

UNIVERSIDAD EAN

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE DE *CANNABIS SATIVA L.* (CÁÑAMO)

PROYECTO DE GRADO- PREGRADO

STIVEN HUERTAS & MISCHEL S. TORO

FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD EAN

INGENIERÍA QUÍMICA

LILIANA MARGARITA MEZA BUELVAS

BOGOTÁ D.C, 30 NOVIEMBRE DE 2021

Resumen

Este trabajo presenta los elementos de ingeniería necesarios para la obtención y caracterización del biodiesel obtenido a partir de aceite de cáñamo, a escala de laboratorio, considerando los problemas relacionados con la industria bioenergética y del cáñamo en Colombia, por medio de un estudio de las propiedades fisicoquímicas y de la cinética de la reacción de transesterificación. La investigación bajo los lineamientos de la Gerencia de investigaciones de la Universidad EAN se centra en el campo de la Ciencia, Tecnología e Innovación, donde bajo un diseño experimental diferenciado, implementado para dos muestras de aceite de cáñamo se pudo identificar por medio de la técnica analítica ATR-IR la obtención de biodiesel y además se observa que dentro del beneficio bruto para cada gramo de biodiesel de cáñamo se obtiene COP\$11.275 y COP\$6.347, para la muestra 1 y 2, respectivamente, compensando con el costo inicial del aceite de cáñamo. En conclusión, el aceite de cáñamo resulta ser una materia prima con potencial bioenergético que cumpliendo con el marco legal disponible permitiría abarcar toda la cadena de valor de la creciente bioeconomía circular.

Palabras clave: *Cannabis Sativa L, ATR-IR, Biodiesel, Laboratorio, Universidad EAN.*

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 7 |
| 2. Problema de investigación | 8 |
| 3. Objetivos | 10 |
| 3.1 Objetivo general..... | 10 |
| 3.2 Objetivos específicos | 10 |
| 4. Justificación | 11 |
| 5. Marco teórico | 15 |
| 5.1 Antecedentes | 15 |
| 5.2 Aspectos técnicos..... | 21 |
| 5.3 Marco institucional | 25 |
| 5.4 Marco legal | 25 |
| 6. Análisis de requerimientos..... | 33 |
| 7. Análisis de restricciones | 36 |
| 8. Metodología para el desarrollo de la solución | 41 |
| 8.1 Especificaciones de la solución de ingeniería..... | 43 |
| 8.1.1 Insumos químicos | 43 |
| 8.1.2 Materias primas..... | 44 |
| 9. Equipos primarios..... | 46 |
| 9.1 Dimensionamiento de los componentes | 47 |
| 9.1.1 Cinética de la reacción..... | 47 |
| 9.1.2 Rendimiento de la reacción | 49 |

| | |
|---|----|
| 9.1.3 Rendimiento del biodiesel | 50 |
| 10. Análisis de costos del diseño experimental | 51 |
| 10.1 Estimación de costos..... | 51 |
| 10.2 Análisis de Beneficio Bruto..... | 55 |
| 11. Análisis de resultados | 57 |
| 12. Caracterización de biodiesel a partir de Cannabis Sativa L a escala laboratorio | 57 |
| 12.1.1 Determinación de densidad..... | 57 |
| 12.1.2 Determinación de viscosidad..... | 58 |
| 12.2 Análisis ATR-IR | 59 |
| 12.3 Rendimiento del biodiesel y condiciones de la reacción de transesterificación..... | 63 |
| 13. Conclusiones | 65 |
| 14. Recomendaciones | 67 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Publicación de estudios relacionados con el cáñamo | 13 |
| Figura 2. Propiedades químicas, nutricionales y fisiológicas del cáñamo | 22 |
| Figura 3. Esquema de producción de bioediesel..... | 25 |
| Figura 4. Capas de protección para seguridad del proceso. | 40 |
| Figura 5. Etapas para la obtención de biodiesel a escala laboratorio..... | 41 |
| Figura 6. Pico Normalizado | 60 |
| Figura 7. Espectros procesados después de la adquisición. | 61 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Desarrollo de conceptos | 24 |
| Tabla 2. Matriz de Requisitos Legales e Ingenieriles | 28 |
| Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas y requerimientos técnicos del biodiesel (Coy et al., 2015)..... | 34 |
| Tabla 4. Resultados para propiedades fisicoquímicas del diésel (Jayaraman et al., 2021). | 34 |
| Tabla 5. Propiedades fisicoquímicas y aspectos del biodiesel según cultivo (Parvez et al., 2021). . | 35 |
| Tabla 6. Propiedades termoquímicas de ácidos grasos del aceite de cáñamo | 44 |
| Tabla 7. Propiedades termoquímicas de los insumos..... | 45 |
| Tabla 8. Equipos y aparatos necesarios durante el proceso. | 46 |
| Tabla 9. Costos directos del diseño experimental | 53 |
| Tabla 10. Costos fijos del diseño experimental | 54 |
| Tabla 11. Costo total | 54 |
| Tabla 12. Costo de la química de reactivos y productos | 55 |
| Tabla 13 Costo de la reacción | 55 |
| Tabla 14. Propiedades fisicoquímicas y cantidad de producción del biodiesel a partir de <i>Cannabis Sativa</i> <i>L.</i> | 58 |
| Tabla 15. Pico de espectros normalizado | 60 |
| Tabla 16. Bandas características del biodiesel obtenido para la muestra 1 y 2..... | 62 |
| Tabla 17. Condiciones de operación | 64 |

1. Introducción

Durante los últimos años, los biocombustibles han surgido como sustitutos para el diésel derivado del petróleo, debido a que estos últimos generan impactos ambientales negativos e incrementan la emisión de sustancias contaminantes, contribuyendo así a la producción de gases de efecto invernadero (Viornery et al., 2020).

En este contexto, ha sido necesario expandir el uso de fuentes de energía renovables a través del aprovechamiento de biomasa, de manera que el biocombustible pueda ser usado en cualquier motor diésel convencional, tanto puro como en mezclas; específicamente, en la actualidad destacan el biodiesel y el bioetanol. Sin embargo, como lo sustenta (Mazzetto et al., 2015), estos combustibles de materia vegetal involucran una amenaza a la seguridad alimentaria, ya que por lo general las materias primas usadas provienen de cultivos destinados al mercado alimenticio.

Con base a lo anterior, en el presente estudio se considera el *Cannabis Sativa L* para generar biodiesel, puesto que este derivado genético del cannabis, con niveles de tetrahidrocannabinol (THC) inferiores al 0,3% ha demostrado una riqueza en aminoácidos y un contenido cercano al 30% de aceite oleico (Rezapour, 2017). Adicionalmente, bajo estudios reportados en la literatura se ha validado que el biodiesel a partir de cáñamo, por sus propiedades fisicoquímicas, cumplimiento de normativas legales aplicables, y conversiones de incluso el 97% en la reacción de transesterificación (Buckley, 2010), se postula como un combustible alternativo para motores diésel.

De esta forma, el presente proyecto expone la producción de biodiesel a partir de aceite de *Cannabis Sativa L* (cáñamo), con el fin de evaluar sus propiedades fisicoquímicas y el cumplimiento de estas con la normativa del territorio nacional, para finalmente identificar aquellas condiciones de operación incrementan el rendimiento de la transesterificación y permiten reconocer a dicha fuente vegetal como una materia prima potencial en el sector energético y agroindustrial.

2. Problema de investigación

De acuerdo con en el trabajo realizado por Huertas y Toro (2021), donde se realizó principalmente el desarrollo de la investigación básica asociada al cáñamo industrial, se encuentra que la bioenergía es un sector promisorio para el aprovechamiento de esta planta. Sin embargo, como lo plantea Parvez et.al (2021) la investigación aplicada sobre su explotación en áreas industriales como la coproducción en biorrefinerías de cáñamo industrial no se han considerado en la literatura, en comparación con otros cultivos energéticos como la soja y palma aceitera, los cuales ocupan alrededor del 77% de la producción de biodiesel (OCDE/FAO, 2020); lo anterior, reduce directamente la disponibilidad de alimentos derivados de estos cultivos, lo que conlleva a un alza de precios y por tanto, a la disminución de la demanda de los mismos por parte de sectores de la población con escasos recursos (CSA, 2013).

De esta manera, se encontró que en Colombia hacia el año 2015, la Policía Nacional - División Antinarcóticos recolectó 52 especies, pertenecientes a *Cannabis Sativa L*, sin embargo, se desconoce la cantidad total de cultivos existentes en el territorio nacional (Montacchini et al., 2018), así, con la legalización del cultivo de *cannabis* en el 2016, por medio de la Ley 1787 del 2016 y el Decreto 613 emitido en 2017, se empezó a fomentar la inclusión de esta planta como una alternativa promisorio con altas capacidades industriales.

En este sentido, Colombia se presenta como un lugar estratégico para el crecimiento y aprovechamiento del cáñamo, dado que este habita en regiones cálidas, terrenos aluviales, permeables y ricos en nitrógeno (muy presentes en el departamento del Valle); es así, como con el actual marco regulatorio y legislativo que existe sobre *cannabis* en Colombia, se abre paso para el uso del cáñamo como una alternativa emergente a los combustibles fósiles y a los actuales biocombustibles, convirtiéndolo así, en una materia prima con altas oportunidades de investigación. Además, esta planta cumple un papel fundamental en el desarrollo de la polinización de las abejas en tiempo de escasez floral

nativa y agrícola, dado que esta planta florece a fines del verano, liberando un alto contenido de polen (Flicker et al., 2020).

Bajo esta perspectiva, la carente investigación sobre el cáñamo hará que la aprobación política y comercial asociada al cannabis se vuelva un mecanismo obsoleto, llevando el desarrollo potencial de las amplias aplicaciones de este a espacios reducidos, con poco valor científico, altos costos, y de manera transitiva cerrando la brecha para atraer inversionistas y el espacio para la participación de pequeños y medianos productores. Según lo presentado por Fedesarrollo en el 2019, Colombia “debería aprovechar las posibilidades productivas del cáñamo, y la capacidad de desarrollo industrial de este sector” (Fedesarrollo, 2019), es así como la articulación con actividades técnico-científicas enfocadas en el modelado multiescala aseguraran el éxito del diseño e ingeniería del biodiesel a partir de cáñamo, en términos de concepto y mercado (Charpentier, 2016).

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

- Producir biodiesel a partir de aceite *de Cannabis Sativa L* (cáñamo) mediante la reacción de transesterificación con metanol (alcohol simple) para el reconocimiento científico de dicha fuente vegetal como una materia prima potencial y versátil en el sector energético y agroindustrial.

3.2 Objetivos específicos

- Evaluar las principales características fisicoquímicas del biodiesel a partir de aceite de cáñamo a través de técnicas analíticas (ATR-IR) para generar las especies activas en la transesterificación.
- Validar el cumplimiento de las características fisicoquímicas del biodiesel a partir de normativa legal aplicable a Colombia.
- Identificar condiciones de operación y factores que aumentan el rendimiento de la reacción de transesterificación de esteres metílicos a través de la revisión de parámetros en la literatura.

4. Justificación

El interés por los biocombustibles ha cobrado importancia durante los últimos años, ya que la creciente dependencia global por la generación energética ha llevado a la exploración y uso de combustibles fósiles, tales como el petróleo, el gas natural y el carbón (Arroyo, 2017), teniendo estos una participación del 80% en la generación mundial de energía (Banco Mundial, 2020). Sin embargo, estos combustibles fósiles han provocado un aumento del 62% en emisiones de CO₂ entre 1990 y 2019 (ONU, 2019). En este sentido, a fin de suplir las demandas energéticas y de acuerdo con el protocolo de Kioto donde se plantea reducir los efectos por los gases de efecto invernadero (GEI), surge la necesidad de producir combustibles biológicos a partir de un desarrollo rural fundamentado en el uso racional de residuos orgánicos e insumos agrícolas (Morelos, 2016).

Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), a nivel Latinoamérica, los biocombustibles de principal interés son el bioetanol y biodiesel; para el caso colombiano, el biodiesel involucra diversos sectores desde el agroindustrial hasta el de transportes, con una producción nacional hacia el 2017 de 460121 ton (Fedebiocombustibles, 2017).

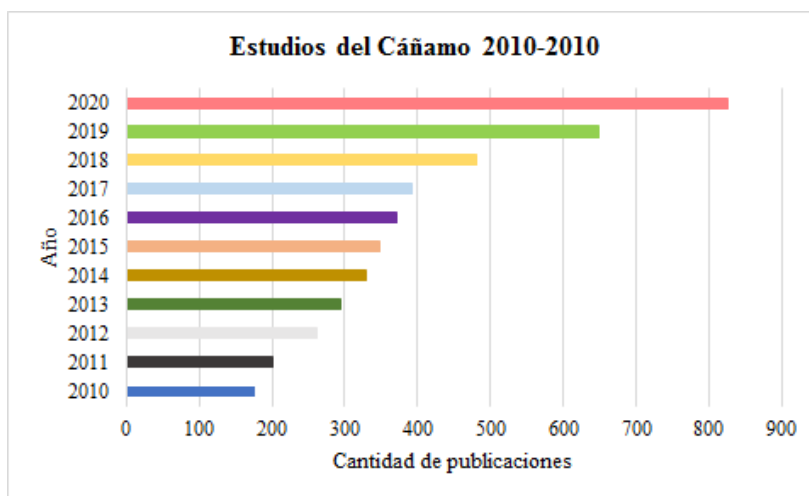
Específicamente, el biodiesel, una mezcla de esteres metílicos de ácidos grasos (FAME) ha demostrado diversas ventajas como la reducción de las emisiones de monóxido de carbono (CO) en un 48%, dióxido de carbono (CO₂) en un 79%, material particulado (PM) en un 47%, óxidos de azufre (SO_x) en un 100%, hidrocarburos (HC) en un 67% e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) en un 80%. En términos del proceso productivo, se encuentra que la tecnología de producción es sencilla, basada inicialmente en la transesterificación de ácidos grasos (derivados de biomasa o fuente vegetal) en presencia de un alcohol de bajo peso molecular y un catalizador como el hidróxido de sodio o potasio. Adicionalmente, el biodiesel se caracteriza por ser un sustituto eficaz puesto que funciona en cualquier motor diésel ya sea en mezcla (Bx) o totalmente puro (B100).

Como se mencionó previamente, frente al entorno de los mercados y la sostenibilidad en procesos productivos, surge la necesidad de conocer y estudiar nuevas fuentes de biomasa que brinden mayor versatilidad y rentabilidad en la producción de biocombustibles. A partir de ello, se encuentra que el cáñamo, taxonómicamente conocido como *Cannabis Sativa L*, se posiciona como una fuente de biomasa de especial interés, ya que permite la coproducción tanto de bioetanol como de biodiesel. Como se reportó en el estudio de (Buckley, 2010) a partir del aceite de cáñamo se obtiene una conversión a 97% biodiesel, que se quema a temperaturas más bajas con respecto a combustibles a partir de soja o colza.

Ahora bien, se ha demostrado el bajo componente de psicoactividad del cáñamo (menor al 0.3% de THC) al igual que su riqueza en aminoácidos, y su contenido aproximado de 30% de aceite oleico (Rezapour, 2017), aspectos que lo consolidan como un producto agrícola versátil; sin embargo, como lo menciona Parvez et al. (2021), los estudios e investigaciones alrededor de la misma ha presentado limitaciones por diferentes connotaciones culturales y legales que se derivan de la consideración de tal producto como una sustancia psicoactiva. En ese sentido, la necesidad de investigar sobre las potencialidades de este producto para generar valor agregado en su cadena productiva se ha evidenciado en el aumento de estudios publicados alrededor del cáñamo, como se observa en la Figura 1, pasaron de 202 publicaciones en el año 2011, a 821 publicaciones en el 2020 (Web of Science, 2020). Según García et al. (2019) y Zhao et al. (2020) resulta necesario tener un acercamiento más técnico al cáñamo, para conocer todas sus propiedades y determinar sus aplicaciones industriales.

Asimismo, gracias a la proclividad climática del cultivo de *Cannabis Sativa* en Colombia en el 2019, fueron solicitadas 247 licencias para cultivo de Cannabis, de las cuales 129 eran cultivos no psicoactivos; también, se obtuvo que los principales focos de la industria del Cannabis con un 52% y 45% del total del mercado eran por las siembras no psicoactivas y por la investigación y desarrollo, respectivamente (Fedesarrollo, 2019).

