ANÁLISIS DE VIABILIDAD PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN COLOMBIA A PARTIR DE PONGAMIA PINNATA

CARLOS ANTONIO GARNICA CASTRO

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
PROYECTO CURRICULAR INGENIERÍA EN MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.
2017

ANÁLISIS DE VIABILIDAD PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN COLOMBIA A PARTIR DE PONGAMIA PINNATA

CARLOS ANTONIO GARNICA CASTRO

Director: GERMÁN ARTURO LÓPEZ MARTÍNEZ

Trabajo presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
PROYECTO CURRICULAR INGENIERÍA EN MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.
2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del presidente del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

Bogotá D. C., __ de _____ 2017.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

1. PROBLEMA Y OBJETIVOS 12
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 12
1.1.1. OBJETIVO GENERAL. 16
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS. 16
2. MARCO TEÓRICO 17
2.1. BIODIESEL 17
2.2. EL CONCEPTO DE ACIDOS Y BASES 19
2.3. PRECALENTAMIENTO DEL ACEITE 21
2.4. PRESIÓN DE REACCIÓN 22
2.5. HOMOGENIZACIÓN DE LA MEZCLA 23
2.6. PURIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS 25
2.6.1. PURIFICACÍON DE LA FASE ÉSTER 25
2.6.2. PURIFICACIÓN EN LA FASE GLICEROL 26
2.6.3. CAMPOS DE APLICACIÓN PARA EL GLICEROL CRUDO 27
2.7. CULTIVO Y PROCESO DE PONGAMIA 28
2.8. ACEITE DE PONGAMIA EN BIODIESEL 32
2.8.1. TRANSESTERIFICACIÓN CATALÍTICA HOMOGÉNEA BÁSICA 32
2.8.2. TRANSESTERIFICACIÓN CATALÍTICA HOMOGÉNEA ÁCIDA 34
2.8.3. TRANSESTERIFICACIÓN CATALÍTICA HETEROGÉNEA 34
3. ESTADO DEL ARTE 38
3.1. CONTEXTO AMBIENTAL Y LEGISLATIVO 38
3.2. EL VEHÍCULOS HIBRIDO 38
3.3. USO DEL PETRÓLEO 41
3.4. USO DEL BIODÉSEL 46
3.5. PRODUCCIÓN DE PONGAMIA 48
3.6. COSECHA 49

3.7. TRITURACION 50
4. METODOLOGÍA 51
5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE LA PONGAMIA A NIVEL MUNDIAL 53
5.1. IMPORTANCIA INDUSTRIAL 55
5.2. IMPORTANCIA ECONÓMICA 56
5.3. EFECTOS SOBRE EL SUELO 58
5.4. IMPORTANCIA AGRÍCOLA 67
6. IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE LA PONGAMIA, DESDE EL CULTIVO HASTA LA COMERCIALIZACIÓN 70
6.1. SINOPSIS DEL PROCESO DE CULTIVO 73
7. GRADO DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA PARA LA PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE BIODIESEL A PARTIR DE LA PONGAMIA 79
7.1. PRESIÓN DE REACCIÓN 80
7.2. OPERACIÓN DISCONTINUA U OPERACIÓN CONTINÚA 81
7.3. HOMOGENEIZACIÓN DE LA MEZCLA REACCIONANDO 81
7.4. SEPARACIÓN DE FASES 83
7.5. PURIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS 84
7.5.1. PURIFICACIÓN DE LA FASE ÉSTER 84
7.5.2. PURIFICACIÓN DE LA FASE GLICEROL 85
7.6. CAMPOS DE APLICACIÓN PARA EL GLICEROL CRUDO 86
7.7. TRANSESTERIFICACIÓN IN SITU 87
7.8. APLICACIONES ALTERNATIVAS PARA LOS ÉSTERES DE METILO DE ÁCIDOS GRASOS 88
7.9. FUENTES DE ALIMENTACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL 89
7.10. ALCOHOLES 91
7.11. CATALIZADORES Y NEUTRALIZADORES 93

7.12. OPCIONES DE PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL. 97
7.12.1. PROCESO BATCH (POR LOTES)..... 97
7.12.2. SISTEMAS DE PROCESO CONTINUO..... 98
7.12.3. SISTEMAS DE ALTO CONTENIDO EN ÁCIDOS GRASOS LIBRES 99
7.12.4. SISTEMAS NO-CATALIZADOS - PROCESO BIOX..... 101
7.12.5. SISTEMAS NO-CATALIZADOS - PROCESO SUPERCRÍTICO 101
7.13. GRADO DE MADUREZ EN ESCALA TRL (TECHNOLOGY READINESS LEVELS) 102
8. ANÁLISIS DE VIABILIDAD 105
9. CONCLUSIONES 107
10. BIBLIOGRAFÍA..... 110

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Moléculas de carbono según el tipo de combustible 42

Tabla 2. Fuentes y procedimientos para el desarrollo de los objetivos 51

Tabla 3. Nivel de madures tecnológica (TRL) 103

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Evolución de la población del planeta 13

Figura 2. Árbol, flores y semillas de pongamia..... 15

Figura 3. Molécula de ácido graso linoleico..... 22

Figura 4. Reacción de la transesterificacion..... 24

Figura 5. Proceso para obtener biodiesel a partir de semillas de pongamia 29

Figura 6. Producción Mundial de Palma Africana..... 31

Figura 7. Producción de Biodiesel en Colombia..... **¡Error! Marcador no definido.**

Figura 8. Woods Dual Power, coche híbrido de 1917 39

Figura 9. Emisiones y efectos en la capa de ozono 44

Figura 10. Proyección del consumo mundial de energía primaria..... 44

Figura 11. Relación entre contaminación del aire y efectos de las emisiones en la salud 46

Figura 12. Etapas de desarrollo según el TRL 104

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una revisión de la bibliografía relevante en cuanto al proceso de producción de Biodiesel a partir de Pongamia Pinnata. Se describe la planta, desde las condiciones requeridas para su crecimiento hasta los subproductos que se pueden obtener adicional a la producción de biodiesel. Se compara la pongamia con el aceite de palma, pues es la principal base de producción de biodiesel actualmente en el país. Se evalúan las normas existentes en la legislación colombiana con el fin de aterrizar las experiencias de otros países a la realidad Nacional.

Se puede encontrar que la Pongamia tiene un vertiginoso ascenso en cuanto a estudios e investigaciones en el campo de biocombustibles, pues sus propiedades son competitivas y su cultivo representa mayores ventajas respecto al cultivo de otras plantas oleaginosas utilizadas para la producción de Biodiesel.

En el campo nacional, no se encontraron estudios sobre dicha planta, lo que sugiere que es un momento importante para iniciar pruebas piloto que determinen un norte para la producción de biodiesel de otra fuente que compita con el aceite de palma, ayude a regular los precios de los biocombustibles y favorezca el desarrollo de la industria nacional protegiendo el medio ambiente al tiempo que genera empleo y contribuye al desarrollo académico.

Palabras claves. ACEITE DE PONGAMIA, TRANSESTERIFICACIÓN, BIODIESEL

ABSTRACT

In the present work a review of the relevant bibliography is made regarding the process of production of Biodiesel from Pongamia Pinnata. The plant is described, from the conditions required for its growth to the by-products that can be obtained in addition to biodiesel production. It compares pongamia with palm oil, as it is the main biodiesel production base in the country. The existing norms in the Colombian legislation are evaluated in order to land the experiences of other countries to the national reality.

It can be found that Pongamia has a rapid rise in studies and research in the field of biofuels, because their properties are competitive and their cultivation represents greater advantages over the cultivation of other oil plants used for the production of Biodiesel.

In the national field, no studies were found on this plant, suggesting that it is an important moment to start pilot tests that determine a north for the production of biodiesel from another source that competes with palm oil, help to regulate the prices of biofuels and favor the development of national industry by protecting the environment while generating employment and contributing to academic development.

Key words: PONGAMIA OIL, BIODIESEL, TRANSESTERIFICATION

INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos para el uso del transporte público están ligados al consumo y el uso de los combustibles fósiles tales como el petróleo y sus derivados, los cuales afectan considerablemente el medio ambiente por los altos contenidos de partículas contaminantes que afectan la capa de ozono.

Este comportamiento a lo largo de los años, ha provocado una grave condición en la conservación del medio ambiente y la gran afectación del aire que preocupa considerablemente a la población humana y en los recursos naturales los cuales contribuyen con la existencia de los seres humanos, plantas y animales.

A raíz de esto, es indispensable encontrar alternativas viables que contribuyan con la reducción del uso de combustibles fósiles, optando por productos tales como biocombustibles o productos a base de aceite vegetal. Considerando lo anterior, el presente proyecto pretende contribuir a la implementación de uso del aceite de pongamia (biodiesel), así como el estudio de la adaptabilidad del cultivo comercial en Colombia y el análisis de los efectos del aceite de pongamia en el desempeño de los motores diésel.

En este contexto, una de esas opciones que ya ha sido estudiada en otros países consiste en la utilización del aceite de pongamia, (*Millettia Pinnata*), árbol de amplia copa caducifolio, de la familia de las leguminosas, que se encuentra especialmente en Asia, que se caracteriza por sus flores rosadas y sus semillas de color marrón, ricas en aceite.

1. PROBLEMA Y OBJETIVOS

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años la contaminación ambiental generada por el uso de combustibles fósiles tales como el petróleo y sus derivados, ha sido una de las grandes problemáticas a nivel mundial debido a las repercusiones que genera sobre la capa de ozono y el efecto negativo que produce en la salud de la población. El proceso que ha seguido la humanidad en el uso de combustibles ha llegado a convertirse en una amenaza para la sostenibilidad alimentaria de las futuras generaciones.

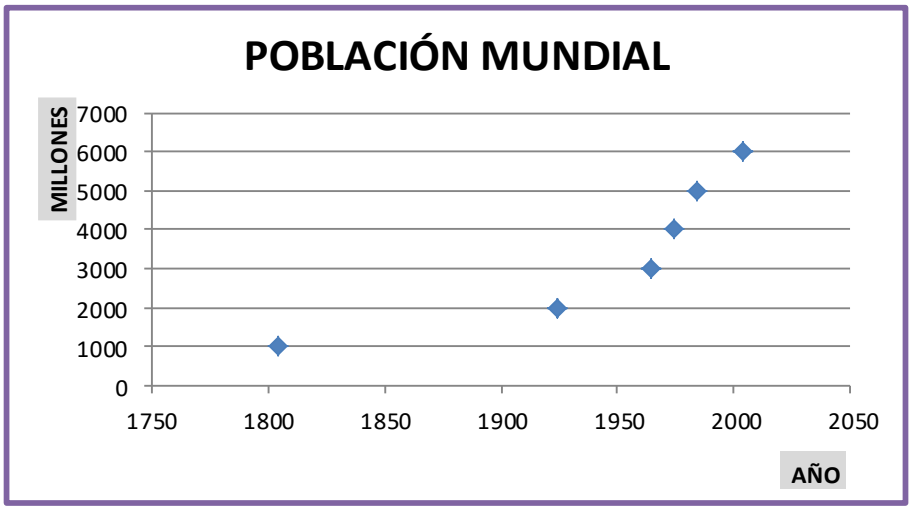
Este problema no solo se presenta en Colombia; de hecho, uno de los debates más intensos que se dio a lo largo de los ocho años de Presidencia de Barak Obama en Estados Unidos, estuvo relacionado con los convenios internacionales orientados a la reducción de los niveles de contaminación. Una de las causas que hace que este problema sea tan generalizado a nivel mundial es la evolución de la población del planeta; la ONU estima que hace aproximadamente 2000 años los habitantes de la tierra serían cerca de 200 millones y no fue sino hasta 1804 cuando se llegó a los 1000 millones de personas. Se calcula que en 1927 existían aproximadamente 2000 millones de personas, en 1960 aproximadamente 3000 millones, en 1974 existían 4000 millones, en 1987 5000 millones y en 1999 existían 6000 millones de personas, según los datos de la ONU.[1]

Esta proyección de la ONU se observa de manera gráfica en la Figura 1. Como se aprecia allí, el crecimiento de la población mundial tuvo una fuerte aceleración a partir del Siglo XX y más concretamente después de 1950, tal como lo señala el

[1] Naciones Unidas. 2013. Óp. Cit.

Premio Noble de Economía 2015 Angus Deaton[2]. Ese crecimiento de la población ha ejercido a lo largo de los años una presión que ha motivado el desplazamiento de la frontera entre las zonas rurales y las zonas urbanas, disminuyendo tanto las reservas de alimentos, como la disponibilidad de plantas que se encarguen de retirar el CO_2 del aire.

Figura 1. Evolución de la población del planeta



Fuente de los datos: Naciones Unidas.[3]

Además de esa evolución de la población, en Colombia el problema de la contaminación se ha visto acelerado debido a que en el país en los años recientes se ha presentado un crecimiento de la densidad de vehículos por habitante, acercándose lenta pero inexorablemente a los indicadores de otros países que tienen similares condiciones de desarrollo[4]. En estas condiciones de mayor número de habitantes y mayor cantidad de vehículos por cada 100.000 habitantes,

[2] Deaton, A. El Gran Escape. Salud, bienestar y los orígenes de la inequidad. Madrid. 2015. Fondo de Cultura Económica de España.

[3] Naciones Unidas. Objetivos de Desarrollo del Milenio. Informe de 2013. Washington. 2013. Naciones Unidas.

[4] Cámara de Comercio de Bogotá. Observatorio de movilidad: La oferta de transporte en Bogotá. Bogotá. 2013. Cámara de Comercio de Bogotá.

la emisión de gases contaminantes ha tenido un crecimiento doblemente acelerado y, por lo tanto, preocupante.

A nivel mundial según estudios la producción de emisiones contaminantes está distribuida en alrededor del 25% en generación de energía, 24% en agricultura, 21% en la industria y 14 % en el transporte, de acuerdo con el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (en inglés, Intergubernamental Panel of Climate Change IPCC)[5] y de las emisiones que producen los vehículos, “La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha lanzado una alerta por la pobre calidad del aire en las zonas urbanas de todo el planeta que está matando a millones y colapsando los sistemas sanitarios"[6]. Colombia cuenta con alrededor de 48.203.000 de habitantes actualmente, los cuales tienen la necesidad de transportarse a sus hogares, lugares de trabajo, entre otros; por lo tanto el efecto de la contaminación por el uso de combustibles fósiles crece inevitablemente, sin embargo, cabe resaltar que son fuentes agotables y que seguramente a futuro tendrán que ser remplazados por otras opciones; por ello nace la necesidad de generar y promover energías alternativas que contribuyan con la disminución del efecto contaminante que se genera con el uso de estas fuentes.

Teniendo en cuenta que la contaminación de aire principalmente es causada por el uso de combustibles fósiles, ya sea por fuentes de emisiones móviles, fijas o aéreas. En las principales ciudades el 41% del total de las emisiones se genera en Bogotá liderando, seguida por Medellín y Cali. Las emisiones de material particulado menor a 10 micras (PM10), de óxidos de nitrógeno (NOx) y monóxido de carbono (CO) son causados por fuentes móviles (vehículos, motocicletas, aviones, trenes, etc.) que son los que utilizan fuentes fósiles de energía mientras que las partículas suspendidas totales (PST) y los óxidos de azufre (SOx) son

[5] PUIG, D. La introducción de la Salud en la COP 20: el reloj no se detiene en el camino a París. Revista Cubana de Salud Pública. 2016. V 42 N1. pp. 176-177.

[6] El Mundo. Alerta mundial por la contaminación en las ciudades de todo el planeta [ON line]. 18 de enero de 2016. Disponible en Internet: http://www.elmundo.es/salud/2016/01/18/569bba3d268e3ea1548b45e4.html

generados por las fuentes fijas como establecimientos industriales y termoeléctricos.

En este contexto, una de esas opciones que ya ha sido estudiada en otros países consiste en la utilización del aceite de pongamia, (*Millettia Pinnata*), árbol de amplia copa caducifolio, de la familia de las leguminosas, que se encuentra especialmente Asia, que se caracteriza por sus flores rosadas y sus semillas de color marrón, ricas en aceite. (Ver Figura 2)

Falasca y Bernabé[7] describen que se trata de una especie cuya planta tiene todas sus partes tóxicas, de alta al a la sequía, y que puede reemplazar a otros cultivos como productora de biodiesel; además la planta tolera los suelos anegados, salinos y alcalinos, con rendimiento alto de semillas por cada árbol, que puede cosecharse de manera mecánica.

Figura 2. Árbol, flores y semillas de pongamia







[7] FALASCA, S. y BERNABÉ, M. El reemplazo del cultivo de jatropha curcas en Argentina por Pongamia Pinnata. Río de Janeiro. 2012. XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia.

Fuente: Gómez, Gómez y Morantes[8]

Teniendo en cuenta que en Colombia ya existe un notorio desarrollo de plantas productoras de biocombustibles a partir de caña de azúcar y aceite de palma, los cuales competirían con aceite de pongamia, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Bajo qué condiciones resulta viable la producción industrial de biocombustible en Colombia a partir del aceite de pongamia?

OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL.

Analizar la viabilidad de la producción de biodiesel en Colombia a partir de pongamia.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1. Identificar ventajas y desventajas de la producción de biodiesel a partir de pongamia a nivel mundial.
2. Identificar el grado de madurez de la tecnología requerida para la producción industrial de biodiesel a partir de pongamia.
3. Identificar el impacto ambiental generado por la producción de biodiesel a partir de pongamia desde el cultivo hasta la comercialización del biodiesel.
4. Elaborar un artículo científico que recoja los hallazgos del presente trabajo.

[8] GÓMEZ, S., GÓMEZ, L. y MORANTES, M. Incidencia de la calidad del aire en la anatomía de hojas de Pittosporum undulatum Vent. y Sambucus nigra L en Bogotá. 2015. Boletín Semillas Ambientales.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. BIODIESEL

En términos generales, biodiesel se refiere a todo sustituto, derivado de biomasa renovable, del petrodiésel. Pero si especificamos, el biodiesel se refiere a la familia de productos obtenidos de aceites vegetales o grasas animales que lo pueden sustituir.

Según el Parlamento Europeo, se entiende por biodiesel como: "Un éster metílico producido a partir de un aceite vegetal o animal de calidad similar al gasóleo para uso como biocarburante". En general, estos ésteres son obtenidos mediante un proceso químico llamado transesterificación metílicos de aceites y/o grasas de origen vegetal.

En definiciones más específicas y un poco más amplias, como la que podemos encontrar en la ASTM (American Standards for Testing and Materials), aunque Europa sigue una normativa diferente sería: "Ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivada de lípidos renovables, como los aceites vegetales, que se utilizan en motores de ignición por compresión (motores diesel) o en calderas de calefacción".[9]

A raíz del Protocolo de Kioto en el que gran número de países industrializados marcan el inicio de una nueva etapa menos contaminante, se está poniendo interés en el incremento del consumo de biocarburantes provenientes del tratamiento de productos vegetales.

Dependiendo de la climatología, de las características del terreno o incluso de las costumbres agrícolas, son múltiples los tipos de cultivos que se pueden cultivar a

[9] Pashova, V. A., & López González, C. A. (2004). El biodiesel a partir de aceites vegetales: una fuente de nuevas bioindustrias. (J. Osorio Gòmez, Ed.) TECNOLOGICAS (13), 9-23

fin aportar productos alcoligénicos, oleaginosos o lignocelulósicos para la producción de Biocarburantes.

Caña de azúcar, maíz, melaza, yuca, patata, palma, avena, colza, girasol, soja, son sólo una pequeña muestra de ejemplos de cultivos que, además de proporcionar carburantes no contaminantes y aumentar las existencias, contribuirían a equilibrar la distribución del trabajo y la riqueza.

Sin olvidar los biocarburantes que pueden derivarse de un mejor aprovechamiento de residuos provocados por las actividades humanas, tanto desde el ámbito municipal como ganadero, agrícola o forestal.

El Biodiesel es un biocarburante líquido para vehículos con motor diésel, que puede ser utilizado solo o mezclado en diferentes porcentajes con gasóleo procedente del petróleo. Se obtiene del tratamiento del fruto de plantas oleaginosas, por tanto de aceites vegetales, así como también de grasas animales y de aceites vegetales recuperados tras de su utilización.

El biodiesel es un combustible alternativo para los motores diésel que está ganando atención a los Estados Unidos después de adquirir un notable éxito en Europa. Sus principales ventajas son que es uno de los combustibles renovables actualmente más disponibles y que también es biodegradable y no tóxico. También se puede usar en motores diésel directamente sin hacer grandes modificaciones. El propósito es describir y explicar los procesos y temas vinculados a la producción de este nuevo combustible.[10]

Una mirada rápida a la bibliografía referente al biodiesel pronto revela la siguiente relación para la producción de biodiesel a partir de grasas y aceites. Al principio, hemos hablado brevemente de compuestos como el metano, el etano y el propano. Estos compuestos pertenecen a una clase llamada alcanos. Los alcanos son compuestos que consisten sólo en carbono e hidrógeno y sólo contienen

[10] Pashova, V. A., & López González, C. A. (2004). El biodiesel a partir de aceites vegetales: una fuente de nuevas bioindustrias. (J. Osorio Gòmez, Ed.) TECNOLOGICAS (13), 9-23

enlaces simples. Por lo tanto, la fórmula general para los alcanos de cadena recta es CH3- (CH2) n-CH3. Otros alcanos, por ejemplo con ramificaciones en la cadena, o con los carbonos colocados formando un anillo, también existen. Sin embargo, en cada caso, los carbonos están conectados sólo por enlaces simples.

Cuando hablamos de combustibles diésel, cabe mencionar el número de cetano, que coge su nombre del hexadecano (nombre trivial: cetano), un alcano de cadena recta con 16 carbonos (C16H34). El número de cetano es un indicador adimensional de la calidad de ignición para un combustible diésel y es conceptualmente similar al número de octano para la gasolina. El hexadecáno es el nivel de mayor calidad en la escala del cetano y se le ha asignado un número de cetano de 100. Un alcano muy ramificado, 2,2,4,4,6,8,8-heptametilnoná (HMN; nueve carbonos en una cadena con siete grupos CH3 unidos, además de los dos grupos CH3 terminales, es decir, que también tiene 16 átomos de carbono) es el compuesto de más baja calidad en la escala de cetano y tiene un número de cetano de 15. De este modo, los alcanos largos y poco ramificados conforman el combustible petrodiésel ideal. La analogía del hexadecá como componente del petrodiésel ideal muestra que el biodiesel es adecuado como un combustible diésel alternativo. Los ácidos grasos de los que ahora se utilizan como biodiesel también son compuestos de cadena larga similares a los alcanos de cadena larga como el hexadecano.[11]

2.2. EL CONCEPTO DE ACIDOS Y BASES

Muchos compuestos, tanto orgánicos como inorgánicos, se pueden clasificar como ácidos y bases. El concepto más útil de ácidos y bases en cuanto al biodiesel es el de donadores de protones (ácidos) o aceptor de protones (bases), también conocido como la teoría de Brønsted y Lowry. La transferencia de un protón de un

[11] Pashova, V. A., & López González, C. A. (2004). El biodiesel a partir de aceites vegetales: una fuente de nuevas bioindustrias. (J. Osorio Gòmez, Ed.) TECNOLOGICAS (13), 9-23

ácido hacia una base es una reacción ácido-base. Un protón es un átomo de hidrógeno al que se le ha arrancado el electrón. Así pues, un protón lleva una carga positiva y menudo se escribe como H +.[12]

Que un compuesto se comporte como un ácido o como una base depende de algunos de los átomos que contenga. Así, los compuestos orgánicos que contienen nitrógeno, a menudo tienen un carácter básico, mientras que los que contienen oxígeno en forma de grupos OH (hidroxilo), suelen tener carácter ácido. También hay ácidos y bases donde el protón ha sido sustituido por otra partícula cargada positivamente llamada catión, derivada de otro elemento. Obsérvese que una partícula cargada, ya sea negativa o positivamente, se llama ion. Que los ácidos y las bases se disocien en iones en vez de en átomos es el resultado de la posición de los átomos del compuesto en la tabla periódica y de sus correspondientes configuraciones electrónicas.

Por lo tanto, al agua (H2O), un protón (H +) Puede ser reemplazado por un catión de sodio, cargado positivamente (Na +), O de potasio (K +), Para dar NaOH (hidróxido de sodio) o KOH (hidróxido de potasio). Obviamente, el grupo hidroxilo remanente (OH) es pues cargado negativamente para dar OH- (Hidróxido). Como resultado, NaOH y KOH son bases fuertes ya que tienen tendencia a captar un protón. De manera similar, en un alcohol como el metanol (CH3OH), el protón enlazado al átomo de oxígeno puede ser sustituido por, por ejemplo, Na +. El resultado es CH3ONa (metilado de sodio; metóxido de sodio; metalonat de sodio), una base fuerte, siendo el CH3O- la razón.

De igual manera, pero al revés, actúan los ácidos, siendo los más conocidos el sulfúrico (H2SO4), el clorhídrico (HCl) y el nítrico (HNO3). Los ácidos tienen tendencia a ceder protones, dejando una partícula cargada negativamente llamada anión.

