



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSENABILIDAD
Manejo Integral de Ecosistemas

**ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR
DE ACEITES USADOS.**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

Fermín Morales Troyo

TUTOR PRINCIPAL: Dr. Omar R. Masera Cerutti.

**Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y
Sustentabilidad, UNAM**

COMITÉ TUTOR: Dr. Roberto Linding Cisneros

**Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y
Sustentabilidad, UNAM**

**Dra. Claudia Alejandra Ponce de León Hill.
Facultad de Ciencias, UNAM**

México, D.F., agosto, 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN ECOSISTEMAS Y SUSENABILIDAD
Manejo Integral de Ecosistemas

ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE ACEITES USADOS.

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

PRESENTA:

Fermín Morales Troyo

TUTOR PRINCIPAL: Dr. Omar R. Masera Cerutti.

**Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y
Sustentabilidad, UNAM**

COMITÉ TUTOR: Dr. Roberto Linding Cisneros

**Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y
Sustentabilidad, UNAM**

Dra. Claudia Alejandra Ponce de León Hill.
Facultad de Ciencias, UNAM

México, D.F., agosto, 2015



Dr. Isidro Ávila Martínez
Director General de Administración Escolar, UNAM
Presente.-

Por medio de la presente, me permito informar a usted, que en reunión ordinaria del Subcomité por Campo de Conocimiento de (Biología Evolutiva y Sistemática) del Posgrado en Ciencias Biológicas, se aprobó el siguiente jurado para el examen de grado de Maestro en Ciencias Biológicas del alumno **Fermin Morales Troyo** con número de cuenta 512028024 con la tesis titulada: "Análisis del ciclo de vida de la producción de biodiésel a partir de aceites usados", bajo la dirección del Dr. Omar Raúl Masera Cerutti.- Tutor principal:

Presidente:	Dr. Carlos Ernesto González Esquivel
Vocal:	Dr. Agustín Jaime Castro Montoya
Secretario:	Dra. Claudia Alejandra Ponce de León Hill
Suplente:	Dra. Cynthia Armendáriz Arnez
Suplente:	Dr. Roberto Antonio Lindig Cisneros

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria, D.F., a 01 de julio de 2015

Dra. Maria del Coro Arizmendi Arriaga
Coordinadora del Programa



AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

- Le agradezco en primer lugar a la UNAM y al Posgrado en Ciencias Biológicas, por darme la oportunidad de superarme y alcanzar mis metas.
- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca que me otorgó (**CVU/Becario**): 480419/280530.
- Al PAPIIT (IT101512) por apoyo fundamental para realizar esta tesis.
- Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) por permitirme hacer uso de sus instalaciones para llevar a cabo mi proyecto de investigación de maestría.
- A los miembros comité tuoral; Dr. Omar Masera Cerruti, Dra. Claudia Alejandra Ponce de León Hill y al Dr. Roberto Lindig Cisneros por asesorarme durante mis estudios académicos.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

Quisiera agradecer primeramente a mi familia comenzando por mis padres y a mi abuela, Aurea Rosa Escobedo. Seguidos de mis hermanos Aranzazú y Salvador. También a mis tíos, Magda Cecilia, Carlos Alejandro, Arturo Sergio y Nora Susana. No podían faltar mis primos que son un buen; los Troyo Heredia, los Gallardo Troyo, los Troyo Ramírez y los Talamas Troyo. También a los Morales que aunque no nos vemos muy seguido sé que cuento con su apoyo.

Al equipo del laboratorio de bioenergía; Al Dr Omar Masera por su apoyo en la realización de esta tesis. MC Rene Martínez Bravo por su apoyo en la realización de esa tesis. También a Iván Cumana, A la monse, a Miriam Miranda Al compañero Felipe Sgarby, A sir Isaac Nava, a Karlita y a Carlos García por haber sido revisor de esta tesis.

A la gente de la Unidad de ecotecnologías por su compañerismo y por llenar mis días de dicha. MC Alfredo Fernando Fuentes Gutiérrez por su apoyo en la realización de esta tesis y su amistad incondicional. A Cintia Armendáriz por revisar mi tesis y a Emilio y a Paveluqui, porque SI. A las Mellizas arroyo, que a pesar de ser de diferentes placentas comparten el mismo lugar en mi corazón. A Vane por ser tan simpática y siempre sonreír. A Jorgy boy y a Juampi que a pesar de andar en extranjia siempre regresan. A paulo por enseñarme que el amor a la Juve es un estilo de vida. A Víctor por su amistad. A Raul Tauro y a Javier “el meke” Rendondo. A todos los minions que se han atravesado en mi camino.

Al laboratorio de Agroecología por aguanar bara cunado les queme el changarro. A John Larsen, a Carlos, a Dante, a Miguel, al Tigre y a Omar por ser mi compañero inicial en esta aventura.

*Gracias a la vida que me ha dado tanto.
Que me ha dado el sonido y el abecedario,
Con él las palabras que pienso y declaro:
Madre, amigo, hermano, y luz alumbrando
La ruta del alma de lo que estoy amando...*

Violeta Parra (1917 – 1967)

“Gracias a la vida”

ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	10
ÍNDICE DE TABLAS	11
RESUMEN	12
ABSTRACT.....	14
1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 Generalidades.	15
2. HIPÓTESIS.....	18
3. OBJETIVO GENERAL.....	18
3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
4. ANTECEDENTES	19
4.1 El Cambio Climático Global.	19
4.2 Biodiésel.....	21
4.3 Biodiesel en el Mundo.	22
4.4 Materia Prima para la Producción.....	24
4.4.1 Ventajas del Aceite Procesado.....	25
4.5 Impacto Ambiental y Social de la Producción de Biodiésel.	26
4.6 Producción de Biodiésel.	27
4.6.1 Transesterificación.	28
4.6.2 Esterificación.	29
4.6.3 Catalizadores Utilizados para la Producción de Biodiésel.....	30
4.6.3.1 Catalizadores Ácidos Homogéneos.....	30
4.6.3.2 Catalizadores Ácidos Heterogéneos.....	30
4.6.3.3 Catalizadores Básicos Heterogéneos.	31
4.6.3.4 Catalizadores básicos homogéneos	31
4.7 Balance Energético de la producción de Biodiésel.....	32
4.8 Análisis de Ciclo de Vida.	33
4.9 Límites del ACV.	35
5. METODOLOGÍA.....	37
5.1 Proceso de Esterificación con Catalizador Ácido.	38
5.1.1 Instalación experimental del proceso de esterificación.....	38
5.2 Recolección.....	38

5.3	Procedimiento Experimental de Esterificación.....	39
5.4	Producción de Biodiesel.....	40
5.4.1	Primera etapa de esterificación.....	40
5.4.2	Segunda Etapa de Esterificación.....	41
5.4.3	Tercera Etapa de Esterificación.....	42
5.5	Procedimiento Experimental de Transesterificación.....	42
5.5.1	Primer Etapa de Transesterificación.....	42
5.5.2	Segunda Etapa de Transesterificación.....	42
5.6	Balance Energético.....	43
5.7	Consumo de Energía en la Producción de Biodiésel.....	44
5.7.1	Energía en la Esterificación.....	44
5.7.2	Energía en el Secado.....	45
5.7.3	La Energía en la Transesterificación.....	46
5.7.4	La Energía Usada en el Lavado del Biodiésel o Refinación.....	46
5.8	Mitigación de Emisiones de CO ₂	47
5.8.1	Emisiones de la Recolección de Aceite Procesado.....	47
5.8.2	Emisiones de Combustibles Fósiles en la Esterificación.....	48
5.8.3	Emisiones de CO ₂ en el Secado.....	49
5.8.4	Emisiones de CO ₂ en la Transesterificación.....	50
5.8.5	Emisiones en el Lavado.....	50
5.9	Total de Emisiones del Sistema.....	51
5.10	Prueba Estadística ANOVA (Análisis de varianza con un factor).....	52
6	RESULTADOS.....	53
6.1	Esterificación.....	53
6.1.1	Peso en Porcentaje de Ácido Sulfúrico H ₂ SO ₄	53
6.1.2	Relación Molar del Metanol.....	54
6.1.3	Tiempo de Reacción.....	56
6.2	Transesterificación.....	57
6.2.1	Porcentaje en Peso de Catalizador NaOH.....	57
6.2.2	Relación Molar del Metanol con Respecto al Rendimiento del Aceite.....	59
6.2.3	Tiempo de Reacción para la Transesterificación.....	60
6.3	Análisis de Ciclo de Vida.....	61

6.3.1	Balance Energético.....	61
6.4	Mitigación de CO ₂	63
7.	DISCUSIÓN.....	64
7.1	Parámetros en la Producción de Biodiésel	64
7.1.1	Esterificación	64
7.1.2	Transesterificación	65
7.2	Eficiencia Energética y Emisiones de CO ₂ eq	65
8	CONCLUSIONES.....	69
9	LITERATURA CITADA.....	70

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1:	Aportaciones de CO ₂ por Categoría. (REN 21. 2014)	20
Ilustración 2:	Consumo de Biocombustibles en el mundo, 2000 – 2013. (REN21 2014).....	23
Ilustración 3:	Producción Mundial de Biodiésel. (REN21 2014)	24
Ilustración 4:	Reacción de Transesterificación. (Elaborado por Autor).....	28
Ilustración 5:	Reacción de Esterificación. (Elaborado por Autor).....	29
Ilustración 6:	Fases del Análisis de Ciclo de Vida. (Elaborado por Autor).....	34
Ilustración 7:	Limites de ACV. (Elaborado por Autor)	36
Ilustración 8:	Proceso de Producción de Biodiésel. (Elaborado por Autor)	37
Ilustración 9:	Bidones de Aceite Usado. (Elaborado por Autor).....	39
Ilustración 10:	Ecuación para obtener la acidez del aceite usado. (Elaborado por Autor)	40
Ilustración 11:	Fórmula para la obtención del índice energético fósil. (Elaborado por Autor)	43
Ilustración 12:	Emisiones de CO ₂ en el transporte.(Elaborado por Autor).....	48
Ilustración 13:	Emisiones en el Proceso de Esterificación. (Elaborado por Autor).....	51
Ilustración 14:	Fórmula para calcular el porcentaje mitigación (Elaborado por Autor).	51
Ilustración 15:	Efecto del % en peso de H ₂ SO ₄ en la acidez del aceite	54
Ilustración 16:	Relación Molar Metanol: Aceite.	55
Ilustración 17:	Efecto del tiempo de reacción en la esterificación en el % de acidez del aceite.	56
Ilustración 18:	Peso del hidróxido de sodio con respecto al rendimiento del aceite.....	58
Ilustración 19:	Relación molar metanol con respecto al rendimiento del aceite.	59
Ilustración 20:	Tiempo de reacción para la transesterificación.	60
Ilustración 21:	Comparación de la Energía para Producir Biodiésel y Diésel.....	62
Ilustración 22:	Emisiones reales mitigadas en la producción de biodiesel.	63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Consumo energético por uso de gasolina en la recolección de aceite por la empresa Moreco.....	44
Tabla 2: Consumo de energía en la esterificación.....	45
Tabla 3: Consumo de energía durante la esterificación.	45
Tabla 4: Consumo de energía en el secado.	46
Tabla 5: Consumo de energía en la transesterificación.....	46
Tabla 6: Consumo de energético de la bomba.	46
Tabla 7: Consumo energético en el lavado.....	47
Tabla 8: Emisiones de CO ₂ en el transporte.	48
Tabla 9: Emisiones de CO ₂ en la esterificación.	49
Tabla 10: Emisiones de CO ₂ por el uso de bomba en la esterificación.	49
Tabla 11: Emisiones de CO ₂ por uso de la bomba eléctrica en el secado.	49
Tabla 12: Emisiones de CO ₂ en la transesterificación.	50
Tabla 13: Emisiones por uso de la bomba en la transesterificación.....	50
Tabla 14: Emisiones de CO ₂ por uso de la bomba.	50
Tabla 15: Consumo de energía (GJ) y las emisiones de KgCO ₂ equivalente/GJ por litro de biodiésel	61

RESUMEN

El biodiésel es un combustible alternativo no tóxico y biodegradable que se obtiene a través de una reacción en la que el aceite, en presencia de un catalizador como el hidróxido de sodio reacciona con un alcohol monohídrico (metanol). Un obstáculo importante en la producción de biodiesel es el costo de materia prima. El Aceite de cocina procesado es una de las fuentes más económicas para la producción de biodiesel. Sin embargo, los productos formados durante la cocción del aceite, tales como ácidos grasos libres pueden afectar a la reacción de transesterificación y las propiedades del biodiesel. Estos aceites que contienen altos niveles de ácidos grasos libres (más de 2 %) producen jabones y no se pueden utilizar directamente con los catalizadores básicos

Se recomienda una concentración de ácidos grasos libres en el aceite de menos de 2 % para la transesterificación. Para reducir la concentración de ácidos grasos libres se necesita un pre - tratamiento, la esterificación de ácido reduce el contenido de ácidos grasos libres al nivel deseable. Los factores que afectan la eficiencia de conversión del proceso son la relación molar de alcohol / aceite, la cantidad de catalizador, temperatura de reacción y el tiempo. La mejor eficiencia en la obtención de biodiésel (1 % de acidez) fue para una relación molar de 15:1 a una temperatura de 60°C, 1 % w/w de H₂SO₄ como catalizador y seis horas de tiempo de reacción. Cuando se reduce la acidez del aceite a un 1% como lo recomienda la literatura, se eliminan los ácidos grasos libres que pueden producir jabones. los jabones no son deseados para la siguiente etapa que es la transesterificación porque bajan el rendimiento del biodiésel.

Para la transesterificación, las variables investigadas fueron el tiempo de reacción, concentración de catalizador y la relación molar aceite- metanol. El mejor porcentaje de rendimiento se obtuvo usando una relación metanol/aceite molar de 6:1, hidróxido de sodio como catalizador (0,5 %) y temperatura de 50°C durante 1 h. A los parámetros obtenidos en las dos etapas de producción de biodiésel se evaluaron con un análisis de ciclo de vida.

El análisis del ciclo de vida de un producto consiste en la evaluación sistemática de los impactos ambientales de los productos en cada etapa del ciclo, hasta que llegan a su destino final. Con un balance energético se comparó la energía necesaria para producir

diésel de petróleo y biodiésel, resultando ser menor la energía fósil utilizada para producir biodiésel en comparación con la del diésel. El inventario de emisiones de CO₂ dio como resultado una reducción de 65% en la producción de biodiésel con respecto a la del diésel.

ABSTRACT

Biodiesel is a nontoxic and biodegradable alternative fuel that is obtained through a chemical reaction in which the oil, in a presence of a catalyst as sodium hydroxide reacts with a monohydric alcohol (methanol). A major hurdle in the biodiesel production is the raw material cost. Using cooking oil is one of the cheapest sources for biodiesel production. However, the products formed during frying, such as free fatty acids can affect the transesterification reaction and the biodiesel properties. These oils that contain high levels of FFAs (more than 2%) resulting in the production of soaps, and cannot be directly used with the basic catalysts currently. Concentration of FFA less than 2% is recommended for the transesterification. To reduce the FFA concentration a pre-treatment is needed, so acid esterification is used to achieve the Free Fatty Acids (FFAs) desirable content. The factors that affect the conversion efficiency of the process are molar ratio of alcohol/oil, the amount of catalyst and reaction temperature and time. The best conversion efficiency obtained (1% acidity) was for a molar ratio of 15:1 at a temperature of 60 °C, 1% H₂SO₄, six hours of reaction time.

For the second step of transesterification, the variables investigated were reaction time, catalyst concentration, and oil-to-methanol molar ratio. The best yield percentage was obtained using a methanol/ oil molar ratio of 6:1, sodium hydroxide as catalyst (0.5%) and 50°C during 1 h. Life Cycle Analysis consists in the study and evaluation of environmental impacts caused by a particular product or service throughout its existence. It analyzes the flow of materials and energy flow involved in all stages of production, use, and disposal. Assessment of the life cycle of a product consists of systematically evaluation of environmental impacts of products at each stage of the production process. With an energy balance the energy needed to produce diesel oil and biodiesel were compared and found to be less fossil energy used to produce biodiesel compared with that obtained from it. The inventory of CO₂ resulted in a 65% reduction in the production of biodiesel compared to diesel.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades.

El cambio climático es uno de los problemas ambientales más severos que enfrenta la humanidad. Es un fenómeno causado por la emisión de gases que favorecen el efecto invernadero derivado de actividades humanas, por lo que también se conoce como “cambio climático antropogénico”. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) hacia la atmósfera se deben al desarrollo industrial, al transporte, a la tala indiscriminada de árboles, a la quema de combustibles fósiles no renovables y la creciente contaminación por la mala disposición y manejo de residuos sólidos, entre otras causas (Chum y col. 2011).

