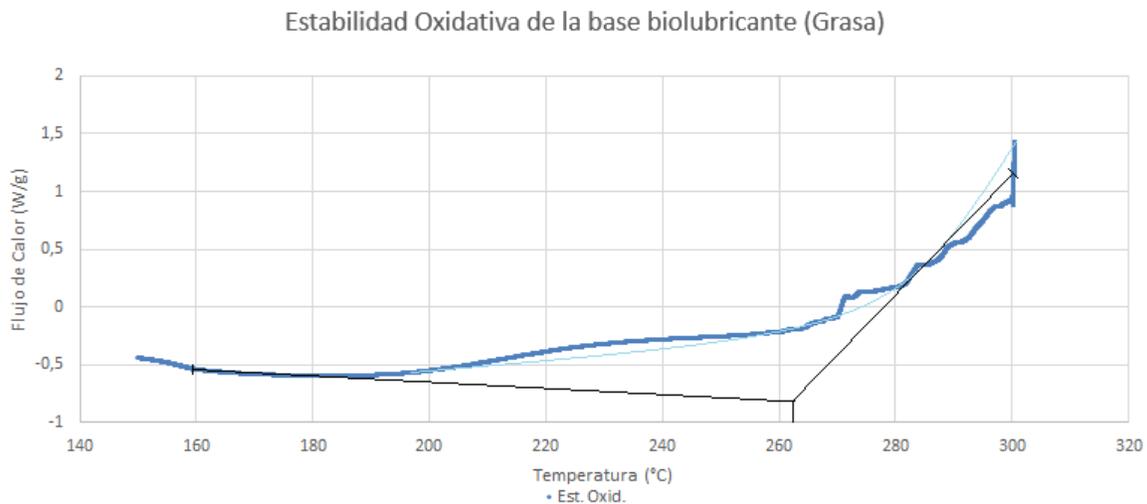
Estabilidad oxidativa de la base biolubricante (líquida).



Según los trazos marcados, se encontró una temperatura de comienzo de oxidación de 297,3°C para la muestra líquida y de 263,21°C para la muestra de grasa. Comparando con estudios realizados en la Universidad de Helwan, Egipto, los resultados de estabilidad oxidativa de las muestras de bases biolubricantes (líquida y grasa) poseen una temperatura de oxidación similar y en algunos casos mayor que las de bases lubricantes comerciales, las cuales son de 283°C, 302°C, 322°C y 281°C en marcas como Mobil, Shell, Total y Rheinol respectivamente (Abdelkhalik et al., 2018). Por lo que es posible aseverar que se obtuvo un resultado satisfactorio en cuanto a la estabilidad oxidativa de las muestras, además, presentan mayores valores respecto a aceites lubricantes comerciales de la APRC (Ameria Petroleum Refining Co) de Egipto, cuyos rangos están entre 187°C y 283°C para temperaturas de comienzo de oxidación (Abdelkhalik et al., 2018).

Figura 15.

Estabilidad oxidativa de la base biolubricante (grasa).



Estos resultados comprueban que, con relación a la estabilidad oxidativa, se pueden obtener excelentes resultados en la obtención de biolubricantes a partir de grasas animales, como en este caso lo es el sebo bovino. Esto continúa con la necesidad de insistir en la elaboración de biolubricantes a partir de fuentes renovables, puesto que plantea una base experimental en cuanto a la obtención de resultados acordes a las necesidades de calidad actuales, además de contribuir en la mitigación del impacto ambiental al cual aportan este tipo de productos (lubricantes) producidos a partir de combustibles fósiles, además de los desechos provenientes de la industria bovina (sebos).

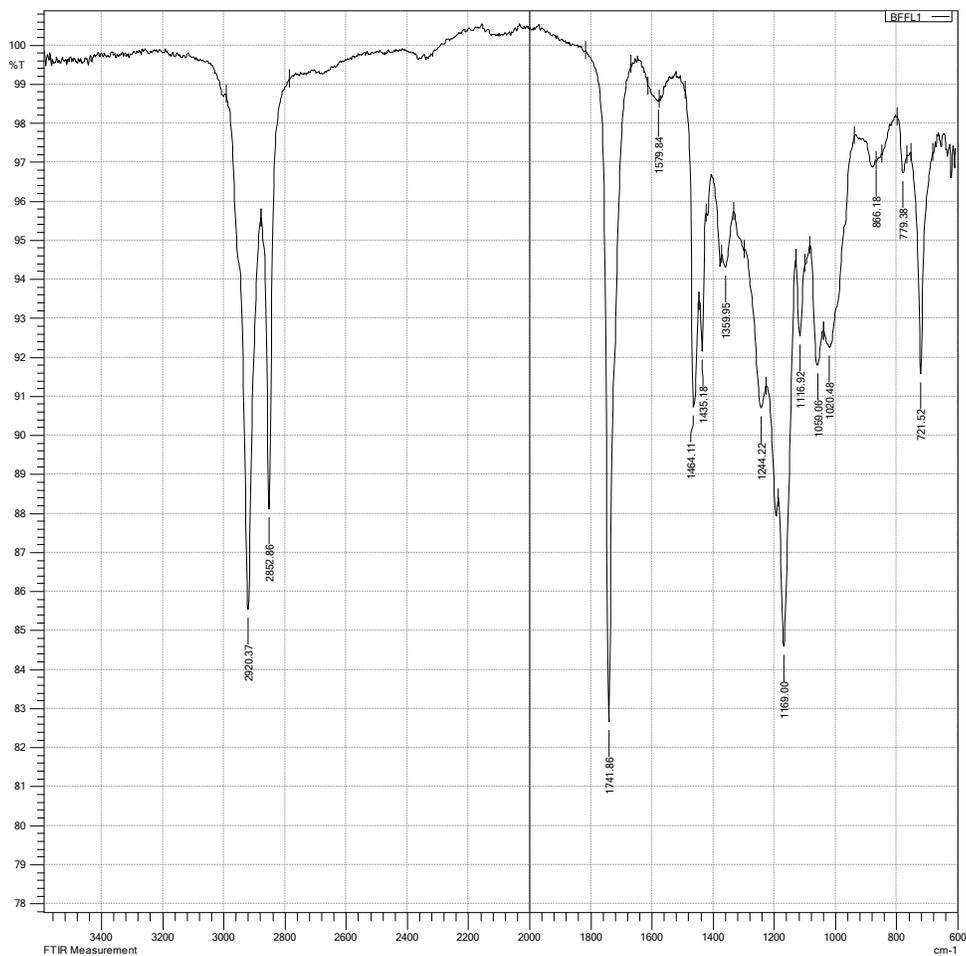
5.4.4 Análisis infrarrojo

En las figuras 9 (líquido) y 10 (grasa) se encuentran los resultados del análisis infrarrojo a los que fueron sometidas las muestras de bases biolubricantes obtenidas. Lo que se puede inferir

al interpretar los picos representativos es que en ambos casos hubo una formación de los grupos funcionales representativos de un poliol éster, esto debido a los picos característicos de los enlaces C-H, los cuales son posibles encontrarlos en los rangos $2850\text{-}3200\text{ cm}^{-1}$ (Merck, 2021), siendo este grupo funcional el de mayor presencia, así como enlaces C=O que es posible encontrarlos en el rango $1735\text{-}1750\text{ cm}^{-1}$ específicamente para ésteres, y finalmente los enlaces C-O que se encuentran en el rango $1000\text{-}1300\text{ cm}^{-1}$ (Merck, 2021).

Figura 16.