---

[12] DRAGO, R., MATWIYOFF, N., Ácidos y Bases. D. C. Heath and Company. Lexinton, Masachusetts. 1968.

El valor de pH de una solución acuosa se puede medir convenientemente de manera directa en cuestión de segundos utilizando un pHmetro. También hay tiras de papel indicador, que cambian de color en introducirlas en la solución debido a una reacción ácido-base con el indicador del papel. Comparando el color obtenido con una lista que se encuentra en la caja donde se guarda el papel, obtenemos el pH.

Así pues, un ácido se puede ver como un compuesto que produce H3O + cuando se disuelve en agua, más allá de H3O + presente en el agua neutra. Y a la inversa, una base produce OH- cuando se disuelve en el agua, aparte del OH- ya presente en el agua.

Otra parte importante de la química ácido-base es la neutralización. Muchas reacciones químicas, incluyendo la de transesterificación que produce biodiesel, requieren el uso de catalizadores. Los catalizadores son compuestos que a menudo son presentes en pequeñas cantidades que permiten que la reacción avance a una mayor velocidad. Estos catalizadores pueden ser ácidos o básicos. Esto significa que, incluso cuando la reacción ha terminado, la solución reactante todavía será ácida o básica, dependiendo del tipo de catalizador empleado (y otras sustancias presentes).

Entonces es necesario neutralizar la solución, es decir, es necesario que la solución consiga un pH neutro. No es extraño, pues, que una solución básica se pueda neutralizar con un ácido y viceversa, una de ácida con una base.

2.3. PRECALENTAMIENTO DEL ACEITE

Antes de la transesterificación los aceites han de experimentar una serie de etapas de refinamiento para extraer una variedad de impurezas, tal como fosfátidos, ácidos grasos libres, ceras, tocoferoles o colorantes, que podrían impedir la reacción. El primer paso de purificación es la extracción de los fosfátidos, Los fosfátidos provocan que el aceite presente turbidez durante el almacenamiento y fomentan la acumulación de agua en el éster producido.

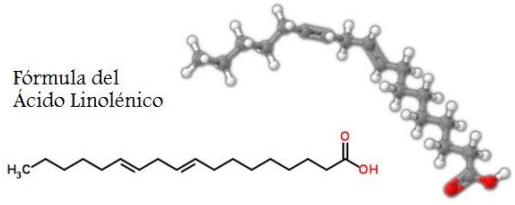
Además, se ha constatado un mayor consumo de catalizador durante la transesterificación con catálisis alcalina. Los fosfátidos solubles se pueden extraer añadiendo agua al aceite a 60- 90ºC, seguido de una centrifugación para separar la fase acuosa y el aceite purificado. Para fosfátidos que no se pueden hidratar se requiere una etapa adicional en la que se añaden soluciones ácidas (por ej. ácidos cítrico o fosfórico) necesarias para descomponer el material.[13]

2.4. PRESIÓN DE REACCIÓN

Básicamente los ésteres de metilo se pueden producir por métodos de alta presión o de baja presión. Los primeros pueden llegar a presiones de hasta 100 bar y temperaturas alrededor de 250ºC, con un exceso de alcohol de 7-8 veces la estequiométricamente requerido en presencia de catalizadores alcalinos o de metales de transición. [14]

Estos procesos fueron muy comunes en la industria detergente, seguidos por la conversión de los ésteres en alcoholes grasos. Las ventajas de las transesterificación a alta presión se encuentran en que se pueden utilizar aceites con un contenido de más del 20% de ácidos grasos libres sin necesidad de pretratamiento y que se obtiene un glicerol de alta pureza que puede ser vendido como subproducto.

Figura 3. Molécula de ácido graso linoleico



Fuente Calla y Pares.

[13] Pashova, V. A., & López González, C. A. (2004). El biodiesel a partir de aceites vegetales: una fuente de nuevas bioindustrias. (J. Osorio Gòmez, Ed.) TECNOLOGICAS (13), 9-23

[14] ROMANSKI, J.; NOWAK, P.; KOSINSKI, K.; JURCZAK, J. High-pressure transesterification of sterically hindered esters. Tetrahedron Lett. vol 53. 2012

Debido a los altos costos de operación estos métodos son inviables para la producción de biodiesel. Con un nuevo proceso a baja presión y baja temperatura se encontró el camino para una estrategia más económica. Este enfoque es ahora práctica común en la manufactura de biodiesel con catálisis alcalina. Además, hasta cierto punto también ha encontrado un lugar en las plantas de producción de metilésteres de ácidos grasos utilizados como materias primas oleo químicas.

2.5. HOMOGENIZACIÓN DE LA MEZCLA

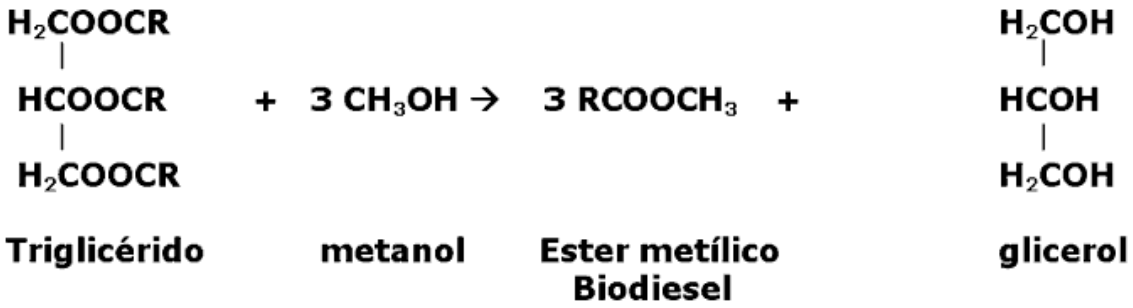
Uno de los grandes problemas de la metanólisis radica en el hecho de que el metanol no se disuelve con facilidad en la materia grasa. Esto significa que la transesterificación no progresa adecuadamente, a no ser que la mezcla se homogeneice de alguna manera, al menos durante las fases iniciales del proceso. Una vez se han producido cantidades suficientes de metiléster y de glicéridos parciales (mono- y di-), estas sustancias actúan como disolventes comunes tanto del alcohol como del aceite, por lo que, de dos fases iniciales pronto acaba formándose una sola fase.[15]

Una mezcla vigorosa de los reactivos es un método común de homogeneización y utiliza pertenece por los procesos discontinuos como para procesos continuos. También se ha descrito la aplicación de irradiación ultrasónica de baja frecuencia para formar una emulsión entre el aceite y el alcohol, tetrahidrofurano, fracciones de hidrocarburos alifáticos, y de metanol supercrítico. Asimismo, el consumo de solvente puede ser elevado. En este sentido se recomienda una relación óptima entre tolueno y aceite de palma de 1:1 (Volumen/volumen), lo que incrementa considerablemente los costes de producción, más aún cuando el solvente debe extraerse de la fase éster después de la reacción.

---

[15] SANGWAN S., RAO, D. y SHARMA, R. A review on Pongamia Pinnata (L.) Pierre: A great versatile leguminous plant. Nature and Science. 2010. V 8 N 11. p.p. 130-139.

Figura 4. Reacción de la transesterificación



Fuente. Silvia Cerdeira, Helena Ceretti y Eduardo Reciulschi

El uso de metanol supercrítico como solvente común se ha valorado de forma particularmente ventajosa por varios investigadores. Se ha informado que el alcoholisis del aceite de colza se completó en 240 segundos en presencia de metanol supercrítico 350ºC y 43 Mpa. Además, se afirma que el metanol se disocia en CH3O - y H + en condiciones supercríticas, por lo que el ion metóxido puede catalizar la transesterificación sin necesidad de añadir otro catalizador.

Otros estudios indicaron que a las altas temperaturas y presiones utilizadas en esta tecnología, las superficies metálicas del reactor podrían ser parcialmente

Responsables de los efectos catalíticos. En cualquier caso, la consecuencia directa de realizar la metanolisis sin un catalizador alcalino es que la glicerina y el metilester resultantes no requieren ser depurados de jabones. Como ventaja adicional, se ha mostrado que los ácidos grasos libres presentes en la materia primera también se convierten en metilesteres, lo que significa que las grasas y aceites no se deben desacidificar antes del proceso.

En un artículo reciente los autores señalaron que la transesterificación con alcohol en estado supercrítico también funciona con etanol, 1-propanol, 1-butanol o 1-octanol. Finalmente, también se observó que el agua presente inicialmente en la materia primera, no tiene un efecto negativo en la conversión en transesterificación con metanol supercrítico, por lo que se recomienda esta tecnología para aceites vegetales crudos o productos reciclados con elevados contenidos de agua. Sin embargo, las elevadas presiones y temperaturas

requeridas y la elevada relación molar del alcohol en aceite de hasta 42:1 son inconvenientes para la producción comercial de biodiesel en condiciones supercríticas. Además, los rendimientos en éster tienden no sobrepasar el 95% comparado a la casi completa conversión encuentro en metanolisis convencional catalizada en medio básico bajo condiciones de reacción suaves.

2.6. PURIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS

2.6.1. PURIFICACÍON DE LA FASE ÉSTER

Tras producirse la separación, tanto la fase superior de ésteres como la inferior de glicerol, deben purificarse para conseguir el máximo rendimiento en ésteres. El metanol se puede recuperar por calentamiento de la fase éster. Los rastros de glicerina se pueden eliminar en lavados sucesivos con agua caliente que puede estar acidulada o no, lo que también eliminará restos de metanol y de catalizador.

No obstante, algún autor sostiene que este tratamiento puede causar pérdidas de éster debido a hidrólisis. La glicerina y los glicéridos parciales se extraen de la fase éster de una manera más elegante, convirtiéndolos en triglicéridos, los cuales se pueden separar fácilmente del éster metílico producido. En este sentido añadieron una cantidad extra de catalizador alcalino a la fase éster recientemente producida y calentar la mezcla a temperaturas entre 80 y 100ºC.

En el curso de este tratamiento, el glicerol y los triglicéridos parciales reaccionan con los ésteres metílicos y se supone que se convierten de forma eficiente en triglicéridos, al tiempo que el metanol producido se destila. Los triglicéridos obtenidos se reintroducen en el reactor de transesterificación conjuntamente con alimentación fresca de grasas y aceites, después de que se hayan extraído trazas de jabones y ésteres metílicos.[16]

[16] SANGWAN S., RAO, D. y SHARMA, R. A review on Pongamia Pinnata (L.) Pierre: A great versatile leguminous plant. Nature and Science. 2010. V 8 N 11. p.p. 130-139.

Los ácidos grasos libres que se pueden recuperar de la fase éster por destilación, aprovechándonos de que los ésteres de metilo en general destilan a una temperatura entre 30 y 50ºC inferior a FFA. Finalmente, se han sugerido varios procedimientos para la extracción de restos de catalizador de la fase éster. Se desarrollar un proceso en el que la fase éster se purifica de las pequeñas cantidades de hidróxido potásico poniéndola en contacto con una resina de intercambio catiónico en condiciones anhidras. Alternativamente, se pueden añadir absorbentes tales como arcillas decolorantes. Además, la fase de glicerina que se ha separado, también se puede utilizar con propósitos de purificación. Así, los ésteres se pueden purificar con la capa de glicerol para extraer el exceso de alcohol y de catalizador.

2.6.2. PURIFICACIÓN EN LA FASE GLICEROL

Para maximizar el rendimiento del éster, también se ha procesar la fase glicerol, ya que aún se pueden encontrar en ella algunas cantidades de ácidos grasos libres, jabones, metanol y trazas. El primer paso en este proceso consiste en la adición de ácido fosfórico o sulfúrico para descomponer los jabones y formar ácidos grasos libres. Si se añade ácido fosfórico a una fase de glicerol proveniente de una catálisis con KOH, se produce fosfato de potasio, el cual se puede vender como fertilizante. Por el contrario, los sólidos obtenidos se deben considerar como residuo.

Los ácidos grasos libres resultantes no son solubles en el glicerol, formando una fase adicional, con lo que se pueden separar con facilidad. Opcionalmente, la separación de la fase de ácidos grasos libres se puede acelerar por microinfiltración. Se ha sugerido la esterificación de los FFA resultantes con etanol utilizando ácido sulfúrico como catalizador. Un método alternativo para tratar los ácidos grasos formados en la descomposición de jabones consiste en poner en contacto a los FFA y ésteres de ácidos grasos con glicerol alcalino y hacer

reaccionar la mezcla a 200ºC durante dos horas para producir triglicéridos, que son reintroducidos en el proceso de transesterificación. [17]

Se desarrolló un proceso para esterificado de los ácidos grasos libres con metanol o etanol en presencia de ácido sulfúrico, p-Tolú-ácido sulfónico o resinas de intercambio iónico, reintroduciendo los productos en el reactor de transesterificación. En un desarrollo posterior, los ácidos grasos libres se pueden mezclar con la materia prima antes de su esterificación.[ib]

2.6.3. CAMPOS DE APLICACIÓN PARA EL GLICEROL CRUDO

En un proceso de transesterificación típico se produce un 80% de fase éster y un 20% de fase glicerol. La fase glicerol consiste sobre todo en glicerol (o glicerina), agua y metanol, pudiendo contener restos de catalizador y jabones, si la mezcla no se ha tratado con alguno de los procedimientos descritos anteriormente. Se puede purificar siguiendo varias estrategias que incluyen destilación, lavado con agua y secado, extracción líquida con glicerol como solvente y purificación vía columnas de intercambio iónico para obtener un producto aplicable a las industrias cosmética e industrial.[ib]

Las posibles aplicaciones de la fase glicerol sin refinar son limitadas. La mezcla se puede quemar en hornos, mezclada con estiércol de animales para producir fertilizantes, o incorporarla a la alimentación animal. Sin embargo, debido a la presencia de trazas de metanol en la fase de glicerol, las dos últimas aplicaciones han sido abandonadas. Se sugiere utilizar la fase glicerol cruda, que todavía contiene catalizador, para la glicerolisis de aceites vegetales y grasas animales para producir una mezcla de mono- y diglicéridos. Las aplicaciones comerciales de

[17] SANGWAN S., RAO, D. y SHARMA, R. A review on Pongamia Pinnata (L.) Pierre: A great versatile leguminous plant. Nature and Science. 2010. V 8 N 11. p.p. 130-139.

los productos resultantes incluyen la producción de detergentes y otros agentes con superficie activa, así como el uso como emulsificante para la comida. También se sugiere la utilización de glicerol crudo para motores adaptados de autoinyección los que atribuyen características mejoradas de emisiones. Se ha propuesto reaccionar la mezcla con aldehídos, cetonas o acetato de metilo para producir cetales de glicerina o acetatos de glicerina, los cuales podrían servir como aditivos para mejorar las propiedades de combustibles FAME a bajas temperaturas.[ib]

2.7. CULTIVO Y PROCESO DE PONGAMIA

El aceite de pongamia ha sido tradicionalmente empleado como tinte textil, para fabricar jabón, como lubricante o aceite para lámparas[18]. Durante su cultivo se pueden presentar ataques de insectos como la mosca minadora (orden díptera, familia agrmyzidae, género liriomyza), de color verde metálico que depositan huevos en las hojas tiernas y que las minan una vez eclosionan; así mismo algunas plantas pueden no sobrevivir debido a la carencia de clorofila, lo que las hace albinas.[19]

La transesterificación[20] de metilo del aceite de Pongamia se lleva a cabo según las etapas que se ilustran en la Figura 5.

El proceso empieza con la extracción del aceite de las semillas, por medio de un sistema de prensado; este aceite se filtra y se le agrega metanol, previamente mezclado con hidróxido de potasio (KOH) en una concentración de 2%. Se añade metóxido de potasio (una cantidad conocida de metanol) a la mezcla de aceite de pongamia filtrado y catalizador de KOH, de manera que los ácidos grasos libres se

---

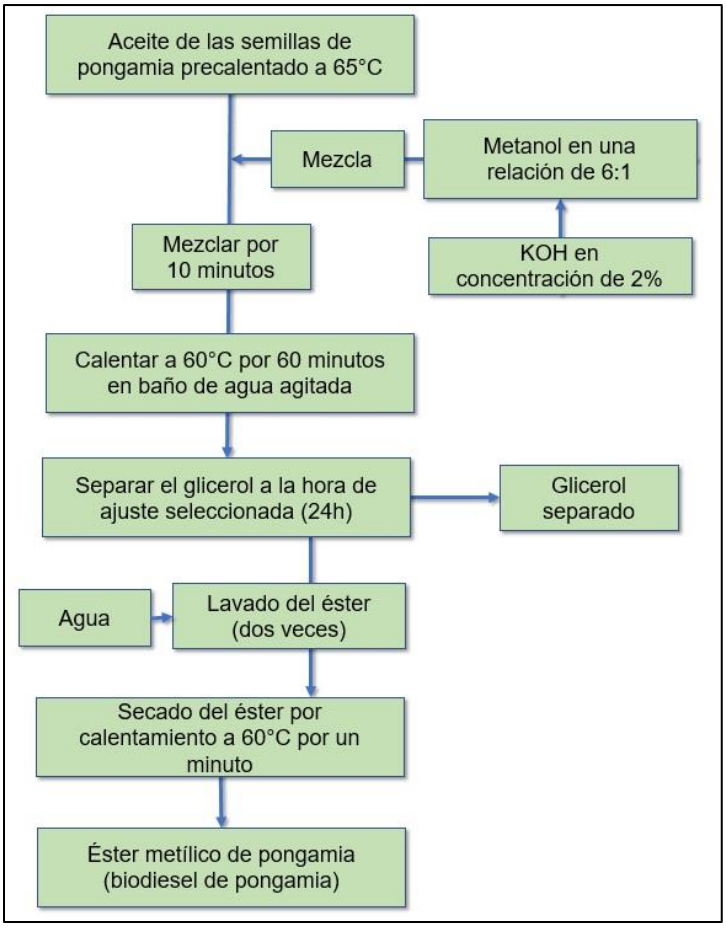
[18] SERRANO, Marta. Estudio de la influencia de las materias primas en la producción y propiedades de biodiesel como combustible. Universidad Complutense de Madrid. Tesis doctoral. 2016.

[19] RIKA Victoria, ENCISO Manuel, VERA Mirtha. Influencia del tamaño de maceta y la composición de sustrato sobre la calidad de Pongamia pinnata (L.) Pierre. Investig. Agrar. 2015. V 17 N1. pp.65-71.

[20] Proceso de intercambiar el grupo alcoxi de un alcohol.

neutralizan; la temperatura se mantuvo a 60ºC. Se pueden utilizar diferentes relaciones de metanol y aceite (4:1, 6:1 y 8:1) para obtener diferentes rendimientos de Pongamia. Después de un período de proceso de 1 hora, se forma biodiesel junto con la glicerina y la separación de fases.

Figura 5. Proceso para obtener biodiesel a partir de semillas de pongamia



Fuente: Prasad[21]

Al comparar el desempeño del biodiesel de pongamia con el de palma, Prasad[21] explica que la necesidad de precalentar el biodiesel de palma por encima de la temperatura ambiente, para mejorar el rendimiento del motor, particularmente la

[21] PRASAD, Sytaram. Study of performance and emissions of C.I. Engine with pongamia based biodiesel. Thapar University, Patiala. Punjab, India. 2016.

potencia de frenado y las características de emisión de escape. A través de un estudio adicional incorpora el éster metílico de aceite de palma precalentado en un motor de encendido por compresión para operarlo; de esta forma se obtienen mejores características de pulverización y atomización. Otras características distintivas como el par, el rendimiento térmico de los frenos, la emisión de gases de escape, la potencia de frenado y el consumo específico de combustible fueron comparables a las del combustible fósil. A su vez, la eficiencia térmica del aceite de pongamia es 63,11% mayor que la del diésel a carga parcial, y se reduce a 11,2% con combustible diésel a plena carga.

De acuerdo con las cifras obtenidas por Franco[22], alrededor de 8,7 millones de hectáreas fueron utilizadas para producir la materia prima requerida por los principales productores durante el año 2011. Sin embargo, países industrializados enfocados en la producción de biodiesel, como Estados Unidos y la Unión Europea, no disponen de las extensiones de terreno requeridas para su creciente demanda en la producción de biocombustibles.

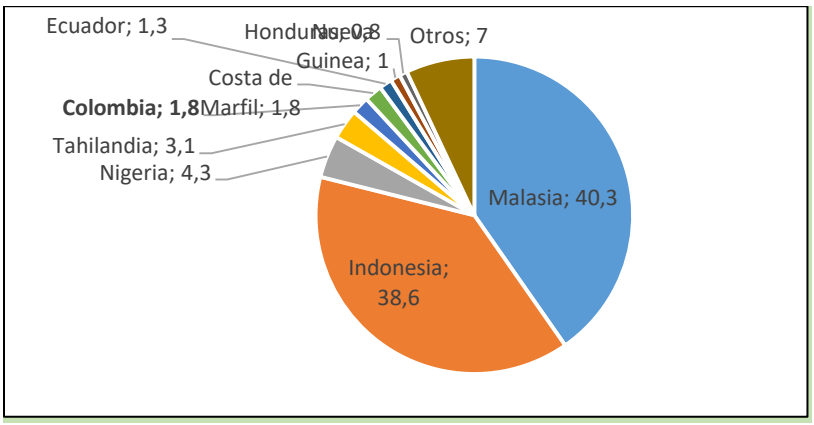
En el país, para el 2011, el rendimiento por hectárea sembrada de palma fue de entre 2.600 y 2.800 litros de biodiesel por hectárea. Si bien la industria de los biocombustibles ha generado efectos sobre el uso de los productos y bienes agrícolas, en el país no existe evidencia de que la evolución del sector cause alteraciones sobre el precio de los alimentos; sin embargo, en países como México, Estados Unidos y Argentina, los precios de alimentos como el maíz y otros comestibles empleados para la producción de biodiesel, "*se han visto alterados por la producción de etanol, generando problemas inflacionarios que se ven directamente reflejados en la seguridad alimentaria de las familias, cuyo*

[22] FRIANCO, M. Simulación del proceso de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). Barcelona. 2013.

producto básico de consumo es el maíz amarillo"[23]. En este aspecto, la pongamia tiene la ventaja de no generar este tipo de efectos, dado que es un aceite no comestible.

Los líderes mundiales de producción de aceite de palma son Malasia e Indonesia, frente a los cuales la capacidad instalada en Colombia es comparativamente pequeña, tal como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Producción Mundial de Palma Africana



Fuente: Acevedo y Díaz[24]

Prácticamente la totalidad del aceite de palma que se produce en el país es para consumo interno. En 2013 existían 407.000 hectáreas sembradas en Colombia con palma de aceite.[25]

[23] SÁNCHEZ, Martha Elena. Evolución de los Biocombustibles en Colombia y su incidencia sobre el precio de los alimentos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Económicas, Escuela de Economía. Bogotá. 2015.
[24] ACEVEDO Diego, DÍAZ Nidia. Formulación del departamento de investigación y desarrollo para Oleaginosas Las Brisas S.A. Universidad industrial de Santander. Programa de Alta Gerencia. Bucaramanga. 2014.

2.8. ACEITE DE PONGAMIA EN BIODIESEL

El aceite de Pongamia se deriva de las semillas del árbol de Millettia pinnata, que es nativo de Asia tropical y templada. Millettia pinnata, también conocida como Pongamia pinnata o Pongamia glabra, es común en toda Asia y por lo tanto tiene muchos nombres diferentes en diferentes idiomas, muchos de los cuales han llegado a ser utilizados en inglés para describir el aceite de semilla derivado de M. pinnata; Pongamia se utiliza a menudo como el nombre genérico para el árbol y se deriva del género. El árbol se colocó originalmente en otros nombres ingleses para este aceite incluyen aceite de Honge (de Kannada), aceite de Kanuga (de Telugu), aceite de Karanja (de Hindi), y aceite de Pungai (de Tamil).

La Pongamia Pinnatta es un árbol de amplia copa, caducifolio, de la familia de las leguminosas y se encuentra mayoritariamente en Asia. Sus características son las flores rosadas, poseen unas semillas de color marrón ricas en aceite que ha demostrado ser apto para la producción de biocombustibles .

La Pongamia es un tipo de árbol susceptible de crecer en “tierras de desecho” no aptas para cultivo de productos agrícolas ya que puede crecer en zonas arenosas y rocosas, incluida piedra caliza y suelos salinos entre 0 y 1200 metros sobre nivel del mar, soporta temperaturas de 0º a 50º centígrados y lluvias de 200 a más de 2.000 mm anuales, es altamente resistente a las sequías. El árbol tiene una vida productiva de 80-100 años y crece entre 15 y 25 metros de altura.[26]

2.8.1. TRANSESTERIFICACIÓN CATALÍTICA HOMOGÉNEA BÁSICA

Se trata de la reacción más común para producir biodiesel. Se lleva a cabo cuando el contenido en ácidos grasos libres del aceite es inferior al 1%. En el caso de que

---

[25] GUALTEROS, J. Estudio prospectivo de la cadena productiva del Biodiesel a partir de palma africana en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2013.