Los combustibles fósiles representan cerca del 70% del requerimiento global de energía, particularmente para el transporte y la industria. El 30% restante corresponde a la energía eléctrica (Gouveia y Oliveira 2009). En México, las emisiones totales de GEI de la categoría de energía alcanzaron 490.42 Tg CO₂equivalente. En cuanto a las emisiones asociadas al consumo de combustibles, se estiman las correspondientes a CO₂, CH₄ y N₂O. Las emisiones de estos gases dependen del contenido de carbono en el combustible, las condiciones de combustión y la tecnología entre otras condiciones. La categoría de transporte contribuyó con 37.8% del total de las emisiones de GEI por consumo de combustibles, en 2012 generó 172.43 Tg CO₂eq (SENER 2012).

El uso de bioenergéticos puede tener un importante papel en reducir la excesiva dependencia en los combustibles fósiles y de esta manera promover la sustentabilidad ambiental (SENER 2012), pues su uso no incrementa la concentración de gases de efecto en la atmósfera en la misma magnitud que los combustibles fósiles.

El biodiésel es un biocombustible líquido alternativo a los derivados de los hidrocarburos. Se produce mediante la reacción química de ácidos grasos como

los aceites vegetales o grasas animales, con o sin uso previo donde, los ácidos grasos se hacen reaccionar con un alcohol como el metanol. La reacción requiere una catálisis usualmente con una base como el hidróxido de sodio o potasio. La reacción produce un nuevo compuesto químico llamado metil-éster y este éster es lo que se llama biodiesel (Berrios y Skelton 2008).

En la actualidad la producción de biodiesel proviene del aceite de plantas oleaginosas como el aceite de palma, soya o girasol (Amaro y col. 2011). Sin embargo, ese tipo de producción es muy controversial, ya que requiere tierra cultivable que puede no estar disponible en cantidades suficientes para satisfacer las necesidades de consumo de combustibles, afectando la seguridad alimentaria debido a un aumento de los precios y la sobre explotación de los recursos naturales (Brennan y Owende 2010).

Los aceites provenientes de los desechos domésticos y de los establecimientos comerciales de comida son una fuente alternativa de abastecimiento de materia para la producción de biodiesel. El aceite usado en algunos países se considera un desecho peligroso ya que al hacer una inadecuada disposición de este se ocasionan serios problemas de contaminación tanto en los suelos como en los cuerpos de agua municipales. Con el aprovechamiento de los aceites vegetales procesados para producir biodiesel, se obtiene energía para ser utilizada en el sector transporte reduciendo los gases de efecto invernadero y se reduce la contaminación directa, lo que constituye un paliativo al medio ambiente (Montefrio y col. 2010).

Una herramienta para medir realmente los beneficios ambientales de la recuperación de los aceites vegetales usados es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), una metodología que evalúa los impactos de un producto desde el proceso de producción hasta su uso final, y se puede hacer en distintas dimensiones: energética, ambiental y económica.

En un ACV se analiza el flujo de materiales y energía involucrada en las diferentes etapas de producción, en su uso y disposición final. De una forma sistemática se examinan los impactos ambientales de los productos en cada etapa, desde extracción de la materia prima hasta su destino final (Sánchez y col. 2007). Lo más importante es que dentro del ACV podemos encontrar los balances energéticos y las emisiones de dióxido de carbono. El balance energético permite al usuario visualizar el impacto de producción de un recurso, bien o servicio (en ese caso biodiésel), además de cuantificar las emisiones asociadas a la energía fósil utilizada (Duarte 2010).

A continuación se da una descripción del trabajo de investigación. En los antecedentes se describen las características generales del biodiésel; su definición e importancia, la producción mundial, su materia prima, ventajas y desventajas de su uso como combustible. Asimismo, se describen los procesos de producción y la estructura general del análisis de ciclo de vida.

En la metodología se describen cada una de las etapas del proceso de producción de biodiésel a partir de aceites comestibles usado. Se detallan los límites del ACV junto con las unidades funcionales. También se menciona cada uno de los insumos requeridos en las etapas de producción. En los resultados, con base en el método de producción, se estima el consumo energético generado al producir biodiésel. Finalmente se calculan las emisiones de CO₂ evitada en la producción de biodiésel.

En los últimos dos capítulos, se aborda una discusión sobre los resultados obtenidos en la investigación y se exponen las conclusiones a las que se llegó después de analizar los datos obtenidos, para terminar con una reflexión sobre futuras investigaciones en biodiésel.

2. HIPÓTESIS

El uso de aceites procesados para la producción de biodiésel tendrá un mejor balance de energía y mitigación de gases de efecto invernadero en relación con el diésel de hidrocarburos.

3. OBJETIVO GENERAL

Analizar la mitigación de gases de efecto invernadero y el balance energético asociado a la reutilización del aceite vegetal procesado en los establecimientos comerciales de comida hasta su destino final en el biorreactor de biodiésel.

3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Determinar la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero asociada a la sustitución del diésel convencional por biodiésel derivado de aceite vegetal procesado.
- Realizar el balance energético en la cadena productiva total del biodiésel obtenido a partir de aceite vegetal procesado.

4. ANTECEDENTES

El presente capítulo aborda las generalidades acerca del biodiésel; su importancia, así como las ventajas y desventajas de su uso. Asimismo, se describe el proceso de producción y la materia prima (aceite procesado) en el proceso de producción.

4.1 El Cambio Climático Global.

En la actualidad el mundo enfrenta un gran problema que nos afecta a todos y que en los próximos años amenaza seriamente con acrecentarse: el cambio climático global antropogénico. Este fenómeno se ha hecho más intenso debido a que el sistema económico mundial fomenta modelos de producción y consumo poco amigables con el ambiente (Niño 2008). Esto provoca que el planeta muestre un patrón atípico de calentamiento. El clima siempre ha variado y las condiciones del sistema climático evolucionan a lo largo del tiempo, el problema es que en el último siglo el ritmo de esas variaciones se ha acelerado, lo cual se atribuye a las diversas prácticas humanas entre éstas se encuentra la quema de combustibles fósiles (Martínez 2014).

Desde la era industrial se han emitido gases hacia la atmósfera por la quema de combustibles fósiles como carbón y combustibles líquidos. Estos son gases que se van acumulando en la atmósfera terrestre y dan lugar al fenómeno de efecto invernadero. Su concentración atmosférica es baja, pero tienen una importancia fundamental en el aumento de la temperatura del planeta. Los gases de efecto invernadero (GEI) más importantes son: vapor de agua, dióxido de carbono (CO_2) metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), haloalcanos también conocidos como clorofluorocarbonos (CFC) y ozono (O_3). El dióxido de carbono es el más importante y su fuente principal es el consumo de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural). El desarrollo de los automotores con motor de combustión

interna aceleró la concentración de GEI en la atmósfera, y en la actualidad se estima es de un 4%.

En México, las emisiones de CO₂ fueron de 493,450.6 Gg en 2010. Contribuyeron en 65.9% al total del inventario nacional y tuvieron un incremento de 23.6% con respecto a 1990. Las emisiones de CO₂ en el país provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles y procesos industriales (Ilustración 1) (Iv. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero). Los sectores con mayor contribución porcentual de emisiones de CO₂ en el 2010 fueron transporte 31.1%, generación eléctrica 23.3%, manufactura y construcción 11.4%, consumo propio de la industria energética, 9.6%, conversión de bosques y pastizales 9.2% y otros (residencial, comercial y agropecuario) 6.7%.

Como puede observarse, cinco de las mayores fuentes de emisión pertenecen al consumo de combustibles fósiles en la categoría de energía y aportan 82.1% del total de CO₂ del inventario nacional.

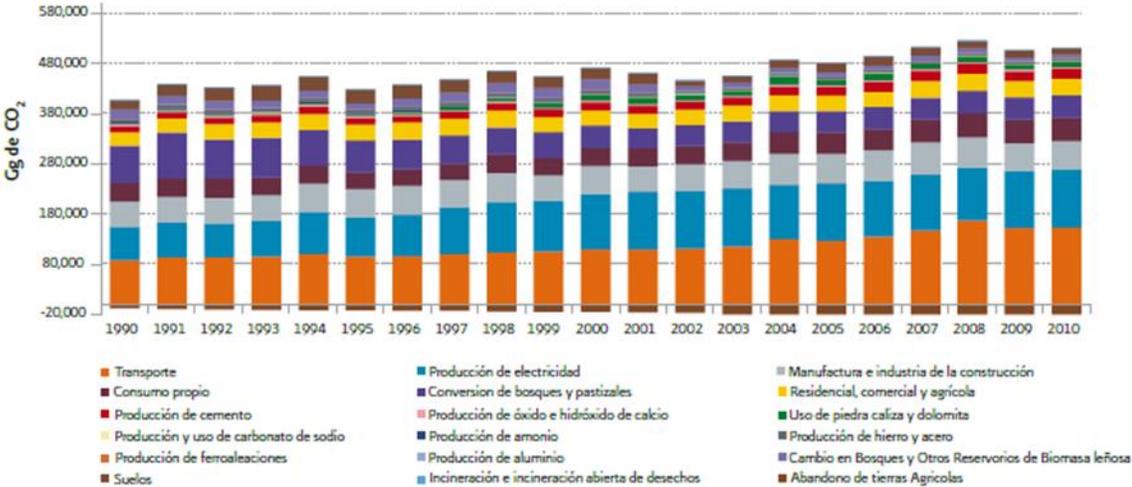


Ilustración 1: Aportaciones de CO₂ por Categoría. (REN 21. 2014)

Esto ha llevado a la necesidad de buscar alternativas para reemplazar al petróleo por otras fuentes energéticas más sustentables. Una alternativa es el biodiesel. La

producción de biodiésel se justifica debido a que éste puede ser usado para reemplazar parcialmente el diésel, decreciendo la dependencia de países importadores de petróleo y reduciendo las emisiones de CO₂ (Azócar 2010). Más del 95% del biodiésel en el mundo es producido a partir de aceites vegetales comestibles, lo cual ha incrementado la demanda y el precio de este tipo de aceites a nivel mundial (Demirbas 2005). Además, alrededor de un 70% a 95% de los costos totales de producción de biodiésel están relacionados con la materia prima, los aceites vegetales.

En los últimos años, los biocombustibles líquidos se han perfilado como candidatos potenciales para sustituir a los combustibles derivados del petróleo que son consumidos en su mayoría por el sector del transporte. Dentro de los biocombustibles están los de primera generación que implican el uso de tierras, de insumo (agua, fertilizante, etc.) que eventualmente pudieran dedicarse a cultivos alimenticios. Los de segunda generación cuya materias primas no compiten con la seguridad alimentaria y los de tercera generación que son los producidos por microalgas y otros microorganismos (Sandoval 2010).

4.2 Biodiésel.

El biodiésel es parte de los combustibles que provienen de la biomasa, que se refiere a toda materia que puede obtenerse a través de la fotosíntesis. La mayoría de las especies vegetales utilizan la energía solar para crear azúcares, partiendo de sustancias simples como al agua y dióxido de carbono, almacenando esta energía en forma de moléculas de glucosa, que se transforma en moléculas más complejas como el almidón, aceite etc. (Stratta 2000).

La idea de utilizar productos vegetales en motores diésel no es nueva. El creador del motor de encendido por compresión, o motor diésel, Rudolf Diesel, utilizó aceite de cacahuate para impulsar una de sus creaciones en la exposición de París de 1900 (Kalam y col. 2011). En esa presentación dijo que la utilización de

los aceites vegetales como combustibles para los motores podrían parecer insignificantes hoy, pero llegarían a ser tan importantes como el petróleo en el futuro (Bravo 2006).

La definición de biodiésel propuesta por las especificaciones de la asociación estadounidense para pruebas de materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) lo describe como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables como aceites vegetales o grasas de animales, y que se emplean en motores de ignición de compresión. Sin embargo, los ésteres más utilizados, son los de metanol y etanol (obtenidos a partir de la transesterificación de cualquier tipo de aceites vegetales o grasas animales o de la esterificación de los ácidos grasos) debido a su bajo costo y sus ventajas químicas y físicas. Se encuentran registrados como combustibles y como aditivos para combustibles en la Agencia de Protección del Medio Ambiente en los Estados Unidos (EPA).

La necesidad de examinar y aprovechar nuevas materias primas para producir biodiésel gira en torno a los problemas que se asocian al petro – diésel. Estos van desde el declive de los yacimientos de petróleo hasta los efectos adversos que causan al medio ambiente, como consecuencia de su uso.

4.3 Biodiesel en el Mundo.

El consumo internacional de biocombustibles ha aumentado considerablemente en los últimos años. La Agencia Internacional de Energía reporta que en la década de 2000 a 2013 la producción mundial de biocombustibles aumentó de 18 mil millones a 116.5 mil millones de litros (REN21 2014) que representa un aumento del 7% en la producción (Ilustración 2).

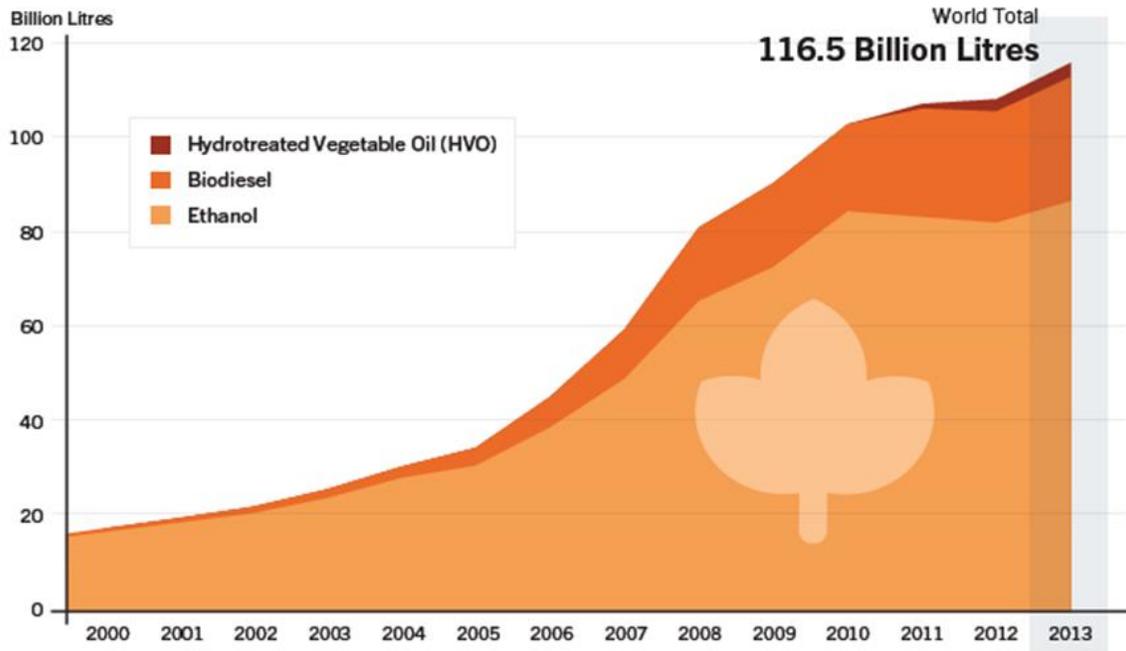


Ilustración 2: Consumo de Biocombustibles en el mundo, 2000 – 2013. (REN21 2014)

La producción mundial de biodiésel en 2013 fue de 26.3 mil millones de litros. Los mayores productores del biocombustibles fueron Estados Unidos, Alemania y Brasil. (Ilustración 3) (REN21 2014).

COUNTRY	FUEL ETHANOL	BIODIESEL	HVO	TOTAL	COMPARISON WITH TOTAL VOLUMES PRODUCED IN 2012
	billion litres				
United States	50.3	4.8	0.3	55.4	+1.2
Brazil	25.5	2.9		28.4	+4.1
Germany	0.8	3.1		3.9	+0.2
France	1.0	2.0		3.0	+0.1
Argentina	0.5	2.3		2.7	-0.3
The Netherlands	0.3	0.4	1.7	2.5	no change
China	2.0	0.2		2.2	-0.1
Indonesia	0.0	2.0		2.0	+0.2
Thailand	1.0	1.1		2.0	+0.5
Canada	1.8	0.2		2.0	+0.1
Singapore	0	0.93	0.9	1.8	+0.9
Poland	0.2	0.9		1.2	+0.3
Colombia	0.4	0.6		0.9	no change
Belgium	0.4	0.4		0.8	no change
Spain	0.4	0.3		0.7	-0.2
Australia	0.3	0.4		0.6	no change
EU-27	4.5	10.5	1.8	16.8	1.3
World	87.2	26.3	3.0	116.6	7.7

Ilustración 3: Producción Mundial de Biodiésel. (REN21 2014)

Actualmente en México se producen pequeñas cantidades de biodiésel a partir de aceites reciclados; sin embargo Calderón (2012) estimó que en conjunto los cultivos y los aceites reciclados tienen un potencial sustentable de producción de 516,744,477.60 litros anuales de biodiésel, que podría sustituir a casi 3.3% del consumo actual de diésel en México.