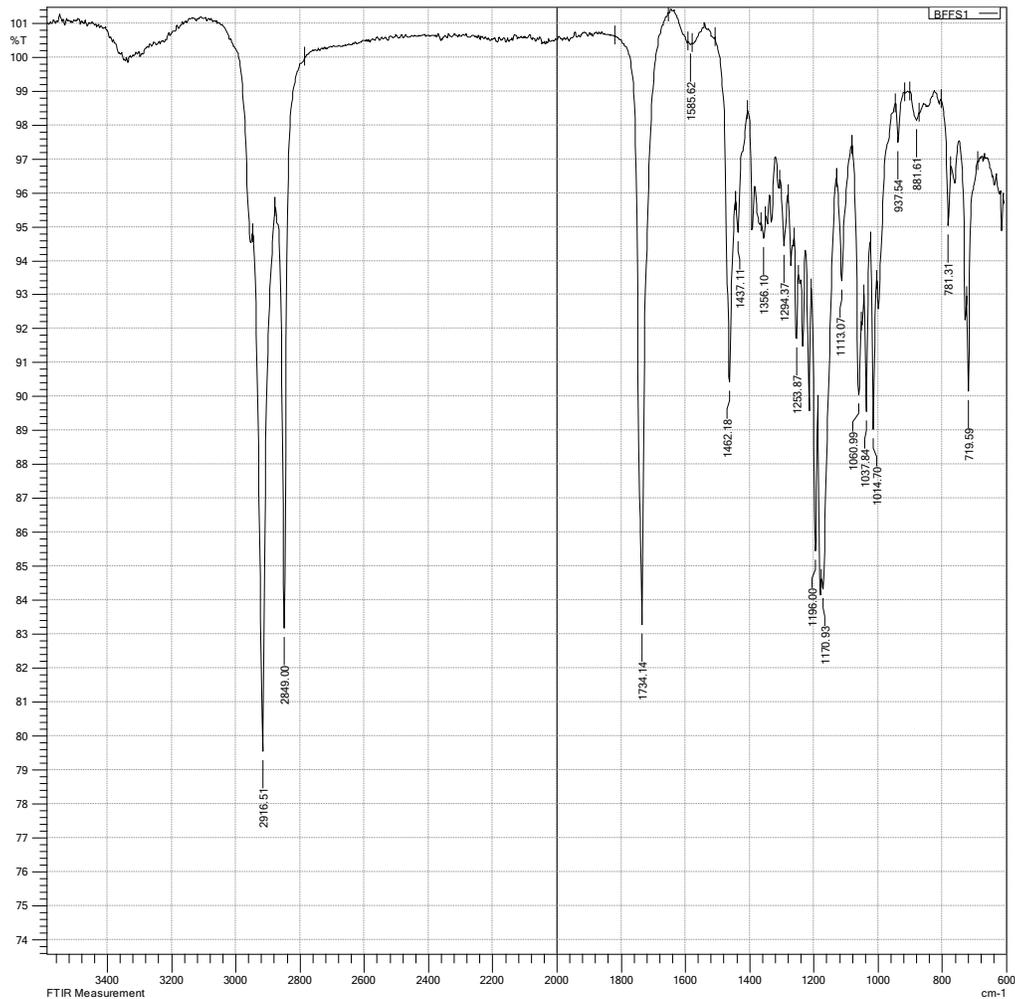
Análisis infrarrojo de la base biolubricante en fase líquida.



Ha sido formada una sustancia lubricante (poliol éster), siendo la diferencia la cantidad de picos característicos en la zona de rangos de $1600-600\text{ cm}^{-1}$, presentando 5 picos característicos más. Esto podría explicar el hecho que, aunque ambas son sustancias lubricantes, se encuentran en diferente fase (líquida y grasa), esto a pesar de que se obtuvieron durante la misma experimentación y las mismas condiciones.

Figura 17.

Análisis infrarrojo de la base biolubricante grasa.



Adicionalmente, según un análisis arrojado por el programa Spectrum donde compara los resultados con una amplia base de datos, hay un 87,8% de compatibilidad entre los grupos funcionales representativos de la base biolubricante líquida y el aceite de cocina, aunque con mejores propiedades lubricantes que esta última, por lo que vale resaltar nuevamente que según la clasificación que obtuvo esta base, tendría una potencial aplicación en el mercado de aceites hidráulicos. Asimismo, la base biolubricante grasa presenta un 82,7% de compatibilidad con la cera de carnauba, la cual es utilizada para aplicaciones alimenticias como chicles o chocolates, pero lo que le daría un mayor potencial valor agregado es que esta última también se utiliza en la industria automotriz, concretamente como protección de la lámina exterior de los automóviles (Turtle Wax, 2021).

5.4.5 Comparación de las propiedades del biolubricante grasa con dos de origen mineral.

Con relación a la grasa biolubricante se obtuvieron los resultados dados en la tabla 10 en la cual se puede observar que posee una viscosidad alta a 40°C en comparación a la fase líquida (12,74 cSt), a pesar de que fueron elaboradas bajo las mismas condiciones siendo separadas las fases por centrifugación. Sus propiedades se compararon con las de dos grasas lubricantes de origen mineral (Chevron y Repsol) que poseen características similares como lo son altas viscosidades a 40°C y viscosidades similares a 100°C, destacando el alto índice de viscosidad (88,71), el cual está entre los rangos (79-164) para sustancias con viscosidad a 100°C entre 2,4 y 80 cSt (American Society for Testing and Materials, 2016). Un punto de goteo (el cual es la temperatura a la cual la grasa se torna totalmente líquida) de > 120°C (la cual fue determinada experimentalmente durante la reacción de transesterificación inversa del biodiésel bovino, debido

a que era la temperatura de operación y se observaba una sustancia grasa -como la resultante- en la muestra, por lo que podría ser mayor), siendo este un valor bajo en comparación a los de los de origen mineral (255 y $> 260^{\circ}\text{C}$), esto puede darse debido a que esta grasa es obtenida bajo las mismas condiciones que la fase líquida y durante la misma experimentación, dando lugar a que esta propiedad no tenga un valor alto en comparación a las comerciales.

Por otro lado, se determinó que el punto de inflamación era mayor a 200°C , lo que sumado a la prueba de estabilidad térmica y oxidativa (figura 6 y 8) se puede estimar que este biolubricante grasa puede ser trabajado a altas temperaturas. Se determinó también la penetración trabajada a 25°C dando como resultado un valor de 270 mm la cual es similar a la de los de origen mineral (280 mm), además, se pudo catalogar según el *Instituto Nacional de Grasas Lubrificantes* (NLGI por sus siglas en inglés, el cual establece una clasificación para grasas con base en su consistencia) como una grasa de grado 2 (American Society for Testing and Materials, 2021), lubricantes considerados de consistencia blanda y que son aplicados para trabajar con cojinetes (Catalys Lubricants, 2021), siendo estos componentes importantes en máquinas de aplicaciones industriales como motores, turbinas eólicas, etc (Li et al., 2020).

Tabla 10.