Figura 1.
Publicación de estudios relacionados con el cáñamo



Adaptado de (Web of Science, 2021)

De acuerdo con lo anterior, el presente proyecto de investigación, bajo los lineamientos de la Gerencia de investigaciones de la Universidad EAN, se encuentra enmarcado en el campo de la Ciencia, Tecnología e Innovación, y encaminado hacia la línea de Gestión y Diseño de Procesos, y Cadena de Suministro, tiene como propósito presentar la obtención de biodiesel a partir del aceite de cáñamo a través de la técnica experimental de transesterificación con metanol para generar una caracterización cuantitativa del biodiesel por medio de análisis físico químicos que permitan esbozar los beneficios tecnológicos, operativos, ambientales y de rendimiento de dicho biocombustible. Hacer esta investigación se hace pertinente puesto que se contribuirá a generar un estudio exploratorio del biodiesel a partir del cáñamo para entender la relevancia de esta materia prima en el mercado colombiano como un avance y oportunidad del uso sostenible de la biodiversidad con fines comerciales y agroindustriales.

De igual forma, los resultados del estudio ayudarán a percibir el potencial de desarrollo del cáñamo y del biodiesel en un país megadiverso como Colombia, resaltando así, la faceta de la academia, industria y sociedad en el desarrollo de productos verdes con alto valor agregado. Bajo

este contexto, los resultados del estudio beneficiarán a investigadores, empresas, al sector energético y agrícola interesados en lograr más competitividad en sus cadenas industriales, y obtener ingresos que en últimas aportarán a la economía nacional, a partir del aprovechamiento del aceite del cáñamo.

5. Marco teórico

A continuación, para facilitar la conceptualización de la investigación, se describen e incluyen aspectos relevantes como antecedentes, generalizaciones empíricas, reportes de investigación previos y actuales que comprenden el desarrollo de la perspectiva teórica conceptual, teórica metodológica y normativa en torno al uso del *Cannabis Sativa L* en la producción de biodiesel.

5.1 Antecedentes

El avance en la investigación durante la última década y la demanda energética han dado un impulso notable en el estudio y la conversión de aceites vegetales en biocombustibles, donde el contexto histórico del biodiesel se remonta al proceso de obtención más usado, es decir, la transesterificación.

En el estudio de Kumar et al. (2019) se realiza un seguimiento histórico a dicho método, donde se resalta el primer proceso de transesterificación a partir de aceite vegetal, ejecutado en 1853 por los científicos E. Duffy y J. Patrick. Años más tarde, durante la Exposición Internacional de París en 1900, se ratificó el uso de material vegetal como combustible, ya que el alemán Rudolph Diesel, presentó el primer motor diésel alimentado con aceite de maní. Luego, hacia 1937, se patentó el primer “Procedimiento para la transformación de aceites vegetales en combustibles” a partir de la transesterificación con metanol y etanol, por parte de G. Chavanne.

Adicionalmente, bajo el especial encadenamiento de la crisis del petróleo en la década de los 70, con la generación de GEI, se evidenció por parte de Brasil el reemplazo de combustibles fósiles por etanol (Carneiro et al., 2017), donde Colombia siguió dicha referencia, por lo cual, en los inicios de los años 80, se dio el planteamiento de políticas que fomentaban la producción de biocombustibles, diversificando así, la canasta energética colombiana y creando oportunidades en materia de desarrollo económico y empleo en zonas rurales del país.

En esta línea, el biodiesel, combustible sin sustancias aromáticas cancerígenas, asocia directamente el proceso de transesterificación. Como tema de interés del presente estudio, se abordará la producción de esteres metílicos a partir de aceites vegetales de cáñamo en presencia de metanol.

Ahora bien, la transformación tecnológica del cáñamo en productos de gran valor se ha convertido cada vez más, en un atractivo para las industrias. El trabajo de Rijavec et al. (2017) realiza un recorrido histórico del cáñamo, el cual tuvo su primera referencia en India y Asia Central puesto que en un yacimiento neolítico de Yuan- Shanu (actual Taiwán) se encontraron rastros de cintas de cáñamo que datan del 10000 a.C. El testimonio más antiguo del uso del cáñamo se remonta al herbolario del emperador Shen Nung quien fomentó el cultivo del cannabis para la producción de telas. El cáñamo, ya en el 500 a.C se mencionada como una fuente de fibra textil, y era usado por los escitas para realizar cordajes, quienes más tarde según Cámara (2017) llevarían el cáñamo a Europa por rutas de comercio.

Cabe aclarar que, aunque la mención de esta planta, desde la antigüedad se ha relacionado a una fuente psicoactiva, y a pesar de las prohibiciones alrededor de la misma, durante los siglos XVI y XVIII el cáñamo logró alcanzar una especial importancia reflejada tanto en la redefinición de sus diferentes usos como en el aumento de investigaciones alrededor de sus propiedades; estas contribuciones están ligadas a la versatilidad de la planta puesto que, como lo afirma García et al. (2019) en términos agronómicos, el cultivo del cáñamo crece en amplias condiciones agroecológicas y con poca demanda de agua o fertilizantes.

La investigación de Fike (2016), se concentró en la búsqueda de aquellos productos y subproductos a partir del cáñamo, y en los sectores donde se puede aprovechar más; en este, se expuso que, a partir de la fibra del floema de la planta se fabrica papel fino, de igual forma, tanto la fibra de alta y baja calidad se usan en la producción de textiles, fabricación de materiales biocompuestos, sustitución de la fibra de vidrio y producción de biomasa. A esto se suma el potencial

del aceite de las semillas de cáñamo, pues Aizpurua (2016) enuncia su uso en el desarrollo de cosméticos, biodiesel, alimentos, productos como barnices y pinturas, entre otros.

Además, esta planta permeó la región Latinoamericana en el siglo XVI, por medio del conocido “trueque” entre las Américas, África Occidental y el Viejo Mundo, donde se destaca que dicho intercambio, trajo consigo animales, poblaciones humanas, tecnología entre otros, para que después de largos periodos de proscripción y políticas de uso y permisibilidad en la salud pública, en el año 2018 se realizaran estudios de investigación clínica bajo el protocolo # 1046, aprobado por instituciones clínicas, el cual se enfocó en el aceite del cannabidiol (CBD) y su impacto medico en pacientes pediátricos con epilepsia refractaria del Hospital de Pediatría JP Garrahan, donde se evaluaron dosis 25 mg/ml, con el fin de realizar caracterizaciones farmacocinéticas del CBD, convirtiéndose este en el primer protocolo clínico de aceite de CBD en América Latina (Cáceres et al., 2020).

Continuando, el estudio de Devi & Khanam (2019) aborda la comparación de diversos procesos para extraer aceite de las semillas de cáñamo teniendo en cuenta las propiedades fisicoquímicas y composiciones de este. Se encontró que el método *soxhlet* tuvo el máximo rendimiento (37,30 %) de extracción; por su parte, el bioaceite resultante del proceso de pirólisis fue idóneo como combustible en términos de su composición en materiales volátiles e inflamables. Sin embargo; económicamente, la evaluación a escala industria demostró que la extracción de fluidos supercríticos es más beneficiosa, proporcionando más pureza en el aceite. En general, se encontró que los ácidos grasos predominantes con potencial de aprovechamiento industrial son: el ácido linoleico, ácido palmítico, y ácido esteárico.

De otra parte, en el trabajo de Zhao et al. (2020), se realizó una revisión del potencial de biomasa del cáñamo para la producción de bioetanol como combustible, encontrando que por la alta cantidad de celulosa la biomasa de este, sería una opción óptima en la producción de etanol; como recomendación se proporciona mantener un pretratamiento óptimo de la biomasa del cáñamo deberá

reducir la calcificación de la biomasa a las enzimas y aumentar la recuperación de azúcar y mayor remoción de lignina.

Adicionalmente, Sair et al. (2020) señalan a partir su estudio experimental-investigativo que el tratamiento alcalino y salinizado sobre las fibras de cáñamo, lleva a la mejora de sus propiedades mecánicas y a la remoción efectiva de impurezas como lignina y hemicelulosa. De acuerdo con la investigación, se presentó el aumento de la rugosidad superficial de las fibras y un aumento del 13-15% en su conductividad térmica, lo que en consecuencia permite la optimización de la interfaz fibra/matriz en compuestos, o polímeros como el poliuretano.

Otro estudio que refleja las propiedades del cáñamo aplicadas a la industria a nivel alimenticio es el realizado por Nissen et al. (2020), en el cual se determinó la actividad probiótica de diversas bebidas de semillas de cáñamo, y se encontró que estas, por su riqueza en moléculas antioxidantes y bioactivas, permiten el crecimiento de probióticos con mayor cantidad de acetato y butirato; además, contienen terpenos que impiden el desarrollo de microorganismos o patógenos bacterianos (enteropatógenos).

Ahora bien, el aceite de cáñamo posee un alto contenido de ácidos grasos y antioxidantes (carotenos y tocoferoles) que permiten la hidratación de la dermis (López, 2021), aspecto por el cual se ha proyectado su uso en áreas como la cosmetología; en efecto, autores como Grijó et al. (2019) proporcionan modelos de referencia para la extracción del aceite usando diversas sustancias como n-propano, dióxido de carbono supercrítico y disolventes orgánicos, de las cuales, el n-propano permitió obtener mayores concentraciones de antioxidantes y menos acidez en el extracto.

Al mismo tiempo la actual industria europea del cáñamo se centra en la fibra de cáñamo, la cual junto con sus tallos y haces primarios se corta en pequeñas partes durante la cosecha y posteriormente se procesa; particularmente, en esta última etapa se planteó un proyecto que buscó optimizar el cultivo para mejor la calidad de las fibras en la región de Flandes (Bélgica), la cual tiene

una arraigada tradición hacia la producción textil. De acuerdo con los resultados, se concluye que el uso de quipos de lino es un enfoque atractivo en el diseño de una industria europea que permite la generación de textiles a corto supliendo la alta demanda de lino en dicha región. Sin embargo, es importante continuar investigando en las condiciones de recogida de la plata y a su vez realizar un estudio exhaustivo de las propiedades del cáñamo en el transcurso de la cadena de valor (Vandepitte et al., 2020).

Y ahora, haciendo énfasis en la producción de biodiésel a partir de *Cannabis Sativa L*, se encuentra el estudio aplicado por Teja et al. (2020), donde se generó biodiesel a partir de entidades orgánicas y se caracterizó con el objetivo de generar comparativos respecto al diésel estándar. El éster metílico se obtuvo por transesterificación catalizada por ácido, donde se mezclaron 2L de aceite de cáñamo junto a metanol y ácido sulfúrico, bajo unas condiciones de reacción de 55°C, 90 min y 450 rpm. En cuanto a las condiciones de prueba, estas, se determinaron en un motor diésel configurado para funcionar durante 30 min con diésel estándar. Las muestras de análisis fueron diésel estándar, HOME25, HOME50, HOME75 y HOME100. En el estudio se concluyó que la Eficiencia Térmica del Freno (BTE) disminuyó para las muestras HOME, con un rendimiento del 95.30% en la transesterificación. En términos de emisiones de HC y CO, estas tuvieron una reducción significativa al aumentar la cantidad de éster metílico. Sin embargo, las emisiones de NO_x y CO₂ fueron mayores ya que el éster metílico contiene más CO₂, adicionalmente, las emisiones de HC fueron menores que las generadas por el diésel estándar.

De otra parte, se ha evidenciado que el cáñamo resulta ser un sustituto efectivo del diésel, con mejores rendimientos ya que el consumo de combustible específico del freno a plena carga (BSCF) es de 0.3 kg/ kWh siendo inferior al combustible diésel (0.32 kg/kWh). En este caso, el biodiesel de cáñamo obtenido por Asokan et al. (2021) se sustentó en el secado de las semillas de cáñamo fue a una temperatura de 50°C; posterior a ello, por medio de extracción soxhlet se obtuvo el aceite de cáñamo, y finalmente, se desarrolló la transesterificación con una solución de metanol y KOH al

5% vol, con una relación molar de metanol a aceite de 16:1. La reacción se ejecutó durante una hora a 60°C y 400 rpm. El biodiesel obtenido con un rendimiento del 90%, se mezcló en diferentes % con diésel. Se realizaron pruebas bajo certificación ASTM, donde la densidad del HMB es 8,1 % mayor que el diésel, con un punto de inflamación de 162°C.

En términos generales, la producción de biodiesel lleva a la descentralización en la producción de energía, y conduce al desarrollo de recursos endógenos. Por lo anterior, los aspectos agroecológicos y de alto rendimiento de la biomasa vegetal provenientes del cáñamo, postulan a este, como materia prima potencial en el campo energético; sin embargo, autores como Buck & Seen (2016) exponen que su aplicabilidad requiere de un previo análisis ambiental (ACV). Así mismo, argumentan como práctica óptima fomentar el cultivo de cáñamo, con fertilizantes a partir de residuos orgánicos.

En este contexto, Viswanathan et al. (2021) proponen estudiar el rendimiento de las semillas y la producción de biocombustible por hectárea de cáñamo, teniendo en cuenta que bajo la simulación y el análisis tecno económico de una planta de biocombustible lignocelulósica en el aplicativo SuperPro Designer, con un consumo de 85 ton/h de cáñamo se encontró que el cáñamo con un contenido del 2% de lípidos lleva a producir 3,95 millones de galones de biodiesel anualmente. A esto se suma que, el costo de producción unitario de equilibrio (UPC) para el biodiesel de cáñamo con contenidos de lípidos del 2, 5 y 10% es de \$ 18,49, \$ 7,87 y \$ 4,13 / galón, respectivamente. El costo de producción unitario de biodiesel por galón cuando se utiliza cáñamo que contiene lípidos al 10% fue comparable al biodiesel de soja a \$ 4.13. Finalmente, al realizar una comparación se encontró que una hectárea de cáñamo industrial puede llegar a producir un 51% más de biodiesel que la soja.

En síntesis, los estudios experimentales y tecno económicos mencionados, validan el uso de biodiésel de aceite de cáñamo como uno de los combustibles alternativos en los motores diésel del futuro, por sus propiedades fisicoquímicas, cumplimiento de requerimientos, y rendimientos de las reacciones de transesterificación.

5.2 Aspectos técnicos

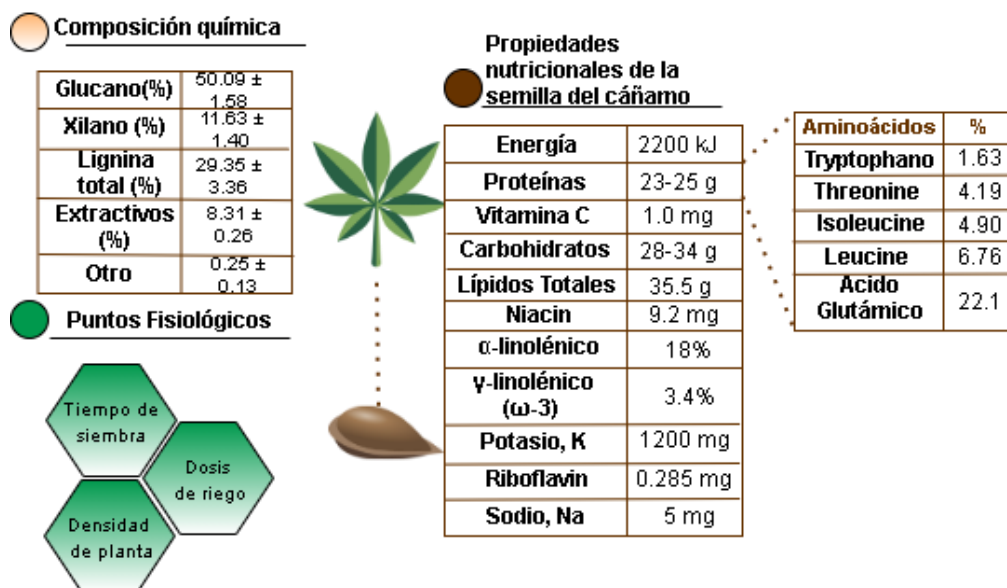
Asimismo, se presenta una descripción de las bases teóricas que soportan el presente estudio haciendo referencia a las variables de este y a las relaciones existentes, basadas en los objetivos y en el planteamiento del problema. De acuerdo con Hao et al.(2015), la planta de cannabis ha sido utilizada en gran medida en la medicina popular india y árabe, específicamente en el grupo étnico Uyghur de la República de China, para fines terapéuticos; en los últimos años, el interés científico y tecnológico por el cáñamo ha ido creciendo, centrándose en el cannabidiol (CBD), el segundo principal constituyente con propiedades no psicotrópicas, dado que además de los beneficios en la regulación de la energía, el metabolismo, la respuesta al estrés entre otros, la interrelación hombre-planta ha ampliado las perspectivas que se tenían desde épocas muy primitivas para aprovechar la tecnología emergente y existente, que permita descubrir y explorar más propiedades alrededor de esta. (Diaz, 2014).