4.4 Materia Prima para la Producción.

Existen varias fuentes de biomasa para la producción de biodiésel. La biomasa incluye todas las partes biodegradables de los residuos agrícolas, forestales, los componentes biodegradables de los desechos industriales y municipales (grasas animales y aceite vegetal usado). Los aceites vegetales procesados son la materia prima para biodiésel más atractiva por su bajo costo. En algunos casos estos aceites vegetales son gratis o su costo se reduce en un 60% en comparación con el aceite vegetal virgen (Predojevic 2008). Otro atractivo es que no compiten con tierras de cultivo y se generan en gran cantidad por locales y restaurantes de comida rápida.

Durante años la industria de alimentos ha utilizado aceite vegetal para sus procesos de cocción. Una vez terminado el proceso, el aceite quemado es desechado en el drenaje. Un litro de aceite convierte 1000 litros de agua potable en agua inutilizable. Esto debido a que el aceite flota sobre el agua y es muy difícil de eliminar (Albarracín y col. 2010). Además estos aceites contienen gran cantidad de compuestos oxigenados (epóxidos) dañinos para la salud humana. En algunos casos se revenden como aceites comestibles lo que genera un problema grave de contaminación para los consumidores.

4.4.1 Ventajas del Aceite Procesado.

Cuando el biodiésel o cualquier biocombustible proviene de cultivos, el cambio de uso de suelo de forestal a agropecuario, o el uso excesivo de agroquímicos y agua en las plantaciones de biocombustibles, puede disminuir el potencial de mitigación de dióxido de carbono o inclusive opacarlo, es decir, puede haber mayores emisiones en la plantación o en el cambio de uso de suelo que en el consumo de combustibles fósiles particularmente para el transporte. Además del consumo directo de combustible como parte del proceso del cultivo (IPCC 2011).

Por otro lado, la producción del biodiésel proveniente de cultivos oleaginosos puede competir con los cultivos para la alimentación. Existen muchos estudios sobre estos temas que han derivado en normas de uso de biodiésel en Europa y Estados Unidos, para evitar el conflicto entre tierra y agua para alimentación o para cultivos energéticos. También está en desarrollo la segunda generación de biodiésel proveniente de celulosa de herbáceas y especies leñosas que aumentaría el potencial de este combustible (IPCC 2011).

En este trabajo, se analiza el biodiésel proveniente de aceite vegetal comestible procesado (primera generación). El biodiésel proveniente de esta fuente, no sólo no genera problemas de competencia por recursos, sino que resuelve un

problema de disposición final de esta sustancia, ya que el aceite comestible procesado genera problemas de contaminación de agua y deficiencia en los sistemas de saneamiento. Por ello, revalorar este material de desecho para ser utilizado como materia prima del biodiésel presenta una clara ventaja.

4.5 Impacto Ambiental y Social de la Producción de Biodiésel.

A pesar de que tienen la misma función, el biodiésel y el diésel tienen orígenes muy distintos y composiciones diferentes. El biodiésel se compone de metil o etil ésteres de ácidos grasos con una baja complejidad estructural. Se obtienen de diferentes fuentes como el aceite de soya, de girasol, cacahuete, de coco, del aceite de palma, etc. (Pinto y col. 2005). En contraste, el diésel contiene de 2000 a 4000 hidrocarburos, en una compleja mezcla de alcanos lineales, ramificados y cíclicos que se obtienen durante la separación del petróleo al destilarlo (Gallego y col. 2001), además de los reconocidos beneficios ambientales relacionados con la combustión del biodiésel (menores emisiones de CO₂, CO y SOx compuestos orgánicos volátiles y material articulado) (Pinto y col. 2005). La diferencia entre la composición de los combustibles también influye en su tiempo de degradación en el ambiente.

El biodiésel es un combustible líquido que se obtiene de productos renovables. Es un combustible que puede llegar a ser puro, además de ser biodegradable al quemarse y no es tóxico (es menos tóxico que la sal de mesa) y prácticamente libre de azufre y compuestos aromáticos. Contiene entre el 10 y 11% de oxígeno lo cual favorece una combustión más completa que la de los combustibles de hidrocarburos. En el motor mejora la combustión aun cuando se mezcla con diésel de petróleo (Singh y Singh 2010).

Puede usarse como combustible al 100% (B100) como una base de mezcla para el diésel de petróleo (B20) o en una proporción baja como aditivo del 1 al 5% del volumen del aditivo.

Son muchos los beneficios que se obtienen de la producción de biodiésel para fines energéticos, se considera en primer lugar la emisión neta casi nula de CO₂, uno de los principales responsables del calentamiento global. Otras ventajas ambientales de la sustitución del petrodiesel por biodiésel además de la ya comentada reducción de emisiones de CO₂, son su alta degradación biológica al quemarse y que no contiene azufre lo cual permite el uso de catalizadores para mejorar la combustión y minimizar los gases en escape. (García Sánchez. 2012)

Existen reportes de que el biodiésel es altamente biodegradable tanto en ambiente acuático como en terrestre. Del 90 al 98% del biodiésel es degradado de 21 a 28 días bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas (Meng y col. 2008).

De no menor importancia son las ventajas socioeconómicas que en términos de microeconomía puede representar la producción de biodiesel (ej. autoabastecimiento de combustible al productor agropecuario) y además, en términos macro económicos, al cubrir una gran parte de la dependencia de los países agro-productores del abastecimiento de combustibles fósiles por parte de los países productores de petróleo.

4.6 Producción de Biodiésel.

En el caso particular del biodiésel, la materia prima se encuentra representada generalmente por los aceites vegetales. Es resultado de la transesterificación de aceites vegetales con metanol o etanol. Durante el proceso de producción convencional, el aceite es mezclado con sales metálicas (por ejemplo hidróxidos de sodio o potasio) que funcionan como catalizadores de la reacción. Los productos obtenidos son ésteres metílicos o etílicos (biodiésel) y glicerol como subproducto (Pérez y col. 2009). No siempre el biodiésel se produce con aceite virgen. Existen una gran cantidad de materias primas, como los aceites procesados de cocina los cuales contienen una gran cantidad de ácidos grasos libres. Al usar la catálisis básica en la transesterificación se produce jabones que

reducen el rendimiento del aceite. Con el fin de resolver ese problema, un pretratamiento (esterificación) se usa regularmente para tratar los ácidos grasos libres (Bao y col. 2008).

La relación estequiométrica para transesterificación requiere tres moles de alcohol y un mol de glicérido para obtener tres moles del éster de ácido graso y un mol de glicerina como subproducto. La transesterificación es una reacción en equilibrio en la cual se requiere un exceso de alcohol para conducir la hacia el producto (Ma y Hanna 1999).

4.6.1 Transesterificación.

La transesterificación básica o alcoholólisis de triglicéridos (TGs) es la ruta más común para la producción de biodiesel y se lleva a cabo a velocidades de reacción con temperaturas entre los 50°C y los 60°C. La reacción de transesterificación es un proceso en tres etapas donde los triglicéridos (TG) son primero convertidos a diglicéridos (DG), luego a monoglicéridos (MG) y posteriormente a ésteres y glicerina (Cerón 2010) (Ilustración 4).

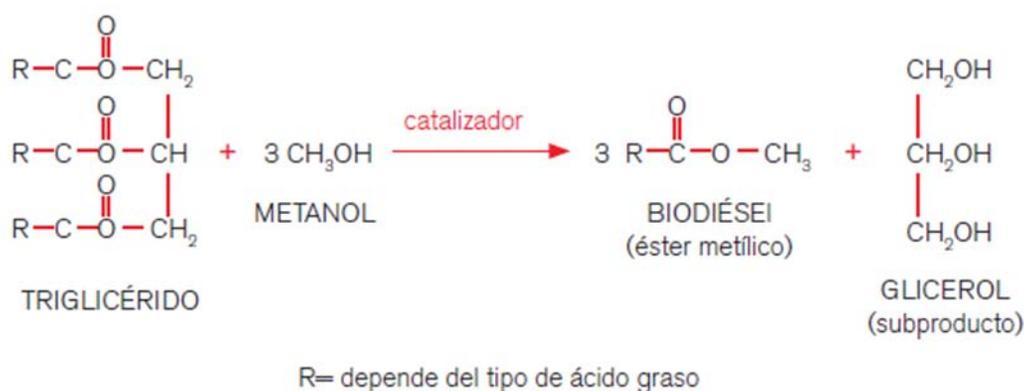


Ilustración 4: Reacción de Transesterificación. (Elaborado por Autor)

La conversión y rendimiento de la reacción de transesterificación se ven afectados por variables como la relación molar alcohol/aceite, la temperatura, la presencia de impurezas y el catalizador. Una relación molar de 6:1 (alcohol: aceite) es

recomendada (Dennis y col. 2010) para una óptima conversión de TG. Relaciones menores resultan en bajas conversiones y el exceso de metanol causa problemas en la separación de la glicerina e incrementa los costos.

Generalmente, la reacción de transesterificación es llevada a cabo a la temperatura de ebullición del alcohol (65°C). El proceso de producción de biodiesel usando catalizadores básicos es sensible al agua y ácidos grasos libres ya que reaccionan para producir jabón dificultando la separación del producto deseado. Un contenido menor a 0.5% en peso de ácidos grasos libres en la materia prima es recomendado para lo cual es posible someter la materia prima a un primer paso de esterificación con metanol usando un catalizador ácido (Predojevic 2008).

Los hidróxidos de sodio o potasio (metóxido) son catalizadores comúnmente usados en la síntesis de biodiésel. Otras investigaciones en transesterificación de lípidos mediante catalizadores ácidos, han mostrado bajas velocidades de reacción, 4000 veces menores comparadas con las velocidades de reacción logradas usando catalizadores básicos (Leung 2010).

4.6.2 Esterificación.

La esterificación de ácidos grasos con alcoholes de bajo peso molecular es otra ruta para la producción de biodiesel (Ilustración 5).

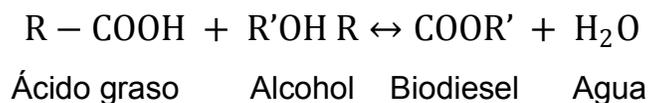


Ilustración 5: Reacción de Esterificación. (Elaborado por Autor)

La esterificación de ácidos grasos con alcohol de manera comercial se lleva a cabo usando catalizadores líquidos como ácido sulfúrico, hidrosulfúrico y *p*-toluensulfónico en un rango de temperatura entre 20°C y 60°C. La velocidad de

reacción depende de la cantidad de catalizador usado y la concentración inicial de ácidos grasos. La esterificación es una reacción en un solo paso, mientras la reacción de transesterificación de triglicéridos consiste en tres reacciones consecutivas (Andrade 2014).

También es posible el uso de catalizadores sólidos en reemplazo de los catalizadores líquidos, ya que evitan tantos problemas de corrosión, ambientales y reducen los protocolos de purificación del producto simplificando los esquemas de producción de biodiésel y reducen los costos de inversión y producción.

4.6.3 Catalizadores Utilizados para la Producción de Biodiésel.

La idea principal del uso de diferentes catalizadores es mejorar las condiciones de proceso y superar algunas dificultades en la reacción dadas las características de las materias primas usadas. De esta forma los catalizadores utilizados pueden ser ácidos o básicos homogéneos o heterogéneos o enzimáticos (Cerón 2010).

4.6.3.1 Catalizadores Ácidos Homogéneos.

Se utilizan sustancias como H_2SO_4 , HCl , H_3PO_4 o RSO_3 entre sus principales ventajas está que permiten la esterificación de los ácidos grasos y la no formación de jabones, desafortunadamente presentan una velocidad de reacción baja, necesitan relaciones de alcohol en exceso y condiciones de presión y temperatura altas, además pueden presentarse reacciones de neutralización del catalizador lo que dificulta las operaciones de purificación (Cerón 2010).

4.6.3.2 Catalizadores Ácidos Heterogéneos.

Se utilizan sustancias como zeolitas, resinas sulfónicas, SO_4/ZrO_2 , WO_3/ZrO_2 , se tiene la ventaja de la reutilización del catalizador, la practicidad para

su uso en procesos continuos, además de que no permite la formación de jabones y permite una purificación sencilla del biodiésel (Cerón 2010).

4.6.3.3 Catalizadores Básicos Heterogéneos.

Entre los catalizadores básicos heterogéneos se pueden mencionar el MgO, CaO, Na/NaOH/Al₂O₃. Tienen como gran ventaja que pueden ser reutilizados, sin embargo requieren alta presión y temperatura (Cerón 2010).

4.6.3.4 Catalizadores básicos homogéneos.

El hidróxido de sodio se escoge para catalizar la transesterificación porque es más barato y más rápido. La presencia de ácidos grasos libres en grandes cantidades ocasiona la formación de jabón cuando se trabaja con catalizadores básicos, la máxima cantidad de ácidos grasos libres recomendada se encuentra entre el 2% y 1% para estos catalizadores (Cerón 2010).

La saponificación con estos catalizadores se ve favorecida cuando se opera con hidróxido potásico o sódico, ya que los iones ⁻OH son los responsables de esta reacción. Por tanto, al utilizar estos catalizadores, se debe tener especial precaución con las condiciones en que se produce la reacción, especialmente la temperatura y la concentración de los catalizadores, para reducir al máximo la saponificación (Abularach y Amurrio 2010.). En cualquier caso, se deben utilizar aceites y alcoholes esencialmente anhidros, ya que el agua favorece la formación de jabones. El agua se debe eliminar, mediante evaporación, en los aceites con altos contenidos en humedad, antes de llevar a cabo la transesterificación.

El uso de un catalizadores básicos homogéneos como; hidróxido de sodio y el hidróxido de potasio han sido de gran éxito en la producción de biodiésel a escala industrial. Sin embargo, el biodiesel y la glicerina producidos necesitan ser

purificados para remover el catalizador utilizando agua caliente dos o tres veces (Ceron 2010).

4.7 Balance Energético de la producción de Biodiésel.

La energía incluye las propiedades moleculares de las sustancias, la cantidad de energía interna que poseen y además su capacidad para hacer trabajo. La energía existe de distintas formas; térmica, química, electromecánica metabólica. Dependiendo el tipo de fuentes de donde provengan pueden ser catalogadas como renovables o no renovables (Nava 2014).

Las energías renovables son aquellas que provienen de materias primas que se pueden utilizar de manera continua por su capacidad regenerativa. Mientras que las no renovables no pueden permanecer constantemente en uso, ya que llegan a un punto de agotamiento por la explotación del hombre, así como la incapacidad o el tiempo que tardan en regenerarse (Nava 2014).

Un balance energético para los biocombustibles se refiere al análisis de la diferencia entre la energía disponible por unidad de combustible que es producido menos la energía que fue requerida para su fabricación, tomando en cuenta todas las etapas de producción (Murillo 2010). Bajo esa definición, mediante el cálculo del balance energético se determina si el biocombustible proporciona más energía durante su combustión de la que fue requerida para su elaboración. Spinelli y col. (2013) lo definen de esta manera: “es la cantidad de energía contenida en el biocombustible con respecto a la energía consumida en su fabricación. Sus resultados generan índices energéticos (IE) que pueden variar de acuerdo a las diversas metodologías utilizadas, por lo mismo puede observarse diferencias de un estudio a otro y es siempre recomendable comparar el mayor número de estudios”.

4.8 Análisis de Ciclo de Vida.

Hay una presión creciente por desarrollar métodos para entender e identificar los impactos generados por la producción y el consumo de bienes y servicios. Una de las herramientas utilizadas para este propósito es el análisis de ciclo de vida (ACV), que como ya se mencionó, es una metodología que evalúa los impactos de un producto desde el proceso de producción hasta su uso final, en distintas dimensiones: energética, ambiental, económica y social.

Debido a que el ACV considera todas las etapas del ciclo de vida de un producto o servicio, se puede llegar a conocer todos los impactos asociados a la producción de biodiésel e identificar su origen y magnitud. De esa manera, se puede determinar en qué etapas o procesos están las oportunidades para reducir los impactos ambientales. Por lo tanto, el ACV contribuye brindando información de calidad para la toma de decisiones sobre los patrones de producción, consumo, políticas y estrategias de gestión (Ruíz 2007).

Existen cuatro fases del ciclo de vida a considerar: (Ilustración 6).