[23] COLPRENSA @ElUniversalCtgBogotá 3 de Mayo de 2013 12:01 am. Colombia, líder latinoamericano en biodiésel de palma

[26] SANTANA A. E., Obtención de biodiésel por catálisis heterogénea con catalizadores alcalinos. Aceite procedente de cultivos energéticos. Universidad de La Laguna. España. 2017.

el aceite contenga un porcentaje mayor en ácidos grasos libres, sería necesaria una esterificación previa.

Los hidróxidos de sodio y de potasio son los catalizadores alcalinos más empleados debido a su bajo coste. La mezcla del catalizador con el alcohol debe realizarse en condiciones anhidras, para evitar que se produzcan reacciones de saponificación.[27]

Esta reacción se lleva a cabo a bajas temperaturas y a presión ambiental, lo que implica una mayor facilidad a la hora de realizar este tipo de sistemas. En primer lugar, se disuelve el catalizador alcalino (KOH o NaOH) en el alcohol (normalmente metanol) para producir el metóxido de sodio o potasio que reaccionará con el aceite. La mayoría de los catalizadores básicos se encuentran en estado sólido y son poco solubles en alcoholes, por lo que es necesario agitar o incluso calentar ligeramente el alcohol.[ib]

Posteriormente, una vez formado el metóxido, se añade al reactor con el aceite para que dé comienzo la reacción. Como se mencionó anteriormente, si el catalizador libera agua durante la reacción, se pueden producir reacciones de hidrólisis de los ésteres producidos, lo que podría provocar la formación de jabones. Es importante tener en cuenta que las reacciones de saponificación reducen la producción de biodiesel y dificultan su purificación.

También hay que tener en cuenta que la presencia de ácidos grasos libres afecta a los catalizadores básicos, presentando problemas de formación de jabones mediante reacciones de saponificación. Existen diferentes tipos de transesterificación dependiendo de la presencia o no de catalizador, así como del tipo de catalizador empleado.[ib]

[27] SANTANA A. E., Obtención de biodiésel por catálisis heterogénea con catalizadores alcalinos. Aceite procedente de cultivos energéticos. Universidad de La Laguna. España. 2017.

2.8.2. TRANSESTERIFICACIÓN CATALÍTICA HOMOGÉNEA ÁCIDA

El catalizador más utilizado es el ácido sulfúrico, seguidos por el clorhídrico y sulfónico. Los catalizadores homogéneos ácidos presentan una gran ventaja frente a los anteriores, son insensibles a la presencia de ácidos grasos libres y agua. Sin embargo, el proceso de obtención de biodiesel mediante catálisis ácida no es tan popular como la catálisis básica debido a su baja velocidad de reacción, se requieren tiempos extremadamente largos, altas temperaturas de reacción (superiores a 100°C) y grandes cantidades de alcohol.[ib]

2.8.3. TRANSESTERIFICACIÓN CATALÍTICA HETEROGÉNEA

Los catalizadores heterogéneos son aquellos que se encuentran en una fase diferente a la de los reactantes. Es decir, que no se encuentran disueltos en el alcohol o aceite, sino que se encuentran en fase sólida. Por tanto, la reacción se llevará a cabo en presencia de dos fases líquidas inmiscibles (aceite y alcohol) y una fase sólida (catalizador sólido).

Tienen grandes ventajas sobre los catalizadores homogéneos en la transesterificación catalítica para producir biodiesel, ya que se pueden separar fácilmente de la mezcla producto, disminuyendo así las necesidades de agua durante la purificación del biodiesel.[ib]

Los catalizadores heterogéneos pueden ser ácidos o básicos. Sin embargo, a diferencia de los sistemas homogéneos, la adsorción de especies y desorción de productos se lleva a cabo en la superficie del catalizador sólido.[ib]

Se ha demostrado que los catalizadores heterogéneos básicos compuestos por óxidos de metales alcalinotérreos son eficientes en la transesterificación de aceites vegetales, tienen una fuerte capacidad básica y un bajo coste. Este tipo de catalizadores son sensibles a altos contenidos en ácidos grasos libres, siendo necesario un pretratamiento para disminuir su contenido, y así mantener buenos rendimientos de la reacción[ib]

Los catalizadores heterogéneos ácidos tienen la capacidad de catalizar las reacciones de esterificación y transesterificación simultáneamente. Esto se debe a que este tipo de catalizadores no se ven afectados por la presencia de agua o de ácidos grasos libres. Además, con estos catalizadores se elimina la etapa de lavado del biodiesel, se minimizan los problemas de corrosión y son fácilmente regenerables.

El biodiesel se produce por una reacción de transesterificación entre grasas o aceites con alcohol para formar ésteres y glicerina en presencia de un catalizador. También es conocida como alcohòlisis. La reacción se produce en tres etapas, primero los triglicéridos se convierten en diglicéridos, luego a mono y al final a glicerol. La razón por la que se hace reaccionar los aceites mediante una reacción de transesterificación es para disminuir la viscosidad de los aceites.

Los alcoholes más utilizados son el metanol y el etanol por sus características físicas y químicas y por su bajo coste. También reaccionan rápidamente con los triglicéridos, para realizar la reacción de transesterificación se necesita una relación molar de 3 moles de alcohol por 1 mol de triglicérido. Para catalizar la reacción se puede utilizar ácidos, bases o enzimas como por ejemplo NaOH o ácido sulfúrico. La reacción utilizando catálisis básica es unas 4000 veces más rápida que utilizando catálisis ácida, por eso en la mayoría de transesterificación que se producen industrialmente utiliza catálisis básica. Los aceites vegetales contienen ácidos grasos libres (FFA) y agua, que pueden reaccionar con el catalizador básico (NaOH) formando jabones.

La producción de esta reacción de saponificación no es deseable ya que hace bajar la producción y produce jabones, cuyo contenido se encuentra limitado por la normativa. Para evitar la formación de jabones, los aceites que contienen más cantidad de FFA reciben un pretratamiento que consiste en la esterificación de estos FFA para formar metil esteres catalizando la reacción con ácido sulfúrico.

Normalmente la reacción de transesterificación se produce entre 60 y 70ºC a presión atmosférica (a una temperatura próxima a la temperatura de ebullición del

metanol). En estas condiciones debe hacerse pretratamiento de esterificación para eliminar los FFA. Estudios recientes han demostrado que trabajando en condiciones supercríticas de metanol se puede trabajar sin utilizar ningún catalizador y la purificación de los productos se simplifica. Pero trabajar en condiciones supercríticas supone trabajar a temperaturas entre 525 y 685 K y presiones entre 35 y 60 MPa.

El glicerol ($C_3H_8O_3$) es uno de los productos principales de la reacción de transesterificación. Esto ha causado una saturación en el mercado de glicerina. En Europa, el año 2012 se produjeron más de 1,2 millones de toneladas. Debido a esta saturación, un porcentaje de esta sustancia se ha considerado como residuo.

La glicerina tiene una densidad de 1,261 g / cm3 y un punto de fusión de 18ºC.

Sus aplicaciones son variadas, las más habituales son fabricación de resinas, cosméticas y farmacéuticas. Para utilizarla para aplicaciones farmacéuticas se requiere una pureza alta que no tiene la glicerina que se obtiene en el proceso de producción de biodiesel.

Para poder utilizar la glicerina obtenida en la producción de biodiesel, se deberá purificar para eliminar las impurezas. El proceso más habitual es la combinación de la recuperación del metanol mediante una destilación y una eliminación de las sales utilizando una columna de intercambio iónico y adsorción utilizando carbón activo.

El biodiesel obtenido deberá cumplir la normativa que marque el país en el que se produce y / o consume.

Contenido de agua: Un contenido demasiado alto de agua puede provocar problemas de corrosión, favorecer el crecimiento de microbios que pueden obstruir el motor y una disminución el rendimiento energético.

Número de cetano: Es un parámetro que indica la calidad de la combustión. Un número de cetano demasiado bajo indica una mala combustión y la necesidad de más tiempo para que comience la ignición.

Viscosidad: La viscosidad es una propiedad importante para que el motor funcione correctamente y el biodiesel fluya correctamente.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. CONTEXTO AMBIENTAL Y LEGISLATIVO

Algunos de los niveles de emisiones que exigen los convenios internacionales para la protección del medio ambiente no pueden cumplirse con los motores de combustión interna que equipan a los actuales vehículos de transporte público o privado[28]. Debido a estas reglamentaciones en la comunidad europea y en los Estados unidos, en Colombia se hace reforma a la ley de Tránsito por Vías Públicas Terrestres, considerando las nuevas políticas internacionales sobre la emisión de gases y la antigua reglamentación nacional, se decreta el reglamento para el control y Revisión Técnica de las emisiones de gases contaminantes producidas por Vehículos Automotores[29].

3.2. EL VEHÍCULO HIBRIDO

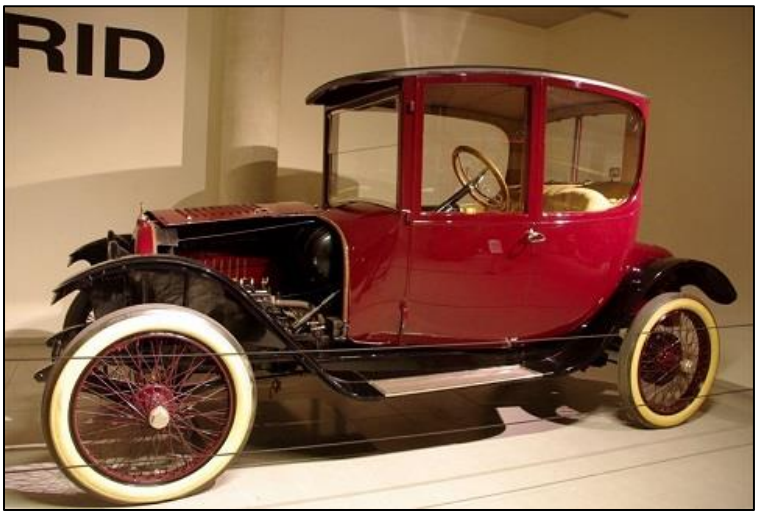
Puede decir que los autos eléctricos ya existían desde la época de 1917, se trataba de un auto de marca Ford que era 100% eléctrico y del cual solo quedo un solo vehículo.[30]

[28] CIFUENTES, Luis. Programa Piloto para el Sistema de Compensaciones de la Región Metropolitana. Diseño de Metodologías de Compensación de Emisiones para Chatarrización de Fuentes Móviles. Santiago, Chile. 2009. p.24

[29] COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Decreto 3422. Por el cual se reglamentan los sistemas de transporte públicos de conformidad con la ley 1151 de 2007. 9, septiembre, 2009.

[30] LÓPEZ, Carlos. Historia del auto eléctrico. Club de autos eléctricos de Chile. 2 de agosto de 2010. [En línea]. Documento electrónico. Consultado en marzo 10 de 2015. Disponible en http://www.autos electricos.cl/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=37&Itemid=60

Figura 7. Woods Dual Power, coche híbrido de 1917



Fuente: Prieto.[31]

El Woods Dual Power fue un automóvil equipado con un motor a gasolina y cuatro cilindros ubicado en la parte delantera y que proporcionaba una potencia de 12 CV; sin embargo, su motor principal era eléctrico y era movido por baterías ubicadas en su parte posterior, permitiéndole alcanzar una velocidad de 30 km/h.[32]

Sin embargo, fue solo hasta comienzos de la década de los noventa cuando se empieza la producción en serie de este híbrido, como consecuencia de la necesidad de disminuir los gases de combustión que son los creadores del efecto invernadero[33]. Hoy en día las marcas más importantes y hasta las de alta gama, se preocupan por estar a la vanguardia sin dejar atrás su aporte a la disminución de gases de automotores en el mundo. El vehículo eléctrico es comercializado exitosamente en países como, Reino Unido, Italia, España, Irlanda, Noruega y Chile[34] y muchas de las grandes ciudades de estos países han tenido que

[31] PRIETO, Maria. Un coche híbrido de 1917. [En línea]. Disponible en Internet. Consultado en marzo 12 de 2015. http://blocly.com/motor-giga/un-coche-hibrido-de-1917/gmx-niv119-con661.htm
[32] PRIETO, Maria. Óp. Cit.
[33] GUILLEN F. ¿Puede España Liderar el desarrollo del sector de vehículos eléctricos? Guía del vehículo eléctrico. Fundación de la energía de la comunidad de Madrid 2009. p.39.
[34] El Tiempo. Redacción vida hoy. de agosto de 2010. Óp. Cit.

reformar su sistema eléctrico de modo que se pueda cumplir con la demanda de vehículos eléctricos. Ejemplos de primera mano se encuentran, en Estados Unidos la ciudad de Portland, Oregón, que en 2010 ya era la primera ciudad de Estados Unidos en contar con una estación pública para recargar vehículos eléctricos, teniendo la capacidad de recargar cerca del 80% de una batería de ion-litio en 30 minutos, lo cual es considerado una recarga bastante rápida y puede brindar una autonomía de hasta 480 Km. en los modelos más avanzados de vehículos eléctricos[35].

Los efectos que el cambio climático produjo han incidido en que las leyes en los diferentes países establezcan limitaciones en las emisiones admisibles[36], lo cual ha ocasionado que las empresas debieran comenzar a crear esta clase de vehículos; pero esto no para ahí, dado que las ciudades y las poblaciones deben prepararse para la llegada de esta innovación. De ahí las propuestas de las empresas como es el caso de la General Electric y NEC, que piensan dar el servicio de recargas vehiculares de manera gratuita por el momento, lo que se suma a las iniciativas de países en Europa que, con el propósito de incentivar el uso de esos vehículos, han comenzado a colocar estaciones de recarga en las ciudades más importantes.[37]

En Colombia hasta hace un par de años esta tecnología no era del todo conocida, entre otras razones porque el precio de la gasolina no era tan alto como en los años recientes ni había tanto interés por la protección del medio ambiente; en estos momentos no se han abierto las puertas para una libre comercialización de estos vehículos, lo que los hacen muy costosos y de difícil alcance por el

[35] GORDILLO, J. Development and Implementation of a Hybrid Photovoltaic System for Energy Back-up, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2009.
[36] En Colombia el marco jurídico que integra la regulación del sistema ambiental y el control de emisiones incluye la Ley 2811 de 1974, la Ley 44 de 1993, la Ley 99 de 1993, la Ley 23 de 1995, la Ley 788 del 2002. IDÁRRAGA, Obed. Disposición final de los desechos producidos por la Industria Textil en Bogotá. Colegio Mayor de Cundinamarca. Facultad de Administración de Empresas y Economía. Bogotá. 2014.
[37] RAHIMI Eichi, ZENG H., CHOW M. Estudio sobre la Electrificación de Transporte en un Marco de Ambiente Inteligente. Informática Industrial. IEEE. Buenos Aires. 2011.

momento. Sin embargo, muy posiblemente en poco tiempo exista oferta de vehículos eléctricos importados; en marzo de 2011 se anunció que Renault y Endesa, a través de Codensa, impulsarán la implantación de los vehículos eléctricos en Colombia.

3.3. USO DEL PETRÓLEO

A través de los tiempos, el hombre ha requerido evolucionar a raíz del consumo de energía, a medida que aumenta la tecnología y la necesidad de mejorar su calidad de vida, utilizando nuevas técnicas y recursos que contribuyan con la generación de energías, Para ello, los seres humanos han implementado el uso del petróleo el cual es un compuesto químico formado por hidrocarburos, es la formación de hidrogeno y pequeñas porciones de nitrógeno, azufre, oxígeno y algunos metales, el cual es formado de forma natural en la profundidad de la tierra.

La estructura del suelo en el cual se encuentra el petróleo debe cumplir una serie de condiciones que permitan la formación del mismo, provienen de zonas profundas de la tierra o mar, donde se acumularon restos de organismos vivos y o especies vegetales que junto con grandes rocas formaron depósitos sedimentarios generadores de crudo, en condiciones de presión y temperatura ideales para la formación de hidrocarburos con pequeñas cantidades de otros elementos; La composición elemental del petróleo está comprendida en (84 – 87) % de carbón, (11-14)% de hidrogeno, (0 – 2)% de azufre y 0,2% de nitrógeno.

La producción de petróleo a nivel mundial surgió en el año 1859 por Edwin L. Drake quien perforo el primer pozo con el propósito de extraer el petróleo para la generación de kerosina para la iluminación, Por lo general, el petróleo tal y como se extrae de los pozos no sirve como energético ya que requiere un proceso para su uso, pues el crudo en sí está compuesto de hidrocarburos de más de cinco átomos de carbono, es decir, hidrocarburos líquidos. Por lo tanto, para poder aprovecharlo como energético es necesario separarlo en diferentes fracciones que constituyen los diferentes combustibles como la gasolina, turbosina, diésel, gasóleo ligero y gasóleo pesado.

Para la separación del petróleo y la formación de los principales productos que sirven para la generación de la energía, se implementa el proceso de separación en las refinerías petroleras para ello, primero se calienta el crudo a 400°C para evaporizarlo y enviarlos a las torres de destilación, subiendo el vapor por las torres enfriándose y condensándose en distintas fracciones cada una de las cuales posee una temperatura específica de licuefacción.

De acuerdo al tipo de crudo que se esté procesando, la primera fracción es la que contiene los hidrocarburos que constituyen los aceites lubricantes y las parafinas, y los residuos son los que tienen los asfaltos y el combustóleo pesado.

Además, en este mismo siglo otro de los grandes desarrollos fue el diseño del motor de combustión interna en el año de 1876 por el ingeniero Nicolaus A. Otto. Éste diseño se hizo famoso en todo el mundo como máquina para el accionamiento de vehículos, trenes, barcos y aviones; a la vez sirvió como punto de referencia al ingeniero Rudolf Diésel para desarrollar entre los años de 1893 y 1897 el diseño y construcción del primer motor del mundo que quemaba aceite vegetal (Aceite de palma) en ambientes de trabajo; es hasta medidos y a finales del siglo XIX que se empleaban muchas fuentes de energías renovables.

Al momento de seleccionar un combustible debe tenerse en cuenta que los derivados del petróleo se fraccionan en las refinerías para obtener diferentes sustancias, cada una de las cuales está compuesta de diferentes moléculas de carbono, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Moléculas de carbono según el tipo de combustible

Fracción	Moléculas de Carbono
Gas no condensable	C, C_2
Gas licuado	C_3, C_4
Gasolina	C_5, C_9
Kerosene	C_{10}, C_{14}
Gasóleo	C_{15}, C_{25}
Lubricantes y parafinas	C_{20}, C_{35}

Fracción	Moléculas de Carbono
Combustóleo pesado	C_{25}, C_{35}
Asfaltos	$>C_{39}$

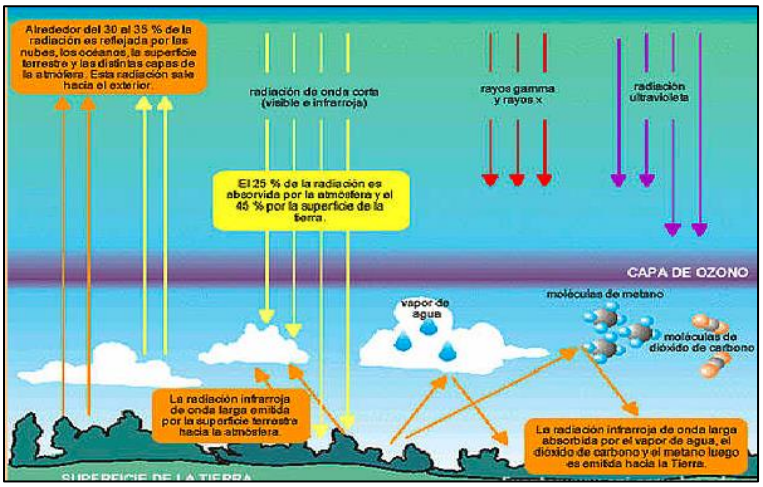
Fuente: Instituto Latinoamericano de Comunicación Educativa [38]

Como se mencionó inicialmente, la gasolina o el diésel es el combustible que tiene mayor demanda; debido al incremento para la obtención y sostenibilidad por el crecimiento socioeconómico, el aumento en la población mundial, han generado un alto consumo en los recursos fósiles (Petróleo, carbón, gas natural y sus derivados), a raíz de esto empezó a ser un problema por los altos niveles de contaminación por emisiones de material particulado al utilizar el petróleo como fuente de energía. Dentro de los contaminantes que existen en la atmósfera, se identifican 5 contaminantes que afectan a la salud inmediatamente desde su inhalación los cuales son el monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono troposférico (O_3) y material particulado con diámetro aerodinámico menor a 10 μm (PM10). Además de éstos, se incluye al CO_2 (dióxido de carbono) por su aporte al efecto invernadero.

Uno de los problemas de mayor importancia a nivel mundial es el cambio climático que está principalmente atribuido a las emisiones de CO_2 y CH_4 generados principalmente por la combustión, la acumulación de gases en la atmósfera forma una capa que evita el intercambio energético entre los rayos emitidos por el sol y la tierra (entrada y salida) y eso hace que se acumule energía entre la tierra y la capa de ozono. Así, la temperatura aumenta dando como resultado un invernadero alterando los ciclos naturales, los ecosistemas, así como la química y física de los gases en la atmósfera.

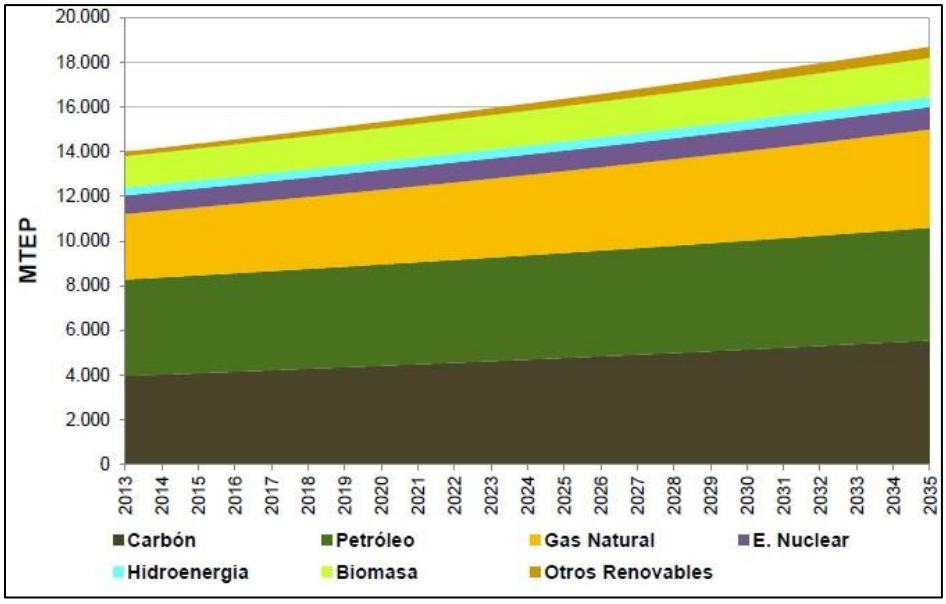
[38] CHOW, Susana. Separación del petróleo en sus fracciones. 2016. [On line]. Disponible en Internet. http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/ volumen1/ciencia2/39/html/sec_9.html

Figura 8. Emisiones y efectos en la capa de ozono



A pesar de esta situación, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la eferencia.** se presenta la proyección del consumo mundial de energía primaria para los próximos 20 años, en la cual se puede observar la tendencia creciente de esta demanda.

Figura 9. Proyección del consumo mundial de energía primaria



Fuente: World Energy Outlook[39]

Como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la emanda de carbón aumenta cerca de 1.650 Millones de Toneladas Equivalentes de Petróleo MTEP, equivalente al 42,4% en el período 2013 a 2035, con un crecimiento medio anual de 1,6%, al pasar de 3.900 a 5.560 MTEP. El gas natural es la fuente de mayor tasa de crecimiento dentro de este tipo de energéticos, con 1,94% y un aumento de 52,7% al pasar de 2.880 a 4.400 MTEP al final del horizonte de estudio. En cambio, el petróleo es el energético fósil que registra la menor tasa de crecimiento con 0.74% promedio año, perdiendo tres puntos porcentuales con respecto a 2012, al alcanzar una participación relativa de 27% en 2035 y cediendo el primer lugar al carbón.[40]

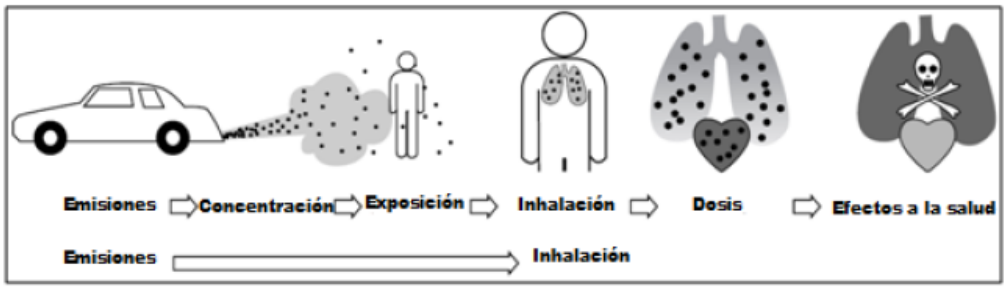
Hoy en día en Colombia, se encuentra en un crecimiento amplio en el transporte público, en el cual cuenta con sistemas de transporte tales como en Bogotá (SITP, Transmilenio); barranquilla (transmetro); Bucaramanga (metrolinea); Cali (Mio); Cartagena (SITMC); Medellín (Metroplus); Pereira (Megabus); los cuales son causales del 74% la contaminación del aire el cual es uno de los problemas más serios en el país además porque afecta directamente al aire, en su mayoría en las ciudades en desarrollo, es uno de los factores que impactan altamente esta contaminación, estos riesgos aún no han recibido la mayor atención o no se han llegado a implementar acciones que contribuyan a la disminución de la contaminación ambiental, los efectos son caudados por la concentración del contaminantes en altas cantidades concentración del contaminante (masa por

[39] Work Energy Outlook. Washington. 2012. E.I.A.