Comparación de propiedades de la muestra biolubricante grasa

Propiedad	Unidades	Muestra			
		Este estudio (grasa)	Este estudio (líq)	Chevron (Chevron, 2017)	Repsol (Repsol, 2018)
Viscosidad a 40°C	cSt	300,13	12,74	226	288-352
Viscosidad a 100°C	cSt	22,31	3,71	20,70	-

Propiedad	Unidades	Muestra			
		Este estudio (grasa)	Este estudio (líq)	Chevron (Chevron, 2017)	Repsol (Repsol, 2018)
Índice de viscosidad	-	88,71	196,84	107	-
Punto de goteo	°C	> 120	-	255	> 260
Punto de inflamación	°C	> 200	185	274	-
Penetración	mm	270	-	280	280
Clasificación ISO VG	-	320	15	220	320
Grado NLGI	-	2	-	2	2

Asimismo, es posible analizar la diferencia entre las dos muestras de bases biolubricantes (grasa y líquida), que, a pesar de haber sido obtenidas durante la misma experimentación presentan diferencias tanto en su consistencia, como en sus valores de viscosidad, siendo significativamente mayores las viscosidades a 40°C y 100°C de la grasa respecto a la líquida, donde se podría considerar que la naturaleza de la materia prima (sebo bovino) representa mayor trascendencia, aunque presentan un valor cercano de índice de viscosidad y punto de inflamación.

Por tanto, aunque existen otras propiedades que podrían ser determinadas para la grasa como temperatura de operación, prueba de desgaste cuatro bolas, entre otras, según los resultados analizados se podría afirmar que la sustancia de consistencia grasa que se está obteniendo durante la reacción de transesterificación inversa del biodiésel posee propiedades lubricantes y tiene gran potencial como objeto de estudio.

5.4.6 Comparación de las propiedades del biolubricante líquido con uno de origen mineral y otro vegetal

Finalmente, en la tabla 10 se presenta la comparación entre las propiedades de las muestras de base biolubricante líquida seleccionada en esta investigación, con las de un lubricante comercial a base de petróleo (Global OIL) (Global Oil, 2018) y dos biolubricantes obtenidos a partir de aceite de palma y aceite de jatropha (Heikal et al., 2017). Las propiedades que se evaluaron fueron las viscosidades a 40°C y 100°C, índice de viscosidad, punto de fluidez, punto de inflamación, índice de acidez y clasificación ISO VG.

Es posible observar que la base biolubricante que se obtuvo en el desarrollo de esta investigación cumple satisfactoriamente con las normas de clasificación ISO VG 15 para lubricantes comerciales, como lo es el lubricante ISO VG 15 de la marca Global Oil, llegando incluso a tener un mayor índice de viscosidad, mayor punto de inflamación y menor índice de acidez, no obstante, su valor de punto de fluidez es bastante alto para los requerimientos del producto, pero al ser considerado una base biolubricante la cual constituye entre el 70 – 80% del total del lubricante, siendo el % restante correspondiente a los aditivos, se podría evaluar el uso de un aditivo depresor del punto de fluidez (Sokolnikov et al., 2016), el cual ayudaría a mejorar el valor de esta propiedad y así competir directamente con el lubricante comercial.

Tabla 11.

Comparación de propiedades de las muestras lubricantes líquidas.

Propiedad	Unidades	Muestra			
		Este estudio	Global OIL (Global Oil, 2018)	BioLub Palma (Heikal et al., 2017)	BioLub Jatropha (Heikal et al., 2017)
Viscosidad a 40°C	cSt	12,74	15	38,25	51,89
Viscosidad a 100°C	cSt	3,71	3,45	7,58	8,53
Índice de viscosidad	-	196,84	105	171	140
Punto de fluidez	°C	19	< -24	5	-3
Punto de inflamación	°C	185	> 180	240	296
Índice de acidez	mgKOH/g muestra	0,08	< 1,5	-	0,52
Clasificación ISO VG	-	15	15	32	46

Por otra parte, con relación a los biolubricantes obtenidos a partir de aceite vegetal, estos obtuvieron mayores valores de viscosidad a 40°C y 100°C, así como menor punto de fluidez y mayor punto de inflamación, sin embargo, el índice de viscosidad de la muestra estudio sigue siendo mayor, así como su índice de acidez que es menor. Esto es un punto muy importante que debe resaltarse, puesto que la materia prima de esta investigación fue el sebo residual bovino, el cual a temperatura ambiente es sólido y presenta menores propiedades viscosidad antes de ser tratado, así como un alto índice de acidez, por tanto, no es un producto altamente comercial. Por lo que la capacidad de transformar este sebo residual de baja calidad en un producto con una perspectiva interesante y de alto valor agregado como lo es un biolubricante (ver ANEXO H) plantea una base significativa para continuar con el estudio e investigación para la elaboración de productos lubricantes, además de que sería una materia prima que no competiría con el mercado alimenticio (como sí lo hacen los aceites vegetales, los cuales tienen mayores aplicaciones alimenticias) y que no es necesario llevar a cabo procedimientos adicionales para su obtención

(como el cultivo o procesamiento extra), además de ayudar a disminuir el impacto ambiental que genera la inadecuada disposición tanto de este tipo de residuos agrícolas como el de los residuos de lubricantes minerales, situaciones que ocasionan mayores problemas con relación al cambio climático, preocupante realidad a la cual se le debe seguir tomando mayor importancia y con acción inmediata para intentar detenerla a mediano y largo plazo.

6. Conclusiones

Fue posible acondicionar un sebo bovino crudo disminuyendo su índice de acidez desde 3,98 mgKOH/g sebo crudo hasta valores de 0,51 mg KOH/g sebo esterificado mediante un tratamiento de catálisis ácida con ácido sulfúrico y metanol, reduciendo las condiciones de operación (relación molar moles de metanol: moles de sebo crudo 6,5:1, % de catalizador H_2SO_4 de 1,10% p/p y tiempo de reacción de 130min) respecto a otros estudios, obteniendo así un producto de calidad que puede ser utilizado posteriormente para la elaboración de biolubricantes, alimentos, surfactantes, fluidos de perforación u otro tipo de productos industriales, además de darle mayor valor agregado y utilidad a un residuo contaminante y nocivo para la salud.

Se obtuvo una base biolubricante líquida que cumple con la norma de clasificación ISO VG 15 para lubricantes comerciales, además de poseer un alto índice de viscosidad (196), alto punto de inflamación (185°C), alta estabilidad oxidativa (Tonset 297°C) y un alto punto de fluidez (19°C), el cual puede ser mejorado mediante la incorporación de un aditivo depresor de punto de

fluidez. Este tipo de biolubricante puede ser utilizado en sistemas hidráulicos industriales y maquinaria pesada del sector automotriz, industrial o agrícola.

Se determinó que la fase de consistencia grasa obtenida durante la reacción de transesterificación inversa del biodiésel bovino puede ser considerada como base biolubricante debido a las propiedades que posee, como su viscosidad a 40°C (300,17cSt) que la clasifica como lubricante ISO VG 320, así como una alta estabilidad oxidativa (Tonset 263°C), punto de inflamación (>180°C), punto de goteo >120°C y una penetración de 270 (0,1mm) que la cataloga como una grasa de grado NLGI 2, que puede ser aplicada en cojinetes de uso industrial en maquinarias como motores, turbinas eólicas, entre otros. Aplicaciones que al igual que la base biolubricante líquida proporcionan un alto valor agregado a este tipo de productos e impulsa su interés como objetos de estudio debido a su potencial.

7. Recomendaciones

Llevar a cabo un estudio de mayor profundidad que permita determinar la composición y estructura química de los biolubricantes obtenidos (líquido y grasa), así como el grado de degradabilidad con el fin de tener certeza del tipo de compuesto que se está generando durante la reacción de transesterificación inversa, así como su posible disposición posterior a su utilización.

Realizar un análisis económico de los costos de producción de base biolubricante desde su punto de partida, es decir, desde la obtención del sebo bovino crudo, sebo mejorado, biodiésel hasta las condiciones de operación necesarias para la elaboración de los biolubricantes.