- a) Definir el alcance y el objetivo del estudio.
- b) El análisis del inventario.
- c) La evaluación del impacto.
- d) La interpretación.

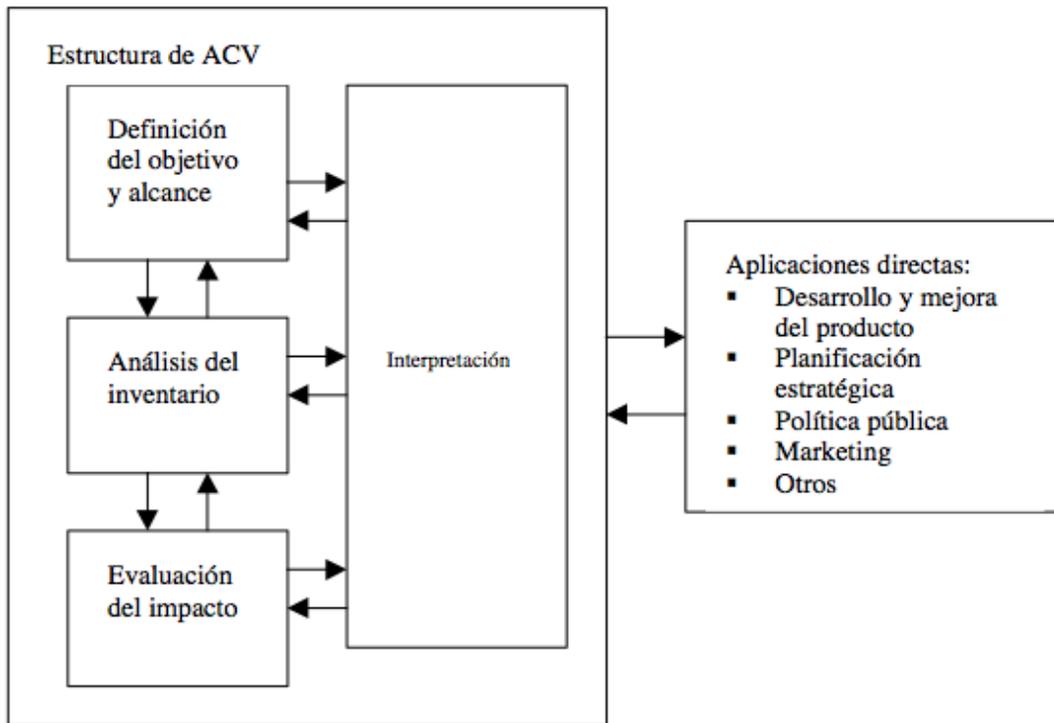


Ilustración 6: Fases del Análisis de Ciclo de Vida. (Elaborado por Autor)

El alcance y el objetivo, incluyen los límites del sistema y los niveles de detalle de un ACV. La profundidad y la amplitud del ACV pueden variar considerablemente en función del objetivo determinado (ISO_14044:2006). El inventario del ciclo de vida (ICV), incluye datos de entradas/salidas relacionadas con el sistema estudiado. Se trata de la recopilación de los datos necesarios para cumplir con los objetivos del estudio definido.

La evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV) es la tercera fase del ACV. El propósito de la EICV es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados de un sistema de producción con el fin de comprender mejor su importancia ambiental.

La interpretación del ciclo de vida, es la fase final del procedimiento de ACV, en el que los resultados de un ICV o EICV una, o ambas, se resumen y comentan como

base para las conclusiones, las recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con la definición del objetivo y alcance (García 2011).

Las unidades funcionales son los indicadores de las entradas y salidas de un ACV. Varían de acuerdo a la disciplina y a los objetivos de la investigación. Las principales unidades funcionales para el ACV de biocombustibles son los gases de efecto invernadero (GEI) y la energía. Las entradas y salidas de GEI ocurren durante todo el proceso de producción del biocombustible. La contribución al calentamiento atmosférico emitido durante la producción del biocombustible se expresa como kilogramos de CO₂ equivalente (Kg CO_{2eq}). Las unidades de GEI se utilizan para evaluar los beneficios ambientales de los biocombustibles en relación con los combustibles fósiles. La definición de la energía de entrada y salida del proceso es importante para el ACV, ya que se interpretan como requerimientos de energía antropogénica (Davis S.C. et al). Para el balance de energía utilizamos mega joules ($\mathbf{MJ}_{\text{biodiesel}} / \mathbf{MJ}_{\text{fósil}}$). La unidad funcional seleccionada deberá estar definida y ser medible (Lechón y col 2005). En esta tesis se utilizó $\mathbf{KgCO_{2eq}/GJ_{biodiesel}}$ para las emisiones GEI, mientras que para el balance energético se utilizó $\mathbf{GJ_{biodiesel}/GJ_{fósil}}$.

4.9 Límites del ACV.

Los límites del sistema determinan qué procesos unitarios deberán incluirse dentro del ACV, y qué cargas ambientales se estudiarán y a qué nivel de detalle.

Los límites del sistema se definen como el conjunto de criterios que especifican cuáles de los procesos unitarios se incluirán en el sistema objeto del estudio. El establecimiento de dichos límites se hace necesario ya que el cálculo del balance de energía de un sistema completo puede resultar extenso y complejo. Puede estar condicionado por distintos limitantes como la aplicación prevista del estudio, la disponibilidad de datos, las limitaciones económicas y el destinatario previsto, entre otras. En la figura 7 se aprecian los límites del ACV.

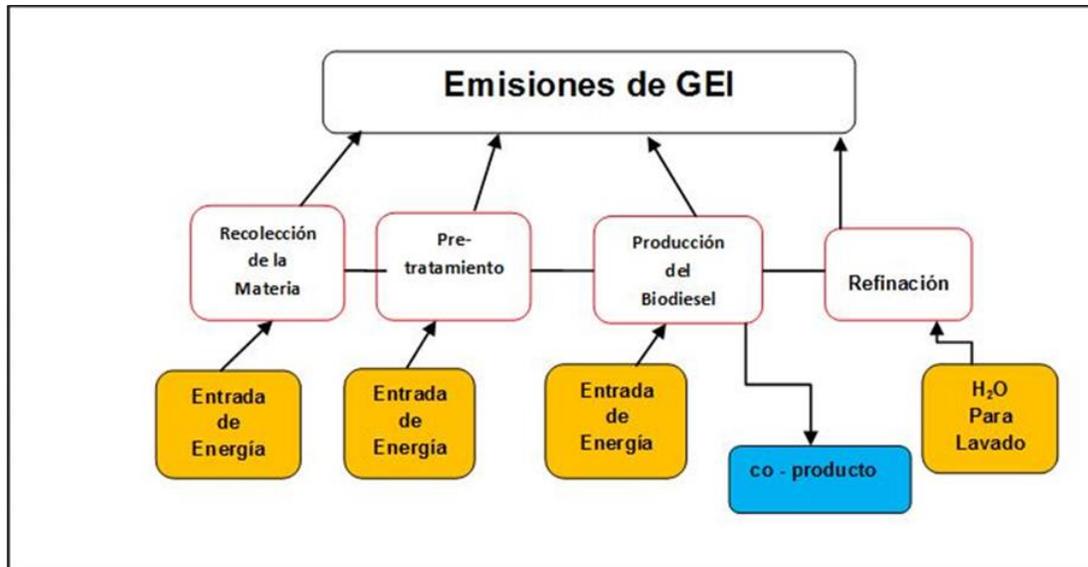


Ilustración 7: Límites de ACV. (Elaborado por Autor)

Los tipos de energía que regularmente se consideran al hacer el análisis del balance energético para biocombustibles líquidos son los siguientes (Nava 2014).

1. *Energía de la materia prima o indirecta:* es la contenida en la materia prima que termina en el producto final, por ejemplo: la energía del metanol, catalizador, solventes, etc.
2. *Energía de proceso o directa:* es la energía que no contribuye al contenido energético del producto, pero es necesaria para la conversión del producto: gas, electricidad, diésel, etc.
3. *Energía fósil:* es la energía fósil o derivados de combustibles fósiles utilizados para el proceso de fabricación.
4. *Energía final de combustibles:* es la que está contenida en el producto que puede ser convertida en trabajo, es decir, el contenido energético del biodiésel.

5. METODOLOGÍA

En el presente capítulo se describen los métodos utilizados en la producción de biodiésel para este estudio. Se presentan los insumos y etapas en la reacción de esterificación y a su vez en la transesterificación. Igualmente, se realiza el inventario de emisiones de CO₂ y el balance energético en el ciclo de vida.

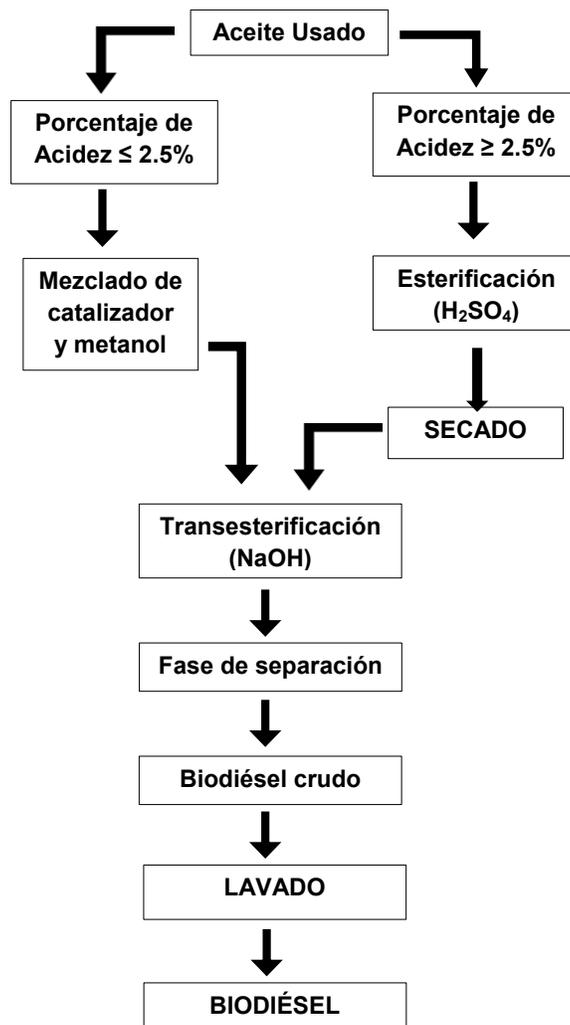


Ilustración 8: Proceso de Producción de Biodiésel. (Elaborado por Atuor)

5.1 Proceso de Esterificación con Catalizador Ácido.

5.1.1 Instalación experimental del proceso de esterificación.

La instalación experimental en la que se llevó a cabo el proceso de esterificación constó de las siguientes partes:

- Reactor: constituido por un vaso de precipitado de 1lt y un vortex o mosca para revolver el aceite procesado con el reactivo y H_2SO_4 .
- Sistema de calefacción: el sistema de calefacción consta de una parrilla eléctrica con un termopar para controlar la temperatura. A su vez, la parrilla está provista de un agitador magnético que permite la homogenización de la composición.
- Todas las muestras se mezclaron a 400 rpm para homogenizar el aceite con el catalizador y el alcohol. Las mezclas se realizaron en la parrilla electromagnética. Los tiempos variaron según el experimento.

5.2 Recolección.

El aceite procesado utilizado para la producción de biodiésel se obtuvo de la empresa MORECO dedicada a la recolección de aceite para producir biodiésel en Morelia Michoacán. Cuenta con tres rutas de aproximadamente 70 Km cada una. La empresa provee a los comercios recipientes de almacenamiento y los recoge una vez que estén llenos. Los contenedores donde se almacena el aceite procesado de cocina son de plástico y de 20 L de capacidad.

MORECO donó un lote al CIECO de la UNAM para investigación. Al ser los aceites de diferente tipo y procedencia se hizo una mezcla de varios contenedores. De la cual se obtuvo una acidez del 13.58%, titulando la mezcla y usando la fórmula de la ecuación 1.



Ilustración 9: Bidones de Aceite Usado. (Elaborado por Autor)

5.3 Procedimiento Experimental de Esterificación.

Para grasas vegetales los ácidos referenciados son: ácido graso oleico, ácido graso palmítico y ácido laúrico (Cid Ortega. 2005). Para los aceites procesados se reporta un peso molecular de 854.32g/mol (Charoenchaitrakool 2011). El principio de la prueba consiste en determinar los ácidos grasos libres presentes en la muestra, para conocer la acidez del aceite que se usa en los experimentos, por medio de titulación utilizando una solución de hidróxido de sodio de normalidad conocida (0.1N), en presencia de fenolftaleína (5 gotas).

La acidez del aceite procesado que se uso para los experimentos fue de 13.57%, el cual es muy alto y por lo tanto al momento de transesterificar se favorece la formación de jabones. Esto a su vez reduce el porcentaje de rendimiento del aceite. Se recomienda una producción de biodiésel de dos fases (Modhar 2010), de esta manera se aumenta el rendimiento del aceite. Esta acidez se obtuvo de acuerdo al procedimiento de la norma NMX-F-101-SCFI-2006. DOF: 17/09/2012.

$$I. A. = \frac{meq \times N \times V}{p}$$

Ilustración 10: Ecuación para obtener la acidez del aceite usado. (Elaborado por Autor)

Donde:

meq = masa molecular del aceite usado

N = normalidad de la solución de hidróxido de sodio.

V = cm^3 de solución valorada de hidróxido de sodio gastados en la titulación de la muestra.

p = peso de la muestra en gramos.

En todas las pruebas se utilizaron 100g de aceite y se calentaron a una temperatura de entre 65°C a 70°C.

La finalidad del experimento de esterificación fue la medición de diferentes parámetros, catalizador ácido (H_2SO_4), relación molar de metanol (CH_3OH) y tiempo de reacción, para tratar de hacer más eficiente la esterificación.

5.4 Producción de Biodiesel.

5.4.1 Primera etapa de esterificación.

El porcentaje de acidez del aceite con el cual se hizo la esterificación fue de 13.58%. Con el fin de reducir los niveles de ácidos grasos libres por debajo 1% de acidez, se sometió el aceite a un proceso de esterificación utilizando ácido sulfúrico. Los parámetros de esterificación que se eligieron fueron diferentes concentraciones porcentuales en peso de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Las

concentraciones porcentuales en peso del ácido sulfúrico que se utilizaron fueron 0.5%, 0.75%, 1%, 1.25% y 1.5% (w/w) (Atadashi 2012) con respecto al peso del aceite. Se hicieron reaccionar las muestras durante 6 horas y se utilizó una relación molar de metanol de 15:1 (Zabala. 2012) con cuatro repeticiones bajo esas condiciones.

El aceite se calentó en una parrilla eléctrica hasta alcanzar los 70°C y se mezcló con 22.5g de metanol. Se añadió el metanol y el ácido al aceite cuando alcanzó la temperatura deseada y se contó el tiempo. Aunque se produce una disminución en la temperatura del aceite, la recuperación de la misma es rápida, ya que la masa del aceite es superior a la del metanol. Al finalizar el tiempo de reacción se removió el metanol y el agua, aumentando la temperatura de la parrilla a 90°C. Las muestras se volvieron a titular para medir su porcentaje de acidez

5.4.2 Segunda Etapa de Esterificación.

En la segunda etapa se experimentó con la relación molar del metanol con respecto a la relación molar del aceite. La concentración al 1% de H₂SO₄ generó el porcentaje de acidez más bajo y fue el que se utilizó en los subsiguientes experimentos. La siguiente variable de estudio fue la relación molar de metanol, donde el tiempo de reacción se mantuvo en 6 horas.

Los tratamientos para la relación molar del metanol son 15:1, 25:1, 35:1, 45:1 y 55:1 (Zabala Marín. 2012) El peso molar del metanol se reporta de 32.04g/mol y se utilizó para preparar las muestras del experimento. El exceso de alcohol adicional acelera la reacción, desplazando el punto de equilibrio hacia los productos del biodiésel, haciendo que la esterificación se complete (Atadashi. 2013.)

5.4.3 Tercera Etapa de Esterificación.

En esta última fase se analizaron varios tiempos de reacción: 6 h, 12 h, 18 h, 24 h y 30 h. El catalizador se utilizó al 1% donde la relación molar de metanol se mantuvo en 15:1.

5.5 Procedimiento Experimental de Transesterificación

Para la transesterificación se experimentó con tres parámetros; peso del catalizador en este caso hidróxido de sodio (NaOH), relación de metanol:Aceite (CH₃OH) y tiempo de reacción.

Lo que se buscó con este análisis fue identificar qué combinación de tratamientos entregan un mayor rendimiento. El aceite procesado con el cual se trabajó contenía una acidez de 1.73%, que se obtuvo del proceso experimental de la esterificación. La acidez se midió de acuerdo con la norma.