[40] Work Energy Outlook. Óp. Cit.

tiempo), fracción inhalada (masa inhalada por masa emitida) y toxicidad (impacto a la salud por masa inhalada).[41]

Figura 10. Relación entre contaminación del aire y efectos de las emisiones en la salud



Fuente: Marshall & Nazaroff[41]

Debido a la gran problemática que está expuesta anteriormente, se quiere contribuir con la disminución de estas emisiones que impactan el aire y el medio ambiente, para ello se piensa utilizar el aceite de pongamia, como biocombustible. El uso de los aceites vegetales como combustible no es poco común para el mundo; Rudolph diésel ya utilizaba aceite de maní en los motores inventados por él, en los años 1930, Sin embargo, la utilización de esos aceites para los motores diseñados tuvo demasiados problemas con el uso de estos en su mayoría en los motores diésel de inyección directa, y el bajo precio del petróleo obligo a utilizar este último.

3.4. USO DEL BIODÉSEL

A lo largo de los años, aumentaron las investigaciones y los desarrollos realizados para utilizar aceites a cambio del diésel, a raíz de esto nació el biodiesel, ya que este es un aceite vegetal modificado se puede describir como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas de animales, y que se emplean en motores

[41] MARSHAL J y NAZAROFF W. Environmental Engineering Science, New York. 2006. John Wiley & Sons.

de ignición de compresión, con unas propiedades muy parecidas a las del diésel convencional.

Este producto se utiliza actualmente en más de 25 países de todo el mundo. El biodiesel es el biocarburante de mayor implantación en el viejo continente, con un porcentaje cercano al 80% del total de la producción, según Eurobserv'eR. De hecho, la Unión Europea es la principal región productora de este producto, que cuenta ya con 11 países de gran producción. En el año 2007 la producción mundial de biodiesel se incrementó en un 29,6%. De la cantidad total producida (47,4 millones de toneladas), 39,5 corresponden a la producción de bioetanol, en la que Estados Unidos se encuentra a la cabeza con 19,5 millones de toneladas, seguido de Brasil con 14,9 millones, la Unión Europea con 1,8 millones y China con 1,27 millones. La producción total de biodiesel registrada en 2007 fue de 7,9 millones de toneladas, situándose como principal productor Alemania con 2 millones de toneladas, seguido de Estados Unidos con 1,2 millones, Francia con 1,15 millones e Italia con 550.000 toneladas. [42]

Colombia diariamente tiene un alto consumo aproximado de 90 mil barriles de diésel o a.c.p.m por tal razón, el gobierno expidió la Resolución 1289 de 2005, en la cual se establecieron los requisitos técnicos y ambientales del biocombustible para uso en motores diésel y sus mezclas con diésel de origen fósil, con el fin de disminuir los impactos ambientales que son ocasionados por cuya base fundamental fueron las normas técnicas y los estándares mundiales fijados en la materia a nivel mundial. En dicha Resolución se estableció que a partir del 1º de enero del año 2008 en las principales ciudades del país se debería distribuir mezclas de 5% de biocombustible para uso en motores diésel (biodiesel) como un 95% de diésel de origen fósil. Los resultados obtenidos mediante esa política, han

[42] HERRERA, Juan; VELEZ, Julián. Caracterizacion Y Aprovechamiento Del Aceite Residual De Frituras Para La Obtencion De Un Combustible (Biodiesel). Trabajo de Grado Tecnólogo Químico. Pereira. Universidad Tecnológica De Pereira. Facultad De Tecnología. Tecnología Química. 2008.

hecho que Colombia sea en la actualidad el segundo productor de biodiesel en Latinoamérica.[43]

3.5. PRODUCCIÓN DE PONGAMIA

BioEnergy Plantations Australia, una empresa dedicada a la plantación de pongamia,[44] publica una función de crecimiento de la biomasa en donde la principal variable es la edad de la planta (Ecuación 1)

Ecuación 1.

$$W(t) = K \exp(\log((W(0))/K)\exp(-;t))$$

Fuente:Stucley.[id]

En donde:

W: Es el peso de la biomasa de la pongamia en cada etapa de crecimiento (edad) del árbol.

t: Es el tiempo en años del crecimiento del árbol (edad) que abarca más de 40 años.

W (0) es el tamaño del árbol joven en la siembra;

K: Es el peso máximo de un árbol de pongamia en una plantación de secano (es decir, no irrigada) plantado a la densidad de siembra especificada. En otras palabras, K es el tamaño máximo que el árbol puede alcanzar en su madurez bajo las condiciones agroclimáticas y edáficas especificadas, y en presencia de la competencia de otros árboles de pongamia, malezas y pastos del sotobosque pastoreadas por ovejas. También depende de los regímenes particulares de nutrición y de gestión agronómica que se le imponen.

---

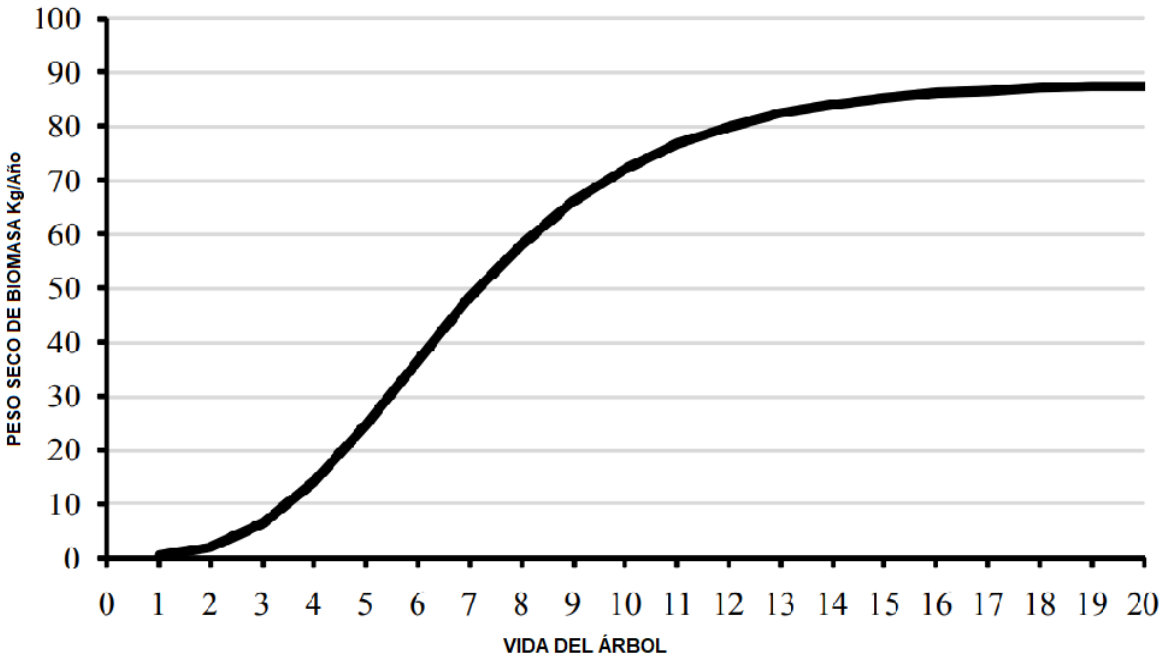
[43] BOTERO M., PÉREZ L., ALZATE, C. Efecto del cambio en el uso de la tierra devenido del cultivo de palma aceitera para la producción de biodiesel en Colombia. 2014. Ingeniería y universidad, 18(1), 91-102.

[44] STUCLEY C., SHUCK S., SIMS R., BLAND J., MARINO B., BOROWITZKA M., ABADI A., BARTLE J., GILES., THOMAS Q., Bioenergy In Australia, Satus and Opportunities. Surrey Hills, Australia. 2012.

A: Es una constante que determina la tasa de crecimiento del árbol. Su valor se establece en el valor que dará como resultado el peso máximo de biomasa sobre el suelo (valor K) para una edad particular observada para el árbol de pongamia.

log (): se refiere al registro natural.

Figura 11. Crecimiento de biomasa de pongamia



Fuente:Stucley.[id]

3.6. COSECHA

Se puede cosechar mecánicamente a través de una cosechadora Colossus que está por el orden de $900.000 USD y un equipo de poda durante los primeros tres años[45]. Para una plantación de 500 hectáreas el costo promedio (teniendo en cuenta un rendimiento de 20 Kg por árbol) es de alrededor de $0,06 USD.[id]

[45] STUCLEY C., SHUCK S., SIMS R., BLAND J., MARINO B., BOROWITZKA M., ABADI A., BARTLE J., GILES., THOMAS Q., Bioenergy In Australia, Satus and Opportunities. Surrey Hills, Australia. 2012.

3.7. TRITURACION

La planta de trituración se debe construir al tercer año de iniciada la plantación, de esta forma un año después entrará a triturar la primera cosecha Esta planta procesa un promedio de 3.345 toneladas de semilla con cáscara (1.672 toneladas de semilla sin cáscara) cada año bajo el escenario de rendimiento de 20 kg de semilla por árbol (7 toneladas por hectárea). La primera cosecha tiene la producción más baja a 752 toneladas de semilla con cáscara. En años de lluvia favorable, se necesita la máxima capacidad de la planta, con más de 4.600 toneladas de semilla con cáscara. El costo de operación de la planta es estimado en $0,27 USD por litro de aceite extruido para un año promedio de producción. [46]

[46] STUCLEY C., SHUCK S., SIMS R., BLAND J., MARINO B., BOROWITZKA M., ABADI A., BARTLE J., GILES., THOMAS Q., Bioenergy In Australia, Satus and Opportunities. Surrey Hills, Australia. 2012.

4. METODOLOGÍA

El desarrollo de los cuatro objetivos previstos para el análisis de la viabilidad de la producción de biodiesel en Colombia a partir de la pongamia, exige el empleo de la metodología cualitativa, pues esta permite profundizar en la comprensión de las cualidades que caracterizan el problema objeto de la investigación.[47]

Cada uno de esos objetivos requiere diferentes fuentes y procedimientos, tal como se describe en la Tabla 2.

Tabla 2. Fuentes y procedimientos para el desarrollo de los objetivos

Objetivo	Fuentes	Procedimientos
Identificar ventajas y desventajas de la producción de biodiesel a partir de pongamia a nivel mundial	Se consultaron publicaciones internacionales a través de las cuales se haya analizado la producción e este combustible	Se analizaron los aspectos social, económico, técnico y legislativo involucrados en la producción de biodiesel a partir de pongamia
Identificar el grado de madurez de la tecnología requerida para la producción industrial de biodiesel a partir de pongamia	En primer lugar. se estudió la tecnología utilizada para el proceso productivo de biodiesel a partir de pongamia	Se estudiaron publicaciones que describan los diferentes procesos productivos requeridos, así como los equipos necesarios
	En segundo lugar, se buscaron otros procesos industriales que empleen equipos y tecnologías similares	Se consultó el grado de evolución de esas tecnologías a nivel nacional
Identificar el impacto ambiental generado por	Se consultaron estudios sobre aspectos botánicos	En primer lugar, se estudiaron las

[47] HERNÁNDEZ SAMPIERI, R. Metodología de la Investigación. Bogotá. 2010. Editorial McGraw Hill.

Objetivo	Fuentes	Procedimientos
la producción de biodiesel a partir de pongamia desde el cultivo hasta la comercialización del biodiesel.	y agrícolas que se hayan publicado sobre el cultivo de pongamia	implicaciones ambientales del cultivo, así como los cuidados en aspectos como plagas, condiciones climáticas, exigencias del terreno, y demás aspectos que puedan afectar el resultado de esa fase del proceso
	Se consultaron publicaciones sobre la fase de refinación del biodiesel a partir de pongamia	Se analizó el ciclo de vida del proceso productivo de biodiesel a partir de pongamia para identificar las entradas y salidas que genera
Elaborar un artículo científico que recoja los hallazgos del presente trabajo.	Trabajo con los objetivos desarrollados	Se resumió el trabajo desarrollado bajo la estructura de un artículo académico

Fuente: elaboración propia

5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE LA PONGAMIA A NIVEL MUNDIAL

Con el vocablo biocombustible se designa cualquier clase de combustible que se genere de los productos obtenidos por fotosíntesis, susceptibles de ser transformados en combustible y que sean de utilidad para el hombre, los cuales están expresados en unidades de superficie y volumen, su energía surge de los componentes vegetales y animales, por ejemplo, los troncos de los bosques, los desechos de tratamientos agrícolas y agrestes, los desperdicios del sector productivo, humano o animal.

Por lo tanto, los combustibles de procedencia biológica permiten reemplazar en cierta proporción el uso de los combustibles fósiles habituales, los biocombustibles más utilizados son el bioetanol y el biodiesel. El bioetanol se produce en base al maíz, sorgo, caña de azúcar o remolacha, mientras que el biodiesel se produce en base a aceites vegetales. El primordial fabricante de biodiesel a nivel mundial es Alemania quien consolida el 63% de la producción, posteriormente está Francia con el 17%, Estados Unidos genera un 10%, Italia el 7% y Austria con el 3%.[48]

Los biocombustibles hoy en día simbolizan la base de la energía sustituible conformando la posible opción que permita reemplazar los combustibles fósiles e igualmente pueden producir novedosos y enormes mercados para el sector agrícola.[49]

India, junto a Australia, son los países que ha realizado especialmente nuevo repoblamiento en sus terrenos con la variedad de árboles de pongamia pinnata del cual su semilla es considerada la materia prima de mejor calidad para la

[48] *Analisis IBEPA* [online]. 2008, vol.1, n.1 [citado 2017-10-26], pp. 6-8 . Disponible en: <http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1999-62332008000100002&lng=es&nrm=iso>. ISSN 1999-6233.

[49] HERNÁNDEZ M., y HERNÁNDEZ, J. Verdades y mitos de los biocombustibles. Ciencia y cultura elementos. 2008. pp. 15-18.

fabricación de biodiesel. Este fruto es muy atractivo, debido a la variedad de usos en los que se aplica, al igual que posee la ventaja de que para su cultivo se puede acondicionar a variadas categorías de circunstancias climáticas. Su siembra ha sido considerada para ser utilizada en varias funciones en los países del continente asiático desde la antigüedad, pero su cultivo a gran escala se inició posteriormente de que se descubriera la condición que posee dicha planta para fabricar el biodiesel. La empresa norteamericana TerViva inició en Mayo de 2017 un cultivo de 150 hectáreas en Maui, Hawái. Aún se desconocen datos de este cultivo por lo reciente de su siembra, sin embargo es un precedente importante de cara a la producción comercial en un futuro no muy lejano.[50]

En el sector donde se siembra esta planta, se desarrolla en entornos húmedos o sub-húmedos, pero igualmente, soporta ser cultivada en climas calientes y secos. Las temperaturas que tolera son desde menores de 0 °C a 50 °C, se aclimata en suelos arcillosos, polvorientos, pedregosos e igualmente la raíz del árbol puede tener roce con agua salada, también puede crecer encima de piedras calizas, en ciertas ocasiones se consigue a la orilla de los manglares.[51]

En cuanto a la dimensión del árbol es bastante mediano, posee la ventaja de que es un árbol que asegura la producción de nitrógeno, es más comúnmente conocido como karanja, karum y kanji, crece en zonas con una precipitación de 500 mm a 2500 mm al año y puede subsistir con 200 mm en el año, pero el grado máximo se reconoce en cifras por encima de 1000 mm. En el medio donde crece las temperaturas más altas varían entre 27°C y 38°C, resiste temperaturas hasta de 50°C, y las más bajas son entre 1°C y 16°C, es resistente a las heladas. Un único árbol produce entre 9 y 90 kg de semilla cada año, generando una productividad entre 900 y 9000 kg semillas/ha., las semillas poseen internamente

[50] MAI, HJ. A&B Partners With California-Based Company To Grow Energy Crop On Former Maui Sugar Land. En: Pacific Business News. Junio 21, 2017.

[51] KUBOTA V., GÓMEZ M., DE ORTÍZ, M. Estudio de germinación de semillas de pongamia pinnata (L.) Pierre. Investigación Agraria. 2013. V 11 N2. pp. 45-48.

de un 30 a un 40% de aceite que se puede transformar en biodiesel, dicho aceite que no es apto para el consumo humano es denso, el color es amarillo-naranja, agrio y no secante, tradicionalmente se utiliza para curtir cueros, para jabones y el aceite que se utiliza para el alumbrado.[52]

La pongamia se produce en la India, Indonesia, Malasia y Myanmar, ha encajado de buena manera en llanuras húmedas tropicales a nivel mundial y en áreas de Australia, China, Nueva Zelanda y Estados Unidos, generalmente se cultiva como un árbol decorativo y que genere sombra, sus semillas se usan para extraer de ellas un aceite comercial, en la India se está estudiando la factibilidad de usar dicho árbol para extraerle biocombustibles líquidos.

Dentro de las ventajas que posee dicho árbol en variados aspectos, están las que se mencionan a continuación.

5.1. IMPORTANCIA INDUSTRIAL

Esta plantación en terrenos infértiles, otorga mayores posibilidades para las industrias que se dediquen a sacar de los frutos aceites vegetales para convertirlas en biodiesel, también para industrias químicas y farmacéuticas, gracias a la cantidad de elementos que constituyen la pongamia como por ejemplo para la elaboración de bio-insecticidas, bio-reguladores o de medicina alternativa para su comercialización.

Dentro de los alcaloides que contiene la pongamia se encuentran: demethoxikanugina, gamatay, blabrina, glabosaponina, kaempferol, kanjone, kanugina, karanjina, neoglabrina, pinnatina, pongamol, ponganina, quercitina, saponina, beta-sitsterol y tanino.

Las semillas que son más nuevas en su recolección y que se secan con el aire, generan una composición media de 16% de humedad, 34% en grasas, 28% en

[52] SILVIA, F. y BERNABÉ M. El reemplazo del cultivo de jatropha curcas en Argentina por Pongamia Pinnata. Buenos Aires: Congreso Brasilero de meteorología. 2009.

proteínas, 10% en fibra, 8% en almidón y 4% en cenizas. Igualmente, quedan las harinas que poseen un gran nivel en proteínas y otras utilidades alimenticias para los animales. También esta planta es productora de biomasa, la cual dentro de los mismos sembrados se puede tratar densificándola en pellets o briquetas, es decir comprimiendo la biomasa a presión para conformar los pellets, los cuales se pueden comercializar a un mejor precio.

5.2. IMPORTANCIA ECONÓMICA

El aspecto de mayor trascendencia en cuanto al beneficio económico que pueda dar la plantación de pongamia es la parte social, ya que estos cultivos los pueden tomar grupos familiares en zonas templadas y en terrenos áridos o deforestados, la dimensión de terreno para un grupo familiar conformado por 3 o 5 personas se fija en unas 10 hectáreas, cuya rentabilidad promedio en el año puede ser en 20.000 kg/ha, el valor de venta a una fábrica procesadora se calcula entre 90 y 110 dólares, teniendo como referencia el valor de la palma aceitera. Los ingresos brutos por hectárea no son representativos con relación a otros cultivos como la caña de azúcar, la palma aceitera y la mandioca, si generan representatividad los ingresos netos. Puesto que los costos y gastos en los que se invierten para el cultivo de la pongamia son más reducidos que los que hay que invertir para otro tipo de plantas.

Si un agricultor toma la alternativa de sembrar pongamia en grandes cantidades como opción frente a otras oleaginosas, y con un proyecto empresarial en proporciones de tener planta laboral, se espera obtener un promedio de 60 toneladas de pongamia por hectárea lo que conlleva a considerar unos ingresos brutos de 6000 dólares por hectárea, y los gastos se aumentan a 3000 dólares. Estos gastos salariales están apoyados en base a los costos que se manejan en el sector agrario en el norte de África, España y el resto de la Unión Europea, requiriéndose poner en funcionamiento el trámite de las tareas agrícolas para equilibrar el alza en los costos salariales.

Plantar pongamia produce un incremento en la contratación de mano de obra con un promedio de entre 80 y 100 trabajadores directos y entre 20 y 25 trabajadores indirectos por hectárea al año, en el período de producción donde ha alcanzado su desarrollo completo. Los costos para dar trabajo a un puesto fijo en la siembra varían entre los 4.000 a los 20.000 dólares, y la inversión para establecer en un sembrado una hectárea de cultivo de pongamia hasta el cuarto año, que es donde se inicia el período preliminar fértil va entre los 2.000 y los 10.000 dólares. De igual manera, el agricultor que se dedica a este cultivo cuenta con 6 a 10 toneladas por hectárea de biomasa que surge de las limpiezas o podas, la cual genera también ingresos para quien se encuentra cultivando.

El aceite que emana se usa como lubricante, para comprimir pinturas de agua, para destruir plagas de animales y plantas, y también como componente para la elaboración de jabones y curtidos. Se conoce de la utilidad terapéutica ya que se utiliza para atender problemas de reumatismo y algunas enfermedades en la piel, de igual forma se ha establecido que es una fuente aceptable para la progresiva industria de los biocombustibles. Este árbol no genera semillas de manera rápida, por lo tanto, la obtención de aceite no es procedimentalmente factible hasta que no pasan cuatro años después de haberlo plantado. La productividad de las semillas está dada en un aproximado de 10 a 15 kg/árbol, lo que representa unos 2000 a 4000 litros de biodiesel/ha, algunas colectividades rurales han extraído biocombustible de pongamia a un bajo nivel.

Abadi[53] reconoce que se sabe muy poco de la producción de pongamia a nivel industria, sin embargo, señala que para rendimientos anuales de semilla que oscilan de 20 a 80 kg por árbol, el costo del aceite de Pongamia se estima entre $2,22 USD $0,5 USD por litro. El rango de rendimiento de semilla de 20 a 80 kg por árbol es aproximadamente equivalente a entre 7 y 29 t por hectárea a una densidad de siembra de 357 árboles por hectárea. Los principales rubros que

[53] Abadi A, Maynard H, Arpiwi N. Economics of oil production from Pongamia (Millettia pinnata) for biofuel in Australia. En: BioEnergy Research. Septiembre, 2016, vol. 9. p 874–883

componen el costo del biodiesel son los gastos de capital de la compra de terrenos, el cultivo de las plantaciones y la construcción de la planta de trituración. Los principales costos operacionales incluyen la cosecha mecánica; fertilizantes (que para el caso de la pongamia es un costo muy bajo); control de malezas, plagas y enfermedades; trituración de semillas; refinamiento. Los rubros de costo relacionados directamente con el volumen son los gastos de capital, los gastos generales (que consisten principalmente en sueldos y salarios de los empleados) y los gastos asociados con las operaciones de cosecha y trituración. Estos costos podrían reducirse significativamente si se pudiera aumentar el rendimiento de semilla.

Por otro lado, Klein[54] hace un análisis sobre el uso del cultivo de pongamia, caña de azúcar y microalgas para la producción de combustibles en la industria de la aviación, concluyendo que las biorrefinerías de procesamiento de las microalgas, semillas de Pongamia, y materiales de alimentación de caña de azúcar serían competitivas con el petróleo crudo en $1343 USD, $374 USD, y $301 USD por barril, respectivamente. Los análisis financieros de los principales impulsores económicos sugieren desarrollos tecnológicos y de mercado que reducirían las cifras correspondientes a $385 USD, $255 USD y $168 por barril

5.3. EFECTOS SOBRE EL SUELO

Esta planta es una leguminosa, sus raíces contribuyen a restituir el nitrógeno del suelo y la configuración que tienen sus raíces, por ser compactas protegen el desgaste del suelo.[55]

---

[54] KLEIN-MARCUSCHAMER, D., TURNER, C., ALLEN, M., GRAY, P., DIETZGEN, R. G., GRESSHOFF, P. M., HANKAMER, B., HEIMANN, K., SCOTT, P. T., STEPHENS, E., SPEIGHT, R. AND NIELSEN, L. K. Technoeconomic analysis of renewable aviation fuel from microalgae, Pongamia pinnata, and sugarcane. 2013. En: Biofuels, Bioprod. Bioref. vol 7. p 416–428.