Es así como, Pergamo et al. (2018) plantea que el desarrollo de nuevas tecnologías permite explotar continuamente las áreas prominentes para el uso del *Cannabis Sativa L.* con amplia versatilidad, para cada vez sea objeto de análisis social, económico y científico, en aras de construir un modelo de desarrollo sostenible basado en la cadena de valor. De este modo, es importante destacar el procesamiento que se lleva a cabo en el cáñamo, el cual se encuentra dividido en semillas y fibra, primero, las semillas son llevadas a un subproceso primario y secundario en aceite , en el cual se desarrolla un proceso semejante al aplicado en tradicional en semillas oleaginosas; en segundo lugar, la fibra atraviesa por un subproceso primario donde se sustrae el núcleo de esta, y luego cada uno de estos entra en varios subprocesos secundarios complejos para convertirlos en productos de mayor valor (Russell et al., 2015).

Como se mencionó anteriormente, las semillas permiten la generación del aceite el cual es uno de los pocos “que contiene alrededor del 80% de ácidos grasos poliinsaturados como el ácido linoleico (ω -6), el 3,4% de γ -linolénico (ω -3) y el 18% de α -linolénico (ω -6)” (Babiker et al., 2021),

además, como se muestra en la Figura 2, con un alto contenido proteico, en minerales, vitaminas, entre otros, los cuales son óptimos para la salud humana.

Figura 2.
Propiedades químicas, nutricionales y fisiológicas del cáñamo



Tomado y adaptado de (Bakowska-Barczak et al., 2020); (Das et al., 2020)

Los datos de composición química, presentados en la Figura 2, están basados en el estudio de 11 cultivos de cáñamo industrial, en Estados Unidos, tomando como punto de referencia el cultivo denominado *Elleta Campana*, el cual presentó altos contenidos de lignina, el cual es “un componente vital de la pared celular de la planta que representa aproximadamente el 10-30% de la biomasa” (Das et al., 2020). Asimismo, dentro del contenido nutricional, se observa que no presentan gluten, siendo de alto uso como un componente dietético (Bakowska-Barczak et al., 2020).

De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta la necesidad latente de energía para la vida en la época actual, el aceite derivado de las semillas del cáñamo subyace como una materia prima renovable fundamental en la generación de biodiesel, la cual es una alternativa promisoriosa y de

valor para hacer frente a la actual demanda energética mundial, además de atraer valor sostenible y renovable a sectores de la bioeconomía circular y de base biológica (Moscariello et al., 2021).

Dentro de este contexto, se encuentra que el biodiesel es principalmente producido a través de aceites vegetales o usados ricos en triglicéridos por transesterificación, sin embargo, estos aceites en su gran mayoría son de carácter alimenticio, lo cual a largo plazo no es sostenible por la alta competencia alimentaria frente a los productos alimenticios que genera el aumento de la población mundial, provocando alza de precios y a su vez inseguridad alimentaria (Rehman et al., 2013), (Viswanathan et al., 2021). Además, según la investigación realizada por Parvez et al. (2021) el biodiesel obtenido a partir del cáñamo ofrece una tasa de conversión del 75,9% a partir del aceite de la semilla utilizando un catalizador básico (hidróxido de potasio), sin embargo, Li et al. (2010) ha encontrado rendimientos de hasta el 97%, esto demuestra el alto potencial para usar esta sustancia en la producción de biodiesel.

Además, se debe conocer los conceptos abordados para el estudio mencionado (Tabla 1), por medio de la literatura emergente sobre el tema y de esta manera identificar las relaciones y dimensiones conceptuales asociadas, considerando su comportamiento y susceptibilidad a ser medidas.

Como se muestra en la Tabla 1, las variables de estudio identificadas para el presente estudio, se encuentra interrelacionadas en aras de proporcionar y evaluar los factores específicos para la producción de la materia prima para la producción de bioenergía y materiales de base biológica (Kircher, 2021), esto teniendo en cuenta los altos contenidos de biomasa que proporciona el cáñamo y a su vez con esta se busca fortalecer el desarrollo tecnológico en el procesamiento postcosecha del cultivo del cáñamo.

Tabla 1.
Desarrollo de conceptos
Concepto de estudio

| Concepto de estudio | Definición | Dimensiones |
|----------------------------|---|---|
| Biodiesel | Combustible líquido renovable obtenido a partir de aceites de semillas con alto contenido de triglicéridos mediante un proceso de transesterificación por medio de mecanismos de reacción alcalinos, ácidos o catalizados por enzimas (Rheay et al., 2021). | <ul style="list-style-type: none"> • Humedad • Contenido de azufre • Punto de inflamación • Viscosidad cinemática |
| Aceite de cáñamo | Aceite natural derivado de la semilla del cáñamo, usado en sectores como la cosmética, alimentos, energético, entre otros. (Das et al., 2017) | <ul style="list-style-type: none"> • Propiedades fisicoquímicas. |
| Transesterificación | Proceso de síntesis de biodiesel en presencia de un ácido, base o enzima como catalizador, siendo la ultrasonicación un método capaz de mejorar la mezcla, el calor y la transferencia de masa asociada al proceso (Tan et al., 2019). | <ul style="list-style-type: none"> • Naturaleza de la reacción. • Características de la reacción. • Selección del método. |

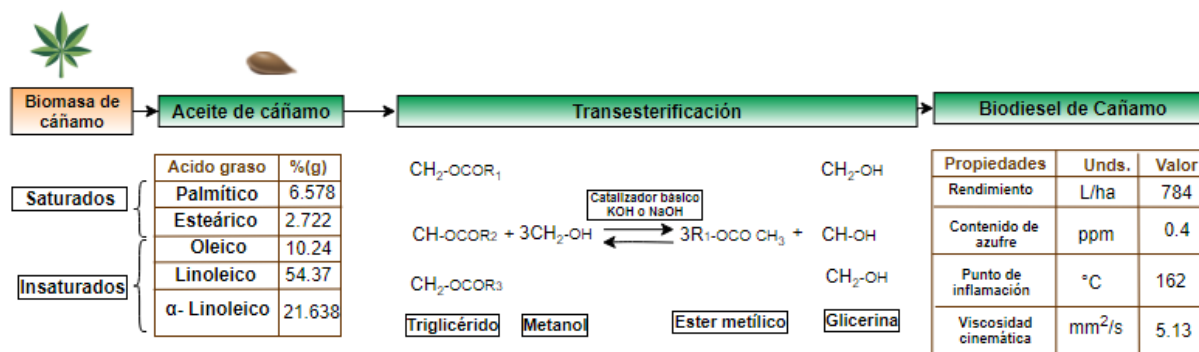
De esta manera, a continuación, se presenta la Figura 3 que relaciona los procesos macro de producción biodiesel a partir del cáñamo, teniendo en cuenta que las propiedades asociadas al aceite del cáñamo son tomadas de varios lugares de Pakistán, un país con altas demandas energéticas por suplir y con escasez de gas que ha impedido el crecimiento de varios sectores industriales como el textil de pequeñas y medianas empresas.

Esta base teórica permite recopilar conceptos y metodologías que influyen para que el cáñamo, en el marco del desarrollo socioeconómico de países en desarrollo como Colombia, cumpla un papel de generador de valor a través de los productos derivados de este, lo que contribuiría al producto interno bruto (PIB) y a su vez, creando oportunidades de empleo (Muflikh et al., 2021), pero esto, requiere de la comprensión y transferencia de conocimiento y actividades asociadas al procesamiento y a la identificación y explotación de las propiedades diferenciales que

ayuden a la actualización agro-técnica del cáñamo a nivel nacional e internacional, y así crear condiciones para industrias diversificadas e innovadoras basadas en el cáñamo (Polova y Bruskova, 2018), un ejemplo de eso es el proyecto *Multihemp*, coordinado por Universtia Cattolica del Sacro Cuore en Italia, donde se desarrolla una biorrefinería integrada basada en cáñamo, profundizando en el concepto de *fabrica verde* usando el potencial inherente de este cultivo (CORDIS, 2017).

Figura 3.

Esquema de producción de bioediesel



Tomado y adaptado de (Rehman et al.,2013); (Coy et.al, 2015)

5.3 Marco institucional

Para el estudio presentado, el sector industrial es uno de los más beneficiados, teniendo en cuenta que, con lo presentado anteriormente, resaltando su versatilidad, diseño verde y limpio entre otros, permite generar un amplio potencial en numerosas industrias ,y particularmente como materia prima para la bioenergía, por el alto contenido de biomasa señalada por (Fike, 2016), además de que actualmente, en el mercado mundial del cáñamo ya se cuenta con más de 25.000 productos diferentes partes del sector industrial como en la agricultura, textiles, reciclaje, automotriz, muebles, alimentos y bebidas, papel, entre otros (Johnson, 2018).

5.4 Marco legal

La base legal y jurídica aplicable, que enmarca la investigación, se encuentra relacionada con las posibilidades y restricciones para cultivar cáñamo y transformarlo en nuevos productos, tales como el biodiesel. En términos internacionales, la Comisión de Estupefacientes de la ONU, el 02 de

diciembre del 2020, reconoció las propiedades medicinales de esta especie y excluyó a la misma de la Lista IV de opioides letales y adictivos (ONU, 2020), donde se aclara que su uso con fines que no sean científicos o médicos se seguirá considerando ilegal. Adicionalmente indicaron en su informe que “el cannabidiol (CBD) con un 2% o menos de tetrahidrocannabinol (THC, sustancia adictiva) no debería estar sujeto a controles internacionales” (Deutsche Welle, 2020).

En el plano nacional, la Ley 30 de 1986 emitida por el Congreso Nacional decreta y reconoce en el Art. 3, que tanto el cultivo como la sustancias se pueden destinar a fines médicos y científicos, siempre y cuando se cumpla el Art.5 que menciona “Estas plantas sólo podrán ser cultivadas previa licencia expedidas por el Consejo Nacional de Estupefacientes, de acuerdo con la reglamentación que para el efecto se establezca”.

Adicionalmente, el 6 de julio de 2016, el Congreso de la República dictó la Ley 1787 del 2016, la cual rige en todo el territorio de la república y tiene como finalidad primordial proporcionar el marco regulatorio que posibilite “un acceso informado y seguro al uso médico y científico del cannabis y sus derivados en el territorio nacional colombiano” .De esta ley, surgió el Decreto 613 de 2017 por el cual se fijan cuatro tipos de licencia para el manejo y uso del cannabis según su fin, a esto se suma, la reglamentación en torno al seguimiento y control de actividades que impliquen la producción, cultivo o fabricación de la planta del cannabis y sus derivados en fines médicos o científicos (Minsalud, 2017).

En materia de biodiesel, Colombia ha establecido un marco normativo favorable, donde se tiene que hacia el año 2001, se estableció la Ley 693 donde se plantea como obligatoria la mezcla de bioetanol con gasolina; hacia mediados del 2004 se promulgó la Ley 939 para la producción de biodiésel, y en el año 2008 las plantas productoras de este biocombustible comenzaron su funcionamiento.




De igual forma, organizaciones no gubernamentales, gremios del sector energético y ambiental, e instituciones educativas, han explorado en investigaciones que permiten determinar las potencialidades de dicho sector en el país, considerando de manera especial su explotación en el sector de palma, aceites y grasas vegetales (Coy et.al, 2015), donde, específicamente en el cáñamo, Afif y Biradar (2019), reportaron que las propiedades definida por la norma ASTM D6751, que establecen las especificaciones del combustible son comparables con las obtenidas para el biodiesel obtenido por el aceite de *Canabis Sativa L* . A continuación, en la Tabla 2 se presenta la matriz de requisitos legales con normativas adicionales aplicables.




Además, existe una barrera legal importante asociada al contenido de THC proveniente de la planta de cáñamo, que, a pesar de tener porcentajes inferiores para considerarse adictiva, ha sido difícil superar para algunos productores, lo cual requiere de un cambio político a nivel nacional para dejar su focalización en ventas netamente al por menor. En Canadá hacia el año 1998, gracias a las Leyes de Sustancias y Drogas Controladas se logró potencializar la investigación en cáñamo industrial y en 2018 con la legalización de cannabis se espera que la producción aumente, posibilitando su incursión en otros sectores (Parvez et al.,2021).



Tabla 2.*Matriz de Requisitos Legales e Ingenieriles***MATRIZ DE REQUISITOS LEGALES Y OTROS REQUISITOS****NA:** No aplica; **ASTM:** American International for Testing and Materials; **DOC:** Documento**NTC:** Norma Técnica Colombiana; **MME:** Ministerio de Minas y Energía; **MAVDT:** Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; **CONPES:** Consejo Nacional de Política Económica y Social
República de Colombia Departamento Nacional de Planeación





| TIPO | BIODIESEL/DI ESEL | CAÑAMO | FECHA DE REVISIÓN | NÚMERO | AÑO DE EMISIÓN | OBJETO | TIPO DE DOCUMENTO QUE SOPORTA LA EVIDENCIA | AUTORIDAD QUE LO EMITE | ARTICULOS/SECCIONES QUE APLICAN | NOTAS DE VIGENCIA |
|---|----------------------|--------|----------------------|---------|-------------------|---|---|---|---|--|
| Ley  | | X | 17/10/2021 | c. 16 | 2018 | Proteger la salud y la seguridad públicas, en especial para proteger a los jóvenes y otras personas de la producción ilícita. | Enlace | Senado y la Cámara de los Comunes de Canadá | Parte 3, subsección 62: Limitación: importación y exportación, donde se plantea que las licencias para dichos fines comerciales solo se otorgan solo con fines médicos o científicos o con respecto al cáñamo industrial. | Activo al 2021-04-05 y modificado por última vez el 2020-10-17 |
| Decreto  | | X | 17/10/2021 | 372/014 | 2014 | Reglamentar aquellos aspectos de la Ley N° 19.172 que se encuentran asociados al cannabis no psicoactivo (cáñamo) para uso industrial, de manera independiente de la reglamentación relativa al cannabis psicoactivo y no psicoactivo para uso medicinal y no medicinal. | Enlace | Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay | Artículo 1 y artículo 9, que expresan el contenido de THC no puede separar el 0,5% y el control técnico de la plantación, cultivo, cosecha, producción, industrialización y comercialización de Cannabis no psicoactivo, respectivamente. | Vigente y su última actualización fue Última 15/07/2020 |
| Decreto  | | X | 17/10/2021 | 46/015 | 2015 | Establece los permisos de plantación, cultivo, cosecha, acopio y comercialización de cannabis (psicoactivo y no psicoactivo) para ser destinado, en forma exclusiva, a la investigación científica, o a la elaboración de Especialidades Vegetales o Especialidades Farmacéuticas para uso medicinal. | Enlace | El presidente de la Republica de Uruguay actuando en Consejo de ministros | Artículo 4,5,6 los cuales establecen, requisitos, autorizaciones y producción de investigación científica para el cannabis no psicoactivo. | Vigente |