5.5.1 Primer Etapa de Transesterificación

En esta etapa se evaluó la efectividad del hidróxido de sodio como catalizador. Se utilizaron cinco tratamientos en porcentajes de peso 0.5%, 0.75%, 1%, 1.25% y 1.5% (w/w) (Berchmans e Hirata 2008). Se empezó con una relación molar de 6:1 metanol:aceite y un tiempo de reacción de 30min.

5.5.2 Segunda Etapa de Transesterificación

Lo que se hizo en esta etapa fue realizar pruebas con las relaciones molares del metanol con respecto al aceite. Se utilizaron relaciones de: 6:1, 8:1, 9:1,10:1, 11:1 y 15:1 El tiempo se mantuvo en 30 min.

5.5.3 Tercera Etapa de Transesterificación

Para esta última parte experimental se trabajó con los tiempos de reacción. Los tiempos fueron: 30min, 45min, 1h, 1:15h y 1:30h.

5.6 Balance Energético.

El índice energético nos da una indicación del grado de renovabilidad del biocombustible producido, nos dice la energía fósil necesaria para producir una unidad de energía renovable. De esta forma a menor requerimiento de energía fósil por unidad de biocombustible, mayor grado de renovabilidad del mismo (García 2011).

El índice energético más utilizado para determinar el impacto de la producción de los biocombustibles es el índice energético fósil o relación de energía fósil el cual será el mismo que se evaluará en este proyecto con base en la siguiente relación:

$$\text{Índice energético fósil} = \frac{\text{Energía fósil para producirlo y distribuirlo}}{\text{Energía contenida en el biodiésel}}$$

Ilustración 11: Fórmula para la obtención del índice energético fósil. (Elaborado por Autor)

Este índice nos habla de la cantidad de energía necesaria para la producción de biodiésel en cada una de sus etapas. La energía contenida en el biodiésel se obtiene de multiplicar la cantidad de biodiésel por su poder calorífico (H°). La energía fósil es la sumatoria de las entradas de energía en cada etapa del ACV.

5.7 Consumo de Energía en la Producción de Biodiésel

Para este trabajo se identificaron tres fuentes de consumo de energía en la producción de biodiésel: la fase de recolección del aceite, consumo de gasolina y la electricidad requerida para el funcionamiento de la bomba y las resistencias.

Primero se calculó cuanta energía es necesaria para recolectar el aceite. Para la recolección de aceite se calculó el gasto energético (en MJ/l).

Se evaluó con la ruta de recolección de la empresa productora de biodiésel MORECO, cuyo vehículo es una camioneta Volkswagen Pointer 2002 con motor a gasolina que rinde 10km por litro. El poder calorífico de la gasolina de acuerdo con lo que reporta Pemex es de 32.6MJ/L. los datos se muestran en la tabla 1.

Datos:

Tabla 1: Consumo energético por uso de gasolina en la recolección de aceite por la empresa Moreco.

Recorrido (Km)	Litros de aceite colectados (L)	Rendimiento vehículo (Km/L)	Entalpia de la gasolina (MJ/L)	Referencia
67	510	10	32.6	Energy Factor 1997

Para el consumo de energía en la recolección se multiplica el volumen de gasolina consumida (L) por el poder calorífico de la gasolina (H°).

5.7.1 Energía en la Esterificación.

Se refiere a la energía en la etapa de esterificación de los ácidos grasos del aceite procesado.

La acidez del aceite procesado de cocina es de 13.58%. Para bajarla a menos de 1%, que es lo recomendable se utiliza ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 1% de peso del aceite. Con base en este dato calculamos el gasto energético y las emisiones de CO_2 (tabla 2). Los 510L colectados con MORECO se trataron en lotes de 100L

dado que la capacidad de la planta de tratamiento del CIECO es de 150L. La densidad del aceite procesado es de 0.90Kg/L (Chhetri 2008). La densidad para el ácido sulfúrico es de 1.83Kg/L a 25°C y 1 atm (Winkler. 2007).

Tabla 2: Consumo de energía en la esterificación.

ESTERIFICACIÓN					
	Litros de aceite (L)	Peso del Aceite (Kg)	Cantidad (Kg o L)	Factor de consumo de energía (MJ/Kg)	Referencia
Ácido sulfúrico	100	90	0.9	-1.24	ACC 2011
Metanol	100	90	50.59	28.89	Energy Factor 1997

El mezclado del aceite con el metano y el ácido sulfúrico se lleva a cabo con una bomba de medio caballo de fuerza (0.5 HP). La bomba funciona por 6 horas. El factor de consumo de energía del ácido sulfúrico se reporta negativo, porque la energía para producirlo se obtiene de una etapa anterior. Es una reacción endotérmica

Cuando hemos calculado los tiempos de operación convertimos la potencia de los caballos de fuerza a watts (W) con la constante de conversión $hp = 745.7$ (Energy Factor. 1997). Luego se calculan los kilowatts hora (Kwh) usando la constante de conversión $KWh = 3.6 MJ$ (Energy Factor 1997). Se reporta el consumo energético en megajoules (MJ) (Tabla 3)

Tabla 3: Consumo de energía durante la esterificación.

BOMBA ELÉCTRICA					
Bomba eléctrica	Potencia (hp)	Potencia (Kwatts)	Consumo (KWh)	Consumo de energía (MJ)	Referencia
½ hp	0.5	0.37	2.24	8.05	Energy Factor 1997

5.7.2 Energía en el Secado.

El tercer paso es un secado del aceite, donde se remueve el agua producto de la reacción de esterificación y el metanol. Los datos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Consumo de energía en el secado.

Actividad	Concepto	Cantidad	Potencia Total (W)	Tiempo (h)	Consumo (KWh)	Referencia
Remoción del Metanol	Resistencia Eléctrica	2	2000	0.5	1	Energy factor 1997
Remoción del H ₂ O	Resistencia Eléctrica	2	2000	1	2	Energy Factor 1997

5.7.3 La Energía en la Transesterificación.

En esta etapa el NaOH se usa a un 0.5% de peso del aceite, el metanol a una relación molar de 6:1 y se mezcla durante una hora que fueron las condiciones óptimas encontradas. Los resultados se muestran en las tablas 5 y 6.

Tabla 5: Consumo de energía en la transesterificación.

TRANSESTERIFICACIÓN					
	Litros de aceite (L)	Peso del Aceite (Kg)	Cantidad (Kg o L)	Factor de consumo de energía (MJ/Kg)	Referencia
Hidróxido de sodio	100	90	0.45	1.19	Energy Factor 1997
Metanol	100	90	30.35	28.89	Energy Factor 1997

Tabla 6: Consumo de energético de la bomba.

Bomba eléctrica	Potencia (hp)	Potencia (Kwatts)	Consumo (KWh)	Referencia
½ hp	0.5	0.3	0.3	Energy Factor 1997

5.7.4 La Energía Usada en el Lavado del Biodiésel o Refinación.

Para finalizar, se remueve el metanol del biodiésel y se lava con agua. La proporción agua y biodiésel para el lavado es de 1L_{biodiésel}/0.5 L_{agua}. El gasto energético se muestra en la tabla 7.

Tabla 7: Consumo energético en el lavado.

Bomba eléctrica	Potencia (hp)	Potencia (Kwatts)	Consumo (KWh)	Referencia
½ hp	0.5	0.3	0.3	Energy Factor 1997

El consumo total de energía se obtiene sumando toda la energía requerida en cada proceso. Una vez que se tiene el consumo total en las unidades deseadas (MJ, GJ, etc.) se divide el total de energía empleada entre el poder calorífico del biodiésel. De esta forma obtenemos el índice energético fósil.

5.8 Mitigación de Emisiones de CO₂.

En esta sección se calculan las emisiones de CO₂ que se generan en el proceso de fabricación de biodiésel con aceite procesado de cocina. Los procesos que se realizan en la fabricación y que emiten CO₂ a la atmósfera son: el consumo de gasolina en la recolección de aceite y la electricidad consumida en la producción. También se indican las emisiones que genera la producción de los insumos como metanol, sosa y ácido sulfúrico. Aunque no se emite CO₂ directamente al usarse en la planta de biodiésel, se toman como referencia las emisiones en la producción de los reactivos.

Para calcular las emisiones de CO₂, se multiplican los factores de emisión por el consumo de combustibles y electricidad anual. Para ello tomaremos los factores de emisión que reporta el IPCC (IPCC. 2006).

5.8.1 Emisiones de la Recolección de Aceite Procesado.

Las emisiones se calculan sobre la cantidad de combustible fósil consumido para la recolección de los aceites/grasas procesados. En la tabla 8 se muestran los valores para el cálculo de las emisiones en la recolección (The Gold Standard. 2009) (Figura 12).

$$PE_{tr,y} = \sum_i (FC_{WOF,i,y} \times NCV_i \times EF_{CO_2,i}) + \sum_i (FC_{BD,i,y} \times NCV_i \times EF_{CO_2,i})$$

Ilustración 12: Emisiones de CO₂ en el transporte.(Elaborado por Autor)

Dónde:

$PE_{tr,y}$ = Emisiones al transportar el aceite procesado al lugar de fabricación del biodiésel.

$FC_{WOF,i,y}$ = Consumo de combustible del tipo i para transporte de los aceites procesado en un año (toneladas).

NCV_i = Valor calorífico del combustible tipo i (GJ/tonelada).

$EF_{CO_2,i}$ = Emisiones de CO₂ del combustible tipo i (tCO₂/GJ).

Tabla 8: Emisiones de CO₂ en el transporte.

Consumo (L)	Entalpia Gasolina (MJ/L)	Energía Final	Factor de conversión	Referencia
6.7	32.6	218.4 MJ	85kgCO ₂ /GJ	IPCC 2006

5.8.2 Emisiones de Combustibles Fósiles en la Esterificación.

En el pre-tratamiento, los ácidos grasos libres son esterificados por medio de una catálisis ácida con ácido sulfúrico (H₂SO₄). La procedencia del ácido sulfúrico se investigará para cuantificar el uso de combustibles fósiles.

En todo el mundo el metanol comercial proviene de combustibles fósiles. Por eso los carbonos en el metanol se consideran no bioenergéticos. El resultado de la reacción es el intercambio de átomos, donde se transfiere un átomo de carbón de metanol por cada molécula de biodiesel (Thamsiroj y Murphy 2011). Por lo tanto, el biodiésel cuenta con moléculas de carbón biogénico y no biogénico en su estructura.

Las emisiones de la combustión del metanol están basadas en el consumo de metanol en la planta de biodiesel y en la fracción de la masa del carbón fósil en el metanol. El consumo de metanol tiene que estar libre de agua. El metanol derramado o evaporado en el sitio debe ser considerado como parte del consumo para la estimación de las emisiones. Tablas 9 y 10.

Tabla 9: Emisiones de CO₂ en la esterificación.

ESTERIFICACIÓN					
	Litros de aceite (L)	Peso del Aceite (Kg)	Cantidad (Kg o L)	Factor de emisiones (KgCO ₂)	Referencia
Ácido sulfúrico	100	90	0.9	0.15	ACC 2011
Metanol	100	90	50.59	1.26	IPCC 2006

Tabla 10: Emisiones de CO₂ por el uso de bomba en la esterificación.

Bomba Eléctrica					
Bomba eléctrica	Potencia (hp)	Potencia (Kwatts)	Consumo (KWh)	Factor de Emisiones KgCO ₂ /GJ	Referencia
½ hp	0.5	0.37	2.24	178	IPCC 2006

5.8.3 Emisiones de CO₂ en el Secado.

Las emisiones de CO₂ generadas durante la remoción del metanol y el agua se muestran en la tabla 11.

Tabla 11: Emisiones de CO₂ por uso de la bomba eléctrica en el secado.

Actividad	Concepto	Cantidad	Potencia Total (W)	Tiempo (h)	Consumo (KWh)	Factor de Emisiones KgCO ₂ /GJ	Referencia
Remoción del Metanol	Resistencia Eléctrica	2	2000	0.5	1	178	IPCC 2006
Remoción del H ₂ O	Resistencia Eléctrica	2	2000	1	2	178	IPCC 2006

5.8.4 Emisiones de CO₂ en la Transesterificación.

El cálculo de las emisiones de CO₂ en la transesterificación se divide en dos. Primero se calculan las emisiones producidas por el uso de reactivos (tabla 12). En seguida se calculan las emitidas por la bomba eléctrica. (Tabla 13).

Tabla 12: Emisiones de CO₂ en la transesterificación.

TRANSESTERIFICACIÓN					
	Litros de aceite (L)	Peso del Aceite (Kg)	Cantidad (Kg o L)	Factor de emisiones (KgCO ₂)	Referencia
Hidróxido de sodio	100	90	0.45	1.12	IPCC 2006
Metanol	100	90	30.35	1.26	IPCC 2006

Tabla 13: Emisiones por uso de la bomba en la transesterificación.

Bomba Eléctrica					
Bomba eléctrica	Potencia (hp)	Potencia (Kwatts)	Consumo (KWh)	Factor de Emisiones KgCO ₂ /GJ	Referencia
½ hp	0.5	0.37	0.37	178	IPCC 2006

5.8.5 Emisiones en el Lavado.

En la tabla 14 se muestra el cálculo de las emisiones del lavado.

Tabla 14: Emisiones de CO₂ por uso de la bomba.

Resistencia						
Bomba eléctrica	Potencia (hp)	Potencia (Kwatts)	Consumo (KWh)	Consumo (MJ)	Factor de Emisiones KgCO ₂ /GJ	Referencia
½ hp	0.5	0.3	0.3	1.34	178	IPCC 2006

5.9 Total de Emisiones del Sistema.

$$TE = PE_{tr,y} + EE_{H_2SO_4} + PE_{MeOH_y} + PE_{elec_y}$$

Ilustración 13: Emisiones en el Proceso de Esterificación. (Elaborado por Autor)

$PE_{tr,y}$ = Emisiones de transportar el aceite procesado al lugar de fabricación del biodiésel.

$EE_{H_2SO_4}$ = Emisiones del uso ácido sulfúrico en la esterificación de los ácidos grasos al año y (tCO₂).

PE_{MeOH_y} = Emisiones del uso de metanol (derivado de combustibles fósiles) en el biodiésel al año y (tCO₂).

PE_{elec_y} = Las emisiones provenientes del consumo de electricidad en la producción de biodiésel al año y (tCO₂).

Para estimar las reducciones netas de GEI es necesario hacer la comparación con respecto del combustible sustituido. En este caso, el sistema de referencia del combustible fósil abarca la extracción del petróleo, el transporte a la refinería, todos los procesos de refinería para producir la gasolina y uso de los combustibles. El total de emisiones del biodiésel se sustituye en la fórmula de la ilustración 14 para obtener el porcentaje de mitigación. El referente fósil del diésel es: 84.2 kgCO₂/GJ. (IPCC 2006)

$$\frac{\text{Emisiones del Biodiésel} - 84.2}{84.2} \times 100$$

Ilustración 14: Fórmula para calcular el porcentaje mitigación (Elaborado por Autor).

5.10 Prueba Estadística ANOVA (Análisis de varianza con un factor).

Las pruebas estadísticas se dividieron en dos etapas. La esterificación y la transesterificación. Para cada etapa se midieron parámetros diferentes. En el caso de la esterificación se midió cantidad de ácido sulfúrico (H_2SO_4), proporción de metanol (C_3OH) y el tiempo de reacción. Para la transesterificación se varió el catalizador usándose, hidróxido de sodio (NaOH). En cada parámetro se experimentó con un *tratamiento* diferente o *un solo factor*, análisis univariado. Se hicieron cuatro repeticiones por parámetro, tanto en la esterificación como en la transesterificación. Las variables resultantes a medir fueron la reducción de acidez y el rendimiento de la reacción respectivamente.

Para analizar los tratamientos se utilizó una ANOVA que es una técnica mediante la cual se analiza la variación total o dividida en componentes representativos. Con el propósito de probar hipótesis frente a la hipótesis alternativa de que por lo menos una de las poblaciones difiere de las demás en cuanto a su valor esperado. Para obtener las medias se utilizó la prueba de Tuckey. (Warpole y Myers 2000).

Los ANOVAS y las medias se realizaron utilizando el programa Statgraphics Centurión XV. Las gráficas fueron realizadas con el programa Sigmaplot 11.0.

6 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos para la producción de biodiésel, en las dos etapas antes mencionadas. También se presentan los resultados del análisis de ciclo de vida, el balance energético y la mitigación de CO₂.

6.1 Esterificación

Los parámetros estudiados en la esterificación fueron peso de catalizador ácido, relación molar de metanol y tiempo de reacción.