Evaluar la posibilidad de mejorar el punto de fluidez de la base biolubricante obtenida con el fin de efectuar pruebas de calidad en sistemas hidráulicos que permitan comprobar la calidad del producto formulado. O utilizando el mismo procedimiento, pero con otro tipo de aceite que posea mejor comportamiento a bajas temperaturas como el ricino, el girasol o la jatropha.

Determinar otras propiedades mecánicas de la base biolubricante grasa que permita definir con certeza los campos de aplicación de esta.

Referencias Bibliográficas

- Abdelkhalik, A., Elsayed, H., Hassan, M., Nour, M., Shehata, A. B., & Helmy, M. (2018). Using thermal analysis techniques for identifying the flash point temperatures of some lubricant and base oils. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(1), 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.02.006>
- Alejandra, D., Quintero, R., & Tello Durán, P. A. (2018). *Obtención de un biolubricante a partir de una grasa residual de la industria avícola*.
- American Society for Testing and Materials. (2016). *Índice de viscosidad*. ASTM, 9.
- American Society for Testing and Materials. (2021). Designation: D217 – 21 Standard Test Methods for Cone Penetration of Lubricating Grease 1. *ASTM*. <https://doi.org/10.1520/D0217-21>
- American Society for Testing and Materials. (n.d.). Standard Classification of Industrial Fluid Lubricants by Viscosity System. *ASTM*. <https://doi.org/10.1520/D2422-97R18>
- Amiril, S. A. S., Rahim, E. A., Embong, Z., & Syahrullail, S. (2018). Tribological investigations on the application of oil-miscible ionic liquids additives in modified Jatropha-based metalworking fluid. *Tribology International*, 120. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.030>
- André, J., Ferreira, V., Lafuente, R. F., Cláudio, A., & Freire, D. M. G. (2015). Journal of Molecular Catalysis B : Enzymatic Enzymatic production and characterization of potential biolubricants from castor bean biodiesel. “*Journal of Molecular Catalysis. B, Enzymatic*,” 122, 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.molcatb.2015.09.017>

- Andrea Maritza, V. C. (2010). *Estudio y obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de origen bovino*.
- Antonio Alfonso Alvarez, J. (n.d.). *Obtención de biodiesel a partir de aceites usados en casa habitación de la comunidad del Refugio*.
- Attia, N. K., El-Mekkawi, S. A., Elardy, O. A., & Abdelkader, E. A. (2020). Chemical and rheological assessment of produced biolubricants from different vegetable oils. *Fuel*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117578>
- Bart, J. C. J., Gucciardi, E., & Cavallaro, S. (2013). Lubricants: properties and characteristics. *Biolubricants*, 24–73. <https://doi.org/10.1533/9780857096326.24>
- Bartz, W. J. (1998). Lubricants and the environment. *Tribology International*, 31(1–3), 35–47. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00006-1)
- Bolsa Mercantil de Colombia. (2021). *Operación Financieras*. <https://3c5.com/WXOUf>
- Boyde, S. (2002). Green lubricants. Environmental benefits and impacts of lubrication. *Green Chemistry*, 4(4), 293–307. <https://doi.org/10.1039/b202272a>
- Castellar, G., Angulo, E., & Cardozo, B. (2014). Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos. *Prospect*, 12(2), 90–104. <https://doi.org/10.1007/s11746-016-2798-5>
- Catalys Lubricants. (2021). SRI GREASE NLGI 2 | *Crevier Lubricants*. <https://www.catalyslubricants.ca/en/on/product/sri-grease-nlgi-2>
- Chan, C. H., Tang, S. W., Mohd, N. K., Lim, W. H., Yeong, S. K., & Idris, Z. (2018). Tribological behavior of biolubricant base stocks and additives. *In Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 93, pp. 145–157). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.024>

- Chauhan, B. S., Singh, R. K., Cho, H. M., & Lim, H. C. (2016). Practice of diesel fuel blends using alternative fuels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.062>
- Chevron. (2017). Delo ® Grease EP 00, 0, 1, 2. *Descripción del producto*. 3. <https://cglapps.chevron.com/msdspds/PDSDetailPage.aspx?docDataId=77039&docFormat=PDF>
- Crown Oil. (2021). *Guide to Hydraulic Oil - Lubricants for Industrial Equipment*. <https://www.crownoil.co.uk/guides/hydraulic-oil-guide/>
- da Cunha, M. E., Krause, L. C., Moraes, M. S. A., Faccini, C. S., Jacques, R. A., Almeida, S. R., Rodrigues, M. R. A., & Caramão, E. B. (2009). Beef tallow biodiesel produced in a pilot scale. *Fuel Processing Technology*, 90(4), 570–575. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.01.001>
- de Blasio, C. (2019). Thermogravimetric analysis (TGA). In *Green Energy and Technology* (pp. 91–102). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11599-9_7
- de Haro, J. C., Garrido, M. del P., Pérez, Á., Carmona, M., & Rodríguez, J. F. (2018). Full conversion of oleic acid to estolides esters, biodiesel and choline carboxylates in three easy steps. *Journal of Cleaner Production*, 184, 579–585. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.190>
- Delgado, A. E., & Aperador, W. A. (2014). Estudio comparativo del poder lubricante y estabilidad oxidativa entre el aceite de ajonjolí y aceite mineral 360. *Informacion Tecnologica*, 25(4), 79–90. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000400011>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística, D. (n.d.). *¿Cómo estamos en Colombia en el mercado de lubricantes para vehículos? Aquí le contamos el panorama de Petronas*.

- Retrieved December 6, 2021, from <https://www.semana.com/economia/hablan-las-marcas/articulo/petronas-fortalece-el-mercado-de-lubricantes-en-colombia/202115/>
- Dev Srivyas, P., & Charoo, M. (2019). *Effect of Lubricants Additive: Use and Benefit. In Materials Today: Proceedings* (Vol. 18). www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings2214-7853
- Espinosa, M., Canielas, L., Silvana, M., Moraes, A., Schmitt, C., Assis, R., Rodrigues, S., Regina, M., Rodrigues, A., & Bastos, E. (2009). Beef tallow biodiesel produced in a pilot scale. *Fuel Processing Technology*, 90(4), 570–575. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.01.001>
- Esteves, V. P. P., Esteves, E. M. M., Bungenstab, D. J., Feijó, G. L. D., Araújo, O. de Q. F., & Morgado, C. do R. V. (2017). Assessment of greenhouse gases (GHG) emissions from the tallow biodiesel production chain including land use change (LUC). *Journal of Cleaner Production*, 151, 578–591. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.063>
- Fedegan. (n.d.). *Sacrificio de ganado bovino cerró al alza en 2020, lo que indica mejores cifras en 2021* | Retrieved October 31, 2021, from <https://www.fedegan.org.co/noticias/sacrificio-de-ganado-bovino-cerro-al-alza-en-2020-lo-que-indica-mejores-cifras-en-2021>
- Fernandes, K. V., Papadaki, A., da Silva, J. A. C., Fernandez-Lafuente, R., Koutinas, A. A., & Freire, D. M. G. (2018). Enzymatic esterification of palm fatty-acid distillate for the production of polyol esters with biolubricant properties. *Industrial Crops and Products*, 116. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.058>
- Fong Silva, W., Quiñonez Bolaños, E., & Tejada Tovar, C. (2017). Caracterización físico-química de aceites usados de motores para su reciclaje Physical-chemical characterization of spent