Cont. Tabla 2

| | | | | | | | | | | |
|---|--|---|------------|----------------|------|--|------------------------|--|---|---------|
| Ley  | | X | 17/10/2021 | Segunda Sesión | 2018 | Presenta relevantes modificaciones legales a la “Agricultural Marketing Act” de 1946, tales como la distinción de las subespecies de cannabis y no menos importante la “legalización” del cáñamo industrial. | Enlace | Congreso de los Estados Unidos de América | Parte 2, subtítulo F Sección 7605: Legitimidad de la investigación del cáñamo industrial, Subtítulo, Sección. 7501: la Ley de Materiales Agrícolas Críticos se modifica insertando e incluyendo cáñamo. Subtítulo G, Sección. 297A. establece que el cáñamo es Cannabis sativa L. y cualquier parte de esa planta, incluidas sus semillas y todos los derivados, extractos, cannabinoides, isómeros, ácidos, sales y sales. | Vigente |
| Ley  | | X | 17/10/2021 | 242 | 2016 | Contiene normas de apoyo y promoción para el cultivo y la cadena de suministro del cáñamo (Cannabis sativa L.) y el cual puede contribuir a la reducción del impacto medio ambiente en la agricultura, la reducción del consumo de suelo y desertificación y pérdida de biodiversidad. | Enlace | La Cámara de Diputados y el Senado de la República de Italia | Artículo 2,6,7,9: De manera general, se establece que los organismos públicos de investigación, universidades, agencias desarrollo regional e innovación, dedicados específicamente a la hemicultura, pueden reproducirse durante una la semilla comprada certificada el año anterior, así como aclaraciones de los productos obtenidos del cáñamo. | Vigente |
| Ley  | | X | 17/10/2021 | 1787 | 2016 | Generar el marco regulatorio que posibilite un acceso informado y seguro al uso médico y científico del cannabis y sus derivados en el territorio nacional colombiano. | Enlace | Congreso de la República | Artículo 7, 8: Vigilancia al otorgamiento y cumplimiento de licencias y financiamiento por Colciencias para estudios científicos alrededor del cannabis. Artículo 17: Comisión encargada de realizar el seguimiento al uso científico y medicinal del cannabis. | Vigente |

| | | | | | | | | | | |
|--|---|---|------------|-------------|------|--|------------------------|---|--|---------|
| Decreto  | | X | 17/10/2021 | 613 | 2017 | Reglamentar el acceso seguro e informado al uso médico y científico del cannabis, permitiendo el seguimiento y control sobre las actividades de exportación, importación, comercialización, y transformación del cannabis. | Enlace | Ministerio de Salud y Protección Social | Capítulo 1: Definiciones conceptuales en torno al Cannabis, autoridades de control aplicables según el uso del cannabis. Capítulo 2- Artículo 2.8.11.1.2 Tipos de licencias y requisitos generales; Artículo 2.8.11.2.3 Requisitos adicionales para el otorgamiento de licencias con fines investigativos. | Vigente |
| Resolución  | | X | 17/10/2021 | 577 | 2017 | Evaluar y llevar un seguimiento de las licencias de uso de semillas para siembra, cultivo de plantas de cannabis psicoactivo y no psicoactivo. | Enlace | Ministerio de Justicia y del Derecho | Capítulo 2: Proceso para solicitar la licencia de uso y siembra de cannabis. Artículo 7 Protocolo de seguridad que deben desarrollar las partes solicitantes de las licencias. Capítulo 4- Artículo 18: Informes periódicos sobre el manejo, uso y siembra que se está ejecutando. | Vigente |
| Resolución  | | X | 17/10/2021 | 578 | 2017 | Proporcionar el manual de tarifas para los servicios de seguimiento y evaluación que deben cubrir las personas naturales y jurídicas solicitantes de licencias para el uso y cultivo de cannabis no psicoactivo y psicoactivo. | Enlace | Ministerio de Justicia y del Derecho | Artículo 2: Tarifas para la obtención por primera vez de la licencia. Artículo 7: Pago de licencia por cuotas, definición de valores. | Vigente |
| Ingenieril | X | X | NA | ASTM D-6751 | 2009 | Especificación Estándar para Combustible Biodiésel destinado para Mezcla (B100) con Combustibles Destilados Medios, que define como los ésteres mono-alquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales, para su uso en motores de encendido por compresión (diesel). Esta especificación es para biodiésel puro (100%) antes de su uso o mezcla con combustible diesel. | Enlace | ASTM | NA | Vigente |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|------------|-----------------|------|--|------------------------|--------------------------|--|---|
| Ingenieril | X | X | NA | CEN-EN 14214 | 2013 | Norma europea que presenta los requisitos y métodos de prueba para los ésteres metílicos de ácidos grasos comercializados y distribuidos (en lo sucesivo, FAME) que se utilizarán como combustible para motores diésel y para aplicaciones de calefacción al 100% de concentración, o como diluyente para combustible destilado para motores diésel. | Enlace | CEN | Todos los requerimientos y propiedades aplicables al combustible. | Vigente |
| Ley  | X | | 17/10/2021 | 939 | 2004 | Estimulación y comercialización del biocombustible para uso en motores diesel: biodiesel. | Enlace | Congreso de la República | Artículo 1, artículo 3 y artículo 6 establecen los efectos para interpretar los biocombustibles de origen vegetal o animal en motores diesel | La vigencia de la exención se aplicará dentro de los diez (10) años siguientes a la promulgación de la presente ley |
| DOC | X | | 17/10/2021 | 3510 | 2008 | Política orientada a promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia, aprovechando las oportunidades de desarrollo económico y social que ofrecen los mercados emergentes de los biocombustibles. | Enlace | CONPES | II ANTECEDENTES NORMATIVOS Y DE POLÍTICA | Vigente |
| Ley  | X | | 17/10/2021 | 693 | 2001 | Establece como obligatoria la mezcla de la gasolina con alcohol carburante: biogasolina. | Enlace | Congreso de la República | Artículo 1: Parágrafo 1, establece que el combustible diesel podrá contener oxigenante Etanol carburante en la cantidad y calidad que establezca el Ministerio de Minas y Energía. | Vigente |

| | | | | | | | | | | |
|--|---|--|------------|---------|------|---|------------------------|------------|---|---------|
| NTC  | X | | 17/10/2021 | 5444 | 2006 | Cubre las especificaciones para los alquil ésteres de ácidos grasos para uso como combustible o como componente de mezclas con combustibles diésel, cuyas características están definidas en la NTC 1438. | Enlace | Icontec | Todos los requerimientos y propiedades aplicables al combustible. | Vigente |
| Resolución  | X | | 17/10/2021 | 18 0782 | 2007 | Modificación los criterios de calidad de los biocombustibles para su uso en motores diesel como componente de la mezcla con el combustible diesel de origen fósil en procesos de combustión | Enlace | MME, MAVDT | Artículo 4: Establece la calidad del biocombustible para uso en motores diesel del diesel ACPM y su mezcla. | Vigente |
| NTC  | X | | 17/10/2021 | 1438 | 2013 | Establece los métodos de ensayo que se deben usar para determinar los parámetros definidos para los combustibles utilizados en motores tipo diesel en Colombia | Enlace | Icontec | Todos los requerimientos y propiedades aplicables al combustible. | Vigente |
| Decreto  | X | | 17/10/2021 | 2629 | 2007 | Establece las disposiciones para promover el uso de biocombustibles en el país, así como medidas aplicables a los vehículos y demás artefactos a motor que utilicen combustibles para su funcionamiento. | Enlace | MME | Artículo 2, artículo 3 y artículo 4 que presentan las mezclas asociadas para los bicombustibles y su uso en motores Diesel. | Vigente |

6. Análisis de requerimientos

La revisión de las propiedades químicas y físicas, junto a las características requeridas para que el biodiesel producido esté alineado a los parámetros de calidad (según normativa vigente) varían de acuerdo con los aceites, grasas, y tecnologías usadas (Coy et al., 2015), ya que los ácidos grasos poseen diversas cantidades de enlaces insaturados y cadenas de carbono con variadas longitudes; sin embargo, este biocombustible debe cumplir con valores estandarizados que aseguran un bajo contenido de ácidos grasos libres (AGL). Entre las principales propiedades de interés se encuentran la viscosidad, densidad, punto nube, índice de yodo, entre otras.

Cabe denotar que, con el fin de determinar la calidad del biodiésel y sus especificaciones técnicas, se emplea como modelo de comparación los valores del diésel (derivado del petróleo). A continuación, en la Tabla 3 se listan los parámetros con mayor incidencia en el rendimiento del motor y de mayor interés según la normativa aplicable a Colombia, es decir la NTC 5444; de otra parte, se incluyen valores teniendo en cuenta normas internacionales como la ASTM D- 6751 aplicable a Estados Unidos y EN 14214 establecida por la Unión Europea.

De otra parte, como forma de seguimiento y comparación respecto al combustible fósil con mayor uso, es decir el diésel, se exponen en la Tabla 4 los siguientes valores obtenidos por Jayaraman et al. (2021) durante la caracterización de diésel ligero.

En general, estas propiedades fisicoquímicas determinan las características deseables y no deseables del biodiesel, donde, el contenido de agua o humedad es un parámetro que debe ser regulado, a fin de evitar problemas en el proceso de combustión (Rheay et al., 2020). De otra parte, el poder calorífico determinará la cantidad de calor entregada por un kilogramo de biodiesel y, la viscosidad influirá en la inyección del combustible, pues como lo menciona Ayetor et al. (2015) altas viscosidades disminuirán la fluidez del combustible. Así mismo, el punto de inflamación permite

determinar qué tan volátiles el biodiésel, y, por último, la densidad es un indicador de cuánta cantidad de alcohol residual sigue en el biocombustible; específicamente, poco remanente de alcohol llevará a una mayor densidad.

Tabla 3.

Propiedades fisicoquímicas y requerimientos técnicos del biodiesel (Coy et al., 2015).

| Propiedades | Unidades | NTC 5444 ^a | ASTM D-6751 ^b | EN 14214 ^c |
|------------------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Densidad (15°C) | g/cm ³ | 0.86-0.90 | - | 0.86-0.90 |
| Viscosidad cinemática (40°C) | cSt | 1.9-6.0 | 1.9-6.0 | 3.5-5.0 |
| Número de cetano | mín. | 47 | 47 | 51 |
| Punto de inflamación | °C | 120 | 47 | 51 |
| Contenido de agua | mg/kg | 500 | - | 500 |
| Índice de Yodo | gr yodo/100 g | 120 | - | 120 |
| Contenido de éster | % m/m | 96.5 | - | 96.5 |
| Estabilidad a la oxidación (110°C) | Horas (mín). | 6 | 3 | 6 |

a) Destinado a biodiesel como componente único en mezcla en motores diésel.

b) Especificaciones aplicables al biodiesel que se mezcla con diésel en un 20% en volumen o menos.

c) Aplicable a biodiesel puro B100 o mezclado en diversos % con el diésel (BXX).

Tabla 4.

Resultados para propiedades fisicoquímicas del diésel (Jayaraman et al., 2021).

Resultados Fisicoquímicos del Diésel

| | |
|---------------------------|------------------------|
| Viscosidad (40°C) | 3.1 cSt |
| Densidad (15°C) | 0.83 g/cm ³ |
| Punto de Inflamación (°C) | 42.6 |
| Número de cetano | 51 |
| Valor calorífico (MJ/kg) | 43.2 |

Para hacer énfasis en los cambios y valores de las propiedades fisicoquímicas que presentan diversos biocombustibles, en la Tabla 5, se condensan resultados reportados por Parvez et al. (2021), según el tipo de cultivo usado en la producción de biodiesel de diferentes calidades, bajo la comparación la normativa ASTM.

Tabla 5.

Propiedades fisicoquímicas y aspectos del biodiesel según cultivo (Parvez et al., 2021).

| Cultivo | Rendimiento de combustible (L/ha) | Punto de inflamación (°C) | Viscosidad cinemática 40°C (mm²/s) | Contenido de azufre (ppm) |
|------------------------|--|----------------------------------|--|----------------------------------|
| Cáñamo | 784 | 162 | 5.13 | 0.4 |
| Maíz | 170 | 180 | 4.6 | - |
| Aceite de palma | 871 | 175 | 4.43 | 10 |
| Haba de soja | 210 | 138 | 3.15 | 1.1 |
| Canola | 386 | 96 | 4.37 | 2.4 |
| Algas | - | 130 | 5.7 | 0.06-0.19 |

De otra parte, al evaluar los requerimientos del biodiesel, se encuentra que las emisiones gaseosas tienen papel fundamental en los beneficios ambientales y la reducción de GEI teniendo en cuenta los hidrocarburos no quemados y las emisiones de material particulado, que definen un mercado más sostenible y consiente. Es por ello, que consecuentemente se tienen en cuenta los datos reportados en el estudio de Martínez et al. (2019) para el diésel tradicional, donde las emisiones de compuestos (gr) por kg de combustible son de: 34.02 gr CO, 3.123 gr CO₂, 15.22 gr NO_x, y 100 gr de hidrocarburos (benceno, metano, butano) / kg de combustible.

7. Análisis de restricciones

En esta sección se detallan y determinan las restricciones aplicables al proceso de obtención de biodiesel a partir de cáñamo, con el fin de evaluar distintos aspectos que inciden en la factibilidad del proyecto. Al respecto, la magnitud de las restricciones se limita a la forma en la cual se procesan y manejan las materias primas, ya sea a una escala industrial o experimental.

- **Ambientales**

En principio, se identificaron aquellas restricciones y posibilidades ambientales durante el proyecto, teniendo en cuenta la generación del biodiesel. Si bien, los biocombustibles como lo menciona Jiménez (2017), reducen la generación de GEI, al ser elaborados a partir de materia vegetal involucran de esta forma, niveles de producción agrícola que requieren tierra cultivable y, por ende, inciden en el uso de recursos hídricos, extensión de tierras y biodiversidad. Es así como se debe garantizar un manejo ambientalmente sostenible que no comprometa el abastecimiento de productos agrícolas desde el correcto manejo de fertilizantes y recursos. Además, como se mencionó en apartados anteriores, el cultivo de cáñamo nutre y repara el suelo.

Adicionalmente, si bien, algunos aspectos no presentan una restricción total para el proyecto, requieren de un manejo adecuado; entre ellos, se tiene en cuenta que durante la producción del biodiesel se hace uso de productos químicos que bajo un mal uso y manejo pueden conllevar a interacciones con el medio ambiente. Específicamente, en la reacción de transesterificación se usa el metanol, un alcohol simple altamente inflamable, que requiere de evaluaciones de riesgo para un correcto almacenamiento y manipulación, puesto que posee una volatilización rápida en el aire (IDEAM, s.f.). La incidencia en el ambiente dependerá de las cantidades manejadas, sin embargo, el metanol es considerado mínimamente tóxico para organismos terrestres o acuáticos.

Finalmente, a nivel industrial la producción de biodiesel lleva consecuentemente a la generación de aguas residuales con contaminación orgánica, que pueden eutrofizar masas de agua

(Hernández & Díaz, 2018), por lo cual se requiere el uso de métodos para el tratamiento de aguas residuales.

- **Socioculturales**

El combustible líquido de cáñamo ofrece sólidas perspectivas a corto plazo, en especial para reducir rápidamente las emisiones de GEI Gases de Efecto Invernadero, por ello la adaptación a este mercado, permitirá disminuir la asociación fenotípica con la planta cultivada para un químico psicoactivo, comúnmente conocida como marihuana, reflejándose en más empleos en el sector textil, energético y de cuidado personal dada la alta versatilidad de este cultivo.

Asimismo, como lo plantea el proyecto de ley 248 de 2020, se espera que la incursión del cultivo de cáñamo en Colombia cambie la imagen negativa que se tiene a nivel global frente a las drogas en el país por medio de este tipo de tecnologías emergentes aplicadas a la bioenergía, recurriendo a la publicidad como medio difusor de los beneficios del cáñamo, soportados en investigaciones realizadas alrededor del cáñamo (Parvez et.al,2021), lo que hará crecer la industria, impulsando así la economía colombiana.

- **Éticas**

Para el desarrollo del proyecto, el marco de actuación ético es indispensable en el diseño y futura implantación de biocombustibles en la industria nacional, por ello, a continuación, se describen las principales restricciones éticas asociadas:

- **El compromiso con el agro en Colombia**

El cultivo del cáñamo tiene una alta influencia en el desarrollo económico, social y tecnológico del agro colombiano (Ramírez, 2019), que se encuentra supeditado a la significancia de esta planta para la sociedad colombiana que por su mala categorización ha evitado que Colombia incremente sus exportaciones e investigaciones que beneficien a los miles de personas afectadas por el conflicto armado.

- **Uso de materias primas verdes**

De acuerdo con las metas establecidas por el objetivo 7 de desarrollo sostenible (Uzcátegui,2016), donde se busca el acceso a la investigación y la tecnología relativas a la energía limpia y menos contaminantes de combustibles fósiles es necesario el uso de productos químicos más seguros, el uso de catalizadores en lugar de reactivos estequiométricos, asegurando la prevención de la producción de desechos (Chen et al., 2020).

- **Uso de energías renovables**

El alcance del presente trabajo está encaminado en el uso de una energía limpia y sustentable por ello, el actuar ético sugiere coherencia, de esta manera subyace el compromiso a satisfacer las necesidades operacionales con fuentes de energía renovables, buscando la priorización de las telecomunicaciones e incentivar modos de transporte con bajo consumo energético, entre otros.

- **Capacidad de fabricación**

Las principales restricciones en la capacidad de fabricación que generan cuellos de botella en la obtención del biodiesel a partir del cáñamo, ya sea a escala laboratorio o a gran escala están sujetas al rendimiento del proceso según condiciones del territorio donde se va a aplicar y conforme se presupueste la materia prima para abastecer la generación del producto por medio de la reacción. Sin embargo, la industria del cáñamo se encuentra en auge en materia regulatoria y profundización de aplicaciones por ello la gestión de materias primas (aceite de cáñamo) es clave para evitar altos costos en la obtención del producto, a esto se suma la manipulación previa del aceite de cáñamo, la producción por parte de proveedores y las condiciones de calidad del producto.