[55] CUSHION E., WHITERMAN A., DIETERLE, G. Desarrollo de la bioenergía. Efectos e impactos sobre la pobreza y la gestión de los recursos naturales. Washington. 2010. Ediciones Gondo.

Uno de los beneficios que posee la siembra de pongamia es que sus semillas poseen en su interior un 30 o 40% de aceite, por lo tanto, a las semillas se les extrae dicho aceite que es no comestible, la rentabilidad que produce el aceite va entre 24 a 26,5%, la extracción del aceite de sus granos se realiza a través de extractores mecánicos. El aceite crudo es amarillo anaranjado y va pasando a marrón el cual se penetra con el paso del tiempo.

El aceite de pongamia como biocombustible tiene cualidades físicas bastante parecidas al diésel habitual, pero las características de dispersión son más puras para el biocombustible que para el diésel habitual, ya que el biocombustible no genera humo venenoso y minimiza la emanación de hollín, también posee una contundente disminución en el contenido de azufre y mayor número de cetano, es decir, el indicativo de la capacidad de ignición o inicio de una combustión. Este aceite se puede emplear también de manera directa en un aparato diésel de baja aceleración con unas piezas que se complementan y se pueden acondicionar a un motor diésel.[56]

La utilización de este tipo de biocombustibles se consigue a base de materias primas que no constituyen fuentes de alimento y por esa razón no perjudican las plantaciones alimenticias, de igual forma, utilizar este tipo de planta para la extracción de los biocombustibles genera un menor impacto al medio ambiente, pero su transformación requiere de una tecnología más evolucionada y compleja lo que genera que su producción sea de mayor valor económico, y esto impide que se genere competencia con los precios que poseen los combustibles fósiles que existen. Este tipo de árbol fuera que no tienen rivalidad con semillas idóneas para el consumo del ser humano, favorecen el rescate de ecosistemas degradados, puesto que ellas generan nitrógeno a los suelos, y esto hace que no

[56] Pongamia S.A. Árbol de joyab bio-energy, proyecto: "siembra, cultivo y cosecha de joyab". Ciudad de Guatemala: 100%bio. 2006.

requiera de aplicársele fertilizantes que son fabricados a base de nitratos por lo tanto se considera una materia prima menos dañosa.[57]

Se tiene certeza que el árbol de pongamia genera un aceite de buena calidad, siendo en los últimos años que se ha hecho comprobación en la literatura científica sobre la probabilidad de explotar para fines industriales esta planta, dentro de las cualidades que tiene la planta es que produce grandes semillas ricas en aceite y que es un cultivo energético prometedor, se deben hacer dos puntualizaciones sobre el estado biológico de la planta, en primer lugar esta planta se debe someter a todo un dominio que encierra el desarrollo de los cultivos modernos de plantas perennes, lo que plantea desafíos de gran importancia, ya que si esta planta se convierte en cultivos de semilla oleaginosa de gran envergadura en un futuro cercano, para establecer un tipo de programa que sea factible para su cultivo, este plan debe estar acorde con los estudios de la función genómica para identificar y caracterizar los rasgos más importantes. Las fases de dicho programa deben incluir no sólo lo concerniente a la composición del aceite, sino también lo que tiene que ver con características agronómicas que apoyarán el desarrollo y la plantación de cultivos bien definidos. En segundo lugar, la evolución que ha tenido esta planta ha generado multiplicidad de rangos de germoplasma con atributos que han contribuido a generar un camino positivo que lleve al desarrollo de un cultivo ideal. Es decir, cualquier mejora que se le haga a la planta mostrara rasgos que lo permitan posicionarse como una de las plantas de producción sostenible de aceite. Dado el tamaño y la naturaleza de sus semillas, no sería sorprendente encontrar bosques salvajes de pongamia en regiones

[57] REYNA, L. Producción y caracterización de biodiesel mediante catálisis heterogénea empleando hidróxidos dobles laminares. Guanajuato: Universidad Autónoma de San Luis de Potosí. 2015.

tropicales y subtropicales de África y América, así como en regiones de Asia y el Pacífico.[58]

Con el fin de minimizar la probabilidad de que las plantaciones de pongamia se conviertan en maleza, las futuras plantaciones deberían ubicarse lejos de las vías fluviales que pueden actuar como medios de dispersión de las vainas de las semillas. Una de las ventajas de las semillas de la pongamia es que su semilla no se puede catalogar como mala hierba, ya que ella germina sólo en condiciones cálidas y húmedas, igualmente la frecuencia de germinación se reduce a un año, evitando la acumulación de semillas. Otro aspecto a tener en cuenta es, que, aunque el árbol forma múltiples raíces, ellas surgen con el fin de no convertirse en invasivas, de igual forma, la semilla tiene baja atracción como forraje para los animales nativos lo que lleva a una transmisión restringida. Finalmente, grandes cantidades de semillas no germinadas que poseen todavía las vainas se encuentran debajo de los árboles de pongamia.

Se han presentado ciertos debates sobre los biocombustibles que han sugerido que los cultivos de primera generación han afectado de manera negativa la oferta y los precios de algunos cultivos alimentarios básicos como por ejemplo el cultivo de maíz en México, este argumento está perdiendo validez debido a la caída de los precios de las materias primas para el cultivo de dichos sembrados, debido a la crisis financiera mundial, y también debido al porcentaje relativamente pequeño de las cosechas que al momento se dedican al mercado de los biocombustibles. Sin embargo, si las materias primas de biocombustibles contribuirán de manera representativa a las futuras demandas, entonces estos cultivos deben ser originados en tierras donde se siembren cultivos no alimentarios. Estas tierras que no han sido cultivadas son las denominadas tierras marginales, que se usan para el sembrado de plantas para la producción de biocombustibles, donde pueden

[58] SERRANO, Marta. Estudio de la influencia de las materias primas en la producción y propiedades de biodiesel como combustible. Universidad Complutense de Madrid. Tesis doctoral. 2016.

existir suelos con grados de salinidad, acidez, deficiencia de nutrientes o fuentes de agua bajas y poco confiables. Po lo tanto, la pongamia está considerada como la planta más tolerante a la sequía y a la salinidad, lo que la ubica en buena posición en comparación con otras especies para la generación de biocombustibles.

Los experimentos realizados demuestran que la pongamia no se ve afectada negativamente cuando se priva de agua por un lapso de 25 días a 55% del contenido relativo de agua, ni en su crecimiento ni en la producción de biomasa. El valor de la materia prima que genera esta planta no solo se analizará por la producción de aceite para la fabricación de biocombustible, sino también los subproductos adicionales que ella genera, estos subproductos pueden incluir valiosa utilidad en los suelos ya que generan una buena fijación de nitrógeno en los mismos y además generar aspectos valiosos en la parte económica, debido a que después de extraído el aceite de las semillas se ha demostrado que el resto de lo que queda de las semillas tiene un valor suplementario para los animales. Actualmente existen problemas con algunos componentes que contiene el aceite de la semilla y que son repugnantes y dañinos, de lo que queda de las semillas sólo se puede proporcionar hasta el 50% como suplemento alimenticio, pero esta situación se puede resolver a través de la selección de líneas o tipos de pongamia que tengan niveles reducidos de estos compuestos o a través de la represión del gen codificando estos compuestos a través de manipulación genética dirigida. Antes de la extracción del aceite de las semillas, en las vainas de las semillas se encuentra un valor potencial catalogado como combustible para la cogeneración de energía, que se puede usar durante la producción del biodiesel. Algunos datos que no han sido publicados, indican que las vainas de las semillas tienen un valor

calorífico de carbón de calidad baja a media, y finalmente se aplica en la producción del biodiesel.[59]

Dentro de los retos futuros que tiene la industria del biodiesel con la utilización del árbol de pongamia es, que la demanda de combustible sigue creciendo en muchas industrias y gobiernos con estilos de vida muy intensos y en economías desarrolladas emergentes, y en observancia a que los recursos de combustibles fósiles se están agotando, y de igual forma, reconociendo que los biocombustibles se catalogan como una industria que suministrará gran parte de las demandas requeridas a futuro, el aspecto más importante que restringe la producción de biocombustible es el aspecto sostenible, desde el punto de vista medioambiental y económico de las plantas industriales. Existen gran variedad de plantas y animales que son considerados como materias primas emergentes, pero se debe tener en cuenta cuál de estas materias primas van a ser cultivos energéticos exitosos durante mucho tiempo y a futuro. Por lo tanto, en ambientes de clima cálido, y en tierras de baja productividad, con recursos hídricos poco confiables y con un efecto mínimo sobre la producción de alimentos, es la pongamia la que está pisando más fuete.

Pero estas plantaciones tienen muchos retos que asumir buscando mejorar su comercialización debido a que ha tenido muy poca o casi nula historia comercial, es trabajo de la parte científica realizar muchos esfuerzos por afianzar esta planta como una fuente confiable y significativa como materia prima para la generación de biodiesel. Para ello es necesario que se implementen estudios, investigaciones a largo plazo que cuenten con el auspicio de grupos gubernamentales y de la misma industria. En el Centro ARC de Excelencia para la Investigación Integrativa de las Leguminosas se ha instituido un programa de investigación genómica funcional, cría molecular, fisiología, vegetal y agronomía a fin de ubicar a la pongamia en el camino hacia un mejor futuro comercial.

---

[59] KAZAKOFF S. y GRESSHOFF, P. Pongamia pinnata, a sustainable feedstock for biodiesel production. Energy crops. 2011. Royal Society of chemistry, pp. 233-254.

Todos los estudios que se han realizado sobre el árbol de pongamia se han basado en árboles creciendo en plantaciones ornamentales, silvestres o urbanos, por lo tanto, se busca que se lleven a cabo plantaciones de pongamia en cientos de miles de hectáreas, con el fin de que existan mejores datos relacionados a su productividad, y demás aspectos primordiales para poder ser considerada una de las plantas de mayor rentabilidad por la generación de aceite que impulse la industria de los biocombustibles, ya que por ejemplo, actualmente existe muy poca información de patógenos o insectos que generen daño dentro del follaje y que hagan daño a la salud del árbol. Una vez que exista una cosecha bastante grande, donde se podrá tener ocasión de analizar las plagas o agentes patógenos que impliquen riesgo a su cultivo.

De acuerdo a lo anterior, es importante que se lleven a cabo muchos ensayos de campo y que se establezca en un futuro bastante próximo esquemas de plantaciones propuestos a gran escala, ya que es necesario que se den respuestas a preguntas agronómicas como, por ejemplo, arquitectura o recolección mecánica apropiada. Evaluar a largo plazo este mercado es demasiado pronto, pero se deben considerar múltiples aspectos a tener en cuenta para el buen desarrollo de esta industria, para colocar en un buen nivel la industria de la pongamia como la de mayor éxito a nivel mundial.[60]

La planta de pongamia es bastante utilizada en el sistema médico de la India en medicina tradicional para el tratamiento de múltiples tipos de enfermedades incluida la diabetes mellitus, y además dentro de sus múltiples propósitos se encuentran los beneficios como fuente potencial de biodiesel, las semillas contienen un promedio de entre 28 y 34% de aceite con un alto grado de grasas poliinsaturadas, todas las partes de la planta se han utilizado como un fármaco para el tratamiento de múltiples enfermedades, e igualmente se utiliza como forraje animal, de estiércol verde, la madera y hasta veneno de pescado. Se han

[60] .

reconocido aplicaciones en la agricultura y para el medio ambiente como insecticida. Últimamente una de las propiedades de la planta es que ha servido como agente antimicrobiano y terapéutico.

El aceite de semilla de pongamia contiene karanjin, una molécula bio-activa con grandes atributos biológicos, se desarrollaron unos métodos para recuperar de manera rápida el aceite karanjin, sometiendo el aceite a una extracción líquido-liquido con metanol. Este extracto se purificó por medio de cromatografía sobre alúmina y posteriormente se cristalizó para obtener el karanjin, con un 20% de pureza y superior al 95%. Dentro de los usos tradicionales que tiene la pongamia se encuentra: El aceite de la semilla sirve para reducir la picazón y abscesos, las flores se recetan para la glucosuria y como remedio para la diabetes, la corteza se usa internamente para hemorragias pilosas, beriberi, diabetes y como un antimicrobiano. El extracto de la semilla cruda puede inhibir por completo el crecimiento del herpes simple. También es usada como antiinflamatorio. Diversas partes de la planta se usan en medicamentos para la bronquitis, tos ferina, reumatismo, articulaciones. Las hojas se usan como laxante, para curar heridas y otras inflamaciones, las infusiones calientes se usan para aliviar dolores reumáticos y para limpiar úlceras en la gonorrea. Diferentes extractos de hojas, raíces y semillas se usan para tratar infecciones y enfermedades tales como leucoderma, lepra, lumbago muscular y articular. El extracto de su jugo se usa para la tos, la diarrea, la dispepsia, flatulencias, gonorrea y lepra. También el aceite de la semilla se usa para la sarna, lepra, úlceras, fiebre crónica, lumbagos. Las raíces se utilizan para limpiar las encías, los dientes y las úlceras.

Las semillas maduras de la pongamia han ganado importancia comercial, debido a su alto contenido en aceite, el cual se ha explorado como una alternativa para ser usada como combustible y energía. El aceite de karanja contiene principalmente furanoflavonas, karanjin, pongapin, kanjone y una dicetona pongamol. Recientemente ha obtenido un interés comercial ya que sirve como fuente alternativa de energía, pero para ser utilizada como fuente de biodiesel y biomedicina se necesita que exista mayor investigación sobre el tema, y para que

pueda esta planta generar producción como tal de biodiesel, es necesario que exista una élite de pongamia que posean semillas de alto rendimiento de aceite.

Se realizó un análisis del petróleo y actividad antimicrobiana de semillas del genotipo de pongamia pinnata. El mayor rendimiento de aceite (33%) de las semillas se recuperaron de n-hexano. Las propiedades físico-químicas del aceite crudo de pongamia se utilizaron como potencial generador de biocombustibles. El total del ácido graso mono insaturado (ácido oleico 46%) se encuentra presente en el aceite de las semillas y es comparado con los poliinsaturados (33%) según el análisis realizado por GC-MS. El aceite de las semillas también mostró inhibición frente a los hongos probados y cultivos bacterianos. Sin embargo, la eficacia de la actividad antimicrobiana del aceite de semilla a cuatro niveles de concentración (50%, 80%, 90% y 100%) contra diversos agentes patogénicos se encontró dependiente de la concentración. Los resultados obtenidos confirmaron el uso de aceite de semilla de grupos de árboles de pongamia pinnata como combustible diesel y también en productos farmacéuticos en circunstancias donde la sociedad es cada vez más consciente de las pocas reservas de petróleo para la producción de combustibles fósiles, donde se ha hecho evidente que los biocombustibles están destinados a aportar una contribución sustancial al futuro de las demandas energéticas de los países comerciales, Por ello, el árbol de pongamia impactará de manera preponderante por medio de la extracción del aceite de sus semillas el cual va a ser utilizado en la fabricación de biodiesel. De igual forma el uso de aceites vegetales, como el que produce la pongamia tiene la posibilidad de proporcionar un combustible de muy buena aceptación, cuya producción es de invernadero, con reducción en las emisiones de gases en el motor diesel actual.[61]

[61] AROTE S., y YEOLE, P. Pongamia pinnata L. a comprehensive review. Int J. Pharm Tech Res., V 2 N 4. 2010. Pp. 2283-90.

5.4. IMPORTANCIA AGRÍCOLA

En países donde se requiere y se puede mejorar e incrementar los linderos agrícolas, y que poseen tierras que presentan perjuicios y daños en los bosques y en las especies vegetales y animales que habitan dichos bosques y que puedan abarcar las necesidades mundiales de comestibles e insumos para las agroindustrias, pero en múltiples ocasiones se deja a un lado el trabajo que se puede llevar a cabo con este árbol que es tan fácil de plantar, en estos bosques o zonas que se mantienen incultas, degradándose y abandonando parte de la fortuna natural que se posee en la tierra, porque una de las propiedades primordiales que posee la pongamia es su rusticidad y amoldamiento a diversas clases de suelo, lo que permite que así no existan las suficientes habilidades agronómicas, su cultivo permite rehabilitar y recobrar suelos considerados infértiles para transformarlos en suelos fecundos y que permita un equilibrio ambiental, pero para ello, las entidades de cada país que se encargan de velar por el mejor aprovechamiento de los suelos, las instituciones educativas, los organismos financieros y los grandes empresarios deben visualizar los puntos a favor que trae la siembra de este árbol. Stucley menciona como viable a siembra de Pongamia en Tennant, Australia, una ciudad con un clima seco en donde no crecen plantas para alimentos y tierra que actualmente no se está utilizando y por ello mismo tiene un precio my bajo.[62]

El hecho de sembrar pongamia en tierras incultas, también permitirá que las comunidades que se encuentran más limitadas puedan acceder a nuevas posibilidades de empleo, buscando restablecer sus horizontes de ingresos permitiéndoles mejorar su nivel de vida. Pero esta alternativa, no le quita valor a la posibilidad de utilizar para ello tierras fértiles, como preferencia para sembrar otro tipo de labranzas que vayan encaminados a la producción de combustibles

[62] STUCLEY C., SHUCK S., SIMS R., BLAND J., MARINO B., BOROWITZKA M., ABADI A., BARTLE J., GILES., THOMAS Q., Bioenergy In Australia, Satus and Opportunities. Surrey Hills, Australia. 2012.

renovables, siempre y cuando las posibilidades que generan esas labranzas dan buenos frutos económicos.

Dentro de otros productos que genera la plantación de pongamia, se encuentra la harina residual denominadas tortas de aceite, las cuales poseen un buen valor, éstas poseen hasta un 30%[63] de proteínas y se utilizan primordialmente como el alimento seco que se da al ganado bovino, ovino y avícola, estas tortas se utilizan como abono orgánico y pesticida natural. Las hojas de este árbol se usan como abono, hierba y para evitar ser atacados por los insectos en los depósitos de granos.

Comparando el rendimiento del cultivo de palma con el cultivo de pongamia, se tiene que, según Fedepalma[64] en Colombia en el año 2013 el rendimiento de producción de fruto fresco (de donde se extrae el aceite) de palma es de 14,9 toneladas por hectárea de donde se obtienen 3,1 toneladas, se deduce una tasa de extracción de 20,8%. Mientras que de pongamia se recogen entre 7 y 29 toneladas de semillas por hectárea[65], teniendo en cuenta que su contenido de aceite es del 30% al 40% se podría decir que por hectárea se obtendrían de 2,1 a 11,6 toneladas.

Tabla 3. Ventajas de la pongamia respecto al Aceite de Palma

PONGAMIA PINNATA	ACEITE DE PALMA
Produce nitrógeno. Requiere poco o ningún fertilizante	Costo alto de fertilizantes
No tiene efectos secundarios sobre	Para el caso de otra planta

[63] BOBADE S.N.; KHYADE V.B. Detail study on the Properties of Pongamia Pinnata (Karanja) for the Production of Biofuel. En: Research Journal of Chemical Sciences. Julio, 2012. Vol 2. no. 7, p 16-20.

[64] FEDEPALMA, Balance económico del sector palmero colombiano en 2013. Bogotá. 2014

[65] Abadi A, Maynard H, Arpiwi N. Economics of oil production from Pongamia (Millettia pinnata) for biofuel in Australia. En: BioEnergy Research. Septiembre, 2016, vol. 9. p 874–883

humanos	oleajinosa como la Jathropa, se ha demostrado ser cancerígena
Poca mano de obra	Mayor costo en mano de obra
Requiere desde 200mm de lluvia	Requiere desde 2500mm de lluvia
Se puede cosechar mecánicamente	No se puede cosechar mecánicamente
La descomposición es más lenta	Se descompone en apenas 1 mes
Se puede cultivar en tierras marginales	Requiere condiciones similares a las plantas para alimentos
Mayor cantidad de usos aparte de la producción de aceite	Usos limitados fuera de la producción de diésel
Poco o ningún mantenimiento	Costos de mantenimiento mayores
Tasa de extracción del 30% al 40%	Tasa de extracción 20,8%

Fuente. Elaboración propia

6. IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE LA PONGAMIA, DESDE EL CULTIVO HASTA LA COMERCIALIZACIÓN

Proveniente de entornos tropicales y subtropicales, esta planta puede resistir una amplia categoría de estados climáticos, pero puede ser perturbado su crecimiento, por la llegada de plagas, lo que genera que exista una controversia por la capacidad para que ella genere la productividad de biocombustibles de manera ambiciosa, puesto que se deben sembrar en granjas de cultivo, lo cual acarrea que se propicien las enfermedades y plagas debido al tamaño de la siembra, por lo tanto, para la pongamia es más fácil que se acondicione mejor en las siembras a pequeña escala. Se calcula que, durante un lapso de 25 años, un árbol de pongamia puede retener 767 kg de carbono. La capacidad que tiene la pongamia para retener carbono se valora en 3600 árboles plantados en una aldea de la India, durante el periodo de siete años, se considera que los árboles retienen 147 toneladas de carbono que corresponden a un promedio de 51.000 kg de aceite, dando como resultado en dólares para esa aldea un aproximado de 845 dólares.[66]

Plantar árboles de pongamia, genera para el mundo un ingrediente alto e influencia en la protección socio-ambiental, debido a que no solamente repercute en las labores productivas y en la posibilidad de repercusión de renta, sino también en gran medida busca disminuir el cambio climático, puesto que el incremento en plantaciones agroforestales colabora en la formación de un mercado de oleaginosas no comestibles que no va a interferir ni desfigurar en el mercado de los aceites comestibles. Igualmente, al buscarse incrementar la plantación de este tipo de árboles se colabora a nivel universal a gestar que exista una arborización masiva.

[66] CUSHION E., WHITERMAN, A. y DIETERLE, G. Óp. Cit.

Mirando hacia el futuro, ya en el año 2020 si se usara únicamente un 10% del territorio deforestado en países de habla portuguesa, se plantarían 25000 millones de árboles que fijarían cada año unos 6000 millones de toneladas de CO_2 lo cual beneficiaría en gran medida el medio ambiente a nivel mundial.

Este árbol se desarrolla y se acondiciona en múltiples climas en zonas cálidas y subtropicales y hasta en climas más intensos desde que los grados de temperatura que tenga que tolerar no sean negativos, y van desde el nivel del mar hasta elevaciones de temperatura por encima de los 1000 metros. Es un árbol caducifolio puesto que concuerda el desprendimiento de las hojas secas con el retoño de las nuevas y en regiones tempestuosas estas fases se ocultan. Es un árbol que posee una apariencia moderada entre 10 y 15 metros, la coronilla o cumbre del árbol es bastante extendida, posee una vida rentable que pasa de los 50 años, en Asia existen árboles con más de cien años y más de 25 metros de altura y de magnitud, se desarrolla en mucha variedad de suelos, incluido el salino, los árboles que son adultos toleran leves heladas y elevadas temperaturas e igualmente sequias demoradas debido a que poseen un sistema de raíces oscilatorio.

Estos cultivos solo necesitan muy poco de abonos nitrogenados debido a que esta especie es fijadora de nitrógeno debido a que ellas mismas realizan una serie de acumulaciones radiculares donde guardan unas bacterias del tipo rhizobium las cuales permiten adherir el nitrógeno atmosférico, son árboles carbono negativos ya que fijan o adhieren mucho más CO_2 del que expulsan debido a la ignición de la biomasa sustituible.

Los frutos del árbol son semillas sin endospermo, con cotiledones enormes los cuales poseen en su interior un almacenamiento de grasas e hidratos de carbono.

Este árbol es típico de oriente y allí se siembra con dos objetivos básicos; el primero, para ser utilizado como árbol decorativo, también para sembrarlo alrededor de caminos, en calzadas o vías de zonas construidas debido al aroma que expelen sus flores, también la siembran ya que sirve para alejar insectos

(sobre todo la siembran en las zonas ribereñas del indo-pacífico). En segundo término, ya que sirve para obtener energía, por ejemplo, su madera que es usada como combustible para cocinar los alimentos en zonas rurales, el aceite que emite el cual lo usan para el alumbrado y para reemplazar el keroseno y el gasóleo. De igual manera, todos los elementos que conforman el árbol (corteza, flores, hojas, raíces, semillas y demás) poseen múltiples utilidades, no solo en actividades económicas de tipo artesanal, sino también en la medicina común.

Este árbol es procedente de la India y se le estima oriundo en Bangladesh, Camboya, Laos, Myanmar, Nepal, Sri Lanka, Tailandia y Vietnam y muy singular en Australia, China, Egipto, Estados Unidos (en Florida y Hawai), Fiyi, Filipinas, Indonesia, Japón, Malasia, Mauricio, Nueva Zelandia, Pakistán, Papúa Nueva Guinea, Islas Salomón, Samoa, Seychelles, Singapur, Sudán, Tonga y otros, es decir casi en toda la región indo-pacífica.

A nivel comercial sus nombres son: en inglés: Indian beech, ponga mil tree, pongam y poonga, en Hindi sus nombres son: karanj y kanji, en Alemán: hulse, von galedupa, en Francés: arbre de pongolete, en Portugués faveiro do óleo y fava indiana, en Español se conoce como: algarrobo aceitero y a la semilla se le conoce como haba de la India, igualmente se conoce por su nombre botánico denominado Pongamia.