- engine oils for its recyclingchemical characterization of spent engine oils for its recycling" Physical-, *Prospectiva*, 15(2), 135–144. <https://doi.org/10.15665/rp.v15i2.782>
- Fröhlich, A., Rice, B., & Vicente, G. (2010). The conversion of low grade tallow into biodiesel-grade methyl ester. *JAACS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 87(7), 825–833. <https://doi.org/10.1007/s11746-010-1561-6>
- Garcés, R., Martínez-Force, E., & Salas, J. J. (2011). Vegetable oil basestocks for lubricants. *Grasas y Aceites*, 62(1), 21–28. <https://doi.org/10.3989/gya.045210>
- García Colomer, A. (2011). *Diseño, selección y producción de nuevos biolubricantes*. 1–3. <http://84.88.10.27/handle/10803/48759>
- Gautam, R., & Kumar, S. (2020). Performance and combustion analysis of diesel and tallow biodiesel in CI engine. *Energy Reports*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.039>
- Global Oil. (2018, February). *Ficha Técnica (Maxfluid ISO-L HM)*. <https://3c5.com/HzQbq>
- Hamdan, S. H., Chong, W. W. F., Ng, J.-H., Chong, C. T., & Zhang, H. (2018). Nano-tribological characterisation of palm oil-based trimethylolpropane ester for application as boundary lubricant. *Tribology International*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.05.036>
- He, B. Q. (2016). Advances in emission characteristics of diesel engines using different biodiesel fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 570–586. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.093>
- Heikal, E. K., Elmelawy, M. S., Khalil, S. A., & Elbasuny, N. M. (2017). Manufacturing of environment friendly biolubricants from vegetable oils. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(1), 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.03.003>

- Hernández-Cruz, M. C., Meza-Gordillo, R., Torrestiana-Sánchez, B., Rosales-Quintero, A., Ventura-Canseco, L. M. C., & Castañón-González, J. H. (2017). Chicken fat and biodiesel viscosity modification with additives for the formulation of biolubricants. *Fuel*, 198, 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.039>
- Ho, C. K., McAuley, K. B., & Peppley, B. A. (2019). Biolubricants through renewable hydrocarbons: A perspective for new opportunities. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 113)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109261>
- Hunaida Abd Elbage Abazar Ahmed. (2019). Extraction of Jatropha Bio-base Oil for Two-Stroke Engines. *International Journal of Engineering Research And*, V8(08). <https://doi.org/10.17577/IJERTV8IS080223>
- Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). Lubricants and lubrication. In *Tribology* (pp. 79–105). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100910-9.00004-0>
- Ibeawuchi, I. V. (2016). *Environmental Impact Assessment of Oil and Gas Industry in Niger Delta, Nigeria: a Critical Environmental and Legal Framework Assessment*. August, 1–274.
- 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). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.02.018>
- Kermani, M., & Ebadi, T. (2012). The Effect of Oil Contamination on the Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils. *Soil and Sediment Contamination*, 21(5), 655–671. <https://doi.org/10.1080/15320383.2012.672486>
- Kirubakaran, M., & Arul Mozhi Selvan, V. (2018). A comprehensive review of low cost biodiesel production from waste chicken fat. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 82, pp. 390–401)*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.039>

- Knothe, G., & Razon, L. F. (2017). Biodiesel fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.08.001>
- Kodali, D. R. (2002). High performance ester lubricants from natural oils. *Industrial Lubrication and Tribology*, 54(4), 165–170. <https://doi.org/10.1108/00368790210431718>
- Leung, D. Y. C., Wu, X., & Leung, M. K. H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87(4), 1083–1095. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>
- Li, H., Liu, T., Wu, X., & Chen, Q. (2020). An optimized VMD method and its applications in bearing fault diagnosis. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108185>
- Lubricant Properties. (2014). In *Lubricants*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118799734.ch2>
- Lubricants Market Size, Share (n.d.). *Industry Report, 2021-2028*. Retrieved November 1, 2021, from <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lubricants-market>
- Luna, F. M. T., Cavalcante, J. B., Silva, F. O. N., & Cavalcante, C. L. (2015). Tribology International Studies on biodegradability of bio-based lubricants. *Tribology International*, 92, 301–306. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.07.007>
- Madankar, C. S., Dalai, A. K., & Naik, S. N. (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>
- Mangas, I., Sogorb, M. A., & Vilanova, E. (2014). Lubricating Oils. In *Encyclopedia of Toxicology: Third Edition* (pp. 670–676). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00525-X>

- McGlashan, S. A. (n.d.). *Usos industriales y energéticos de los subproductos de origen animal, pasado y futuro*. www.produccion-animal.com.ar
- McNutt, J., & He, Q. S. (2016). Development of biolubricants from vegetable oils via chemical modification. In *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (Vol. 36, pp. 1–12). Korean Society of Industrial Engineering Chemistry. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.02.008>
- Merck. (2021). *IR Spectrum Table*. <https://www.sigmaaldrich.com/CO/es/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry/photometry-and-reflectometry/ir-spectrum-table>
- Mobarak, H. M., Niza Mohamad, E., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., al Mahmud, K. A. H., Habibullah, M., & Ashraful, A. M. (2014). The prospects of biolubricants as alternatives in automotive applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.062>
- Mofijur, M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Atabani, A. E., Shahabuddin, M., Palash, S. M., & Hazrat, M. A. (2013). Effect of biodiesel from various feedstocks on combustion characteristics, engine durability and materials compatibility: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.051>
- Monteiro dos Santos, E., Sassim, N., & Castro, M. S. de. (2018). Antifoam performance evaluation of medium api gravities petroleums. *17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*. <https://doi.org/10.26678/ABCM.ENCIT2018.CIT18-0738>
- Nagappan, B., Devarajan, Y., Kariappan, E., Shone, & Philip, B., & Gautam, S. (n.d.). *Environmental and energy management Influence of antioxidant additives on performance*

- and emission characteristics of beef tallow biodiesel-fuelled C.I engine.*
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-09065-9/Published>
- Nagendramma, P., & Kaul, S. (2012). Development of ecofriendly/biodegradable lubricants: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 764–774.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.002>
- Naranjo, D. L., Raúl, J., Cuevas, L., & Aúl, J. R. (2018). The effects of oil pollution in the development of Ejidal Communities: the case of the San Juan river basin (Nuevo León, Mexico). In *investigación & desarrollo* (Vol. 26, Issue 1).
- Naveed, T., Zahid, R., Mufti, R. A., Waqas, M., & Hanif, M. T. (2021). A review on tribological performance of ionic liquids as additives to bio lubricants. In Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: *Journal of Engineering Tribology* (Vol. 235, Issue 9, pp. 1782–1806). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/1350650120973805>
- Obasi, A. U., Udeagbara, S. G., & Anusiobi. (2014). Effect of Additives on the Performance of Engine Oil. *International Journal of Engineering and Technology Research*, 2(9), 1–11.
www.ijeatr.org1
- Ossman, M., Farouq, R., Fatah, M. A., Abu-Elella, R., Ossman, M. E., Farouq, R., & Abd-Elfatah, M. (2015). Used Motor Oil Treatment: Turning Waste Oil Into Valuable Products
Bioremediation of Heavy Metals View project mathematical modeling View project Used Motor Oil Treatment: Turning Waste Oil Into Valuable Products. In *IJCBS* (Vol. 7).
www.iscientific.org/Journal.html
- Parente, E. J., Marques, J. P. C., Rios, I. C., Cecilia, J. A., Rodríguez-Castellón, E., Luna, F. M. T., & Cavalcante, C. L. (2021a). Production of biolubricants from soybean oil: Studies for