Dado que, el principal cuello de botella para el proyecto se encuentra en la gestión de los insumos para la obtención de biodiesel de cáñamo, es importante asegurar que estos cumplan con el “Sistema Globalmente Armonizado de clasificación y etiquetado de productos químicos” (SGA), enfocado en la información centralizada acerca de los peligros del insumos, lo que permitirá la gestión racional de los productos químicos, además de permitir que en el tiempo se puedan seguir

disponiendo de estos productos químicos y facilitando a nivel global los requisitos nacionales de clasificación y comunicación de peligros químicos (UN, 2016)

- **Económicas**

Teniendo en cuenta que, desde el contexto político el *Cannabis Sativa L* y sus variedades de presentación como semillas o aceites poseen una amplia normatividad sujetas a contenidos de psicoactividad y volumen a manejar, es posible presentar transformaciones económicas en los gastos de licencias y permisos científicos. Adicionalmente, la gestión ineficiente de las materias primas lleva a un aumento en los costos generales de producción, puesto que, en el caso a escala industrial, el manejo del metanol para obtener el biodiesel incide notoriamente en la economía, ya que un uso que exceda los límites permitidos requiere de mayores cantidades, donde la fijación del precio del metanol por tonelada USD/ton varía según indicadores como el costo logístico del metanol un valor dependiente de los costos promedio de nacionalización, logística de puerto y transporte a la planta de biocombustible, entre otros indicadores, como contrato de metanol, spot de metanol, los cuales están dispuestos en la resolución 40400 del 08 de mayo de 2019.

- **Legales**

La barrera legal es fundamental para el desarrollo del proyecto ya que el cultivo de cáñamo posee Tetrahidrocannabinol (THC) pero no en cantidades superiores a 0,3% donde se considera psicoactivo (Rezapour, 2017), por ello es una de las restricciones más difíciles de superar para algunos productores, ya que requiere un cambio político a nivel nacional, donde Colombia ha realizado importantes avances, como se observa en la Tabla 4.

- **Salud y seguridad**

La solución planteada y el producto no presentan restricciones de salud y seguridad radicales que impidan la ejecución del proyecto; aun así, se requiere tener en cuenta la gestión de seguridad del proceso tanto a escala experimental como a nivel industrial para evitar incidentes y la acumulación de fallas que lleven a explosiones, incendios, emisiones, derrames o descargas atmosféricas de sustancias

químicas. En general, los productos químicos usados para la transesterificación requieren ser manipulados con elementos de protección personal (EPP) por parte del capital humano y contar con un correcto almacenamiento según normativas de seguridad.

Adicionalmente, los productos químicos principales como metanol e hidróxido de sodio, solvente y catalizador respectivamente deben ser aprobados por la normatividad; a nivel proceso, se requiere tener en cuenta un sistema de gestión de seguridad de procesos, en el cual se circunscriben las capas de protección situadas en la Figura 4, y que llevan a mitigar consecuencias de accidentes o prevenir situaciones peligrosas.

Figura 4.
Capas de protección para seguridad del proceso.

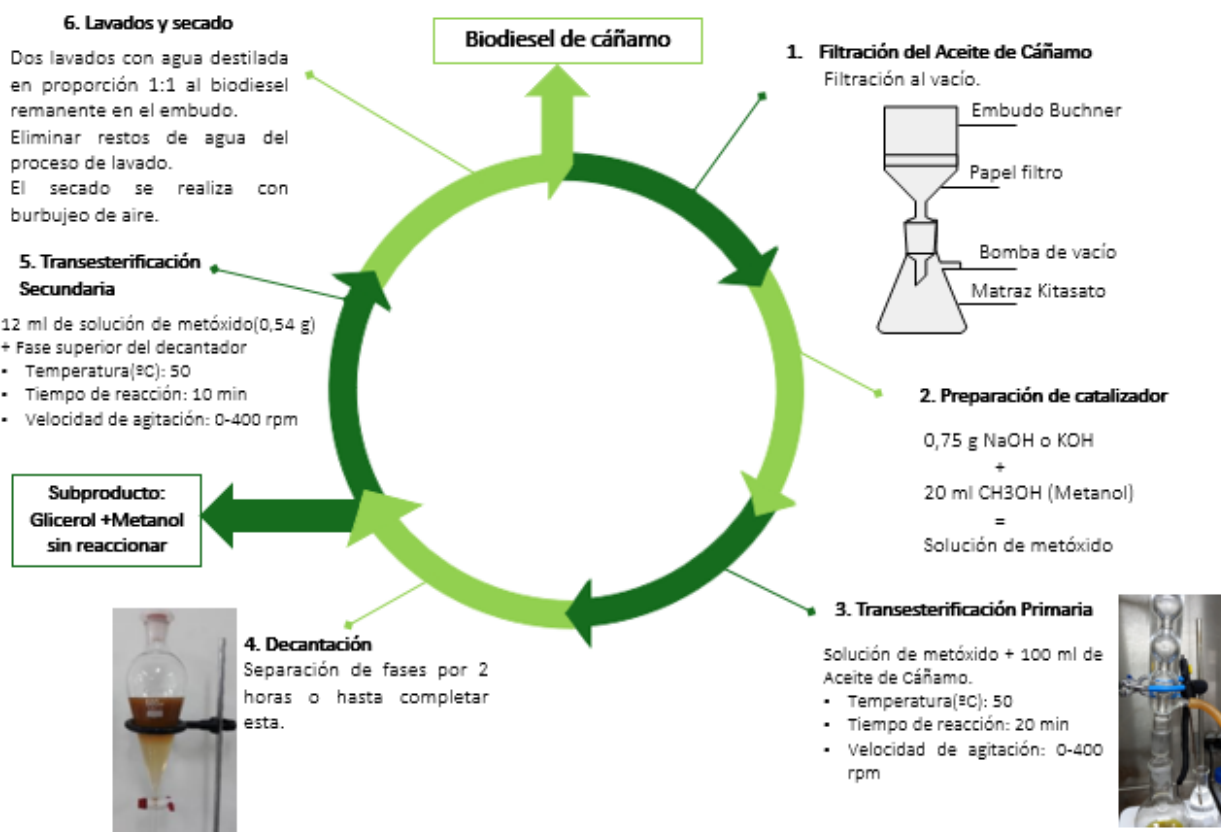


Adaptado de (Viloria et al., 2016)

8. Metodología para el desarrollo de la solución

El aceite de semilla de cáñamo se transforma en biodiesel mediante una reacción de transesterificación en presencia de un alcohol de bajo peso molecular y catalizada por una base (NaOH), este medio de transformación se elige dado que es más efectivo (alto rendimiento), a bajo costo, con bajo tiempo de reacción y a presión atmosférica (Asokan et al., 2021). De esta manera, en la Figura 5 se presentan y describen cada una de las etapas asociadas al proceso de elaboración de biodiesel a escala laboratorio:

Figura 5.
Etapas para la obtención de biodiesel a escala laboratorio



Elaboración propia, adaptado de (Li et al., 2010) ;(Mohandass, 2017)

- **Filtración del aceite de cáñamo (Acondicionamiento de la muestra):** En esta etapa se logra el alistamiento del aceite de cáñamo por medio la eliminación eficaz de las impurezas que contenga el aceite dado el uso de la bomba de vacío, lo anterior con el fin de aumentar el rendimiento de la reacción.
- **Preparación de catalizador:** La solución de metóxido es preparada de acuerdo con las cantidades definidas en la Figura 5, con el fin de lograr proporciones molares adecuadas entre el aceite: metanol (1:6), además es importante asegurar continua agitación, teniendo en cuenta las propiedades termoquímicas de estos, las cuales se encuentran detalladas en la Tabla 7, lo anterior con el fin de lograr la total miscibilidad del NaOH en el metanol.
- **Transesterificación Primaria y Secundaria:** Para la etapa de transformación de la materia prima se debe realizar un precalentamiento en condiciones de agitación y temperatura constante (50°C) con el fin de reducir la viscosidad, evitando el proceso de saponificación y aumentando la recuperación de ésteres (Mohandass, 2017), para luego bajo las condiciones de operación definidas en la Figura 5, realizar la mezcla de los reactivos y catalizador preparado. Además, la segunda reacción de transesterificación se realiza con el fin de cumplir con el tiempo óptimo de reacción definido por Moscariello et al. (2021) y extraer mayor rendimiento a la reacción.
- **Decantación:** De acuerdo con el esquema de la Figura 3, aparte de biodiesel se obtiene como subproducto la glicerina o glicerol y metanol sin reaccionar por ello el proceso de separación de fases permite realizar la división de capas, siendo el subproducto mencionado la capa inferior, mientras que el producto de interés quedara en la capa superior del embudo de decantación. Este proceso puede tardar de 2 a 4 horas, hasta lograr una alta obtención del producto deseado.

- **Lavados y secado:** Los pasos de lavado se realizar para retirar el metanol, glicerol y trazas de catalizador remantes del embudo y posteriormente su secado por medio de plancha de calentamiento o burbujeo de aire.

8.1 Especificaciones de la solución de ingeniería

A partir de la metodología determinada, se seleccionaron las especificaciones detalladas involucradas con la producción de biodiesel a partir de aceite de cáñamo; lo anterior, teniendo en cuenta que la reacción de transesterificación involucra al solvente (metanol), catalizador y equipos de laboratorio esenciales. A continuación, se describen las materias primas y equipos necesarios a escala laboratorio.

8.1.1 Insumos químicos

- **Metanol (CH_3OH):** Denominado también como alcohol metílico de carácter primario; es un líquido incoloro, inflamable y volátil con un punto de ebullición a una temperatura de $67.4^{\circ}C$ y 760 mmHg. Este líquido es fácilmente miscible en agua, cetonas, ésteres, y alcoholes, adicionalmente, es poco soluble en aceites (IDEAM, s.f.). Dentro de sus aplicaciones industriales está la producción de formaldehído, ácido acético, y metilaminas.
- **Hidróxido de Sodio ($NaOH$):** La reacción de transesterificación en fase líquida requiere de un catalizador que aporte iones hidrógeno, de esta forma se alcanzan velocidades de reacción razonables, por esta razón, se hace uso del $NaOH$. Este sólido blanco, inoloro, y cristalino (PubChem, 2021). Es corrosivo y al neutralizarse con ácidos libera calor; por lo general, se usa en la producción de jabones y productos de limpieza. Este catalizador se seleccionó ya que reportes en la literatura, como el de Arul & Kirubakaran (2018) exponen la ventaja de este catalizador de disolverse en aceite por su alta solubilidad, eficacia y un mínimo costo. En la Tabla 7 se resaltan algunas propiedades termoquímicas de tales insumos.

8.1.2 Materias primas

- **Aceite de cáñamo:** Comercialmente es un aceite vegetal, prensado en frío, puro y con certificación ecológica. De forma similar a otros aceites vegetales, el aceite de semilla de cáñamo es un triglicérido de diferentes ácidos grasos presentados en la Tabla 1.

Para efectos del presente estudio no se exponen valores exactos para las composiciones ya que no son especificadas por el proveedor. Sin embargo, dada la relevancia de estos ácidos grasos, en la Tabla 6 se presentan sus propiedades termoquímicas estimadas en Aspen Plus V.

11 ®.

Tabla 6.

Propiedades termoquímicas de ácidos grasos del aceite de cáñamo

| Propiedad | Estearico | Oleico | Linoleico | Araquídico | Palmítico |
|--|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Peso molecular (g/mol) | 284,483 | 282,467 | 280,451 | 304,473 | 256,429 |
| Temperatura de ebullición (K) a 760 mmHg | 647,15 | 633 | 628 | 647,01 | 623,15 |
| Temperatura crítica (K) | 803 | 781 | 775 | 775 | 785 |
| Volumen crítico (m^3/mol) | 1140 $\times 10^{-06}$ | 1000 $\times 10^{-06}$ | 990 $\times 10^{-05}$ | 1114 $\times 10^{-06}$ | 1015 $\times 10^{-06}$ |
| Factor crítico de compresibilidad | 0,227 | 0,214 | 0,217 | 0,214 | 0,232 |
| Presión crítica (Pa) | 1,33 $\times 10^{06}$ | 1,39 $\times 10^{06}$ | 1,41 $\times 10^{06}$ | 1,24 $\times 10^{06}$ | 1,49 $\times 10^{06}$ |
| Entalpía de fase de transición – Calor de fusión (J/mol) HFUS | 61208,9 | 41374,3 | 33353,1 | 34496,09 | 53711,2 |
| Gravedad específica | 0,882 | 0,886 | 0,902 | 1,063 | 0,886 |

Adaptado de Aspen Plus V.11 ®

Tabla 7.
Propiedades termoquímicas de los insumos.

| Propiedad | Metanol | Hidróxido de sodio |
|---|------------------------|---------------------------|
| Peso molecular (g/mol) | 32.042 | 39.997 |
| Temperatura de ebullición (K) a 760 mmHg | 148.3 | 266 |
| Temperatura crítica (K) | 512.5 | 2820 |
| Volumen crítico (m^3/mol) | 117×10^{-06} | 200×10^{-06} |
| Factor crítico de compresibilidad | 0.222 | 0.213 |
| Presión crítica (Pa) | 8.084×10^{06} | 2.5×10^{07} |
| Entalpía de fase de transición – Calor de fusión (J/mol) | 3215 | 6609.9 |
| Gravedad específica | 0.7962 | 1.92 |

Adaptado de Pubchem y Aspen Plus V.11 ®

9. Equipos primarios

En la Tabla 8 se evidencian los soportes gráficos de los equipos y aparatos primordiales, reportados por proveedores.

Tabla 8.
Equipos y aparatos necesarios durante el proceso.

| Equipos | Soporte gráfico | Costo | Especificaciones técnicas |
|---|---|-------------|--|
| Balón de 250 mL de fondo plano |  | \$34.400 | Presentación: 250 mL Marca: Glassco Fabricado en: vidrio borosilicato y boca esmerilada 29/32 Especificaciones según: ASTM E-1403 tipo 1. |
| Refrigerante de bolas |  | \$64.000 | Forma: Bolas Fabricado en: vidrio borosilicato 3.3 esmerilado 29/32 Longitud: 300 mm |
| Plancha de calentamiento con agitación |  | \$1'930.000 | Pantalla LED Máxima temperatura: 550°C Placa de trabajo en vitrocerámica Potencia: 1010 W Dimensión de placa: 184×184 mm (7 pulgadas) |

Adaptado de Norquimos.com

** El equipo Shimadzu IR TRacer 100, no está involucrado directamente con el proceso de obtención del biodiesel; sin embargo, se aborda por su relevancia en el análisis del producto obtenido.*

- **Plancha de calentamiento:** Se requiere una plancha con agitación y control de temperatura para inducir en primer momento el calentamiento (precalentamiento) del aceite de cáñamo hasta los 60°C, eliminando así, humedad y evitando la formación de jabones durante la reacción. Este equipo es portátil, y se destina para la preparación de soluciones y evaporación de solventes; posee una plataforma en vitrocerámica y un control digital de temperatura micro procesado.

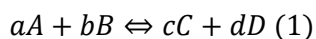
- **Balón de 250 mL de fondo plano:** En el matraz de bola se adiciona el aceite y la mezcla del catalizador con metanol, es decir, en este se da el calentamiento con reflujo para la reacción. Está compuesto por un solo cuello y tiene paredes resistentes que reducen roturas mecánicas; además, está elaborados a base de vidrio refractario lo cual lo hace óptimo para el calentamiento de soluciones.
- **Refrigerante de bolas:** Se usa como un acople en el montaje para garantizar una temperatura constante durante el tiempo de reacción, así mismo, este condensador evita la pérdida de los reactivos por evaporación, ya que los condensa y regresa al matraz de bola; lo anterior, reduce pérdidas especialmente de metanol, puesto que la reacción se da a una temperatura cercana al punto de ebullición de dicho alcohol. Técnicamente, el condensador tiene un tubo interno tipo bola y está elaborado en vidrio borosilicato.
- **Shimadzu IRTracer 100*:** Adicionalmente, para el análisis del biodiesel en el presente trabajo, se requiere del equipo o espectrofotómetro Shimadzu IRTracer 100, esto, con el objetivo de evidenciar las modificaciones en los grupos funcionales, comparando el aceite de cáñamo respecto al biocombustible obtenido. El espectrofotómetro contiene un accesorio ATR (Reflectancia Total Atenuada) y realiza transformadas de Fourier. A partir de este, se obtiene una gráfica en la que se relacionan los porcentajes de transmitancia con el número de onda irradiada a la muestra; la gráfica resultante es conocida como espectro infrarrojo.