No existe una clasificación total de este tipo de árbol, ni costumbres generalizadas para la implantación, últimamente algunos organismos privados y públicos de la India y Australia se presumen de haber perfeccionado la variedad con singularidades más adelantadas con relación a variedades naturales no elegidas, pero estas ventajas son objeto de estudio para que quede totalmente demostrado.

Actualmente en España, se está realizando un procedimiento de clasificación natural “in situ” de semillas de pongamia de alta productividad. El procedimiento se inicia implantando la escogencia de árboles sobre los cuales se puede trabajar, es decir, que sean árboles con un desarrollo de 20 a 30 años y que posean unas particularidades que los hagan dignos de apreciar las semillas selectas para

realizar plantones, con el fin de establecer nuevas áreas de siembra de la especie, con el propósito de generar aceite para transformarlo en biodiesel.

Estas semillas se recogen de forma directa del árbol, teniendo en cuenta el tiempo exacto de maduración, con el fin de ofrecer el trato a la semilla de tal forma que respalde su mantenimiento hasta que se produzca el cultivo en viveros.

Uno de los aspectos de mayor trascendencia que tiene las plantaciones de pongamia es el aporte que hace al medio ambiente ya que es un fruto adecuado para reforestar terrenos que con la ayuda de la mano de obra del ser humano se pueden transformar en productivos. Estos terrenos que poseen pocas opciones de rentabilidad puedan ser transformados en terrenos fértiles, es necesario que exista una mentalidad a nivel mundial de la necesidad de buscar mejorar los ingresos de las comunidades menos favorecidas, generando a través de un real aporte a minimizar las emisiones contaminantes a través de plantaciones que generen energía de procedencia renovable, por lo tanto, es de gran trascendencia lo que simboliza las siembras de la pongamia en variados ecosistemas que al día de hoy se encuentran abandonados.

Existe algunos aspectos que se mencionan a continuación y que pueden ser considerados como aporte al medio ambiente, debido a que son situaciones que forman parte integrante de lo que compone el desarrollo mundial en todo el proceso productivo, y además la colaboración que puede brindar el hecho de incentivar el cultivo de dicho árbol en todas las ramas que competen el desenvolvimiento laboral en el mundo.

6.1. SINOPSIS DEL PROCESO DE CULTIVO

Esta es una variedad de planta rústica se reproduce de manera natural con solo tirar las algarrobas que se generan por los desbordamientos mientras la estación de los monzones, en las áreas de estructuración natural van germinando nuevas reproducciones en los lugares más imprevistos, cuando se piensa realizar su siembra a nivel productivo, será recomendable realizar una pre-germinación y posteriormente se pasa al semillero, buscando con ello perfeccionar los ciclos de

separación de las semillas, ésta técnica se resume de acuerdo a los pasos que se mencionan a continuación.

- Clasificación de las semillas: La pongamia es un sembrado imperecedero, por lo tanto, se debe garantizar que las semillas sean escogidas y que sean de buena calidad, ya que ello permite que ésta se pueda convertir en un árbol fuerte y fértil.
- Humectación: Con el fin de estimular el periodo del brote de la semilla es apropiado hidratarlas entre 24 y 48 horas antes de sembrarla, si no se cuenta con una cámara de germinación, éstas semillas que se encuentran humedecidas deben conservarse a temperatura ambiente entre 30 a 40 °C.
- Siembra-pre-gestación: Se aconseja pre-germinar las semillas esperando que las radículas retoñen por lo menos unos centímetros, antes de instalar el pre-vivero o semillero, así se busca confirmar que la capacidad y los depósitos que se utilizan están mejor empleados al reducir el nivel de posibles equivocaciones, ya que al ubicar las semillas en posición acorde, es decir, con los micrópilos dirigidos hacia abajo y los cotiledones enfrentados, lo que permite que al momento de iniciar la germinación hipogea, las radículas se muestran primero apuntando hacia los micrópilos, traspasando la testa y se penetran en la tierra perpendicularmente, cuando la radícula sale de la tierra, ésta se transforma en la raíz principal, que es el apoyo del futuro árbol, generando pelos absorbentes y raíces secundarias. En circunstancias comunes las radículas inician su desarrollo entre el segundo y el séptimo día que se siembran, por esto, las bandejas se deben inspeccionar a partir del tercer día para que al removerlas a otro lado no sean tan grandes. El sustrato que se debe utilizar debe tener las suficientes cualidades de aireación y humedad para que se dé un favorable desarrollo de la planta, ya cuando las radículas tienen las capilares adecuadas para el desplazamiento de fluidos y nutrientes y así puedan germinar las plúmulas. De ellas se constituyen los tallos y posteriormente los troncos o fustes, que

conformarán con el pasar del tiempo los árboles cuyas copas pueden tapar más de 200m^2.

En algunas ocasiones cuando se está realizando los pasos de la humectación y pre-gestación a las semillas se les cae la piel, pero esto no causa ningún daño en el progreso de crecimiento de la planta, pero es básico revisar que las semillas no se encuentren dañadas ni que tengan heridas por donde pueda tener acceso algún tipo de patógeno.

- Pre-vivero: Comienza con la siembra de las semillas pre-gestadas en bandejas donde se colocan los alvéolos, pueden estar ubicadas por tamaños pequeños, es decir, de 0.2 a 2 litros con el fin de ser repicadas entre los 30 y 90 días, o en moldes o bolsas de 5 a 20 litros para continuar todo el tiempo en el ciclo de vivero sin que tenga que ser repicada. Este ciclo puede durar de 30 a 90 días, período en el que las plántulas se trasplantan de los moldes a contenedores donde crecerán y se desarrollarán en la epata de vivero, ciclo que durará entre 8 y 14 meses hasta que se llevan y se siembren de manera permanente o siembra de asiento. En este ciclo es necesario aplicar fertilizantes, ya sea los que son necesarios, así como los suplementarios. Teniendo en cuenta los espacios, los medios técnicos, servicios e instalaciones con que se cuenta y el manejo de los costos de excelente manera, se pueden llevar a cabo varios repicados, de manera gradual para conseguir de la planta la talla que se pretende.
- Vivero: De acuerdo a como se muestre el clima en cada sitio o sembrado y con el fin de conseguir un plantón en excelentes condiciones, se debe fomentar dentro del vivero plantones robustos, poderosos, bien enraizados y fuertes con por lo menos 2 centímetros de diámetro de tallo. Los plantones dentro del vivero pueden permanecer entre 8 y 14 meses y para sembrarlos ya propiamente en su hábitat debe hacerse en época de lluvia. En algunos casos teniendo en cuenta el tamaño como la ubicación, las

plántulas se deben colocar en tubetes forestales y luego sembrarlas en tierra entre 0,5 y 0,8 metros y pasados dos años volver a plantar en el sitio final, con lo que se realizan de manera perfecta la tarea de formación de la planta de manera más pareja y también se consiguen árboles más aclimatados a la tierra donde fueron plantados.[67]

Todas las partes de la planta, la corteza, las hojas, las flores y las semillas se usan como droga cruda para el tratamiento de tumores, enfermedades de la piel, heridas, úlceras, en la India existe un sistema de medicina tradicional autóctona denominado “ayurveda” que significa la ciencia de la vida, en el cual utilizan dicha planta como antinflamatorio, anti-plasmodial, anti-hiperglicámico, antilipidproxidativo, antidiárreico, anti- úlceras, antihiperamónico y antioxidante. Este árbol es de crecimiento rápido y alcanza una altura de 40 pies, dentro de las características botánicas que tiene la planta están: es un árbol de tamaño mediano, caducifolio de hoja perenne, tiene una altura de 35 a 40 pies, la tasa de crecimiento es rápida, requiere de luz ya que es un árbol que crece a pleno sol, la tolerancia que tiene al suelo es que puede ser cultivado en tierra arcillosa, arenosa, ligeramente alcalina, ácida, también tolera la sequía y tolera la sal. Las hojas tienen un tamaño de 2 a 4 pulgadas, son perennes y sin pelo, con colores de rosa y blanco, las hojas se desprenden entre abril y desarrolla nuevas a partir de mayo, las flores aparecen entre abril y junio y sus vainas maduran entre marzo y mayo del año siguiente, la semilla madura de febrero a mayo. Las raíces son largas, numerosas y bien desarrolladas, se debe tener cuidado a no ingerir ninguna parte de la planta porque es tóxica y puede inducir náuseas y vómitos.

El patrón de crecimiento que tiene la planta, es decir, los sitios donde se puede sembrar para su desarrollo van desde el nivel del mar hasta una altitud aproximada de 1200 metros con una precipitación anual óptima de 500 a 2500

[67] BIOD2, I. Inversión en fincas para plantaciones de árboles de pongamia rendimiento neto inicial: del 5% al 8% anual, variedades aptas para suelos y. Big projects Biod2. 2013.

mm, el pH que debe tener el suelo y que es el indicado para su crecimiento es de 6 a 9 con un óptimo entre 6,5 y 8,5.

Dentro de los valores económicos que presenta se encuentra: se usa como combustible para las estufas, los postes y para los talles ornamentales, la ceniza de la madera se utiliza para teñir, también su madera es utilizada para fabricar gabinetes y postes, se elaboran también instrumentos agrícolas, mangos de herramientas y peines, como forraje para el ganado, para repeler insectos, se usa como estiércol para los sembrados de arroz y los campos de caña de azúcar, es usada también como combustible para cocinar y encender lámparas, como lubricante y aglutinante de pintura de agua, se usa de igual forma como lípido para procesos comerciales, de igual forma para la elaboración de algunos cosméticos y como pasta de papel, es considerada buena fuente de polen para las abejas melíferas.

Dentro los valores medicinales que tiene la planta están: el jugo de la raíz con leche de coco y agua de cal es usada para el tratamiento de la gonorrea, también se utiliza para limpiar las encías, los dientes y las úlceras bucales, las raíces ayudan a la erradicación de las lombrices parásitas, se usan en enfermedades vaginales y cutáneas, el jugo de la raíz se usa también para limpiar úlceras y cerrar llagas. Los extractos acuosos de la corteza del vástago contienen sedantes CNS y se usan como antipiréticos, el jugo de las hojas se usa para el resfriado, tos, diarrea, dispepsia, flatulencia, lepra, el aceite de la planta es estíptico, antihelmíntico, sirve para bajar la fiebre y ayudan en los dolores hepáticos. De igual forma se usa como infusión para aliviar el reumatismo, también como un extracto para tratar la picazón y el herpes. Sus frutos son usados para tumores abdominales y es útil para los dolores del tracto genital femenino, también se usa para la hipertensión, para tumores queloides, artritis reumática. El polvo de la semilla es cotizado para ayudar en la tos convulsiosa o coqueluche, útil en inflamaciones, enfermedades pectorales, hemorroides, anemia y tos ferina, al mezclar el aceite con óxido de zinc se utiliza para las enfermedades de la piel, se

usa para el beriberi, minimiza la hinchazón del bazo, también es usado en los trastornos mentales.[68]

[68] SANGWAN S., RAO, D. y SHARMA, R. A review on Pongamia Pinnata (L.) Pierre: A great versatile leguminous plant. Nature and Science. 2010. V 8 N 11. p.p. 130-139.

7. GRADO DE MADUREZ DE LA TECNOLOGÍA PARA LA PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE BIODIESEL A PARTIR DE LA PONGAMIA

La autosuficiencia energética es vital para el desarrollo económico general de los países en desarrollo del mundo. La necesidad de buscar fuentes alternativas renovables, seguras y no contaminantes ha sido prioridad absoluta.

Además, los suministros inciertos y los frecuentes aumentos de precios de los combustibles fósiles en el mercado internacional también plantean serias amenazas económicas para los países en desarrollo. Entre los varios cultivos de semillas oleaginosas no comestibles, la planta de pongamia se considera como los únicos recursos que pueden satisfacer la creciente demanda de biodiesel a su alta productividad y menor ciclo de madurez.

La Pongamia Pinnata se encuentra como una de las especies de plantas oleaginosas no comestibles más adecuadas debido a su buena capacidad de fijación de N2 y no ser comestible por animales. Se puede cultivar en suero salino y alcalino y puede soportar climas agresivos. Es un árbol de hoja perenne de tamaño mediano con una corona que se extiende y un tronco corto.

El árbol se planta en sombra y se cultiva como árbol ornamental. Las semillas contienen 30% - 40% de aceite[69]. La distribución natural a lo largo de las costas y las riberas en las tierras son nativas del subcontinente asiático. También se puede cultivar a lo largo de los bordes de las carreteras, bancos de canales y tierras agrícolas abiertas. Es una especie preferida para controlar la erosión del suelo. Su raíz, corteza, hojas, savia y flores también tienen propiedades medicinales y se usan tradicionalmente como plantas medicinales.

[69] BOBADE S.N.; KHYADE V.B. Detail study on the Properties of Pongamia Pinnata (Karanja) for the Production of Biofuel. En: Research Journal of Chemical Sciences. Julio, 2012. Vol 2. no. 7, p 16-20.

Las semillas se utilizan en gran medida para extraer el aceite conocido como "aceite de Karanja". Las propiedades de combustible de Pongamia se compara con el diesel .Además, el mismo aceite se utiliza como combustible para cocinar y encender las lámparas. El aceite también se utiliza como lubricante, aglutinante de pintura de agua, pesticida, y en la fabricación de jabón y curtido de industrias.

Tiene un sabor amargo, olor desagradable, y no es comestible. El aceite es conocido por tener valor en la medicina popular para el tratamiento del reumatismo, así como las enfermedades de la piel humana y animal. Es eficaz en la mejora de la pigmentación de la piel afectada por leucoderma o sarna. La incorporación de las hojas y la torta de prensa utilizada tradicionalmente para mejora/r la fertilidad del suelo como las hojas y la torta son buenas fuentes de nitrógeno fijo. Las hojas secadas biológicamente se utilizan como repelente de insectos en los granos almacenados.

7.1. PRESIÓN DE REACCIÓN

Básicamente los ésteres de metilo se pueden producir por métodos de alta presión o de baja presión. Los primeros pueden llegar a presiones de hasta 100 bar y temperaturas alrededor de 250ºC, con un exceso de alcohol de 7-8 veces la estequiométricamente requerido en presencia de catalizadores alcalinos o de metales de transición. [70]

Estos procesos fueron muy comunes en la industria detergente, seguidos por la conversión de los ésteres en alcoholes grasos. Las ventajas de las transesterificación a alta presión se encuentran en que se pueden utilizar aceites con un contenido de más del 20% de ácidos grasos libres sin necesidad de pretratamiento y que se obtiene un glicerol de alta pureza que puede ser vendido como subproducto. Debido a los altos costos de operación estos métodos son inviables para la producción de biodiesel. Con un nuevo proceso a baja presión y

[70] ROMANSKI, J.; NOWAK, P.; KOSINSKI, K.; JURCZAK, J. High-pressure transesterification of sterically hindered esters. Tetrahedron Lett. vol 53. 2012

baja temperatura se encontró el camino para una estrategia más económica de producción. Este enfoque es ahora práctica común en la manufactura de biodiesel con catálisis alcalina. Además, hasta cierto punto también ha encontrado un lugar en las plantas de producción de metilèsters de ácidos grasos utilizados como materias primas oleoquímicas.

7.2. OPERACIÓN DISCONTINUA U OPERACIÓN CONTINÚA

La producción de biodiesel se puede dar tanto en un proceso continuo como discontinuo. Como regla general la operación discontinua, en la que son suficientes unidades de operación más simples, es más adecuada para plantas pequeñas (produciendo entre 500 y 1.0000 toneladas de biodiesel / año). Para plantas mayores (desde 3.0000 toneladas / año), la operación continúa tiende a ser más económica, a pesar de un proceso y unas etapas de control más complejas. El primer ejemplo de un proceso de producción continuo a escala industrial a baja presión utiliza columnas verticales para la transesterificación con catálisis alcalina, para la separación de glicerina y para el lavado con agua.[71]

7.3. HOMOGENEIZACIÓN DE LA MEZCLA REACCIONANDO

Uno de los grandes problemas de la metanòlisis radica en el hecho de que el metanol no se disuelve con facilidad en la materia grasa. Esto significa que la transesterificación no progresa adecuadamente, a no ser que la mezcla reaccionando homogeneice de alguna manera, al menos durante las fases iniciales del proceso. Una vez se han producido cantidades suficientes de metilester y de glicéridos parciales (mono- y di-), estas sustancias actúan como

[71] EVANGELISTA-FLORES, A.; ALCÁNTAR-GONZÁLEZ, F. S.; RAMÍREZ DE ARELLANO ABURTO, N.; COHEN BARKI, A.; ROBLEDO-PÉREZ, J. M.; CRUZ-GOMÉZ, M. J. Diseño De Un Proceso Continuo De Producción De Biodiesel Revista Mexicana de Ingeniería Química, vol. 13, núm. 2, 2014, pp. 483-491. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. Distrito Federal, México.

disolventes comunes tanto del alcohol como del aceite, por lo que, de dos fases iniciales pronto acaba formándose una sola fase.[72]

Una mezcla vigorosa de los reactivos es un método común de homogeneización y utiliza pertenece por los procesos discontinuos como para procesos continuos. también se ha descrito la aplicación de irradiación ultrasónica de baja frecuencia para formar una emulsión entre el aceite y el alcohol, tetrahidrofurano, fracciones de hidrocarburos alifáticos, y de metanol supercrítico. Asimismo, el consumo de solvente puede ser elevado. en este sentido se recomienda una relación óptima entre tolueno y aceite de palma de 1: 1 (Volumen / volumen), lo que incrementa considerablemente los costes de producción, más aún cuando el solvente debe extraerse de la fase éster después de la reacción.

El uso de metanol supercrítico como solvente común se ha valorado de forma particularmente ventajosa por varios investigadores. Se ha informado que el alcohòlisi del aceite de colza se completó en 240 segundos en presencia de metanol supercrítico 350ºC y 43 Mpa. Además, se afirma que el metanol se disocia en CH3O - y H + en condiciones supercríticas, por lo que el ión metóxido puede catalizar la transesterificación sin necesidad de añadir otro catalizador. Otros estudios indicaron que a las altas temperaturas y presiones utilizadas en esta tecnología, las superficies metálicas del reactor podrían ser parcialmente responsables de los efectos catalíticos. En cualquier caso, la consecuencia directa de realizar la metanolisis sin un catalizador alcalino es que la glicerina y el metilester resultantes no requieren ser depurados de jabones. Como ventaja adicional, se ha mostrado que los ácidos grasos libres presentes en la materia primera también se convierten en metilester, lo que significa que las grasas y aceites no se deben desacidificar antes del proceso.[ib]

[72] SANTANA A. E., Obtención de biodiésel por catálisis heterogénea con catalizadores alcalinos. Aceite procedente de cultivos energéticos. Universidad de La Laguna. España. 2017.

En un artículo reciente los autores señalaron que la transesterificación con alcohol en estado supercrítico también funciona con etanol, 1-propanol, 1-butanol o 1-octanol. Finalmente, también se observó que el agua presente inicialmente en la materia primera, no tiene un efecto negativo en la conversión en transesterificación con metanol supercrítico, por lo que se recomienda esta tecnología para aceites vegetales crudos o productos reciclados con elevados contenidos de agua. Sin embargo, las elevadas presiones y temperaturas requeridas y la elevada relación molar del alcohol en aceite de hasta 42: 1 son inconvenientes para la producción comercial de biodiesel en condiciones supercríticas.

Además, los rendimientos en éster tienden no sobrepasar el 95% comparado a la casi completa conversión encuentro en metanólisis convencional catalizada en medio básico bajo condiciones de reacción suaves.

7.4. SEPARACIÓN DE FASES

Después de cada etapa de transesterificación, la fase glicerina se debe separar y extraer de la mezcla reaccionando. La separación de fases se da de manera espontánea si, en caso de catálisis alcalina se ha utilizado metanol o etanol absolutos como compañeros de reacción. Si se ha utilizado etanol al 96% con catálisis alcalina, podría ser conveniente tratar la mezcla con algún ácido suave para descomponer los jabones formados y poder reducir los efectos emulsivos.

Esto significará, no obstante, que los ácidos grasos libres producidos se quedarán en la fase éster. En la práctica, la separación se verifica realizando una precipitación durante un largo período de tiempo, opcionalmente combinada con el uso de un filtro de coalescencia o un decantador. La centrifugación acelera la separación de fases, pero no está claro que el balance económico sea mejor. También se ha encontrado útil añadir agua, glicerina extra o hexano a la mezcla obtenida en la reacción. Enfriar las fases alquilester / glicerol también acelera la separación de fases y la aplicación de un voltaje elevado también facilita la separación entre una fase polar (glicerina, alcohol y restos de catalizador) y una

fase no polar (ésteres y alcohol). Finalmente, también se ha encontrado adecuada la extracción de ésteres de la mezcla reaccionando con diferentes solventes.[73]

7.5. PURIFICACIÓN DE LOS PRODUCTOS

7.5.1. PURIFICACIÓN DE LA FASE ÉSTER

Tras producirse la separación, tanto la fase superior de ésteres como la inferior de glicerol, deben purificarse para conseguir el máximo rendimiento en ésteres. El metanol se puede recuperar por calentamiento de la fase éster. Los rastros de glicerina se pueden eliminar en lavados sucesivos con agua caliente que puede estar acidulada o no, lo que también eliminará restos de metanol y de catalizador.

No obstante, algún autor sostiene que este tratamiento puede causar pérdidas de éster debido a hidrólisis. La glicerina y los glicéridos parciales se extraen de la fase éster de una manera más elegante, convirtiéndolos en triglicéridos, los cuales se pueden separar fácilmente del éster metílico producido. En este sentido añadieron una cantidad extra de catalizador alcalino a la fase éster recientemente producida y calentar la mezcla a temperaturas entre 80 y 100ºC[74]. En el curso de este tratamiento, el glicerol y los triglicéridos parciales reaccionan con los ésteres metílicos y se supone que se convierten de forma eficiente en triglicéridos, al tiempo que el metanol producido se destila. Los triglicéridos obtenidos se reintroducen en el reactor de transesterificación conjuntamente con alimentación fresca de grasas y aceites, después de que se hayan extraído trazas de jabones y ésteres metílicos. los ácidos grasos libres que se pueden recuperar de la fase éster por destilación, aprovechándonos de que los ésteres de metilo en general destilan a una temperatura entre 30 y 50ºC inferior a FFA. Finalmente, se han

---

[73] ZAPATA, D. MARTINEZ, I. CASTIBLANCO, E. HENAO, C. Producción De Biodiesel A Partir De Aceite Crudo De Palma: 1. Diseño Y Simulación De Dos Proceso Continuos. Pontificia Universidad Bolivariana. Medellin. Colombia. 2006.

[74] ALISEDA, Rodrigo; VICENTE, Gemma; RUPEREZ, Begoña. Estudio de la Transesterificación de Aceite Vegetal con Metano. Trabajo Fin de Carrera. Ingeniero Químico. Madrid. Universidad Rey Juan Carlos. Facultad de Ingeniería.

sugerido varios procedimientos para la extracción de restos de catalizador de la fase éster. Se desarrollar un proceso en el que la fase éster se purifica de las pequeñas cantidades de hidróxido potásico poniéndola en contacto con una resina de intercambio catiónico en condiciones anhidras. Alternativamente, se pueden añadir absorbentes tales como arcillas decolorantes. Además, la fase de glicerina que se ha separado, también se puede utilizar con propósitos de purificación. Así, los ésteres se pueden purificar con la capa de glicerol para extraer el exceso de alcohol y de catalizador.

7.5.2. PURIFICACIÓN DE LA FASE GLICEROL

Para maximizar el rendimiento del éster, también se ha procesar la fase glicerol, ya que aún se pueden encontrar en ella algunas cantidades de ácidos grasos libres, jabones, metanol y trazas de alquilèsters. El primer paso en este proceso consiste en la adición de ácido fosfórico o sulfúrico para descomponer los jabones y formar ácidos grasos libres. Si se añade ácido fosfórico a una fase de glicerol proveniente de una catálisis con KOH, se produce fosfato diácid de potasio, el cual se puede vender como fertilizante. Por el contrario, los sólidos obtenidos se deben considerar como residuo.