- an integrated process with the current biodiesel industry. *Chemical Engineering Research and Design*, 165, 456–466. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.11.012>
- Petran, J. (2008). *Biolubricants From Natural*. 471–478.
- Petroleum Service. (2021). *Clasificación ISO VG Aceites hidráulicos*. <https://petroleumservicecompany.com/iso-vg-10-spindle-low-viscosity-air-tool-oil/>
- Prasca Cuello, Y. C., & Ortega Díaz, D. D. (2018). *Estudio exploratorio de la obtención de biolubricantes a partir de biodiesel del sebo bovino*. Universidad Industrial de Santander.
- Ramírez García, Y. A. (2016). *Acondicionamiento del sebo de bovino residual como materia prima para la obtención de biodiesel*. Universidad Industrial de Santander.
- Repsol. (2018, June). *Molibgras Especial EP 2*. https://www.repsol.com/content/dam/repsol-corporate/es/productos-y-servicios/lubricantes-documentos/rp_grasa_molibgras_especial_ep_2_tcm13-188684.pdf
- S, B. (2013). Production of biolubricant from *Jatropha curcas* seed oil. *Journal of Chemical Engineering and Materials Science*, 4(6), 72–79. <https://doi.org/10.5897/jcems2013.0164>
- Saboya, R. M. A., Cecilia, J. A., García-Sancho, C., Sales, A. v., de Luna, F. M. T., Rodríguez-Castellón, E., & Cavalcante, C. L. (2017a). 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>
- Saboya, R. M. A., Cecilia, J. A., García-Sancho, C., Sales, A. v., de Luna, F. M. T., Rodríguez-Castellón, E., & Cavalcante, C. L. (2017b). Synthesis of biolubricants by the esterification of free fatty acids from castor oil with branched alcohols using cationic exchange resins as catalysts. *Industrial Crops and Products*, 104(March), 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.018>

- Salih, N., Salimon, J., & Yousif, E. (2011). Synthesis of oleic acid based esters as potential basestock for biolubricant production. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 35(2), 115–123. <https://doi.org/10.3906/muh-1005-42>
- Shi, S. C., & Jiang, S. Z. (2020). Influence of graphene/copper hybrid nanoparticle additives on tribological properties of solid cellulose lubricants. *Surface and Coatings Technology*, 389. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125655>
- Sokolnikov, A. N., Bezborodov, Y. N., & Shram, V. G. (2016). Apparatus for Determining of the Pour Point of Crude Oil and Petroleum Products. *Procedia Engineering*, 150, 486–489. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.023>
- Soldi, R. A., Oliveira, A. R. S., Ramos, L. P., & César-Oliveira, M. A. F. (2009). Soybean oil and beef tallow alcoholysis by acid heterogeneous catalysis. *Applied Catalysis A: General*, 361(1–2), 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2009.03.030>
- Solidaridad South America. (n.d.). *Pequeños palmicultores en Colombia ya tienen soluciones a la medida, para avanzar en su camino a la sostenibilidad* Retrieved November 2, 2021, from <https://www.solidaridadsouthamerica.org/es/news/peque%C3%B1os-palmicultores-en-colombia-ya-tienen-soluciones-a-la-medida-para-avanzar-en-su-camino-a>
- Srivastava, A., & Prasad, R. (2000). *Triglycerides-based diesel fuels*. 4.
- Srivastava, M., Goyal, S. K., & Saraswat, A. (2021). Ester oil as an alternative to mineral transformer insulating liquid. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2850–2854. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.066>
- Statista. (n.d.). *Lubricants demand worldwide 2020* Retrieved November 1, 2021, from <https://www.statista.com/statistics/411616/lubricants-demand-worldwide/>

- Tacias Pascacio, V. G., Rosales Quintero, A., & Torrestiana Sánchez, B. (2016). Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel: Un caso de estudio. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(3), 303–313. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.03.05>
- Teixeira, L. S. G., Assis, J. C. R., Mendonça, D. R., Santos, I. T. V., Guimarães, P. R. B., Pontes, L. A. M., & Teixeira, J. S. R. (2009). Comparison between conventional and ultrasonic preparation of beef tallow biodiesel. *Fuel Processing Technology*, 90(9). <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.05.008>
- Turtle Wax. (2021). *What Is Carnauba Wax And How Should You Use It?* <https://www.turtlewax.com/blogs/how-to/what-is-carnauba-wax-and-how-should-you-use-it>
- Wang, E., Ma, X., Tang, S., Yan, R., Wang, Y., Riley, W. W., & Reaney, M. J. T. (2014). Synthesis and oxidative stability of trimethylolpropane fatty acid triester as a biolubricant base oil from waste cooking oil. *Biomass and Bioenergy*, 66. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.022>
- Wilson, K., Lee, A. F., & Dacquin, J. (2012). *Catalysis for Alternative Energy Generation* (Issue March 2017). <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0344-9>
- Yunus, R., Fakhru'l-Razi, A., Ooi, T. L., Omar, R., & Idris, A. (2005). Synthesis of palm oil based trimethylolpropane esters with improved pour points. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44(22), 8178–8183. <https://doi.org/10.1021/ie050530>
- Zulkifli, N. W. M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Shahabuddin, M., & Yunus, R. (2013). Wear prevention characteristics of a palm oil-based TMP (trimethylolpropane) ester as an engine lubricant. *Energy*, 54(January), 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.038>

Apéndices

Apéndice A. Diseño experimental, cálculo de referencia y mecanismo de reacción del acondicionamiento de sebo bovino

Tabla 12.

Diseño experimental para la obtención del sebo esterificado

N° de experimento	Relación molar moles metanol: moles sebo crudo	% p/p Catalizador H ₂ SO ₄	Tiempo (minutos)
1	7,50	1,25	183,64
2	8,50	1,40	170,00
3	6,50	1,40	130,00
4	8,50	1,40	130,00
5	8,50	1,10	170,00
6	6,50	1,40	170,00
7	7,50	1,00	150,00
8	5,82	1,25	150,00
9	8,50	1,10	130,00
10	9,18	1,25	150,00
11	7,50	1,50	150,00
12	7,50	1,25	116,36
13	7,50	1,25	150,00
14	6,50	1,10	170,00
15	7,50	1,25	150,00
16	6,50	1,10	130,00

- $Volumen\ metanol = 71,30g\ sebo\ bovino\ crudo * \frac{1\ mol\ sebo\ crudo}{856,76\ g\ sebo\ crudo} *$

$$\frac{7,5\ mol\ metanol}{1\ mol\ sebo\ crudo} * \frac{32,04\ g\ metanol}{1\ mol\ metanol} * \frac{1\ ml\ metanol}{0,79\ g\ metanol} = 25,25\ ml\ metanol *$$

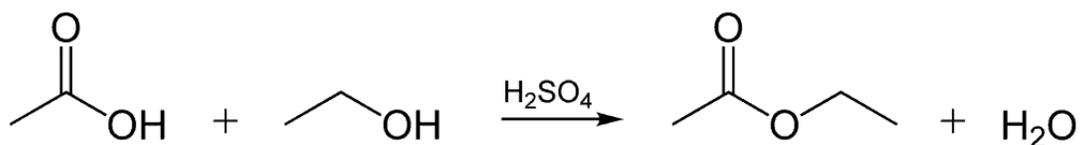
$$\bullet \text{ Volumen } H_2SO_4 = 71,30g \text{ sebo bovino crudo} * \frac{1,25g H_2SO_4}{100g \text{ sebo crudo}} * \frac{100g H_2SO_4}{97g \text{ puros } H_2SO_4} *$$

$$\frac{1 \text{ ml } H_2SO_4}{1,84 \text{ g } H_2SO_4} = 0,50 \text{ ml } H_2SO_4$$

Mecanismo de reacción: El objetivo es que los ácidos grasos libres presentes en el sebo bovino crudo reaccionen con el metanol en exceso en presencia de un catalizador ácido como el H_2SO_4 , con el objetivo de formar metil ésteres y así disminuir el índice de acidez del sebo, buscando mejorar la calidad de la materia prima para la posterior obtención de biodiésel.