9.1 Dimensionamiento de los componentes

A continuación, se presenta el dimensionamiento de los componentes por medio del comportamiento de la reacción aplicable al producto y variables a considerar en el proceso.

9.1.1 Cinética de la reacción: La cinética química está definida por el estudio de las velocidades de las reacciones presentes teniendo en cuenta los factores que influyen sobre esta (Fogler,2008),

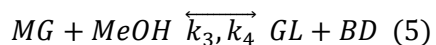
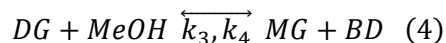
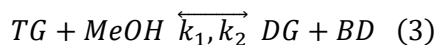
para la reacción de transesterificación se encuentra que a nivel laboratorio los factores principales son el tiempo de reacción, la relación de concentración molar aceite: metanol, la carga del catalizador, temperatura de reacción y velocidad de agitación. Sin embargo, para modelar la ecuación cinética de la reacción se ha definido a la temperatura y concentración de los reactivos como las variables cinéticas más relevantes; considerando que en su mayor parte los triglicéridos contenidos en el aceite de cáñamo reaccionan con tres moléculas de metanol y que de acuerdo con lo presentado en el estudio realizado por García et.al(2018) los pasos de la reacción son basados en reacciones reversibles, la cinética está definida en la ecuación 2, teniendo en cuenta la estructura de ecuación de reacciones químicas definida en la ecuación 1.



$$r_A = \frac{dC_A}{dt} = -k_{DI}(T)C_A^a C_B^b + k_{ID}C_C^c C_D^d \quad (2)$$

Donde DI, representa la reacción de derecha a izquierda e ID, lo opuesto a esto.

De acuerdo, con lo anterior las reacciones homogéneas de los pasos definidos para la producción de biodiesel a nivel general son:



Donde

TG Molécula de Triglicérido

DG Molécula de Diglicérido

MG Molécula de Monoglicérido

GL Glicerina o Glicerol

BD Biodiesel de C  namo

k_1 a k_6 *Constantes de velocidad de cada reacción*

Ahora bien, considerando el monitoreo de las concentraciones de los reactivos y que estas reacciones son irreversibles (Ecuación 2), se caracteriza matemáticamente la cinética de reacción de cada paso presentado anteriormente, de la siguiente manera:

$$\frac{d[TG]}{dt} = -k_1[TG][MeOH] \quad (6)$$

$$\frac{d[TG]}{dt} = -k_3[DG][MeOH] \quad (7)$$

$$\frac{d[MG]}{dt} = -k_5[DG][MeOH] \quad (8)$$

Cabe aclarar que las potencias a las cuales se elevan las concentraciones (orden de reacción) en la ley de velocidad cinética (Ecuación 2) son obtenidos basados en la experimentación por lo que se generan pseudo ecuaciones de cinética de la reacción empíricas.

9.1.2 Rendimiento de la reacción: El procedimiento experimental aborda la transformación de reactivos a productos a través de una reacción química; en este sentido, se tiene en cuenta el rendimiento de la reacción a partir de la estequiometría y pesos moleculares involucrados. Específicamente, el rendimiento est   dado por la ecuación 9.

$$\text{Rendimiento} = \left(\frac{\text{Moles de producto obtenido}}{\text{Rendimiento teórico}} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

Donde el rendimiento teórico es

$$\text{Rendimiento teórico} = \left(\frac{\text{Moles de reactivo limitante}}{\text{proporción estequiométrica de reactivos}} \right) \quad (10)$$

En este caso, para la ecuación (9), se tienen en cuenta las moles de producto obtenido, ya que en la práctica es posible la presencia de reacciones secundarias o un estado de equilibrio donde se recupera producto de partida.

9.1.3 Rendimiento del biodiesel: Teniendo en cuenta que se lleva a cabo un procedimiento experimental, el valor del rendimiento con base al producto obtenido se calcula mediante la ecuación 11, la cual tiene en cuenta la conversión aparente del biodiesel y fue reportada por Vera et al. (2016).

$$C = \frac{m_{biodiesel}}{m_{aceite}} \quad (11)$$

Donde la expresión $m_{biodiesel}$ es la masa del biodiesel obtenido; por su parte, la cantidad de muestra de partida es m_{aceite} .

10. Análisis de costos del diseño experimental

En el presente capítulo se propone la estimación de costos para el proyecto, teniendo en cuenta la relación costo- producción; cabe denotar que, los análisis y resultados para la estimación se desarrollaron a escala laboratorio, específicamente en los laboratorios dispuestos por la Universidad EAN dentro del proceso de formación investigativo. Adicionalmente, se calcula el beneficio bruto teniendo en cuenta la estequiometría de la reacción.

10.1 Estimación de costos

En primer momento, se tuvieron en cuenta los costos directos, asociados con la producción de 11.89 g y 23.32 g de biodiesel para las muestras 1 y 2, respectivamente; en este sentido, se consideraron los valores por el concepto de la compra del aceite de *Cannabis Sativa L.* Asimismo, se estiman en los costos directos el servicio de laboratorio, en tal caso donde el diseño experimental no se rigiera por un proceso formativo de investigación.

Como se evidencia en la Tabla 9, el costo directo total de producir 35.21 gramos de Biodiésel de cáñamo es COP\$241.905, donde a mayores cantidades de aceite de cáñamo, metanol e hidróxido de sodio, se incurren en más costos directos. Para el caso de las materias primas los costos son de COP\$171.905 y la sesión práctica por persona y dos horas en el laboratorio es de COP\$70.000.

De otra parte, se aclara que al ser un proyecto a escala laboratorio no se incluyen valores por costos fijos puesto que los servicios como energía, gas y agua se incluyen en el servicio de laboratorio, donde se dispone de planta física, equipos y mobiliario. Además, se plantea una base destinada a posibles imprevistos, esta es el 10% de la inversión en la compra de los dos aceites de cáñamo, es decir, COP\$17.999.

Según los importes por muestras, se encuentra que al aumentar el volumen de materias primas se incrementan los costos totales, lo que refleja que al llevar el proceso a una escala

industrial se requerirá incluir diversos valores, según implementaciones de equipos, requerimientos de talento humano, adquisición de locativas, e impuestos.

Tabla 9.*Costos directos del diseño experimental*

| COSTO DIRECTO (Biodiesel de Cáñamo) para producir: | | | | Muestra 1(gr) | Muestra 2(gr) |
|--|----------|---------------------|----------------|-----------------|---------------------|
| | | | | 11,89 | 23,32 |
| Concepto | Unidad | Cantidad Disponible | Cantidad Usada | Precio unitario | Importe |
| Materias primas | | | | | |
| Aceite de cáñamo (Muestra 1) | COP/ml | 30 | 30 | \$ 2.633,33 | \$ 78.999,90 |
| Aceite de cáñamo (Muestra 2) | COP/ml | 120 | 100 | \$ 920,00 | \$ 92.000,00 |
| Metanol usado en Muestra 1 | COP/ml | 100 | 5 | \$1,774 | \$8,87 |
| Metanol usado en Muestra 2 | COP/ml | 100 | 20 | \$1,774 | \$35,48 |
| Hidróxido de Sodio usado en Muestra 1 | COP/gr | 20 | 0,23 | \$566,350 | \$130,26 |
| Hidróxido de Sodio usado en Muestra 2 | COP/gr | 20 | 1,29 | \$566,350 | \$730,59 |
| Servicios | | | | | |
| Servicio de Laboratorio con equipos incluidos | COP/Hora | 2 | 2 | \$35.000,00 | \$70.000,00 |
| Costo Directo Total | | | | | \$241.905,10 |

Tabla 10.
Costos fijos del diseño experimental

| COSTOS FIJOS (Bioediesel de Cáñamo) para producir: | | | | Muestra 1(gr) | Muestra 2(gr) |
|--|---------|--|----------------|-------------------|---------------|
| | | | | 11,89 | 23,32 |
| Concepto | Unidad | Cantidad Disponible | Cantidad Usada | Precio unitario | Importe |
| Servicios | | | | | |
| Gas | COP/m3 | Suministrados dentro del servicio de laboratorio | | | \$ - |
| Energía | COP/kWh | | | | \$ - |
| | | | | Costo Fijo | \$ - |

Tabla 11.
Costo total

| COSTO TOTAL PARA PRODUCIR | | |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Concepto | Importe (\$/11,89 gr) | Importe (\$/23,32 gr) |
| | Muestra 1 | Muestra 2 |
| Costo directo | \$ 149.139,03 | \$ 162.766,07 |
| Costo fijo | \$ - | \$ - |
| Costo Total | \$ 149.139,03 | \$ 162.766,07 |

10.2 Análisis de Beneficio Bruto

Este análisis se realiza con el fin de estimar cuánto beneficio se podría llegar a obtener y a su vez determinar el costo asociado para poner en ejecución la reacción de transesterificación presentada en la Figura 3; para realizar el levantamiento de la información de costos de los reactivos se hizo uso de ICIS, programa online que establece los costos de la química por gramo, como se presenta en la Tabla 10.

Tabla 12.

Costo de la química de reactivos y productos

| Costo de la química | | | |
|----------------------------|-----------------|-----------------|--------|
| Insumos | Muestra 1 (COP) | Muestra 2 (COP) | Unidad |
| Aceite de cáñamo | \$ 2.893,770 | \$ 920,000 | g |
| Metanol | \$ 2.678,090 | \$ 2.678,090 | g |
| Glicerina | \$ 3,290 | \$ 3,290 | g |
| Ester metílico (biodiesel) | \$ 12.543,000 | \$ 6.958,000 | g |

Tabla 13

Costo de la reacción

a. Costo de la reacción (Muestra 1) b. Costo de la reacción (Muestra 2)

| a. | | | | | |
|--|--------|--------|---------|-------------|----------------------|
| Reacción transesterificación (muestra 1) | | | | | |
| | gmol** | MW* | g | g/g | \$COP/g |
| Aceite de cáñamo | -1 | 281,66 | -281,66 | -0,33290783 | \$ -963,359 |
| Metanol | -3 | 32,042 | -96,126 | -0,11361606 | \$ -304,274 |
| Glicerina | 1 | 92,09 | 92,09 | 0,10884571 | \$ 0,358 |
| Ester metílico (biodiesel) | 3 | 282,02 | 846,06 | 1 | \$ 12.543,000 |
| TOTAL | | | | | \$ 11.275,725 |

b.

Reacción transesterificación (muestra 2)

| | gmol** | MW* | g | g/g | \$COP/g |
|----------------------------|--------|--------|---------|--------------|--------------|
| Aceite de cáñamo | -1 | 281,66 | -281,66 | -0,33290783 | \$ -306,275 |
| Metanol | -3 | 32,042 | -96,126 | -0,11361606 | \$ -304,274 |
| Glicerina | 1 | 92,09 | 92,09 | 0,10884571 | \$ 0,358 |
| Ester metílico (biodiesel) | 3 | 282,02 | 846,06 | 1 | \$ 6.958,000 |
| | | | | TOTAL | \$ 6.347,809 |

*MW: Peso molecular

** Coeficientes estequiométricos (a, b, c, d) representados en la ecuación 1

Asimismo, es necesario establecer el balance estequiométrico de la reacción para de esta manera estimar la relación exacta de los reactivos con respecto al producto deseado (Bioediesel de cáñamo) y así determinar con base en los costos determinados en la tabla 10, el costo total de la reacción que para este caso dado el uso de dos aceites con características diferentes se encuentran dos reacciones para cada uno, dado que en la muestra 1 la reacción es catalizada en un paso (Tabla 11.a), mientras que la muestra 2 (Tabla 11.b) es realizada en dos pasos como lo presenta la Figura 5.

De acuerdo con los totales obtenidos para cada muestra se observa que para cada gramo de biodiesel de cáñamo se obtiene COP\$11.275 y COP\$6 .347, para la muestra 1 y 2, respectivamente; lo que muestra que el mayor beneficio bruto monetario se obtiene por medio de la muestra de aceite de cáñamo 1 esto debido a que es un aceite altamente refinado y orgánico, en comparación con la muestra 2 sin refinar, sin embargo el costo asociado al biodiesel de la muestra 1 es elevado pero es compensable con el beneficio que generado basado únicamente en el costo de la química de la reacción.

11. Análisis de resultados

En este apartado se muestran los resultados experimentales obtenidos para la validación de las propiedades fisicoquímicas del biodiesel; a nivel laboratorio se generaron dos muestras de biodiesel, para dos aceites de diferentes proveedores, en la Tabla 14 se evidencian los datos analizados. La muestra 1 se obtuvo de un aceite Premium y la muestra 2 a partir de un aceite no refinado. De esta manera, inicialmente para la muestra 1 y 2 de aceite de cáñamo se usaron 27.3 g y 91 g, respectivamente, para realizar el proceso de obtención de biodiesel bajo las condiciones definidas en la metodología a nivel laboratorio, obteniendo 11.89 g y 23.32 g de biodiesel de cáñamo, correspondientemente.

12. Caracterización de biodiesel a partir de Cannabis Sativa L a escala laboratorio

12.1.1 Determinación de densidad





El método analítico de caracterización se fundamentó en la NTC 336, la cual especifica la determinación de densidades (masa por volumen convencional) para aceites vegetales tomando un líquido de referencia (agua); de esta forma, se usó un picnómetro Jaulmes de cuello capilar. Las muestras 1 y 2 de biodiesel (objeto de estudio), a condiciones de 15°C presentaron una densidad de $0,8891 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ y $0,8706 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$, respectivamente; estos valores se encuentran dentro de los límites permitidos por las normas NTC 5444 y EN 14214 con datos entre 0.86 a 0.90 g/cm^3 para biodiesel estándar o en mezcla.

Como primera observación, y según estudios previos de Cubillos et al. (2019), la densidad relaciona el contenido de energía que puede poseer un combustible, donde altos valores refieren una mayor energía térmica, por ende, un funcionamiento óptimo del combustible; sin embargo, para el biodiesel se encuentra que la densidad tiene repercusiones en la desintegración del combustible y la cantidad inyectada al motor, pues a mayor densidad, se requerirá más de este. Es así como se deja en evidencia que el biodiesel a partir de aceite de Cannabis Sativa L cumple con la

normativa tanto nacional, como internacional en términos de densidad, siendo promisorio para el uso en motores diésel.

Tabla 14.

Propiedades físicoquímicas y cantidad de producción del biodiesel a partir de Cannabis Sativa L.

| Propiedad | Muestra 1 | Muestra 2 |
|---------------------------------------|---|--|
| |  |  |
| |  |  |
| Densidad (g/cm^3) | $0,8891 \pm 0,05$ | $0,8706 \pm 0,05$ |
| Viscosidad (cSt) | N. A ^a | $9 \pm 0,026$ |
| Aceite inicial (g) | 27,3 | 91 |
| Biodiesel producido (g) | 11,89 | 23,32 |

a) Por motivos de cantidad de muestra obtenida a partir del Aceite Premium no fue posible ejecutar el análisis de viscosidad.

12.1.2 Determinación de viscosidad

El biodiesel obtenido se analizó mediante un viscosímetro tipo Boeco Germany a condiciones de 40°C y 100 rpm, siguiendo la metodología dispuesta en la norma ASTM D445-11, *Método estándar para medir la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos*; a partir del análisis, se obtuvo una viscosidad de $9 \pm 0,026$ cSt para la muestra 2, este resultado excede los valores permitidos por la NTC 5444 y la ASTM D-6751 (véase la Tabla 3); de igual forma, en comparación con el valor reportado por Parvez et al. (2021) para un biodiesel a partir de cáñamo, la viscosidad cinemática fue de 5,13 cSt, presentando así, variaciones altas.

En este contexto, es necesario tener en cuenta que la viscosidad cinemática influye en el funcionamiento de los inyectores y atomización, puesto que altas viscosidades se correlacionan con el incremento en la opacidad de los humos generados por el combustible y la emisión de hollín (García et al., 2018); a partir de lo anterior se aprecia que posiblemente se deben manejar procesos

de tratamiento adicionales, ya que altos valores en dicha propiedad como lo sustentan Lafont et al. (2011), se producen por un contenido elevado de esteroides metílicos de ácidos grasos saturados o contaminaciones en el aceite.