Los ácidos grasos libres resultantes no son solubles en el glicerol, formando una fase adicional, con lo que se pueden separar con facilidad. Opcionalmente, la separación de la fase de ácidos grasos libres se puede acelerar por microinfiltración. Se ha sugerido la esterificación de los FFA resultantes con etanol utilizando ácido sulfúrico como catalizador. Un método alternativo para tratar los ácidos grasos formados en la descomposición de jabones consiste en poner en contacto a los FFA y ésteres de ácidos grasos con glicerol alcalino y hacer reaccionar la mezcla a 200ºC durante dos horas para producir triglicéridos, que son reintroducidos en el proceso de transesterificación. Se desarrolló un proceso para esterificado los ácidos grasos libres con metanol o etanol en presencia de ácido sulfúrico, p-Tolú-ácido sulfónico o resinas de intercambio iónico, reintroduciendo los productos en el reactor de transesterificación. En un desarrollo

posterior, los ácidos grasos libres se pueden mezclar con la materia prima antes de su esterificación.[75]

7.6. CAMPOS DE APLICACIÓN PARA EL GLICEROL CRUDO

En un proceso de transesterificación típico se produce un 80% de fase éster y un 20% de fase glicerol. La fase glicerol consiste sobre todo en glicerol (o glicerina), agua y metanol, pudiendo contener restos de catalizador y jabones, si la mezcla no se ha tratado con alguno de los procedimientos descritos anteriormente. Se puede purificar siguiendo varias estrategias que incluyen destilación, lavado con agua y secado, extracción líquida con glicerol como solvente y purificación vía columnas de intercambio iónico para obtener un producto aplicable a las industrias cosmética y industrial.[76]

Las posibles aplicaciones de la fase glicerol sin refinar son limitadas. la mezcla se puede quemar en hornos, mezclada con estiércol de animales para producir fertilizantes, o incorporarla a la alimentación animal. Sin embargo, debido a la presencia de trazas de metanol en la fase de glicerol, las dos últimas aplicaciones han sido abandonadas. Se sugiere utilizar la fase glicerol cruda, que todavía contiene catalizador, para la glicerólisis de aceites vegetales y grasas animales para producir una mezcla de mono- y diglicéridos. Las aplicaciones comerciales de los productos resultantes incluyen la producción de detergentes y otros agentes con superficie activa, así como el uso como emulsificante para la comida. También se sugiere la utilización de glicerol crudo para motores adaptados de autoinyección los que atribuyen características mejoradas de emisiones. Se ha propuesto reaccionar la mezcla con aldehídos, cetonas o acetato de metilo para producir cetales de glicerina o acetatos de glicerina, los cuales podrían servir

---

[75] FERRERO, A. J., ROSA, I. M., VENECIANO, E. Proceso De Purificación De La Glicerina Obtenida Del Biodiesel A Pequeña Escala. CITELAC. Universidad Tecnológica Nacional. Villa María. Córdoba. 2010.

[76] SANTANA A. E., Obtención de biodiésel por catálisis heterogénea con catalizadores alcalinos. Aceite procedente de cultivos energéticos. Universidad de La Laguna. España. 2017.

como aditivos para mejorar las propiedades de combustibles FAME a bajas temperaturas.

Se espera que la exploración de aplicaciones económicamente viables para el glicerol crudo ganará aún más importancia en el campo de investigación del biodiesel en un futuro próximo, ya que el aumento de la producción mundial de FAME comporta también un incremento de la formación de glicerol crudo.

7.7. TRANSESTERIFICACIÓN IN SITU

El término "transesterificación in situ" se refiere a un proceso en el que el aceite que se encuentra en las semillas vegetales extrae y se transesterifica en una sola etapa.

Esto significa que un alcohol de cadena corta sirve tanto como agente extractivo para los aceites como reactivo en la alcohólisis[77]. La transesterificación in situ presenta una serie de ventajas. En primer lugar, ya no se precisa hexano como solvente en la recuperación del aceite. En segundo lugar, se somete a una transesterificación a la semilla aceitosa al completo, por lo que se minimizan las pérdidas debidas a la incompleta extracción del aceite. Para finalizar, los lípidos esterificados tienden a ser más fáciles de recuperar del residuo sólido que los aceites nativos debido a sus menores viscosidades.

Se han utilizado tanto la catálisis alcalina), como la ácida. Al contrario de lo que sucede en las reacciones convencionales de alcohòlisi, el etanol y los alcoholes de cadena más larga como el 1-propanol o el 1-butanol, se ven favorecidos respecto al metanol para procesos in situ. Esto se debe a que el metanol es un mal solvente para los aceites, por lo que los rendimientos de la metanólisi in situ tienden a ser bajos. Una excepción es la metanòlisi in situ con catálisis ácida del aceite del salvado de arroz, con un elevado índice de acidez, en el que se encontró que la conversión es más elevada que en los otros respectivos procesos realizados con

[77] PEREZ, Leticia; SALGUEIRO, José; MACERÍAS, Rocío. Producción de Biodiesel mediante transesterificación in situ a partir de algas marinas. 1 ed. Vigo, España. Meubook. 2016.

otros alcoholes. La mayor limitación de las reacciones de etanòlisi in situ es el contenido en agua del alcohol. Se sugiere que únicamente el etanol anhidro dará resultados satisfactorios, ya que, de otro modo, los metilesters se verán contaminados por compuestos de fósforo y azufre. Debido a los elevados precios del alcohol anhídrido y de los de cadena más larga, la transesterificación in situ se considera antieconómica en estos momentos.

7.8. APLICACIONES ALTERNATIVAS PARA LOS ÉSTERES DE METILO DE ÁCIDOS GRASOS

Aparte de su aplicación como combustible renovable de motores de ciclo diesel, los ésteres de metilo de ácidos grasos dan servicio a un amplio rango de utilizaciones industriales; tanto en forma directa como materias primas para la producción de otros compuestos. Un ejemplo de la aplicación directa de ésteres de metilo de ácidos grasos es el uso de los metilèsters de aceite de colza o soja para la limpieza de playas contaminadas por petróleo crudo.

Además, los metilèsters de ácido graso, se pueden utilizar como decapantes no tóxicos y biodegradables, limpiadores de graffittis y solventes para limpiar maquinaria. Es un solvente adecuado en la producción del asfalto "cutback", sustituyendo los hidrocarburos. Además, pueden servir de fluidos portadores para formulaciones agrícolas como pesticidas e insecticidas, como un medio inerte para la molturación de pigmentos de aluminio y como emulsionador de fluidos de tratamientos de pozos en la industria del petróleo.

Los ésteres de metilo de ácidos grasos también se han propuesto como combustibles no tóxicos de lámparas de aceite y como iniciadores de fuego, ofreciendo la ventaja de que una ingestión accidental no representa riesgo para la salud que un efecto laxante. Finalmente, los metilèsters de aceite de colza se proponen como absorbente de bajo consumo para contaminantes orgánicos volátiles en aplicaciones industriales. Resultados preliminares han mostrado que los RME son particularmente adecuados para extraer hidrocarburos clorados, compuestos aromáticos y éteres de corrientes de gases de escape industrial.

En un exhaustivo artículo de recopilación se listan varias posibilidades para el uso indirecto de ésteres de metilo de ácidos grasos, sirviendo de materia prima para la producción de otros compuestos. Entre los ejemplos escogidos se encuentra la producción de alcanolamides utilizadas como surfactantes no iónicos y como agentes emulsificantes, espesantes y plastificantes, y la transesterificación con isopropanol para producir ésteres isopropílico, los que encuentran aplicaciones en la industria de cosméticos. Los ésteres de metilo de ácidos grasos se pueden transformar en alcoholes grasos por hidrogenación catalítica y los productos resultantes se pueden o bien etoxilado para dar surfactantes no iónicos o se pueden utilizar como aditivos farmacéuticos o cosméticos. Alternativamente, los de ésteres de metilo de ácidos grasos se pueden etoxilado directamente para producir no iónicos eliminando el paso de hidrogenación de alto consumo energético, o se pueden convertir en% -sulfoèsters de ácidos grasos como surfactantes aniónicos.

Una aplicación interesante para fines nutricionales de los ésteres de ácido graso es la transesterificación con catálisis básica para obtener poliésteres de sacarosa, utilizados como aceites combustibles no calóricos. Algunas variedades de bacterias Gram-positivo o Gram-negativo pueden utilizar el REM como la única fuente de carbono para el crecimiento y biosíntesis de varios ácidos polihidroxialcalonicos, que se utilizan como poliésteres biodegradables. Entre otros, los compuestos obtenidos encuentran aplicación como fluidos hidráulicos biodegradables, lubricantes y fluidos para el corte.

7.9. FUENTES DE ALIMENTACIÓN EN LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Las materias primas brutas empleadas en la producción de biodiesel son aceites vegetales, grasas animales y grasas reciclados. Estas materias contienen triglicéridos, ácidos grasos libres y otros contaminantes, dependiendo del grado de pretratamiento que hayan recibido previamente a su recepción. Ya que el biodiesel en un éster de un ácido graso monoalquil, el alcohol primario usado para formar el éster es la otra principal fuente de alimentación.

La mayoría de los procesos para fabricar biodiesel utilizan un catalizador para iniciar la reacción de esterificación. El catalizador es necesario porque el alcohol es muy poco soluble en la fase oleosa. El catalizador favorece un incremento de la solubilidad que permite a la reacción proceder en una proporción razonable. Los catalizadores más comúnmente usados son bases minerales fuertes tales como el hidróxido de sodio y el hidróxido de potasio. Después de la reacción, el catalizador básico debe fue neutralizado con un ácido mineral fuerte. 5.1.1. Grasas y aceites

La elección de las grasas o aceites que utilizaremos para producir biodiésel es, además de una decisión de la química de proceso, una decisión económica. Respecto a la química de proceso, la mayor diferencia entre los posibles grasas y aceites es la cantidad de acidos grasos libres asociados a los triglicéridos.

Otros contaminantes, tales como partículas con color y olor, pueden reducir el valor de la glicerina producida y reducir la aceptación pública del combustible si el color y el olor persisten en él. La mayoría de los aceites vegetales tienen un porcentaje bajo de ácidos grasos libres asociados. Los aceites vegetales crudos contienen algunos ácidos grasos libres y fosfolípidos.

Los fosfolípidos son eliminados en una fase de degomació y los ácidos grasos libres en una fase de refinamiento. El aceite se puede obtener crudo, Degom o refinado. La selección del tipo de aceite afecta la tecnología de producción requerida.

Las grasas animales reciclados tienen unos niveles de acidos grasos libres más elevados. Actualmente, no hay mercado para este tipo de grasas, y la mayoría son vertidos al alcantarillado. La grasa residual todavía no se utiliza para la producción de biodiesel y presenta algunos retos técnicos que no están completamente resueltos, como la dificultad de romper emulsificación, pequeños sedimentos que pueden desgastar las instalaciones, elevados contenidos de agua, y partículas con fuertes color y olor que afectan a los productos del biodiesel y la glicerina.

También hay aspectos sin resolver en cuanto a las pequeñas cantidades de otros contaminantes, como pesticidas que podrían estar presentes en el combustible.

Las opciones para la elección del triglicérido son muchas. De entre las fuentes de aceites vegetales han la soja, la palma y la colza. Las grasas animales son productos de operaciones de transformación. Se incluyen la grasa de ternera, manteca, grasa de pollo y aceites de pescado. Algunos grasas pueden ser mezclas de fuentes vegetales y animales. También hay otros menos apreciadas, aunque menos costosas, fuentes de triglicéridos. El contenido en ácidos grasos libres afecta el tipo de proceso empleado para fabricar biodiesel, y el rendimiento en la producción de combustible derivado de este proceso. Otros contaminantes presentes pueden afectar la preparación previa de la alimentación necesaria para una determinada reacción química.

7.10. ALCOHOLES

El alcohol primario más comúnmente empleado en la producción de biodiesel es el metanol, aunque otros alcoholes, como el etanol, el isopropanol y el butilo, también se pueden utilizar. Un factor clave de calidad para el alcohol primario es el contenido en agua. El agua interfiere en las reacciones de transesterificación y puede resultar en rendimientos pobres y elevados niveles de jabón, ácidos grasos libres y triglicéridos al combustible final. Desgraciadamente, todos los alcoholes son higroscópicos y tienen la capacidad de absorber agua del aire.

Muchos alcoholes se han utilizado para hacer biodiesel. Mientras el éster producido cumpla con las normas establecidas, no supone ninguna diferencia química cuál alcohol se use el proceso. Otras cuestiones, como el coste del alcohol, la cantidad de este que se necesita para la reacción, la facilidad de recuperación y reciclaje del alcohol, la desgravación en impuestos de combustible y asuntos referentes al calentamiento global, influencian en la elección del alcohol.

Algunos alcoholes también requieren ligeras modificaciones técnicas al proceso de producción, como temperaturas de operación más elevadas, tiempos de mezclas más largos o más cortos, o velocidades de mezcla más lentas.

Dado que la reacción para formar ésteres se hace sobre una base molar y que nosotros adquirimos el alcohol sobre una base volumétrica. sus propiedades

marcan una diferècia significativa en el precio del material crudo. Se necesitan 3 moles de metanol para hacer reaccionar completamente un mol de triglicérido. Hoy, un galón de metanol cuesta 0,61 $. Este galón contiene 93,56 gramos-moles de metanol; a un coste de 0,00652 $ por gramo-mol. Por otra parte, un galón de etanol, al actual precio de 1,45 $ por galón de etanol apto como combustible, cuesta 0,02237 $ por grammol, o lo que es lo mismo, 3,4 veces más.

Además, un proceso catalizado por una base utiliza habitualmente una relación molar de operación de 6:1 moles de alcohol en vez del 3:1 requerido para la reacción. La razón por la que se utiliza alcohol en exceso es que este conduiex la reacción a cerca del 99,7% de rendimiento que necesitamos para cumplir la norma de glicerol total para el biodiesel apto como combustible. El alcohol no utilizado debe ser recuperado y reciclado de nuevo dentro del proceso para minimizar costes de operación e impactos ambientales. El metanol es considerablemente más fácil de recuperar que no el etanol. Este último forma un azeótropo con el agua y, por tanto, es caro de purificar durante la recuperación. Si el agua no se extrae, puede interferir con las reacciones.

Estos dos factores son la razón por la que aunque el etanol sea más tóxico, es el alcohol preferido para producir biodiesel. El metanol tiene un punto de inflamación de 10 ºC, mientras que el del etanol es de 8ºC, así que ambos son considerados altamente inflamables. Nunca se debe dejar que el metanol entre en contacto con la piel o los ojos porque puede ser absorbido fácilmente. Una exposición excesiva al metanol puede causar ceguera y otros efectos sobre la salud. Para experimentos de estudiantes, el etanol puede ser más seguro que usar.

El metanol tiene una estructura de precios variable. Cuando se obligó a producir MTBE para la reducción de emisiones de los motores de gasolina en invierno, hubo una expansión considerable en la producción mundial de esta materia. El exceso de producción y caída de la demanda hizo bajar los precios del metanol hasta 0,31$ por galón a principios del 2002. Sin embargo, a finales de julio de

2002, la proporción producción / consumo recuperó el equilibrio y el precio del metanol se dobló, llegando de nuevo al valor típico de ± 0,60 $ por galón.

Los requerimientos de la calidad del alcohol son que ésta no esté desnaturalizado y que sea anhídrido. Ya que el etanol para química se normalmente desnaturalizado con substancias venenosas para prevenir su abuso, es difícil encontrar etanol desnaturalizado. Se recomienda obtener etanol desnaturalizado con metanol siempre que sea posible.

7.11. CATALIZADORES Y NEUTRALIZADORES

Los catalizadores pueden ser tanto básicos como ácidos o substancias enzimáticas. Los más utilizados para convertir los triglicéridos en biodiesel son el hidróxido de sodio, el hidróxido de potasio y el metóxido de sodio. La mayoría de los sistemas catalizadores básicos utilizan aceites vegetales como alimentación. Si el aceite es crudo, contendrá pequeñas cantidades (<2%) de ácidos grasos libres que formarán jabones, los cuales irán a parar a la glicerina cruda. Fuentes de alimentación refinadas, como el aceite de soja refinado también se pueden usar con catalizadores básicos.

Los catalizadores básicos son altamente higroscópicos y forman agua química cuando se disuelven en el alcohol reactante. También absorben agua del aire durante su almacenamiento. Si ha absorbido demasiada agua, el catalizador actuará deficientemente y el biodiésel no cumplirá con las normas en cuanto a glicerina total.

Aunque los catalizadores ácidos se pueden utilizar para la transesterificación, generalmente se les considera demasiado lentos para el procesamiento industrial. Este se utilizan más comúnmente para la esterificación de ácidos grasos libres. Los catalizadores ácidos incluyen el ácido sulfúrico y el ácido fosfórico. El carbonato cálcico sólido se utiliza como catalizador ácido en un proceso con catalizador homogéneo experimental. El catalizador ácido se mezcla con metanol y, posteriormente, esta mezcla se añade a los ácidos grasos libres o en una alimentación que contiene elevados niveles de los mismos. Los ácidos grasos

libres se convierten en biodiesel. Una vez el proceso se ha completado, es necesario neutralizar los ácidos, pero esto debe hacerse añadiendo un catalizador básico para convertir los triglicéridos restantes.

Hay un interes creciente en el uso de lipasses como catalizadores enzimáticos para la producción de ésteres alquílicos de ácidos grasos. Algunos enzimas actúan los triglicéridos, convirtiéndolos en metilesters; y otros, a los ácidos grasos.

Actualmente, el uso comercial de enzimas está limitado a países como Japón, donde los costes energéticos son elevados, o para la producción de productos químicos especializados derivados de tipos específicos de ácidos grasos. Esta limitación es debida a los elevados costes, a una velocidad de reacción lenta y unos rendimientos en la producción de metilesters normalmente inferiores al 99,7% del requerido para el biodiésel apto como combustible.

Las enzimas están siendo considerados para la conversión de ácidos grasos en biodiesel como un paso en el pretratamiento, pero este sistema no está comercializado actualmente. Los neutralizadores se usan para eliminar el catalizador ácido o básico del biodiesel y glicerol producidos. Si se utiliza un catalizador básico, el neutralizador será normalmente un ácido, y veceversa. Si se lava el biodiésel, se puede añadir el neutralizador al agua de lavado. El ácido clorhídrico es una opción habitual para neutralizar catalizadores básicos, como se ha mencionado anteriormente, mientras que el ácido fosfórico da como resultado una sal valorable como fertilizante químico.

Selección del catalizador: Los catalizadores básicos se utilizan esencialmente para en todas las plantas de proceso de aceite vegetal. El contenido en ácidos grasos libres y en agua son generalmente bajos. Las grasas con contenidos en ácidos grasos libres superiores a un 1% deben ser pretratados para eliminar estos o para convertirlos en ésteres antes de comenzar la reacción catalizada por la base.

De otro modo, el catalizador básico reaccionará con los ácidos grasos libres para a formar jabón y agua. La reacción de formación del jabón es muy rápida y se completa antes que cualquier esterificación inicie. Todos los productores de

biodiesel comercial actuales utilizan esencialmente reacciones catalizadas por bases. Este tipo de reacciones son relativamente rápidas, con tiempo de residencia que van de los 5 minutos a 1 hora, dependiendo de la temperatura, la concentración, la mezcla y la proporción alcohol: triglicérido. La mayoría utilizan NaOH o KOH como catalizadores, aunque los refinadores de glicerol prefieren NaOH. El KOH tiene un coste más elevado pero el potasio se puede precipitar como K3PO4, un fertilizante, cuando los productos se neutralizan mediante ácido fosfórico. Esto puede conllevar que el cumplimiento de la normativa sobre los vertidos de agua sea un poco más difícil debido a los límites en los niveles de fosfato.

El metóxido de sodio, normalmente en solución al 25% en metanol, es un catalizador más eficaz en base al peso que la mezcla de NaOH y metanol. esto parece ser, en parte, el resultado del efecto negativo del agua química producida in situ cuando el NaOH y el metanol reaccionan para formar metóxido de sodio.

Los sistemas de catalizadores ácidos se caracterizan por unas velocidades de reacción lentas y la necesidad de una elevada proporción alcohol: triglicérido (20: 1 como mínimo). Generalmente, las reacciones catalizadas por ácidos se utilizan para convertir ácidos grasos libres en ésteres, o jabones en ésteres como paso previo en alimentaciones con elevada concentración de ácidos grasos libres. Se han documentado tiempo de residencia de entre 10 minutos a 2 horas.

Los sistemas de esterificación ácida a contracorriente se utilizan desde hace décadas para convertir auténticas corrientes d`ácids grasos en metilèsters con unos rendimientos superiores al 99%. Estos sistemas tienden a unos rendimientos de los 100% y se lava el agua fuera del sistema a la vez porque la alimentación y la mezcla ácido sulfúrico / metanol se mueven en direcciones opuestas. los sistemas de esterificación ácida producen un subproducto de agua. A los sistemas "batch" (Por lotes), el agua tiende a acumularse en el depósito en el punto donde puede detener la reacción prematuramente. El ácido sulfúrico tiende a migrar hacia el agua, fuera del metanol, quedando indisponible para la reacción. Es

necesario que todos los sistemas de esterificación ácida tengan una estrategia de gestión del agua. Una buena gestión puede minimizar la cantidad de metanol necesaria para la reacción. [78]

Normalmente es necesario un exceso de metanol (como la proporción de 20: 1) a los reactores "batch" donde se acumula el agua. Otra propuesta sería plantear la reacción en dos fases: el metanol y el ácido sulfúrico se hacen reaccionar, se eliminan y se reemplazan por nuevos reactantes. Mucha del agua se elimina en la primera ronda y los reactantes nuevos en la segunda ronda consiguen que la reacción se dé casi por finalizada.

La esterificación catalizada por ácidos es tratada con más detalle en el capítulo de pretratamiento de alimentaciones con elevado contenido en AGL. Las reacciones catalizadas por lipasses tienen la ventaja de reaccionar a temperatura ambiente sin consumir catalizadores. Las enzimas se pueden reciclar para utilizarlos de nuevo o inmovilizar a un sustrato. En el caso de inmovilización, hay que renovar el sustrato cuando el rendimiento comience a disminuir.

Las reacciones enzimáticas son altamente específicas. Como el alcohol puede inhibir algunas enzimas, una estrategia habitual es introducir el alcohol al reactor en tres pasos de razón molar 1: 1 cada uno. Las reacciones son muy lentas, con una secuencia de 3 pasos que necesita de 4 a 40 horas, o más. Las condiciones para a la reacción son modestas, de 35 a 45 ºC. Los rendimientos de la transesterificación no suelen cumplir con las normas ASTM, pero tienen lugar relativamente de prisa y los rendimientos son buenos. Los ácidos grasos libres en exceso se pueden eliminar como jabones en fase posterior de transesterificación o de "stripping" cáustico.

[78] GORDILLO, J. Development and Implementation of a Hybrid Photovoltaic System for Energy Back-up, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2009.

7.12. OPCIONES DE PROCESOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.

7.12.1. PROCESO BATCH (POR LOTES)

Es el método más simple para producir ésteres de alcohol, se utiliza un reactor de tanque agitado por lotes. Se han dado proporciones de alcohol: triglicérido que van de 4:1 hasta 20:1 (molar), siendo la razón de 6:1 la más común. El reactor debe esté sellado o equipado con un condensador de reflujo. La temperatura de operación es habitualmente de 65 ºC, aunque también se han presentado temperaturas de 25 ºC a 85 ºC.

El catalizador más común es el hidróxido de sodio, siendo utilizado también el hidróxido de potasio. El rango de carga típico va de 0,3% a un 1,5%. Al principio de la reacción, es necesaria una mezcla a fondo para poner en contacto el aceite, el catalizador y el alcohol. Hacia el final de la reacción, una disminución en la mezcla puede ayudar a incrementar la extensión de la reacción, permitiendo así que la fase del producto inhibidor, el glicerol, se separe de la fase éster-aceite. Se dan rendimientos de entre un 85% y un 94%.

Algunas instalaciones utilizan una reacción en 2 pasos, con la retirada del glicerol entre pasos, para incrementar la extensión de la reacción final hasta un 95% o más. Temperaturas más elevadas y proporciones alcohol:aceite superiores también pueden aumentar el porcentaje del rendimiento. El margen de tiempo típico para la reacción de los 20 minutos hasta más de 1 hora.

Primero, el aceite se carga al sistema, seguido del catalizador y del metanol. todo lo sistema se agita mientras dura la reacción. Posteriormente, se detiene la agitación. En algunos procesos, se permite que la mezcla reaccionando se deposite en el reactor para dar una separación inicial de los ésteres y del glicerol. En otros, la mezcla se bombea hacia un depósito o se separa utilizando una centrífuga. El alcohol se elimina tanto del glicerol como del éster utilizando un evaporador o una unidad flash. Los ésteres se neutralizan, se lavan suavemente, utilizando agua caliente ligeramente ácida para eliminar el metanol residual y las sales, y luego secan. El biodiesel producido ya se puede almacenar. La corriente

de glicerol se neutraliza y se lava con agua blanda. El glicerol se envía a la sección de refinamiento.

Para el las grasas animales, el sistema se modifica ligeramente con la adición de una unidad de esterificación ácida y de un depósito para el catalizador ácido. A menudo, la alimentación seca (hasta un 0,4% de agua) y se filtra antes de cargar el tanque de esterificación ácida. Se añade entonces la mezcla de ácido sulfúrico y metanol y el sistema es agitado. Se utilizan temperaturas similares a la transesterificación y el sistema trabaja a presión o se añade un cosolvente. No se produce glicerol.

Si se utiliza un tratamiento ácido en dos pasos, la agitación se suspende hasta que la fase metanol se separa y se elimina. Se añade entonces metanol nuevo y ácido sulfúrico, y se reanuda de nuevo la agitación. Una vez la conversión de los ácidos grasos a metilésters ha alcanzado el equilibrio, la mezcla metanol / agua / ácido se elimina por decantación o por centrifugación. La mezcla restante se neutraliza o se envía directamente hacia la transesterificación, donde será neutralizada mediante catalizadores básicos en exceso.