Figura 18.

Mecanismo de reacción de preesterificación.



Apéndice B. Diseño experimental de la obtención de biodiésel

Tabla 13.

Diseño experimental para la obtención del biodiésel

N° de experimento	Relación molar moles metanol: moles sebo esterificado	% p/p Catalizador KOH
1	6,50	0,60
2	6,50	0,90
3	6,09	0,75
4	7,50	0,96
5	8,91	0,75
6	8,50	0,60
7	7,50	0,75
8	7,50	0,53
9	8,50	0,90
10	7,50	0,75
11	7,50	0,75

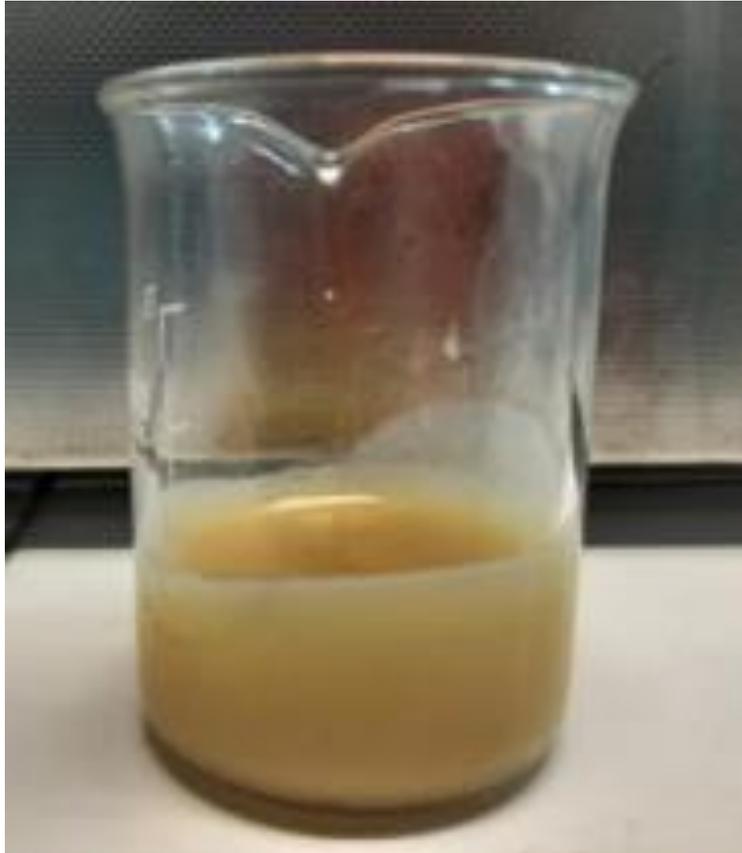
Apéndice C. Diseño experimental para la obtención de la base biolubricante

Tabla 14.

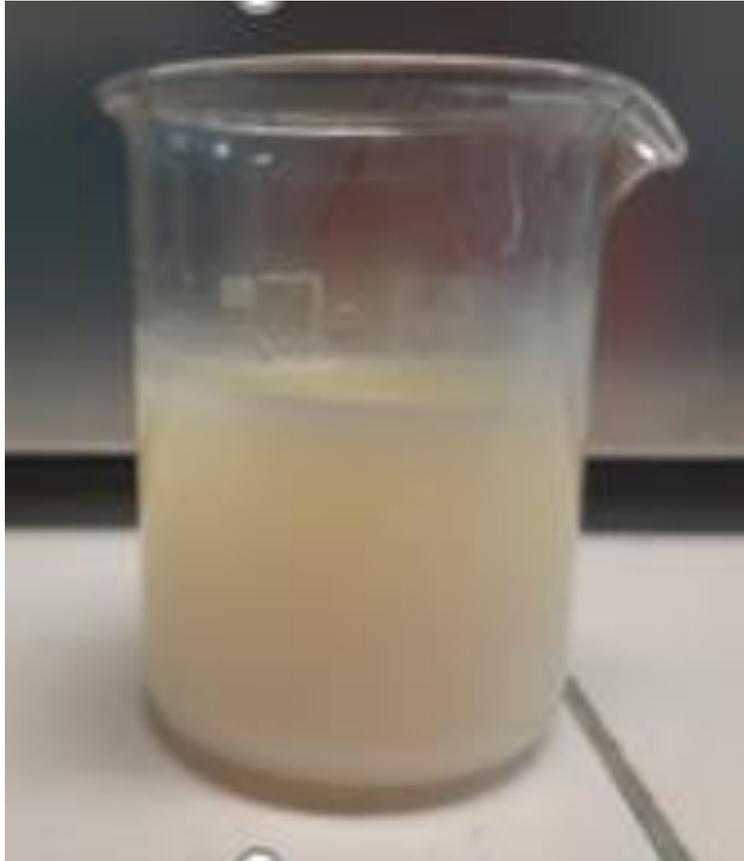
Diseño experimental para la obtención de las bases biolubricantes.

N° de experimento	Relación Molar moles TMP: Biodiésel	% p/p Catalizador (CH ₃ NaO)	Tiempo (minutos)
1	3,50	0,45	160,00
2	4,00	0,50	180,00
3	4,50	0,55	160,00
4	3,50	0,55	200,00
5	4,50	0,45	200,00
6	4,50	0,55	200,00
7	3,50	0,55	160,00
8	4,00	0,50	180,00
9	4,50	0,45	160,00
10	3,50	0,45	200,00
11	4,00	0,50	180,00
12	4,00	0,58	180,00
13	4,00	0,50	146,53
14	3,16	0,50	180,00
15	4,84	0,50	180,00
16	4,00	0,42	180,00
17	4,00	0,50	213,47