12.2 Análisis ATR-IR

El análisis se realizó por medio del equipo Shimadzu IRTracer-100 con un detector DLATGS (sulfato de triglicina dopado con L-alanina deuterada), una fuente de infrarrojo medio (IR) y un cristal de seleniuro de zinc (ZnSe) de reflectancia total atenuada por reflexión única (ATR). Todos los espectros se registraron en el rango de 340 cm^{-1} - 4000 cm^{-1} , con una resolución espectral de 2 cm^{-1} y 32 scans. Antes de cada análisis, se realizó la medición del espectro de fondo para asegurarse de que todas las muestras estuvieran en contacto uniforme con la óptica durante el análisis, se garantizó una distancia constante entre la muestra y la óptica con el espaciador de muestra mediante el brazo de sujeción del dispositivo. Cada muestra se analizó por triplicado en el ATR-FTIR. Cada espectro se recogió colocando una parte del aceite sobre una lámina de vidrio en la ventana de cristal redonda. Se aplicó el programa de recopilación de datos de LabSolutions IR para registrar.

La línea de base de cada espectro se ajustó con pendiente variable desplazamiento y un suavizado avanzado con 3 algoritmos: promedio móvil, Savitsky-Golay y filtro de percentiles. Se filtró el espectro de los picos cósmicos que pueden estar presentes en todos los sistemas de lectura fotoeléctrica como picos agudos unidireccionales aleatorios que distorsionan los espectros y pueden afectar los resultados de análisis estadísticos posteriores (Barton y Hennelly, 2019). Lo anterior se realizó haciendo uso del programa Spectragryph (<http://spectroscopy.ninja>).

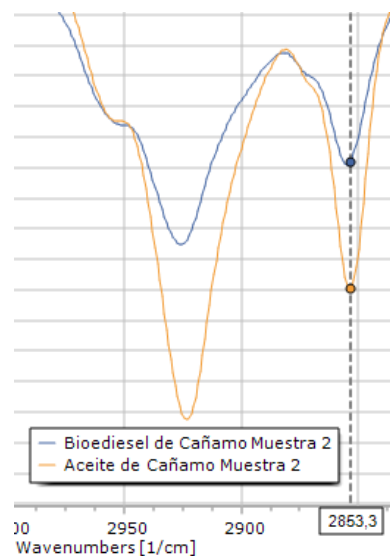
Asimismo, dentro del procesamiento del aceite de cáñamo se tiene como paso final la normalización de estos (Figura 6), la cual permite asegurar que todo el proceso se encuentre dentro de

un rango y a su vez elimina la variación asociada a la textura de la superficie de la muestra y posibles contaminaciones.

Tabla 15.
Pico Normalizado

| Muestra | % Transmitancia | Número de onda (cm ⁻¹) |
|--------------------|-----------------|------------------------------------|
| Aceite de Cñamo | 84,27 | 2853.3 |
| Biodiesel de Cñamo | 74,56 | |

Figura 6.
Pico de espectros normalizado

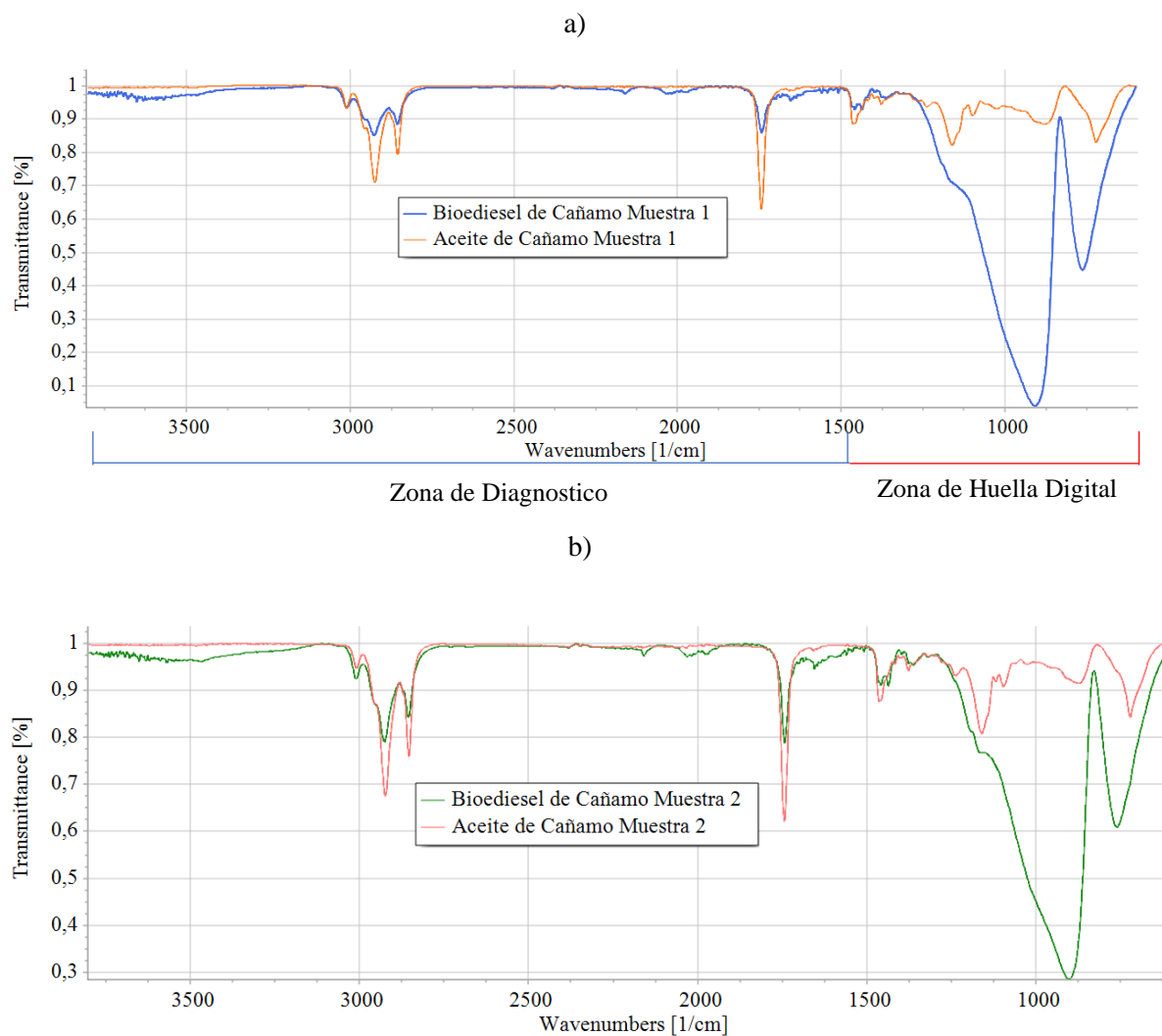


Cabe recordar que la normalización de un espectro se realiza dividiendo la transmitancia de cada longitud de onda por un número elegido arbitrariamente; para este trabajo, los espectros fueron normalizados a partir de la señal de mayor transmitancia, pero con menor variación dentro del espectro correspondiente para cada uno, lo cual se observa teniendo en cuenta los niveles de transmitancia presentados en la Tabla 13.

De esta manera, en la figura 7, se presentan los espectros de la muestra 1(a) y 2(b) a fin de realizar la respectiva comparación con base a las señales características del biodiesel que están ausentes en el aceite de cañamo, considerando principalmente la reacción de esterificación y la generación de grupos funcionales tipo éster.

Figura 7.

Spectros procesados después de la adquisición. a) Muestra 1; b) Muestra 2



Las muestras fueron examinadas en la región del infrarrojo medio ($4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$), donde se destaca la región de huella digital ($1500\text{--}600\text{ cm}^{-1}$), la cual posee las variaciones principales para realizar la caracterización descrita en la tabla 14, así como aquellas presentadas en la zona de diagnóstico ($4000\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$).

Tabla 16.

Bandas características del biodiesel obtenido para la muestra 1 y 2

| Número de onda (cm^{-1}) | Tipo de Intensidad | Grupo funcional | % Transmitancia normalizado | Observaciones |
|---------------------------------|---|---|--------------------------------|--|
| 1440~1435 | Estiramiento asimétrico | -COOCH ₃ | [0,90-0,95] | Banda conjunta en 790~760 |
| 1075~900 | Alta (Vibración y estiramiento) | Alcohol Primario | [0,72-0,83] | Flexiones fuera del plano(<900 cm^{-1}) |
| 1750~1715 | Alta | C=O | [0,84-0,86] | Señal Carbonilo |
| 2950- 3000 | Estiramiento asimétrico - simétrico | -CH ₃ ,-CH ₂ -, CH | [0,86-0,90] | Carbonos alifáticos |

Las muestras de bioediesel de las muestras 1 y 2, como se observa en la Figura 7 se encuentran picos semejantes entre ellas, así como en el aceite de cañamo, sin embargo en la región de huella digital del espectro, se observan dos bandas de intensidad baja entre 1500 y 1400 cm^{-1} que con respecto a las muestras de aceite presentan un cambio de patrón con estiramiento asimétrico atribuibles a un estiramiento asimétrico del grupo éster (-COOCH₃) característico de los ésteres metílicos que conforman al biodiesel, asimismo en la región de diagnóstico del espectro se identifica que en el número de onda 1745,1 cm^{-1} , las muestra 1 y 2 de biodiesel registran picos de intensidad alta atribuibles a un enlace carbonilo (C=O) propio de los ésteres relacionado con la vibración de estiramiento, sin embargo la muestra 2, presenta una mayor intensidad en el espectro de esta banda. Para ambos espectros es común la banda de absorción entre (2950 y 3000) cm^{-1} , correspondiente al estiramiento de los enlaces CH₃, CH₂ y CH propio de carbonos alifáticos presentes en el bioediesel y en el aceite de cañamo en los ácidos grasos.

Asimismo, la banda de mayor diferencia entre ambos espectros se encuentra en la región de 1075~900 cm^{-1} esta se debe a un exceso de metanol realizado en la muestra 1 debido a la falta de reactivo (Aceite de cañamo) con el fin de lograr la mezcla de catalización, por ello dicha banda es atribuible al grupo alcohol primario.



12.3 Rendimiento del biodiesel y condiciones de la reacción de transesterificación

A nivel experimental, se procedió a determinar el rendimiento del biodiesel según el procedimiento de la sección 8.1.3 y la ecuación 11. Los rendimientos obtenidos a partir de las cantidades de aceite empleadas para las muestras 1 y 2, fueron de 47.33% y 25.62%, respectivamente. Como se evidencia, la muestra 2 de aceite no refinado obtuvo un menor rendimiento lo que se atribuye como lo sustenta Mera et al. (2019) a diversos factores, entre ellos, una mínima cantidad de metanol que puede conducir a una reacción incompleta y mínima formación de ésteres o en contraparte un exceso de alcohol que impide la correcta separación para de fases del glicerol.

Adicionalmente, la concentración del catalizador y la relación molar metanol/aceite llevan a maximizar o minimizar el rendimiento del biodiesel; sin embargo, otro factor que incide es la calidad del aceite en términos de refinación, ya que un aceite más refinado tendrá menores niveles de humedad y acidez (Zuleta et al., 2007), que relacionan la presencia de otras sustancias como gomas, carotenos que no reaccionan con el metanol. A partir de lo anterior, se da validez al mayor rendimiento de biodiesel obtenido a partir de aceite Premium refinado.

Las muestras de aceite de cáñamo relacionadas (1 y 2), fueron tratadas bajo condiciones de reacción diferentes, como se observa en la tabla 15. Se tiene que el uso de metanol en la reacción para la muestra 1 es elevada y los análisis ATR-IR, demostraron un exceso de este, lo cual “debido a la naturaleza reversible de la reacción, se necesita una cantidad de exceso de metanol para cambiar la trayectoria de la reacción hacia adelante” (Gupta et al., 2018). Asimismo, para el tiempo de reacción, se tiene que, dado que es un factor económico importante, por ello se realizó para ambas un precalentamiento del aceite de cáñamo, el cual permite la generación de calor local a presión atmosférica reduciendo la velocidad de reacción al combinarse con metanol dentro del matraz.

Tabla 17.
Condiciones de operación

| Propiedad | Muestra 1 | Muestra 2 |
|---|--|--|
| |   |   |
| Tiempo de reacción(min) | 60 | 30 |
| Velocidad de agitación(rpm) | 250 | 400 |
| Relación molar (aceite: metanol) | 1:4.5 | 1:3 |
| Carga de catalizador(gr) | 0.75 | 1.29 (2 pasos) |

La variación operativa más influyente sobre el rendimiento del biodiesel es la carga del catalizador, dado que para la muestra 2, el diseño experimental fue realizado a partir de una base de dos pasos eliminado en un paso primario de transesterificación el glicerol restante para en uno secundario seguir con la reacción hasta completarla, una vez eliminado el glicerol inicial. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el rendimiento disminuyó, y esto se debe a como lo presentan Gupta et.al (2018) la cantidad en exceso del catalizador tiende a producir jabón que finalmente aumenta la viscosidad de la masa de reacción y así el rendimiento del biodiesel.

13. Conclusiones

Finalmente a partir del proyecto, se concluye que el cáñamo, es una materia prima con potencial de ser usada en la transesterificación con metanol para la producción de biodiesel en el sector energético y agroindustrial, puesto que inicialmente propone una sustitución parcial del diésel bajo un proceso de producción ambientalmente sostenible lo que lleva a la generación de energía a partir de fuentes renovables, y adicionalmente, se postula como una materia vegetal versátil por su alto contenido de ácidos grasos.

Como se desprende del análisis físico químico, las muestras 1 y 2 del biodiesel a partir de aceite de *Cannabis Sativa L.* producido, en términos de densidad cumplen con la normativa legal aplicable a Colombia NTC 5444, para valores de $0,8891 \pm 0,05$ y $0,8706 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, siendo valores próximos a valores experimentales reportados en la literatura. De otra parte, se evidenció que el valor de viscosidad para la muestra 2 fue de $9 \pm 0,026 \text{ cSt}$, un valor fuera del rango permitido, por lo cual se requiere incluir tratamientos adicionales en la metodología experimental, evitando así, un alto contenido de esteres metílicos de ácidos grasos saturados o contaminaciones.

Este trabajo, demostró la aplicabilidad de la técnica de espectroscopia infrarroja en la identificación de esteres metílicos propios del biodiesel, logrando identificar y caracterizar los grupos funcionales esenciales de los productos obtenidos, a partir de la comparación de aceites de cáñamo, sin embargo, se deben realizar más estudios en aras de fortalecer el enfoque para el análisis cuantitativo de este tipo de biodiesel dado la versatilidad de esta materia prima.

Asimismo, se observa que los factores más relevantes que afectan la velocidad de reacción para el diseño experimental, son la carga de catalizador y la relación molar, ya que por parte del primero, la cantidad usada favorecerá una reacción deseada (transesterificación) o una reacción no deseada (saponificación) afectando el rendimiento del biodiesel, mientras que en segundo lugar, la cantidad de metanol usado determina en términos económicos la factibilidad de la realización de la reacción, es por

ello que es indispensable determinar una cantidad optima de metanol para realizar la mezcla con el aceite de cáñamo previamente precalentado.

14. Recomendaciones

Para futuras investigaciones se sugiere adicionar etapas de tratamiento previo (refinación) al aceite de cáñamo y adecuar el diseño experimental con el fin de reducir partículas contaminantes y remover impurezas; también, evaluar la relación molar metanol/aceite y la concentración del catalizador para favorecer la reacción hacia los productos.

Así mismo, se recomienda implementar análisis experimentales de caracterización fisicoquímica como la Cromatografía de Gases con Espectrómetro de Masas, con vistas a analizar la cantidad de esteres metílicos y determinar la concentración de metanol en el biodiesel (remanente).

De otra parte, se aclara que el escalamiento industrial para la producción de biodiesel de *Cannabis Sativa L.* requiere considerar licencias ambientales nacionales según la cantidad de materia prima a manejar; lo anterior, también debe regirse bajo el contenido de THC permitido.