6.1.1 Peso en Porcentaje de Ácido Sulfúrico H₂SO₄

El peso en porcentaje del ácido sulfúrico influyó en la reducción de la acidez del aceite. Siendo el 1% (w/w) la relación que dio mejor resultado. Al usar menor cantidad de ácido la reacción de esterificación no se completa. Una mayor cantidad de ácido oxida las moléculas de aceite reduciendo el rendimiento del mismo.

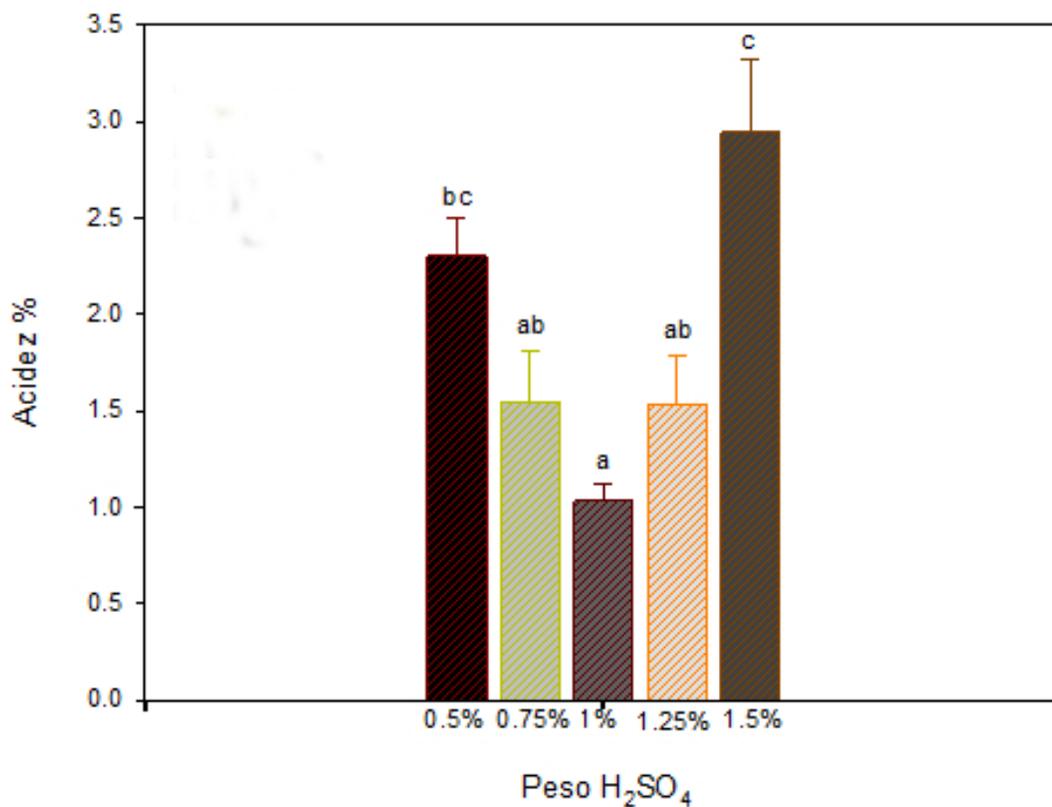


Ilustración 15: Efecto del % en peso de H₂SO₄ en la acidez del aceite

En la Ilustración 15 se observaron diferencias significativas entre los tratamientos de ácido sulfúrico ($p \leq 0.05$) se encontraron diferencias significativas en los tratamientos. El tratamiento “a” que corresponde al 1%w/w de peso H₂SO₄ fue con el cual se redujo la acidez al 1.0%. Con el 1% w/w de ácido sulfúrico se redujo la acidez de los aceites en un 92.63%.

6.1.2 Relación Molar del Metanol

Debido a que la reacción de esterificación es reversible, es necesario desplazar el equilibrio hacia los productos, es por eso que se debe añadir un exceso de metanol. A continuación se muestran las distintas relaciones molares

de alcohol con las cuales se obtuvieron productos de biodiesel. Un exceso de metanol diluye el ácido menguando la reacción de esterificación de los ácidos grasos libres.

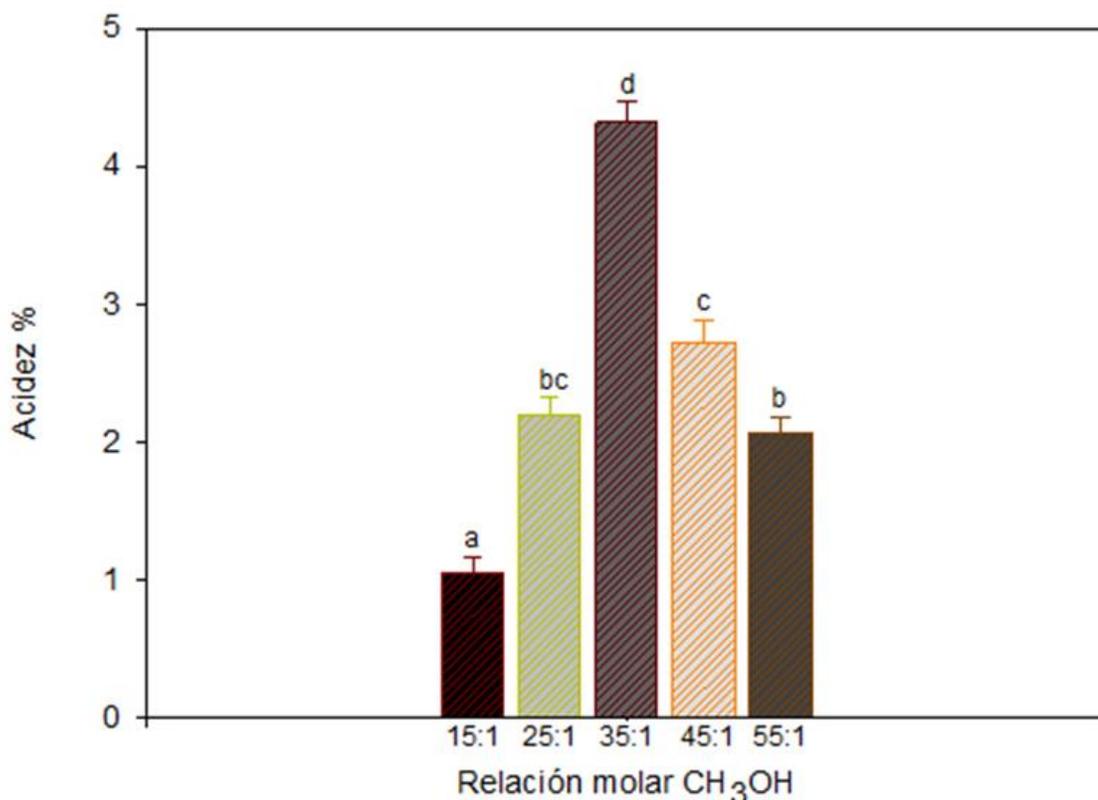


Ilustración 16: Relación Molar Metanol: Aceite.

En la ilustración 16 se aprecian las diferentes concentraciones de metanol y su relación con la reducción de la acidez del aceite de cocina. Hubo diferencias significativas entre los tratamientos de relación molar metanol:aceite ($p \leq 0.05$). La letra “a” corresponde con la relación molar de 15:1, la cual redujo la acidez a un 1%. Teniendo un 88.9% de eficiencia en la reducción del acidez del aceite.

Una relación molar 15:1 – 35:1 de metanol:aceite para la esterificación como la que se usó en el experimento, fue reportada (Veljkovi y col 2006).

6.1.3 Tiempo de Reacción

Se observa que la mayor conversión para la esterificación de los ácidos grasos libres del aceite se logra a las 6 horas, también se observa que los valores de conversión disminuyen conforme aumenta el tiempo de reacción.

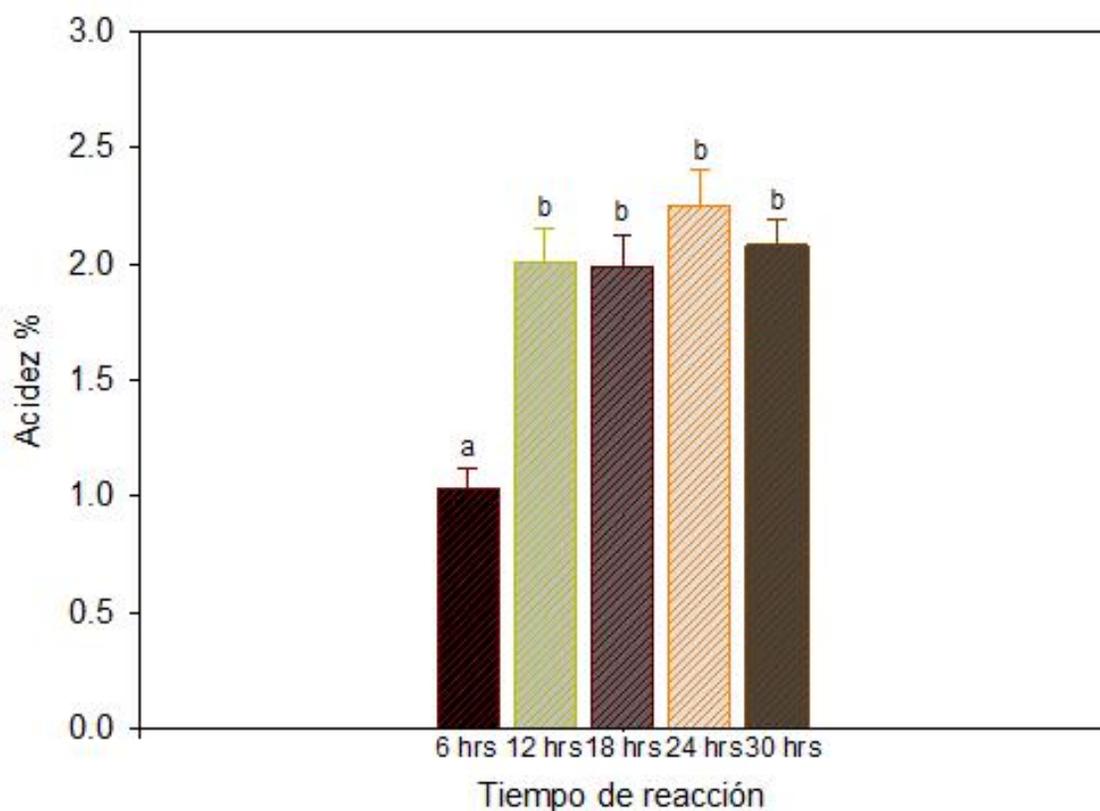


Ilustración 17: Efecto del tiempo de reacción en la esterificación en el % de acidez del aceite.

En la Ilustración 17 el tratamiento con la letra “a” es estadísticamente diferente a los demás. El tiempo de reacción de 6 h. redujo la acidez a un 1%. ($p \leq 0.05$) encontrándose diferencias significativas. La acidez después de 6 horas se redujo un 92.36%.

6.2 Transesterificación

La cantidad de catalizador usado en el proceso de transesterificación es una variable a tomar en cuenta, no solo porque determina la velocidad de la reacción sino porque puede causar hidrólisis y saponificación. Ambas reacciones interfieren con la separación de la glicerina y la purificación del biodiésel. Freedman y col. (1984) recomiendan el uso de un 1% de NaOH como la concentración óptima de catalizador.

6.2.1 Porcentaje en Peso de Catalizador NaOH.

Se realizaron experimentos de transesterificación utilizando varias concentraciones de catalizador NaOH, con el fin de encontrar la concentración que diera mayor rendimiento del biodiésel. Se muestran los rendimientos del biodiésel a diferentes concentraciones de catalizador.

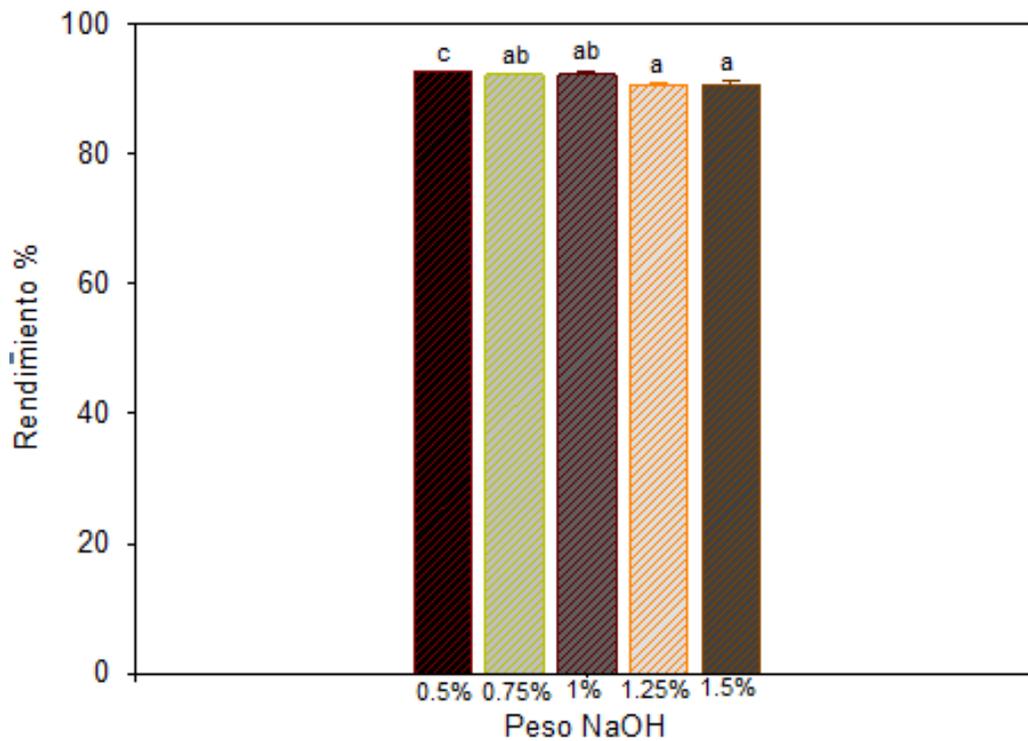


Ilustración 18: Peso del hidróxido de sodio con respecto al rendimiento del aceite.

El tratamiento “c” de la Ilustración 18 es significativamente diferente al resto ($p \leq 0.05$). Un porcentaje de 0.5% de catalizador aumentó el rendimiento del aceite en un 96%. Lo cual quiere decir que el 96% del aceite se transformó en biodiésel.

El-Mashad y col. (2008) ya reportaron que el máximo de conversión se alcanza con un 0.5% de NaOH durante la transesterificación, lo que coincide con estos resultados, siempre y cuando la acidez del aceite sea menor de 2%. Un exceso de catalizador puede producir una emulsión.

6.2.2 Relación Molar del Metanol con Respecto al Rendimiento del Aceite.

Se evaluó la relación molar del metanol en la transesterificación para poder determinar una relación óptima en la cual el rendimiento del biodiésel sea mayor. Los resultados se muestran en la siguiente figura.

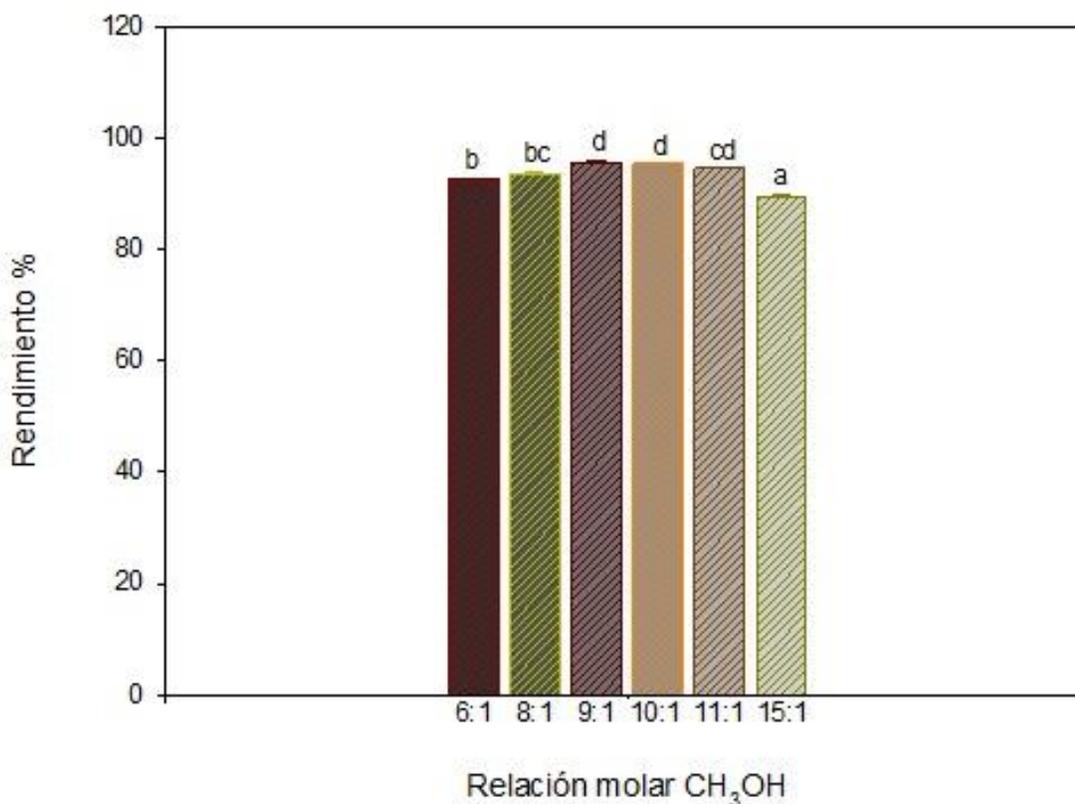


Ilustración 19: Relación molar metanol con respecto al rendimiento del aceite.