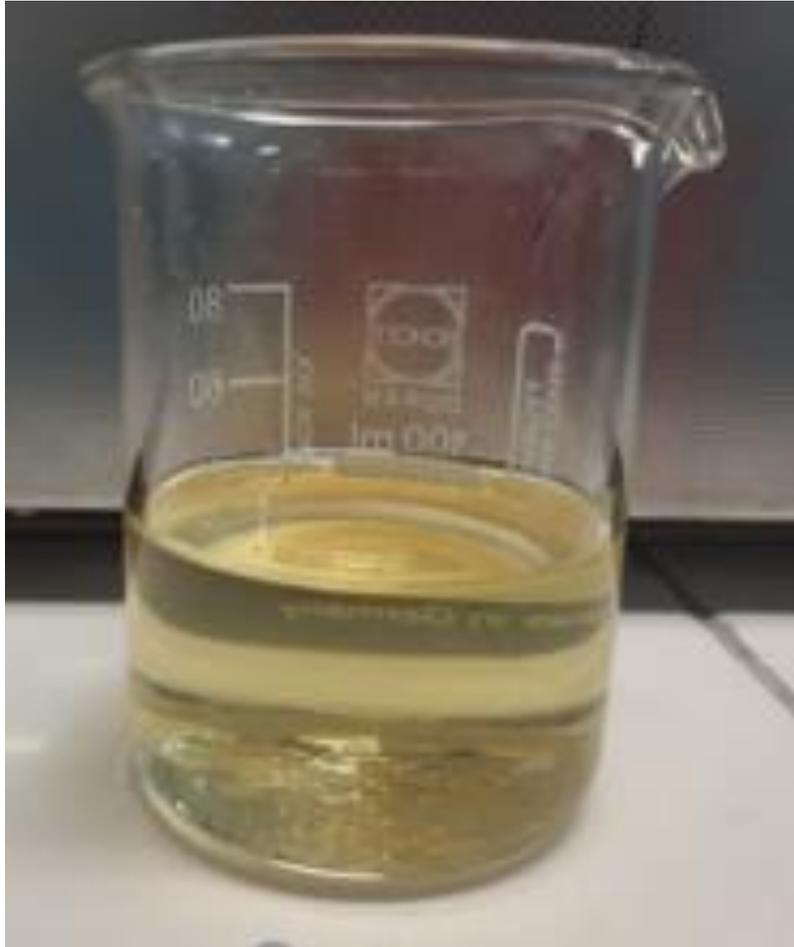
Apéndice D. Muestra de sebo crudo a 25°C.



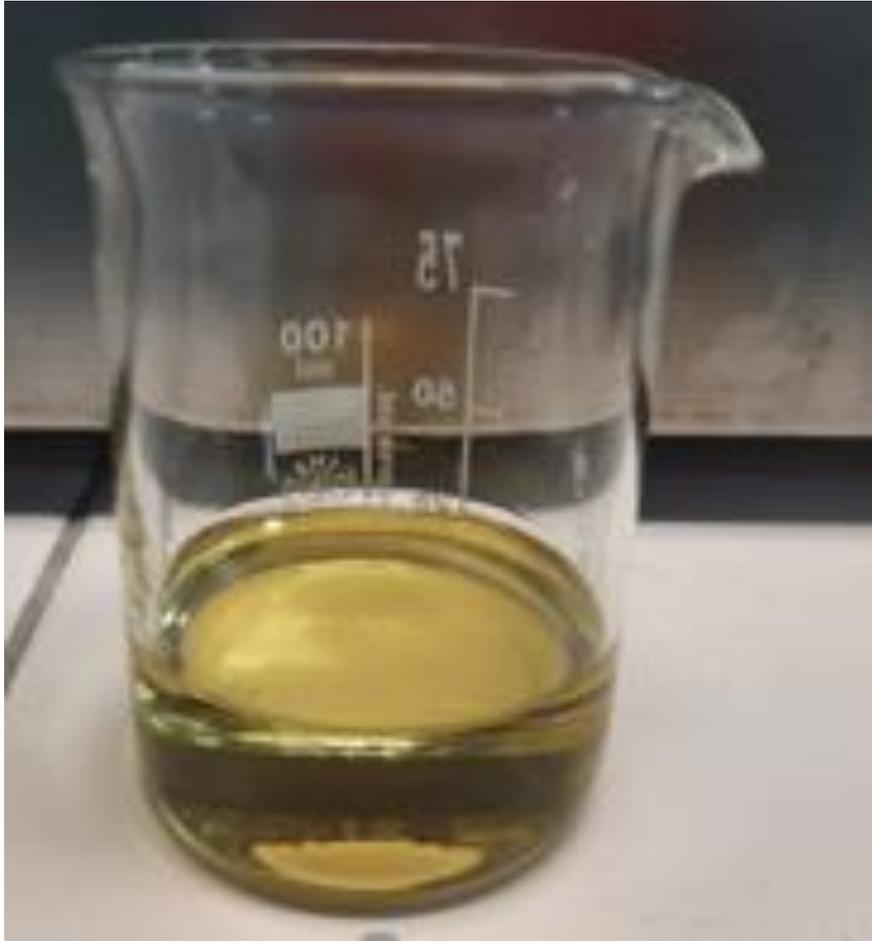
Apéndice E. Muestra de sebo esterificado a 25°C.

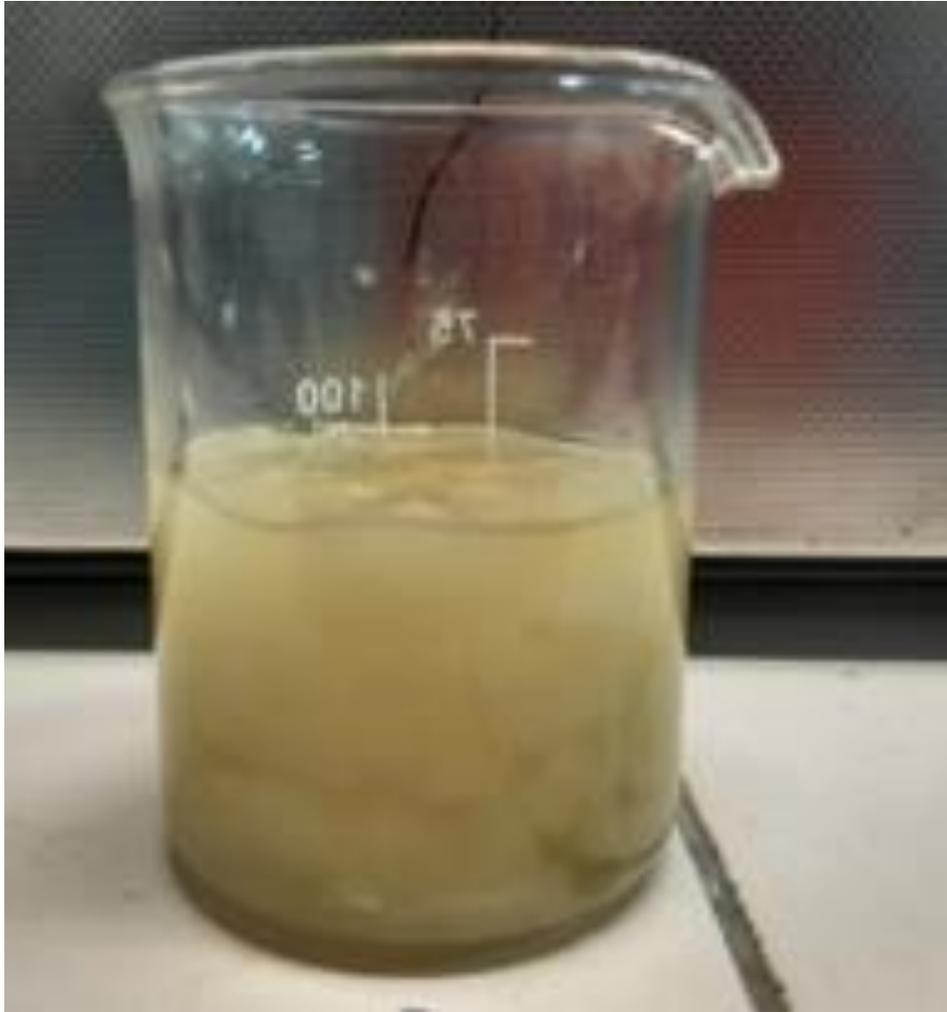


Apéndice F. Muestra de biodiésel de sebo bovino a 25°C.



Apéndice G. Muestra de base biolubricante líquida a 25°C.





Apéndice H. Comparación de todas las muestras obtenidas durante la experimentación a 25°C.