Referencias

- Afif, M. K., & Biradar, C. H. (2019). Production of biodiesel from Cannabis sativa (Hemp) seed oil and its performance and emission characteristics on DI engine fueled with biodiesel blends. *Int. Res. J. Eng. Technol*, 6(8), 246-253.
- Aizpurua-Olaizola, O., Soydaner, U., Öztürk, E., Schibano, D., Simsir, Y., Navarro, P., Etxebarria, N., & Usobiaga, A. (2016). Evolution of the Cannabinoid and Terpene Content during the Growth of Cannabis sativa Plants from Different Chemotypes. *Journal of natural products*, 79(2), 324–331.
- Arroyo, A. (2017). El gran impulso ambiental en el sector de la energía: Perspectivas para los países y la industria de los hidrocarburos de América Latina. *CEPAL*.
- Arul, S. & Kirubakaran, M. (2018). Eggshell as heterogeneous catalyst for synthesis of biodiesel from high free fatty acid chicken fat and its working characteristics on a CI engine. *Journal of environmental chemical engineering*, 6(4), 4490-4503.
- Asokan, M. A., Prabu, S. S., Bollu, A., Reddy, M. A., Ram, A., & Sukhadia, D. S. (2021). Emission and performance behavior off hemp seed oil biodiesel/diesel blends in DI diesel engine. *Materials Today: Proceedings*, 46, 8127–8132. doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.064
- Ayeter, G. K., Sunnu, A., & Parbey, J. (2015). Effect of biodiesel production parameters on viscosity and yield of methyl esters: Jatropha curcas, Elaeis guineensis and Cocos nucifera. *Alexandria Engineering Journal*, 54(4), 1285-1290.
- Bakowska-Barczak, A., Larminat, M.-A. de, & Kolodziejczyk, P. P. (2020). The application of flax and hempseed in food, nutraceutical, and personal care products. In *Handbook of Natural Fibres* (pp. 557–590). Elsevier.
- Banco Mundial. (2020). *A pesar del lento avance hacia las metas mundiales en materia de energía, las fuertes mejoras en los países resultan prometedoras*. Lisboa. Bancomundial.org.

<https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/05/02/sustainable-development-goal-sdg-7-global-progress-report>

Barton, S. J. and Hennelly, B. M. (2019). An Algorithm for the Removal of Cosmic Ray Artifacts in Spectral Data Sets. *Applied spectroscopy*, 73(8), 893–901. DOI: 10.1177/0003702819839098.

Buck, M., & Senn, T. (2016). Energy self-sufficient production of bioethanol from a mixture of hemp straw and triticale seeds: Life-cycle analysis. *Biomass and Bioenergy*, 95, 99-108.

Buckley, C. (2010). Hemp Produces Viable Biodiesel, UConn Study Finds. *UCONN*. Recuperado el 19 de agosto del 2021, de <https://today.uconn.edu/2010/10/hemp-produces-viable-biodiesel-uconn-study-finds/>

Cáceres, P., Riva, N., Calle, G., Dell’Orso, M., Gatto, M., Sberna, N., & Schaiquevich, P. (2020). Medicinal cannabis in Latin America: History, current state of regulation, and the role of the pharmacist in a new clinical experience with cannabidiol oil. *Journal of the American Pharmacists Association: JAPhA*, 60(1), 212–215

Cámara, I. L. (2017). Cultivo y usos etnobotánicos del cañamo (*Cannabis Sativa L.*) en la ciencia árabe (siglos VIII-XVII). *Asclepio*, 69(2), 197.

Carneiro, M. L. N., Pradelle, F., Braga, S. L., Gomes, M. S. P., Martins, A. R. F., Turkovics, F., & Pradelle, R. N. (2017). Potential of biofuels from algae: Comparison with fossil fuels, ethanol and biodiesel in Europe and Brazil through life cycle assessment (LCA). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 632-653.

Charpentier, J.-C. (2016). *What kind of modern “green” chemical engineering is required for the design of the “factory of future”?* *Procedia Engineering*, 138, 445–458.

Coy, J. L., Jurado, J. V., Velásquez, S. H., & Acevedo, E. B. (2015). Análisis del sector biodiésel en Colombia y su cadena de suministro. Universidad del Norte.

- CORDIS. (2017). Europa.Eu. <https://cordis.europa.eu/project/id/311849/reporting>
- CSA. (2013). *Los biocombustibles y la seguridad alimentaria*. Fao.org.
<http://www.fao.org/3/i2952s/i2952s.pdf>
- Cubillos, A. A. E., Tobón, A. E. D., & Vargas, S. A. C. (2019). Estimación teórica del efecto de la temperatura en la densidad, viscosidad, poder calorífico, capacidad calorífica y gravedad API de biocombustibles. *Scientia et Technica*, 24(2), 190-199.
- Das, L., Li, W., Dodge, L. A., Stevens, J. C., Williams, D. W., Hu, H., Li, C., Ray, A. E., & Shi, J. (2020). Comparative evaluation of industrial hemp cultivars: Agronomical practices, feedstock characterization, and potential for biofuels and bioproducts. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(16), 6200–6210.
- Devi, V., & Khanam, S. (2019). Comparative study of different extraction processes for hemp (*Cannabis sativa*) seed oil considering physical, chemical and industrial-scale economic aspects. *Journal of Cleaner Production*, 207, 645–657.
- Fedebiocombustibles. (2017). *Información Estadísticas Sector Biocombustibles: Biodiesel de Palma de Aceite*. Fedebiocombustibles.com. https://www.fedebiocombustibles.com/estadistica-mostrar_info-titulo-Biodiesel.htm
- Fedesarrollo. (2019). *Cannabis medicinal: ¿la próxima bonanza?* Recuperado el 24 de febrero de 2021, de <https://www.fedesarrollo.org.co/es/content/cannabis-medicinal-la-proxima-bonanza>
- Fike, J. (2016). Industrial hemp: Renewed opportunities for an ancient crop. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 35(5–6), 406–424.
- Flicker, N. R., Poveda, K., & Grab, H. (2020). The bee community of *Cannabis sativa* and corresponding effects of landscape composition. *Environmental Entomology*, 49(1), 197–202.

- García-Muentes, S. A., Sánchez del Campo-Lafita, A. E., Labrada-Vázquez, B., Lafargue-Pérez, F., & Díaz-Velázquez, M. (2018). Cinética de la reacción de transesterificación para la producción de biodiesel a partir del aceite de *Jatropha curcas* L., en la provincia de Manabí, Ecuador. *Tecnología Química*, 38(2), 281-297.
- García, I. F., Durán, V. H., Sánchez, C., Hernández, A., Ferreiro, C., & Casano, S. (2019). Seeking suitable agronomical practices for industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivation for biomedical applications. *Industrial Crops and Products*, 139 (111524). <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111524>
- García, S. A., Lafargue, F., Labrada, B., Díaz, M., & Sánchez del Campo, A. E. (2018). Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Química*, 30(1), 142-158.
- Gupta, A. R., Jalan, A. P., & Rathod, V. K. (2018). Solar energy as a process intensification tool for the biodiesel production from hempseed oil. *Energy Conversion and Management*, 171, 126–132.
- Grijó, D. R., Piva, G. K., Osorio, I. V., & Cardozo-Filho, L. (2019). Hemp (*Cannabis sativa* L.) seed oil extraction with pressurized n-propane and supercritical carbon dioxide. *The Journal of Supercritical Fluids*, 143, 268-274.
- Hernández, S., & Díaz M. (2018). ANALYSIS OF AN INDUSTRIAL BIODIESEL PRODUCTION PROCESS BY LIFE CYCLE ASSESSMENT. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(3), 453-465.
- IDEAM. (S/f). *METANOL*. Gov.co.
<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia19.pdf>
- Jayaraman, J., Dey, K., Arunkumar, T., Appavu, P., & Joy, N. (2021). Investigation on titanium oxide nano particles as additives for operating biodiesel fuelled engine. *Materials Today: Proceedings*, 44, 3525-3529.

- Jiménez, S. (2017). *Situación socioambiental del biodiesel en Colombia* (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).
- Johnson, R. (2018). Hemp as an agricultural commodity. Fas.Org <https://fas.org/sgp/crs/misc/RL32725.pdf>
- Kircher, M. (2021). Bioeconomy - present status and future needs of industrial value chains. *New Biotechnology*, 60, 96–104.
- Kumar, S. A., Sakthinathan, G., Vignesh, R., Banu, J. R., & Ala'a, H. (2019). Optimized transesterification reaction for efficient biodiesel production using Indian oil sardine fish as feedstock. *Fuel*, 253, 921-929.
- Lafont, J. J., Páez, M. S., & Torres, Y. C. (2011). Análisis químico de mezclas biodiesel de aceite de cocina usado y diesel por espectroscopia infrarroja. *Información tecnológica*, 22(4), 35-42.
- Li, S.-Y., Stuart, J. D., Li, Y., & Parnas, R. S. (2010). The feasibility of converting Cannabis sativa L. oil into biodiesel. *Bioresource Technology*, 101(21), 8457–8460.
- López, J. (2021). *Diseño de un sistema de extracción de aceite de Cáñamo para su uso en la industria farmacéutica y cosmética*. [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València]. RiuNet Repositorio UPV.
- Mera-Ayala, J., Revelo-Vargas, D., Mora-Martínez, M., Pérez-Barón, J., & Areiza-Rico, Y. (2019). Caracterización fisicoquímica de biodiésel derivado de grasa de pollo como alternativa de producción limpia en la Sabana de Túquerres-Nariño. *Informador Técnico*, 83(1), 41-50.
- Martínez, A., Arcos, J., Benavides, J., Garay, H., Lloreda, R., Ramírez, J. M., ... & Vera, J. C. (2019). Recomendaciones para una política integral de precios de los energéticos (diésel, gasolina, GLP, jet, gas natural, energía eléctrica, biocombustibles y carbón) y sus implicaciones fiscales, sociales, ambientales y energéticas aplicable en Colombia para la transición hacia un sistema energético moderno, seguro, confiable, asequible, y limpio. (pp- 183-85). *UPME*.

- Mazzetto, F., Simoes-Lucas, G., Ortiz-Gutiérrez, R. A., Manca, D., & Bezzo, F. (2015). Impact on the optimal design of bioethanol supply chains by a new European Commission proposal. *Chemical Engineering Research and Design*, 93, 457-463.
- Mohandass, R. (2017). *Investigations on Performance of Ci Engine Using Biodiesel Derived from Sunn Hemp Oil* (Doctoral dissertation, Department of Mechanical Engineering, Pondicherry Engineering College).
- Montacchini, E. P., Muñoz Veloza, M. A., Pennacchio, R., Savio, L., & Tedesco, S. (2018). The use of hemp in building components for the development of a modular house in a rural area of Cauca—Colombia. In *Advances in Natural Fibre Composites* (pp. 267–280). *Springer International Publishing*.
- Morelos Gómez, J. (2016). Analysis of the variation in the efficiency in the production of biofuels in Latin America. *Estudios Gerenciales*, 32(139), 120-126.
- Moscariello, C., Matassa, S., Esposito, G., & Papirio, S. (2021). From residue to resource: The multifaceted environmental and bioeconomy potential of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.). *Resources, Conservation, and Recycling*, 175(105864), 105864
- Muflikh, Y. N., Smith, C., & Aziz, A. A. (2021). A systematic review of the contribution of system dynamics to value chain analysis in agricultural development. *Agricultural Systems*, 189(103044), 103044.
- Nissen, L., di Carlo, E., & Gianotti, A. (2020). Prebiotic potential of hemp blended drinks fermented by probiotics. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 131(109029).
- OCDE/FAO (2020), “OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas”, Estadísticas de la OCDE sobre Agricultura (base de datos), <http://dx.doi.org/10.1787/agr-outl-data-en>.
- ONU. (2019). El cambio climático no se ha detenido por la COVID-29. *Ciencia*. Un.org <https://www.un.org/es/climatechange/science/key-findings>

- Parvez, A. M., Lewis, J. D., & Afzal, M. T. (2021). Potential of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) for bioenergy production in Canada: Status, challenges, and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *141*(110784), 110784
- Polova, Z., & Bruskova, P. (2018). *Roadmap Report HEMP Value Chain*. Ipe.Ro.
<http://www.ipe.ro/RR%20Hemp.pdf>
- Ramírez, J. M., & Fedesarrollo. (2019). La industria del cannabis medicinal en Colombia.
<https://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/3823>
- Rehman, M. S. U., Rashid, N., Saif, A., Mahmood, T., & Han, J.-I. (2013). Potential of bioenergy production from industrial hemp (*Cannabis sativa*): Pakistan perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *18*, 154–164.
- Rezapour, S. (2017). Herbal Oil Supplement with Hot-Nature Diet for Multiple Sclerosis. *Nutrition and Lifestyle*. *Nutrition and Lifestyle in Neurological Autoimmune Diseases* (pp. 229–245). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805298-3.00024-4>
- Rheay, H. T., Omondi, E. C., & Brewer, C. E. (2021). Potential of hemp (*Cannabis sativa* L.) for paired phytoremediation and bioenergy production. *GCB Bioenergy*, *13*(4), 525-536.
- Rijavec, T., Janjić, S., & Ačko, D. K. (2017). Revitalization of Industrial Hemp Cannabis Sativa L. var. sativa in Slovenia: A Study of Green Hemp Fibres. *Tekstilec*, *60*(1), 36-48.
- Rodríguez Miranda, RA (2020). Determinación de valor del suelo rural por unidades mínimas rentables para la producción de cáñamo en tres modelos de aprovechamiento mediante el uso de un algoritmo de optimización, para un predio en el municipio de Villapinzón, Cundinamarca. Recuperado el 23 de febrero de 2021 en <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/22574>

- Sair, S., Oushabi, A., Kammouni, A., Tanane, O., Abboud, Y., Oudrhiri Hassani, F., Laachachi, A., & El Bouari, A. (2017). Effect of surface modification on morphological, mechanical, and thermal conductivity of hemp fiber: Characterization of the interface of hemp –Polyurethane composite. *Case studies in thermal engineering*, 10, 550–559.
- Tan, S. X., Lim, S., Ong, H. C., & Pang, Y. L. (2019). State of the art review on development of ultrasound-assisted catalytic transesterification process for biodiesel production. *Fuel* (London, England), 235, 886–907.
- Teja, N. B., Hafeez, M. M. A., Surendran, G., Rajeshwaran, M., & Alagumurthi, N. (2020). Investigations of performance and emission characteristics in diesel engine fueled with Hemp oil methyl ester. *Materials Today: Proceedings*.
- Toro, M. S. & Huertas, S. (2021). Bioprospección del cáñamo soportada en procesos verdes para la industria colombiana [Capítulo de libro, Universidad EAN]. Recuperado el 19 de agosto de 2021, de <http://hdl.handle.net/10882/10857>.
- United Nations: Economic Commission for Europe. (2016). Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA) (6a ed.). United Nations.
- Uzcátegui U, O. (2016). Objetivos de desarrollo sostenible 2015-2030. *Revista De Obstetricia Y Ginecología De Venezuela*, 76(2), 73-75. Retrieved from http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0048-77322016000200001
- Vandepitte, K., Vasile, S., Vermeire, S., Vanderhoeven, M., Van der Borght, W., Latré, J., De Raeve, A., & Troch, V. (2020). Hemp (*Cannabis sativa* L.) for high-value textile applications: The effective long fiber yield and quality of different hemp varieties, processed using industrial flax equipment. *Industrial Crops and Products*, 158(112969), 112969.
- Vera-Rozo, J. R., Rodríguez-Herreño, B. A., Riesco-Ávila, J. M., & Cano-Andrade, S. Modelo para determinar el contenido de ésteres metílicos en el biodiesel obtenido de aceites vegetales usados.

Viloria, D., Díaz, H., & López, S. (2016). *Aplicación del método de análisis de capas de protección para una planta de procesos industriales. Instituto Politécnico Nacional.*

<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/12355/1/TESIS%20LOPA.pdf>

Viornerly-Portillo, E. A., Bravo-Díaz, B., & Mena-Cervantes, V. Y. (2020). Life cycle assessment and emission analysis of waste cooking oil biodiesel blend and fossil diesel used in a power generator. *Fuel*, 281, 118739.

Viswanathan, M. B., Cheng, M. H., Clemente, T. E., Dweikat, I., & Singh, V. (2021). Economic perspective of ethanol and biodiesel coproduction from industrial hemp. *Journal of Cleaner Production*, 299, 126875.

Web of Science Beta. (2020). *Analyze Results Publication Years Hemp*. Recuperado el 22 de febrero de 2021, de <https://www.webofscience.com/wos/woscc/analyze-results/1>

Zhao, J., Xu, Y., Wang, W., Griffin, J., Roozeboom, K., & Wang, D. (2020). Bioconversion of industrial hemp biomass for bioethanol production: A review. *Fuel*, 281(118725).

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118725>

Żuk-Gołaszewska K., Gołaszewski J. (2020) Producción de cáñamo. En: Crini G., Lichtfouse E. (eds) *Sustainable Agriculture Reviews 42. Sustainable Agriculture Reviews*, vol 42. Springer, Cham.

https://doi-org.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/10.1007/978-3-030-41384-2_1

Zuleta, E., Bonet, J., Díaz, L., & Bastidas, M. (2007). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite crudo de palma africana (*Elais guineensis*) con etanol. *energética*, (38), 47-53.