En la Ilustración 19 se muestran dos tratamientos iguales que se diferencian de los demás ($p \leq 0.05$). El de la relación molar de 9:1 y el de 10:1 que corresponden a la letra “d”. Ambos tienen un rendimiento de 95% pero se toma la relación molar 9:1 por que se usa menos metanol. Sharman y Shing (2008) recomendaron la relación molar de 9:1 (alcohol: aceite) como los valores óptimos para la reacción de transesterificación alcalina.

6.2.3 Tiempo de Reacción para la Transesterificación.

Se evaluaron distintos tiempos de esterificación del aceite para verificar qué efecto tiene el tiempo en el rendimiento, y para poder determinar un tiempo de reacción óptimo en el cual se pueda considerar que la reacción haya llegado al equilibrio.

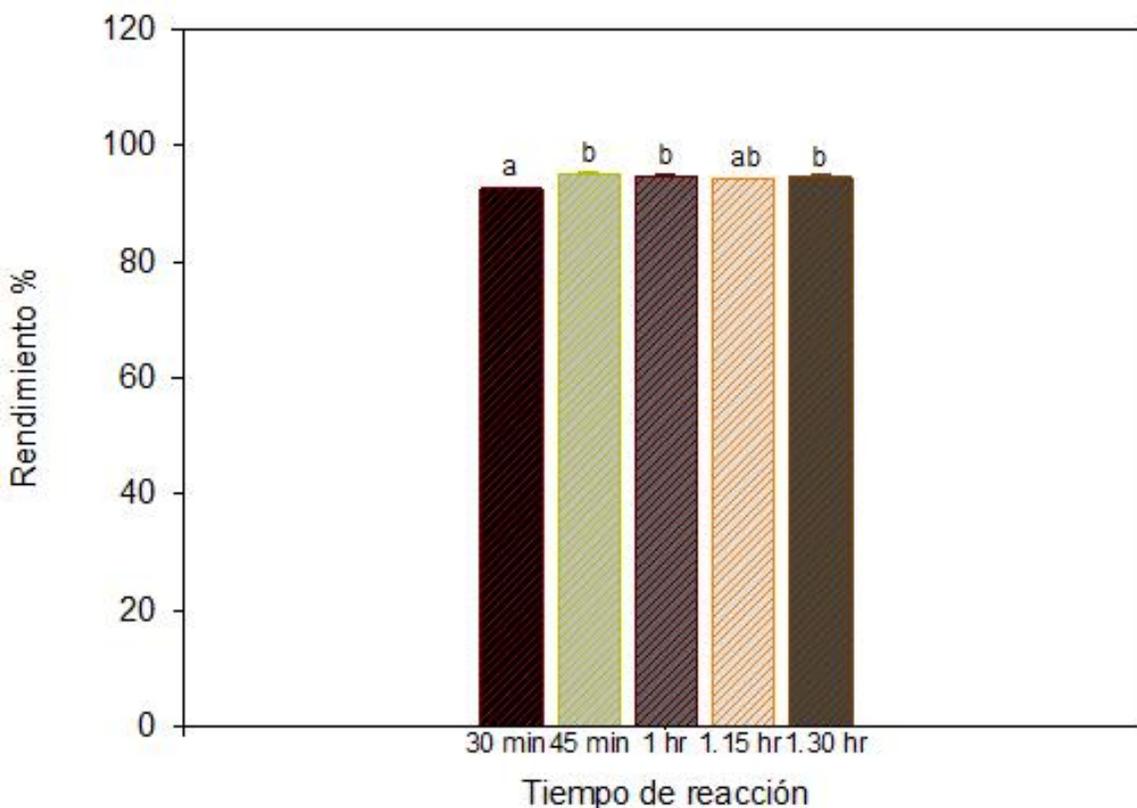


Ilustración 20: Tiempo de reacción para la transesterificación.

El tiempo de reacción se muestra en la Ilustración 20. Los mayores rendimientos, de 95%, se dieron en los tiempos de 45 – 60min que son los tratamientos que difieren de los demás ($p \leq 0.05$). También la reacción en 1:30min mostró un rendimiento de 95%, pero es un exceso de tiempo. Rojas y col. (2009) reportaron una mayor conversión de biodiesel con tiempos de 45 – 90 min.

6.3 Análisis de Ciclo de Vida

Se muestra los resultados de las sumatorias, de los gastos energéticos para el balance de energía. La sumatoria también incluye las emisiones de CO₂ para el porcentaje de mitigación.

6.3.1 Balance Energético

Tabla 15: Consumo de energía (GJ) y las emisiones de KgCO₂equivalente/GJ por100 litro de biodiésel

ETAPA	CONSUMO DE ENERGÍA (GJ)	EMISIONES DE (KgCO₂eq/GJ)
Recolección de aceites	0.002	1.0
Esterificación		
Ácido sulfúrico	-0.00001	0.0
Metanol	0.015	17.2
Tiempo de reacción	0.0001	0.4
Secado		
Remoción de metanol	0.00004	0.2
Remoción H ₂ O	0.00004	0.2
Transesterificación		
Hidróxido de sodio	0.00005	0.1
Metanol	0.0088	10.3
Tiempo de reacción	0.00001	0.1
Lavado	0.00001	0.1
TOTAL	0.026	29.6

Se obtiene el balance energético mediante la sumatoria de todos los gastos energético en todos los procesos para producir biodiésel.

El poder calorífico del biodiésel es: 37MJ/L (Castillo 2012) que es la energía contenida en el biodiésel.

Para obtener el Índice energético fósil se sustituyen los valores del consumo energético de la producción y el poder calorífico del biodiésel.

Dando como resultado:

Índice energético fósil = 0.67

En la Ilustración 21 se muestra la comparativa entre la energía fósil para producir biodiésel y la energía fósil para producir diésel.

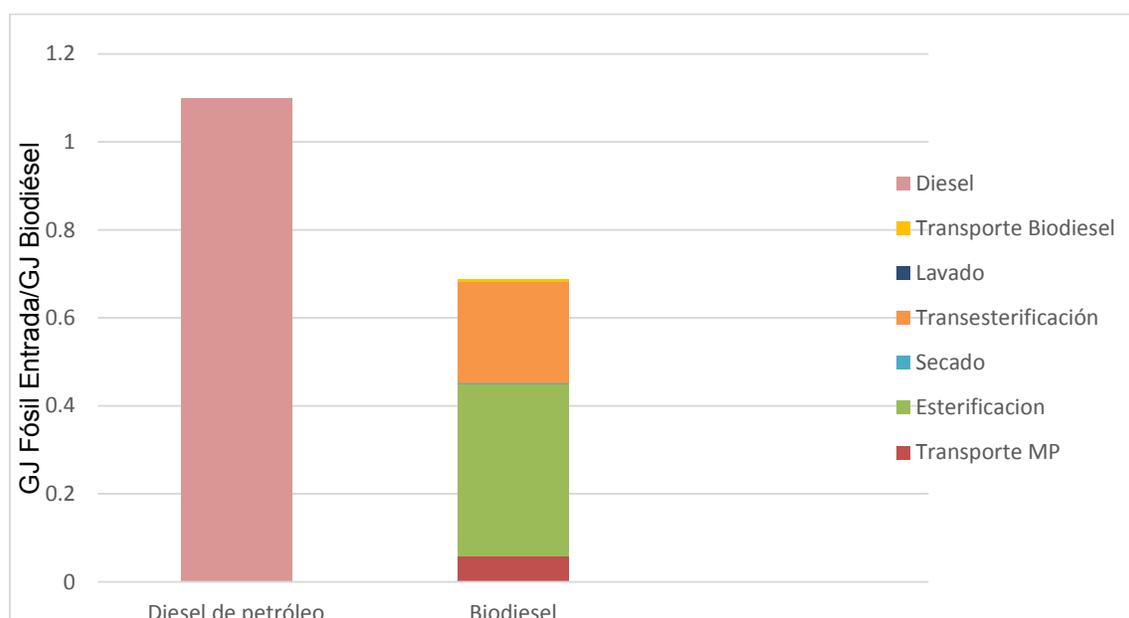


Ilustración 21: Comparación de la Energía para Producir Biodiésel y Diésel.

6.4 Mitigación de CO₂

El porcentaje de mitigación se obtuvo con la fórmula para calcular porcentajes (Ilustración. 14) dando como resultado un 65%.

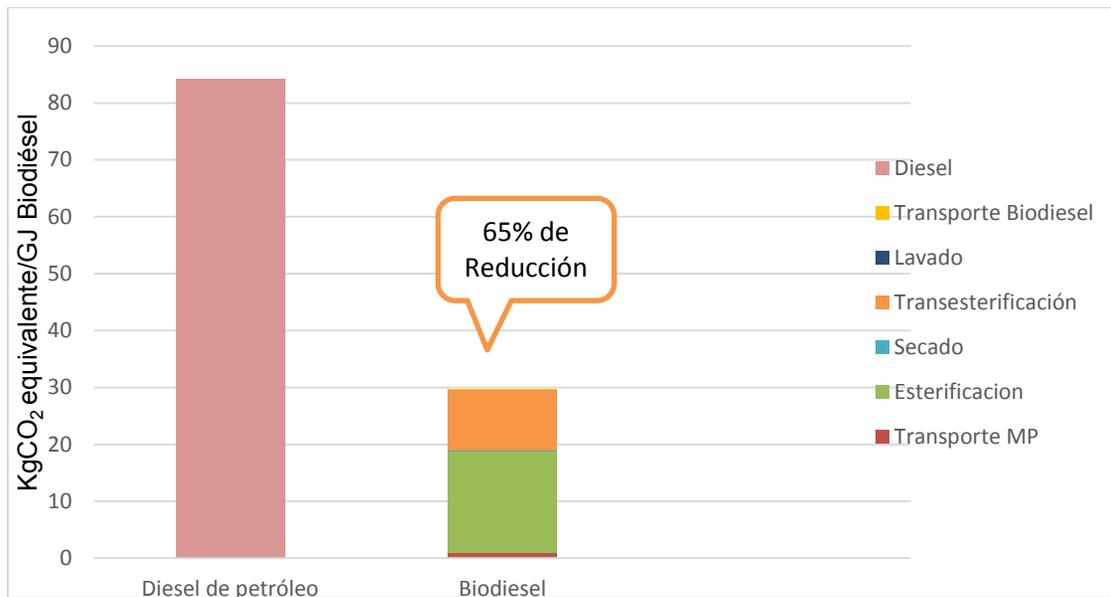


Ilustración 22: Emisiones reales mitigadas en la producción de biodiesel.

7. DISCUSIÓN.

7.1 Parámetros en la Producción de Biodiésel

7.1.1 Esterificación

El problema de usar aceites procesados con gran cantidad de ácidos grasos libres es, que estos no pueden ser convertidos a metil-éster mediante catálisis básica debido a la formación de sales de ácidos grasos (jabones), por esta razón el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico son los catalizadores más usados para la esterificación. En una primera instancia se utilizó la esterificación con ácido sulfúrico, lo cual redujo la acidez en un 1%. Ese resultado es comparable a los resultados de Velijkovic y col. (2006) quienes reportaron el uso de un 1% w/w H₂SO₄. El 1% w/w demostró ser diferente a los otros tratamientos propuestos en ese trabajo ($p \leq 0.05$). Zabala. (2012) encontró que para las concentraciones de ácido clorhídrico de 0.8%, 0.9% y 1%w/w, no se encontraron diferencias significativas ($p \geq 0.05$) disminuyendo la acidez hasta 2,82%. Este valor representa un porcentaje de conversión de los ácidos grasos libres del 91.17%.

En la fase de esterificación, la relación molar óptima es la de 15:1 (metanol:aceite) ($p \leq 0.05$) la cual reduce la concentración de los ácidos grasos libres a valores cercanos a 1% y permite que el rendimiento del biodiésel sea de un 98%. Charoenchaitrakool y Thienmethangkoon (2011) encontraron que una relación molar mayor de 20:1 afecta el resultado de la esterificación, esto debido a que una gran cantidad de metanol en el sistema, diluye el H₂SO₄ disminuyendo su eficacia mientras que una concentración menor de ácido podría pirolizar las moléculas causando una producción menor de biodiésel.

El otro parámetro analizado (tiempo de reacción) las 6 horas utilizadas en el experimento redujeron la acidez al porcentaje óptimo de 1% de acidez ($p \leq 0.05$). Al ser 6 horas el mínimo de tiempo con la mayor efectividad, es el tiempo que se emplea para la esterificación.

7.1.2 Transesterificación

En la transesterificación al igual que lo encontrado por Berchmans e Hirata (2008) el porcentaje óptimo de NaOH fue de 0.5% ($p \leq 0.05$) encontrando diferencias significativas con los valores de 0.75 - 1%. En ambos casos se obtuvieron rendimientos por encima del 95%. Un incremento en la cantidad del catalizador mayor a un 1% aparte de frenar la velocidad de reacción no garantiza una mayor conversión de aceite procesado. Además favorece la formación de emulsión, la cual incrementa la viscosidad y causa problemas al separar la glicerina del biodiesel y reduce el rendimiento del biodiésel.

La relación molar de metanol – aceite es una de las variables más importantes que afectan la eficiencia de conversión, así como el costo del biodiesel. La mayor eficiencia se alcanzó con una relación molar de 9:1 y 10:1 ($p \leq 0.05$) donde se encontraron diferencias significativas alcanzando rendimientos del 95%. Se utilizó 9:1 por que la cantidad de metanol usada es menor.

El tiempo de reacción óptimo fue de 45min, ya que el 80% del biodiesel se produce durante los primeros 30min. Con 45 min y 60 min se obtuvieron rendimientos de 95% ($p \leq 0.05$) encontrándose diferencias significativas. Bravo de Anda (2014) encontró que la mayor eficiencia se obtuvo cuando la reacción se realizó durante 60 min. Más de una hora de reacción solo contribuiría a un gasto innecesario de electricidad.

7.2 Eficiencia Energética y Emisiones de CO₂eq

El análisis de ciclo de vida se puede considerar como una herramienta valiosa, que ofrece flexibilidad en cuanto a los parámetros del sistema y a la evaluación integral de los impactos ambientales (Nanaki y Koroneos 2012). Una vez que se determinaron las condiciones ideales para la producción de biodiesel, se hizo el análisis de ACV a las variables que dieron mejor rendimiento. El total de energía

consumida en el proceso de producción de biodiésel fue de 2.58 GJ. Las emisiones fueron 124.38 KgCO₂eq.

El balance energético dio como resultado un índice energético de 1.5 mientras que el índice energético del diésel es de 0.88 (ADEME. 1997) 0.67. Eso significa que la cantidad de energía necesaria para producir biodiésel es menor que la cantidad de energía que contiene el biodiésel, en otras palabras, se necesita menos energía para producir biodiésel que diésel. Se logró mitigar un 65% de emisiones de CO₂eq comparadas con las emisiones de la producción de diésel de petróleo. Esas comparaciones fueron por cada GJ/L y KGCO₂eq de biodiésel producido respecto a las emisiones de petróleo.

La etapa de recolección de aceites procesados se utilizó 0.0021GJ/L de combustible que representa un 8.4% del total de la energía consumida, Pleanjais y Gheewala (2009) consumieron 0.0026 GJ/L de combustible en la recolección. Las emisiones totales fueron de un 14.93% CO₂eq. Esto debido al uso de gasolina para recorrer 67km para recolectar aceite en Morelia, Mich.

Para la etapa de esterificación se aplicó el ACV a tres variables. Una de ellas fue el porcentaje de ácido sulfúrico que representó menos del 1% del total de la energía usada en la producción de biodiesel y emitió menos del 1% del CO₂eq producido. Esto se debió a que se usó un porcentaje pequeño de catalizador en la esterificación. El uso de metanol (relación molar 15:1, metanol:aceite) representó un 56.6% del total de energía consumida y un 51.2% de las emisiones totales de CO₂eq, siendo los valores más altos del trabajo. Tobin y Fulford (2005) reportaron que el uso del ácido sulfúrico en el pretratamiento representó menos del 1% de consumo de energía y de emisiones totales. También reportaron un consumo de energía por el metanol de 38%, eso debido a que la relación molar:aceite que usaron fue similar a la de la etapa de transesterificación (6:1) Se obtuvieron estos valores porque el metanol proviene de fuentes fósiles y se requiere mucha energía para producirlo por ende emite más CO₂eq a la atmósfera (Castro 2009).

El balance de energía en referencia al proceso de reacción fue menor al 1% de la energía total y las emisiones de CO₂eq representaron un 1% del total. El tiempo de reacción fue de 6 horas pero se usó una bomba de 1/2 hp la cual no consume mucha energía. Iriarte (2012) obtuvo un consumo de energía de 0.0146GJ que representó menos un 1% del total de energía. Fue menor porque para calentar el aceite o el biodiésel no utilizó electricidad sino gas butano.

La etapa de secado se dividió en dos fases remoción de metanol y remoción de agua. El balance de energía y las emisiones de CO₂eq fueron ambas menores al 1% del total. Siendo poco significativas estadísticamente debido a la bomba de 1/2hp y al poco tiempo que se usó.

En la transesterificación los valores del hidróxido de sodio representaron menos del 1% del total de consumo de energía y de emisiones, esto es por las cantidades utilizadas de NaOH. Una contribución significativa fue la del metanol que representó en el consumo de energía un 34.1%. Pleanjais y Gheewala (2009) reportó un una entrada de energía con respecto al uso de metanol de 34.6%, aunque se reporta ya mezclado con el hidróxido de sodio. Para las emisiones contribuyó con 30.7%. En su tesis sobre producción de biodiésel a partir de aceite usado Orlandin (2013) obtuvo una contribución CO₂eq por parte del metanol de un de un 33.8%.

La última etapa fue la del lavado del biodiésel y sus valores aportaron menos del 1% de CO₂eq. El consumo de energía no fue significativo porque fue menor al 1%. Los valores bajos fueron debidos a la bomba de 1/2hp y al poco tiempo que se usó.

El trabajo de tesis de Vázquez 2014 sobre la producción de biodiésel a partir de aceite de palma de plantaciones existentes, dio como resultado emisiones de GEI de 8.1 kgCO₂eq por litro de biodiesel. Comparado con lo encontrado de (1.24KgCO₂eq), esta diferencia es debido a que las plantaciones necesitan más

insumos para producir las semillas oleaginosas y para el aceite usado que es un desecho de cocina esa etapa previa no cuenta. Vázquez 2014 también reporto las emisiones de CO₂ para aceite de palma de selva talada en 798 KgCO₂e. Este aumento se debe en parte a los insumos agrícolas y también al cambio de uso de suelo. Se sabe que el cambio de suelo puede incrementa las emisiones de CO₂ en un 1000%. Nava I (2014) obtuvo biodiesel a partir de microalgas nativas del lago de Texcoco con 5% de lípidos. Su consumo de energía fue de 1.16 GJ/L de biodiesel, el que se encontró en esta tesis de 0.025 GJ/L. La enorme diferencia es debido a que las microalgas se cosechan con el método de ozoflotación. Un método que requiere el 77% del total de la energía para producir biodiesel, en la oxidación de moléculas O₂ para producir O₃. El resultado fue no viable por la poca cantidad de aceite en la microalgas y el alto consumo de energía fósil para producir biodiésel.

8 CONCLUSIONES.

En este trabajo se abordó la producción de biodiésel a partir de aceite procesado con una alta concentración de ácidos grasos libres. El proceso de transesterificación con un catalizador básico y la presencia de ácidos grasos libres reducen el rendimiento del biodiésel significativamente. Fue por ello que se determinó obtener el biodiésel en dos etapas.

La primera etapa fue un tratamiento ácido, con el cual se pudo reducir los ácidos grasos libres del aceite procesado desde un 13.58% a cerca del 1%, que es el nivel de ácidos grasos libres recomendado por la literatura. Una vez neutralizados los ácidos grasos el segundo tratamiento, fue una catálisis básica para la obtención del biodiésel a través de la transesterificación. Eliminados los ácidos grasos el rendimiento del aceite para la obtener biodiésel se elevó hasta un 95%.

Con el análisis de ciclo de vida se demostró que, el aceite procesado, aparte de ser una alternativa económica también es una alternativa ambiental. Al producir biodiésel con aceite procesado se redujeron las emisiones de CO₂ en un 64% en comparación con la producción de diésel de hidrocarburos. El índice energético fue de 0.67, lo cual demuestra que el procedimiento empleado es rentable para la producción del bioenergético, es decir que la energía fósil que se emplea es menor a la cantidad de energía que se obtiene del biodiésel.

Los resultados expuestos en esta tesis, solo son una pequeña pieza del gran rompecabezas que es la investigación sobre biodiesel. Se abordó el uso de catalizadores como el ácido sulfúrico y el hidróxido de sodio. Pero no son los únicos factores o variables que intervienen en el proceso de producción de biodiésel, se puede probar la misma metodología con ácido clorhídrico (HCl) e hidróxido de potasio (KOH). También es importante para futuras investigaciones el análisis de los costos.

9 LITERATURA CITADA

Abularach Asbún, E., & Amurrio Derpic, D. (2010). Obtención de biodiesel a partir de aceite desechado de frituras. *Acta Nova*, 4(4), 514-534.

Albarracín P. M., Garay F. C., Di Bacco V., González M., Tereschuk M. L., Chauvet S., & Genta H. D. (2010). Estudios de Caracterización de Aceites Usados en Frituras para ser Utilizados en la Obtención de Jabón. *Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería*, 19(32), 11 - 22.

Amaro H. M., Guedes A. C., & Malcata F. X. (2011). Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel. *Applied Energy*, 88(10), 3402-3410.

Andrade J. E. (2014). Estrategias y nuevas técnicas para la optimización de la obtención de biodiésel y mezclas con combustibles de aviación (AVGAS 100 LL yJP1). Tesis de Doctorado. UNAM. México.

Atadashi I. M., Aroua M. K., Aziz A. A., & Sulaiman N. M. N. (2013). The effects of catalysts in biodiesel production: a review. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 19(1), 14-26.

Azocar L. H. (2010). Proceso enzimático para la producción de metil ésters de ácidos grasos utilizando aceites residuales de frituras en mezcla con aceite de raps como materia prima. Tesis de Doctorado. Universidad Católica de Temuco. Chile.

Berchmans H. J., & Hirata S. (2008). Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. *Bioresource technology*, 99(6), 1716-1721.

Berrios M., & Skelton R. L. (2008). Comparison of purification methods for biodiesel. *Chemical Engineering Journal*, 144(3), 459-465.

Bravo F. J. (2014). Optimización del proceso de obtención de biodiésel a partir de aceite de cocina usado. Tesis de Licenciatura. UNAM. México.

Bravo E. (2006). Red por una América Latina libre de transgénicos, biocombustibles, cultivos energéticos y soberanía alimentaria en América Latina. Editorial Génesis. Ecuador.

Brennan L., & Owende P. (2010). Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(2), 557-577.

Calderón A I. (2012). Potencial de uso del biodiesel a partir de aceite comestible usado. Tesis de licenciatura. UNAM. México.

Castillo-Hernández P., Mendoza-Domínguez A., & Caballero-Mata P. (2012). Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con Etanol. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 13(3), 293-306.

Castro C. J. (2009). Evaluación del análisis del ciclo de vida para la producción de biodiésel a partir de aceites de higuera en el eje cafetalero. Tesis de licenciatura. Universidad Industrial de Santander. Colombia.

Cerón A. A. (2010). Evaluación experimental de la producción de biodiésel por destilación reactiva. Tesis de Maestría. Universidad Nacional sede Manizales. Colombia.

Charoenchaitrakool M., & Thienmethangkoon J. (2011). Statistical optimization for biodiesel production from waste frying oil through two-step catalyzed process. *Fuel Processing Technology*, 92(1), 112-118.

Chhetri A. B., Watts K. C., & Islam M. R. (2008). Waste cooking oil as an alternate feedstock for biodiesel production. *Energies*, 1(1), 3-18.

Cid S. (2005). Manual de prácticas de alimentos. Comisión Académica Nacional Área Agroindustrial Alimentaria. Práctica número 12. 88.

Davis S. C., Anderson-Teixeira, K. J., & DeLucia, E. H. (2009). Life-cycle analysis and the ecology of biofuels. *Trends in plant science*, 14(3), 140-146.

Demirbas A. (2005). Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification methods. *Progress in energy and combustion science*, 31(5), 466-487.

Duarte G. (2010). Balance energético y ecológico de la producción de biodiesel a partir de *Jatropha Curca*. Tesis de Licenciatura. UNAM. México.

El-Mashad H. M., Zhang R., & Avena-Bustillos R. J. (2008). A two-step process for biodiesel production from salmon oil. *Biosystems Engineering*, 99(2), 220-227.

Equihua M. (2011). El aceite residual comestible como materia prima para la producción de biodiesel; análisis de factibilidad según la degradación del aceite. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo. México.

Freedman B. E. H. P., Pryde E. H., & Mounts T. L. (1984). Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 61(10), 1638-1643.

Gallego J. L., Loredó J., Llamas J. F., Vázquez F., & Sánchez J. (2001). Bioremediation of diesel-contaminated soils: evaluation of potential in situ techniques by study of bacterial degradation. *Biodegradation*, 12(5), 325-335.

García C. A. (2011). Etanol de primera generación, estudio de la sustentabilidad de su producción considerando el ciclo de vida y análisis económico ambiental de su introducción en el sector transporte mexicano. Tesis de Doctorado. UNAM. México.

Gouveia L., & Oliveira A. C. (2009). Microalgae as a raw material for biofuels production. *Journal of industrial microbiology & biotechnology*, 36(2), 269-274.

López J. M., Gómez Á., Aparicio F., & Sánchez F. J. (2009). Comparison of GHG emissions from diesel, biodiesel and natural gas refuse trucks of the City of Madrid. *Applied Energy*, 86(5), 610-615.

Iriarte A., Rieradevall J., & Gabarrell X. (2012). Transition towards a more environmentally sustainable biodiesel in South America: The case of Chile. *Applied Energy*, 91(1), 263-273.

IPCC, 2011: Summary for Policymakers. En: IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)]. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY. USA.

Issariyakul T., Kulkarni M. G., Dalai A. K., & Bakhshi N. N. (2007). Production of biodiesel from waste fryer grease using mixed methanol/ethanol system. *Fuel Processing Technology*, 88(5), 429-436.

ISO_14044-2006. 2010. Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.

Kalam M. A., Masjuki H. H., Jayed M. H., & Liaquat A. M. (2011). Emission and performance characteristics of an indirect ignition diesel engine fuelled with waste cooking oil. *Energy*, 36(1), 397-402.

Khan M. A., Yusup S., & Ahmad M. M. (2010). Acid esterification of a high free fatty acid crude palm oil and crude rubber seed oil blend: Optimization and parametric analysis. *biomass and bioenergy*, 34(12), 1751-1756.

Keera S. T., El Sabagh S. M., & Taman A. R. (2011). Transesterification of vegetable oil to biodiesel fuel using alkaline catalyst. *Fuel*, 90(1), 42-47.

Lechón Y., Cabal H., Lago C., De la Rúa C., M^a Sáez R. y Fernández M. 2005. Análisis de ciclo de vida de combustibles alternativos para el transporte. CIEMANT/ESYME/04-45201/12. Ministerio de medio ambiente. España

Lechon Y., Cabal H., de la Rúa C., Izquierdo L., & Saez R. M. (2006). Análisis de Ciclo de vida de Combustibles alternativos para el Transporte. Fase II: análisis de Ciclo de Vida comparativo del Biodiesel y del Diésel. Madrid (España): Centro de Publicaciones Secretaria Técnica. Ministerio de medio ambiente. España.

Leung D. Y., Wu X., & Leung M. K. H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied energy*, 87(4), 1083-1095.

Leung D. Y. C., Wu X., & Leung M. K. H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, 87(4), 1083–1095.

doi:10.1016/j.apenergy.2009.10.006

Leung D. Y. C., & Guo Y. (2006). Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production. *Fuel Processing Technology*, 87(10), 883-890.

Ma F., & Hanna M. A. (1999). Biodiesel production: a review. *Bioresource technology*, 70(1), 1-15.

Meng X., Chen G., & Wang Y. (2008). Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test. *Fuel Processing Technology*, 89(9), 851-857.

Montefrio M. J., Xinwen T., & Obbard J. P. (2010). Recovery and pre-treatment of fats, oil and grease from grease interceptors for biodiesel production. *Applied energy*, 87(10), 3155-3161.

Nanaki E. A., & Koroneos C. J. (2012). Comparative LCA of the use of biodiesel, diesel and gasoline for transportation. *Journal of Cleaner Production*, 20(1), 14-19.

Nava I. (2014). Balance energético de producción de biodiesel a partir de microalgas separadas del medio acuoso. Tesis de Maestría. UNAM. México.

NMX -F-101_SCFI-2006. 2012. Alimentos-aceites y grasas vegetales o animales determinación de ácidos grasos libres.

Orlandin F. (2013). Avaliação do Ciclo de vida de unidade produtora de biodiesel a partir de óleo de fritura. Tesis de licenciatura. Pontificia Universidad Católica de Rio Grande do Sul. Brasil.

Pinto A. C., Guarieiro L. L., Rezende M. J., Ribeiro N. M., Torres, E. A., Lopes W. A., & Andrade J. B. D. (2005). Biodiesel: an overview. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 16(6B), 1313-1330.

Pleanjai S. & Gheewala S. H. (2009). Full chain energy analysis of biodiesel production from palm oil in Thailand. *Applied Energy*, 86, 209-214.

Predojević, Z. J. (2008). The production of biodiesel from waste frying oils: a comparison of different purification steps. *Fuel*, 87(17), 3522-3528.

Pérez P., Gusberti P., & Gallardo A. (2009). Producción de biodiesel a partir de aceites usados de cocina a escala piloto en la provincia de Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13(6), 125-129.

REN21, 2014. Renewable 2014 Global Status Report. (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-9815934 -2-6.

Ruiz F. N. (2007). Aplicación del análisis de vida en el estudio ambiental de diferentes procesos avanzados de oxidación. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Barcelona. España.

Sandoval G. (2010). Biocombustibles avanzados en México, estado actual perspectivas. Cuadernos temáticos sobre la bioenergía. REMBIO, 2.

Sánchez O. J., Cardona C. A., & Sánchez D. L. (2012). Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol: Una aproximación cualitativa. *Revista Universidad EAFIT*, 43(146), 59-79.

Secretaria de Energía. (2009). Estrategia Intersecretarial de los Bioenergéticos. México.

Sharma Y. C., & Singh B. (2008). Development of biodiesel from karanja, a tree found in rural India. *Fuel*, 87(8), 1740-1742.

Singh S. P., & Singh D. (2010). Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 200-216.

Spinelli D., Jez S., Pogni R., & Basosi, R. (2013). Environmental and life cycle analysis of a biodiesel production line from sunflower in the Province of Siena (Italy). *Energy Policy*, 59, 492-506.

Stratta, J. (2000). Biocombustibles: los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiesel. *Agosto de*, 1–15. Retrieved from http://www.bcr.com.ar/Publicaciones/investigaciones/biocombustibles_stratta.pdf

Thamsiroj T., & Murphy J. D. (2011). The impact of the life cycle analysis methodology on whether biodiesel produced from residues can meet the EU sustainability criteria for biofuel facilities constructed after 2017. *Renewable Energy*, 36(1), 50-63.

The Gold Standard. 2009. Gold standard methodology for Biodiesel from Waste oil/fat. Version 1.0.

Tobin J. & Fulford D. J. (2005). Life cycle assessment of the production of biodiesel from *Jatropha*. School of construction management and engineering: The University of Reading.

Vazquez D. (2014). Biodiésel a partir de aceite de palma en el transporte mexicano. Tesis de Licenciatura. UNAM. México.

Veljković V. B., Lakićević S. H., Stamenković O. S., Todorović Z. B., & Lazić M. L. (2006). Biodiesel production from tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) seed oil with a high content of free fatty acids. *Fuel*, 85(17), 2671-2675.

Warpole Ronald E. y Raymond H. Myers. 2000. Probabilidad y estadística. McGraw Hill. Tercera edición. ISBN 0-02-424210-1. México.

Winkler. 2007. Ficha de Seguridad Química. vol 1.USA.

Zabala A. R. (2012). Producción de biodiesel de residuos de café utilizando diferentes catalizadores. Tesis de maestría. Venezuela.