Cualquier ácido graso libre restante será convertido en jabón en la fase de transesterificación. La fase de transesterificación se procesa como se ha descrito anteriormente.

7.12.2. SISTEMAS DE PROCESO CONTINUO.

Una variación bien conocida del proceso por lotes es el uso de reactores continuos de tanque agitado (RCTA) en serie. Los RCTA pueden variar de volumen para permitir un tiempo de residencia mayor al RCTA 1 y conseguir así una extensión de la reacción mayor. Después de haber decantado el glicerol producido inicialmente, la reacción al RCTA 2 es mucho más rápida, llegando fácilmente a rendimientos superiores al 98%. Un elemento esencial a la hora de diseñar un RCTA es una alimentación de la mezcla suficiente para asegurar que la composición por todo el reactor sea constante. Esto tiene el efecto de incrementar

la dispersión del glicerol producido en la fase éster y, como resultado, se incrementa también el tiempo requerido para la separación de fases.

Hay varios procesos con mezcla intensa, tanto con bombas como con agitadores inmóviles, para iniciar la reacción de esterificación. En vez de conceder tiempo para la reacción al tanque agitado, el reactor es tubular. La mezcla reaccionando se mueve a través de este tipo de reactor en un pistón continuo, con poca mezcla en la dirección axial. Este tipo de reactor, llamado reactor de flujo de pistón (RFP), se comporta como una serie de RCTA en cadena.

7.12.3. SISTEMAS DE ALTO CONTENIDO EN ÁCIDOS GRASOS LIBRES

Las fuentes de alimentación con un alto contenido en ácidos grasos libres reaccionarán con el catalizador para formar jabones si se introducen en un sistema de catalización básica. La cantidad máxima de ácidos grasos libres aceptable en un sistema de este tipo es inferior al 2%, y preferiblemente, inferior al 1%. Algunas propuestas para utilizar estas fuentes de alimentación tienen en cuenta este percentantge y "refinan" los ácidos grasos libres fuera de la alimentación disponible del sistema o por tratamiento separado en una unidad de esterificación ácida. la sosa cáustica (NaOH) se añade a la alimentación y los jabones resultantes se separan con técnica centrífuga; a esta técnica la llaman separación cáustica.

Algunos triglicéridos se pierden con los jabones durante la separación cáustica. La mezcla jabonosa se puede acidificar el fin de recuperar los ácidos grasos y los aceites perdidos en un tanque de reacción separado. Los aceites refinados se secan y se envían a la unidad de transesterificación para un procesamiento posterior. Los ácidos grasos libres eliminados de esta manera se pueden aprovechar transformándolos en metilestes utilizando un proceso de esterificación ácida. Tal y como ya se ha comentado antes, los procesos catalizados por ácidos se pueden utilizar para la esterificación directa de ácidos grasos libres en alimentaciones con un alto contenido en éste.

Fuentes menos costosas, como las grasas residuales, se caracterizan por tener un alto contenido en ácidos grasos libres: pueden llegar a tener hasta un 15%, aunque que algunos lotes pueden sobrepasar este nivel.

El estereficacion ácida de los ácidos grasos libres en la fuente de alimentación requiere eliminar el agua durante la reacción, si no se quiere que la reacción se detenga prematuramente. También hay un proporción elevada de alcohol, normalmente entre 20: 1 y 40: 1, y mayores cantidades de catalizador ácido, dependiendo del proceso empleado.

La reacción de esterficación los ácidos grasos con metanol da lugar a agua de producto que hay que eliminar, pero la mezcla resultante de ésteres y triglicérido se puede utilizar directamente en un sistema de catalización básica. El agua se puede eliminar por vaporización, decantación o centrifugación, igual que en una mezcla metanolaigua.[79]

Los sistemas de flujo continuo a contracorriente limpian el agua con la corriente existente de metanol acídico. Un procedimiento alternativo para trabajar con alimentaciones de este tipo es convertirlas por hidrólisis en ácidos grasos libres puros y glicerina.

Normalmente, esto se lleva a cabo en un reactor a contracorriente utilizando ácido sulfúrico o sulfónico y vapor. El producto final es ácidos grasos libres puros y glicerina. Algunos contaminantes continúan con los ácidos grasos y pueden ser eliminados o no, dependiendo de los procesos y de los requerimientos del producto. Los ácidos grasos libres puros son entonces esterificados en otro reactor en contracorriente para transformarlos en metiléster. Este se neutraliza y se secan. Los rendimientos pueden superar el 99%. El equipo debe ser resistente a los ácidos, pero generalmente los costes de alimentación son en extremo bajos.

[79] GORDILLO, J. Development and Implementation of a Hybrid Photovoltaic System for Energy Back-up, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2009.

7.12.4. SISTEMAS NO-CATALIZADOS - PROCESO BIOX.

Las opciones que utilizan cosolventes están diseñadas para superar la lentitud de la reacción causada por la solubilidad extremadamente baja del alcohol en la fase triglicéridos. Un método que está a punto de comercializarse es el proceso Biox.

Este utiliza un cosolvente, tetrahidrofurano, para solubilizar el metanol. El resultado es una reacción rápida, del orden de 5 a 10 minutos, y sin residuos de catalizador ni en la fase éster ni a la del glicerol. La elección de este cosolvente está motivada, en parte, porque tiene un punto de ebullición muy similar al del metanol. Un vez que la reacción, el exceso de metanol y el cosolvente se recuperan en un único paso. Este sistema requiere de una temperatura de operación antes baja, unos 30 ºC. También se ha estudiado el uso de otros cosolventes, como el metilterbutileter (MTBE).[80]

7.12.5. SISTEMAS NO-CATALIZADOS - PROCESO SUPERCRÍTICO

Cuando se somete un fluido o un gas a temperaturas y presión por encima de su punto crítico, se manifiestan una serie de propiedades inusuales. Ya no hay una fase distinguible de líquido y vapor, sino un única fase fluida presente. Los solventes que contienen un grupo hidroxilo (OH), como el agua o los alcoholes primarios, toman las propiedades de super-ácidos.

Una vía no catalítica es el uso de una alta proporción (42: 1) alcohol / aceite. Bajo condiciones supercríticas (350 a 400 ºC y> 80 atm), la reacción se completa en unos 4 minutos. El capital y los costes de operación pueden ser más grandes, y el consumo de energía mayor.

Un ejemplo fascinante de este proceso se ha expuesto en Japón, donde aceites con un altísimo exceso de metanol han sido sometidos a temperaturas y presiones muy elevadas durante un pequeño periodo de tiempo. El resultado es una

[80] GORDILLO, J. Development and Implementation of a Hybrid Photovoltaic System for Energy Back-up, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2009.

reacción muy rápida (De 3 a 5 minutos) que da ésteres y glicerol. La reacción debe ser interrumpida muy rápidamente para que los productos no se descompongan. el reactor utilizado hasta la fecha es un cilindro de 5 ml que se introduce en un baño de metal fundido y después es apagado en agua.

El refinamiento del glicerol se discute en un capítulo aparte, aunque es un tema de gran importancia para la selección del proceso de producción de biodiesel. Generalmente, la calidad del glicerol producido y su valor como coproducto es una variable económica importante. El glicerol típico producido en una planta de biodiésel es 50% glicerol o menos, y contiene agua, sales, metanol, metilèsters y glicéridos que no han reaccionado, así como partículas de color y olor, dímeros, trímeros y otros componentes minoritarios. Esto es lo que se llama "crudo del biodiesel "y normalmente está valorado en menos de 5 céntimos por libra. [81]

Eliminar el agua y el metanol y aumentar el contenido de glicerol hasta un 88% puede generar un beneficio, basado en el valor del glicerol crudo. Las sales, y particularmente las sales de azufre o potasio, reducen el valor de este glicerol crudo.

7.13. GRADO DE MADUREZ EN ESCALA TRL (TECHNOLOGY READINESS LEVELS)

La escala TRL fue publicada por la NASA[82] en los años noventa y desde entonces es mundialmente aceptada por la industria y la academia en la determinación del grado de madurez de cualquier desarrollo científico. Allí se listan los diferentes niveles en los cuales se puede encontrar una tecnología dependiendo el punto en el que se encuentra la investigación. En la Tabla 3 se pueden observar los 9 diferentes grados a los que hace referencia la escala.

---

[81] GORDILLO, J. Development and Implementation of a Hybrid Photovoltaic System for Energy Back-up, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2009.

[82] Mankins John C. Technology Readiness Levels. NASA. Washington D. C. 1995.

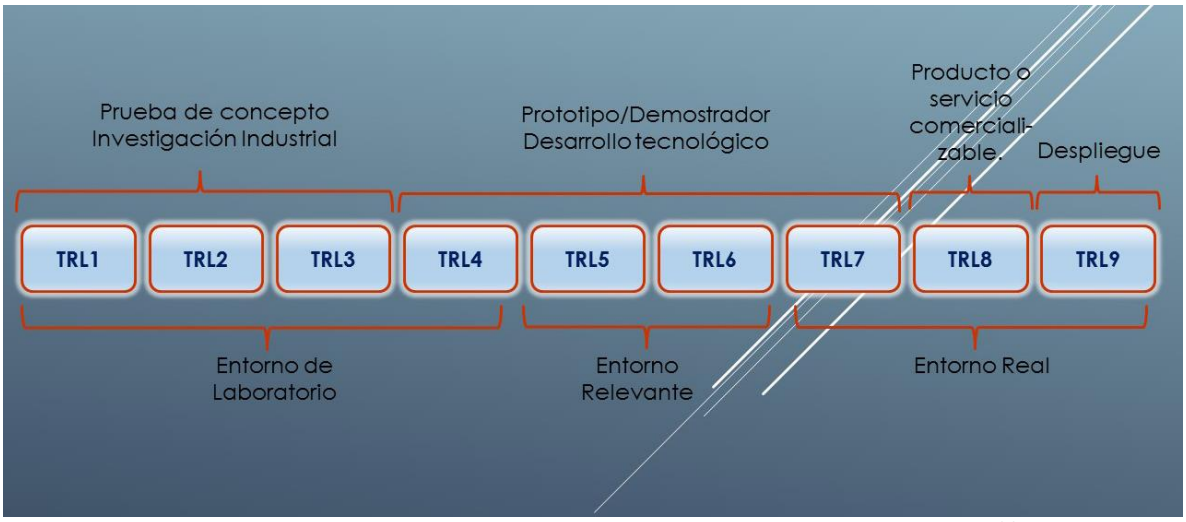
Tabla 4. Nivel de madurez tecnológica (TRL)

NIVEL DE MADURÉZ TRL	DESCRIPCION
TRL 1	Principios básicos estudiados
TRL 2	Concepto tecnológico formulado
TRL 3	Prueba de concepto experimental
TRL 4	Tecnología validada en laboratorio
TRL 5	Tecnología validada en un entorno relevante
TRL 6	Tecnología demostrada en un entorno relevante
TRL 7	Demostración de prototipo en entorno operacional
TRL 8	Sistema completo y cualificado
TRL 9	Sistema real probado en un entorno operacional

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al nivel en el que se encuentre la tecnología se puede agrupar en diferentes etapas tal y como lo muestra la figura 12.

Figura 12. Etapas de desarrollo según el TRL



Fuente. Oficina europea de I+D. Universidad Complutense de Madrid[83]

The University of Queensland en Australia bajo la iniciativa de combustibles de aviación sostenible viene desarrollando trabajos con base en la caña de azúcar, microalgas y pongamia. Este claustro ubica la pongamia dentro de su boletín de Mayo de 2016[84] en el grado TRL 7 de madurez, lo que quiere decir que la tecnología ya se encuentra en fase de prototipo, ya se han ensayado en entornos reales pero aún se encuentra en desarrollo la fase de producción industrial para comercialización.

[83] Oficina Europea de I+D. Niveles de madurez Tecnológica - Technology Readiness Levels (TRLs). Universidad Complutense de Madrid. Madrid. 2016. Visto el 23 De octubre de 2017. Disponible en (http://oficinaeuropea.ucm.es/index.php?option=com_k2&view=item&id=141:niveles-de-madurez-tecnologica-technology-readiness-levels-trls&Itemid=342)

[84] HALLIDAY J., ANGLISS M., ADAMSON G. Science Innovation Pipeline. Queensland. Australia. 2016.

8. ANÁLISIS DE VIABILIDAD

En términos generales el desarrollo de la producción de biodiesel a partir de pongamia aún se encuentra en pruebas (TRL 7). Los estudios preliminares arrojan unas cifras alentadoras, sin embargo, aún se debe esperar las experiencias de paíes como Estados Unidos, India y Australia en donde se encuentran los cultivos y las plantas de producción más grandes.

Para el cultivo de pongamia en el país se hace necesario obtener la aprobación del Ministerio de Agricultura que mediante el Decreto 1071 de 2015[85] reglamenta el sector administrativo agropecuario, pesquero y de desarrollo rural. Existen 2 entidades adscritas al ministerio encargadas de regular los cultivos y las semillas, el ICA (Instituto Colombiano Agropecuario) y la CAR (Corporación Autónoma Regional) cuya jurisdicción se limita por regiones. La resolución 970 de 2010 señala el procedimiento para la producción, acondicionamiento, importación, exportación, almacenamiento, comercialización y/o uso de semillas para siembra en el país[86]. Para el caso de la pongamia, en primer lugar, el artículo 5 expone que el ICA debe realizar pruebas de evaluación agronómica a través de entes certificados, indica los requisitos, el trámite y los resultados. Una vez superadas las pruebas requeridas por el ICA, el artículo 6 Define la prueba semicomercial que no es más que una expansión del cultivo primario con el que se viene realizando la prueba de evaluación agronómica. Una vez realizado los dos pasos anteriores se puede proceder con el registro de la semilla, todas las semillas que se siembran en el país deben estar registradas ante el ICA. Cuando el Instituto

[85] COLOMBIA. EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. Decreto 1071 DE 2015 (26, Mayo, 2015). Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo Agropecuario, Pesquero y de Desarrollo Rural. Bogotá D. C. 2015.

[86] COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL AGROPECUARIO. Resolución 970 de 2010 (10, Marzo, 2010). Por medio de la cual se establecen los requisitos para la producción, acondicionamiento, importación, exportación, almacenamiento, comercialización y/o uso de semillas para siembra en el país, su control y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogota D. C., 2010. No. 47.648

certifique las pruebas respectivas y compruebe que el cultivo no causa efectos significativos en el medio ambiente, para el registro lo único que se requiere es el certificado de aprobación de la evaluación agronómica y el de la prueba semicomercial, comunicar los datos de procedencia y adjuntar el permiso fitosanitario de importación. En resumen, al registrar la semilla se puede comenzar con el proceso de cultivo en el país, para ello se debe comunicar a la CAR de la región donde se va a sembrar la información del cultivo comercial (Cantidad de Hectáreas o árboles, propósito comercial y demás documentos que requiera la entidad).

Dadas las regiones, la ubicación geográfica y los climas que se tienen en Colombia, prácticamente en cualquier región del país se pueden sembrar pongamia para la producción de biodiesel. Si se tiene en cuenta que es una planta resistente a climas áridos y se puede sembrar en zonas marginales, podrían iniciarse pruebas de cultivo en la baja y media Guajira, pues según el IDEAM, el promedio de precipitaciones anual es de 501 a 1100 mm y la pongamia crece a partir de los 200mm, la temperatura media en esta zona es de 30 a 32^0C y la pongamia resiste temperaturas de 0 a 50^0C.[87] Sin embargo se deben iniciar las pruebas de evaluación agronómica para verificar su adaptabilidad en el territorio colombiano.

[87] IDEAM. Ficha departamental de La Guajira. 2011. Visto el 24-10-2017. Disponible en (http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022963/fichas_departamentales/la_guajira_fichatecnica.pdf)

9. CONCLUSIONES

- Debido a las condiciones ambientales que presenta el territorio colombiano, la producción de bioediesel en Colombia es viable en zonas como la Guajira y otras áreas marginales, sin embargo, como lo señala el grado de madurez de la tecnología evaluado por la Universidad de Queensland, no es aconsejable la producción a nivel comercial aún. Es conveniente estar atentos a los datos que puedan arrojar los cultivos que se vienen realizando en Australia y Hawai entre otros.

- Es un buen momento para iniciar pruebas de evaluación agronómica que busquen el registro de la semilla en el país, ya que el ICA debe comprobar el impacto y la adaptabilidad de la planta. Siguiendo las experiencias de otras naciones, lo más favorable es buscar inversión mixta para el desarrollo evitando que el riesgo que implica una plantación piloto lo asuma únicamente el sector privado o el sector público.

- Aunque faltan experiencias de producción a gran escala como lo señala Abadi, los estudios realizados sobre la producción de combustible a partir de pongamia resaltan más ventajas que desventajas respecto a la producción de biodiesel de origen vegetal con base en otras plantas. La tasa de extracción del aceite de palma según datos del 2013 de Fedepalma es de 20,8% mientras que la de aceite de pongmaia se estima entre el 30% y el 40% como lo demuestran los datos entregados por Bobade.

- La otra gran ventaja es la resistencia de la planta a condiciones climáticas extremas (de 0 a 50^0C pero con precipitaciones superiores a 200mm anuales), pues se podría sembrar en zonas tales como la Guajira y similares, es decir, lugares donde no se podría sembrar ningún otro

producto diferente y esta ventaja es importante en el sentido que no compite con cultivos para alimentos. La principal desventaja es la falta de información agronómica relacionada con cultivos a gran escala, pues por el momento no se conocen enfermedades ni plagas que la ataquen, y este es un punto de suma relevancia para la producción comercial.

- El grado de madurez de la tecnología a nivel mundial para la producción de biodiesel a partir de pongamia se encuentra en estado precomercial, pues actualmente se está produciendo biodiesel a partir de pongamia en granjas y cultivos que no superan las 150 hectáreas como el que inició en Junio de 2017 la empresa TerViva en Maui, Hawái. Lo anterior indica un buen momento para el inicio de estudios en Colombia sobre esta tecnología.

- Adicional a las ventajas conocidas para la producción de biodiesel a base de aceite de palma, la pongamia tiene un efecto positivo en el medio ambiente. Las raíces de la pongamia retienen e inyectan nitrógeno y ayudan a la fertilización de suelos que se consideraban perdidos, además el extracto vegetal actúa como bioincecticida y puede ser usado en el control de plagas. Otra característica ambiental importante es que no consume demasiada agua y requiere poco o ningún riego.

10. BIBLIOGRAFÍA

ABADI A, MAYNARD H, ARPIWI N. Economics of oil production from Pongamia (Millettia pinnata) for biofuel in Australia. En: BioEnergy Research. Septiembre, 2016, vol. 9. p 874–883

ACEVEDO Diego, DÍAZ Nidia. Formulación del departamento de investigación y desarrollo para Oleaginosas Las Brisas S.A. Universidad industrial de Santander. Programa de Alta Gerencia. Bucaramanga. 2014.

ALISEDA, Rodrigo; VICENTE, Gemma; RUPEREZ, Begoña. Estudio de la Transesterificación de Aceite Vegetal con Metano. Trabajo Fin de Carrera. Ingeniero Químico. Madrid. Universidad Rey Juan Carlos. Facultad de Ingeniería.

AROTE S., y YEOLE, P. Pongamia pinnata L. a comprehensive review. Int J. Pharm Tech Res., V 2 N 4. 2010. Pp. 2283-90.

Analisis IBEPA [online]. 2008, vol.1, n.1 [citado 2017-10-26], pp. 6-8. Disponible en: <http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1999-62332008000100002&lng=es&nrm=iso>. ISSN 1999-6233.

BIOD2, I. Inversión en fincas para plantaciones de árboles de pongamia rendimiento neto inicial: del 5% al 8% anual, variedades aptas para suelos y. Big projects Biod2. 2013.

BOBADE S.N.; KHYADE V.B. Detail study on the Properties of Pongamia Pinnata (Karanja) for the Production of Biofuel. En: Research Journal of Chemical Sciences. Julio, 2012. Vol 2. no. 7, p 16-20.

BOTERO M., PÉREZ L., ALZATE, C. Efecto del cambio en el uso de la tierra devenido del cultivo de palma aceitera para la producción de biodiesel en Colombia. 2014. Ingeniería y universidad, 18(1), 91-102.

Cámara de Comercio de Bogotá. Observatorio de movilidad: La oferta de transporte en Bogotá. Bogotá. 2013. Cámara de Comercio de Bogotá.

CHOW, Susana. Separación del petróleo en sus fracciones. 2016. [On line]. Disponible en Internet. http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/39/html/sec_9.html

CIFUENTES, Luis. Programa Piloto para el Sistema de Compensaciones de la Región Metropolitana. Diseño de Metodologías de Compensación de Emisiones para Chatarrización de Fuentes Móviles. Santiago, Chile. 2009. p.24

COLOMBIA. EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA. Decreto 1071 DE 2015 (26, Mayo, 2015). Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo Agropecuario, Pesquero y de Desarrollo Rural. Bogotá D. C. 2015.

COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL AGROPECUARIO. Resolución 970 de 2010 (10, Marzo, 2010). Por medio de la cual se establecen los requisitos para la producción, acondicionamiento, importación, exportación, almacenamiento, comercialización y/o uso de semillas para siembra en el país, su control y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogota D. C., 2010. No. 47.648.

COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Decreto 3422. Por el cual se reglamentan los sistemas de transporte públicos de conformidad con la ley 1151 de 2007. 9, septiembre, 2009.

CUSHION E., WHITERMAN A., DIETERLE, G. Desarrollo de la bioenergía. Efectos e impactos sobre la pobreza y la gestión de los recursos naturales. Washington. 2010. Ediciones Gondo.

DEATON, A. El Gran Escape. Salud, bienestar y los orígenes de la inequidad. Madrid. 2015. Fondo de Cultura Económica de España.

DRAGO, R., MATWIYOFF, N., Ácidos y Bases. D. C. Heath and Company. Lexinton, Masachusetts. 1968.

El Mundo. Alerta mundial por la contaminación en las ciudades de todo el planeta [ON line]. 18 de enero de 2016. Disponible en Internet: http://www.elmundo.es/salud/2016/01/18/569bba3d268e3ea1548b45e4.html

El Tiempo. Redacción vida hoy. de agosto de 2010. Óp. Cit.

EVANGELISTA-FLORES, A.; ALCÁNTAR-GONZÁLEZ, F. S.; RAMÍREZ DE ARELLANO ABURTO, N.; COHEN BARKI, A.; ROBLEDO-PÉREZ, J. M.; CRUZ-GOMÉZ, M. J. Diseño De Un Proceso Continuo De Producción De Biodiesel Revista Mexicana de Ingeniería Química, vol. 13, núm. 2, 2014, pp. 483-491. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa. Distrito Federal, México.

FALASCA, S. y BERNABÉ, M. El reemplazo del cultivo de jatropha curcas en Argentina por Pongamia Pinnata. Río de Janeiro. 2012. XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia.

FEDEPALMA, Balance económico del sector palmero colombiano en 2013. Bogotá. 2014

FERRERO, A. J., ROSA, I. M., VENECIANO, E. Proceso De Purificación De La Glicerina Obtenida Del Biodiesel A Pequeña Escala. CITELAC. Universidad Tecnológica Nacional. Villa María. Córdoba. 2010.

FRIANCO, M. Simulación del proceso de producción de biodiesel a partir de aceites vegetales (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). Barcelona. 2013.

GÓMEZ, S., GÓMEZ, L. y MORANTES, M. Incidencia de la calidad del aire en la anatomía de hojas de Pittosporum undulatum Vent. y Sambucus nigra L en Bogotá. 2015. Boletín Semillas Ambientales.

GORDILLO, J. Development and Implementation of a Hybrid Photovoltaic System for Energy Back-up, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2009.

GUALTEROS, J. Estudio prospectivo de la cadena productiva del Biodiesel a partir de palma africana en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 2013.

GUILLEN F. ¿Puede España Liderar el desarrollo del sector de vehículos eléctricos? Guía del vehículo eléctrico. Fundación de la energía de la comunidad de Madrid 2009. p.39.

HALLIDAY J., ANGLISS M., ADAMSON G. Science Innovation Pipeline. Queensland. Australia. 2016.

HERNÁNDEZ M., y HERNÁNDEZ, J. Verdades y mitos de los biocombustibles. Ciencia y cultura elementos. 2008. pp. 15-18.

HERNÁNDEZ SAMPIERI, R. Metodología de la Investigación. Bogotá. 2010. Editorial McGraw Hill.

HERRERA, Juan; VELEZ, Julián. Caracterizacion Y Aprovechamiento Del Aceite Residual De Frituras Para La Obtencion De Un Combustible (Biodiesel). Trabajo de Grado Tecnólogo Químico. Pereira. Universidad Tecnológica De Pereira. Facultad De Tecnología. Tecnología Química. 2008.

KAZAKOFF S. y GRESSHOFF, P. Pongamia pinnata, a sustainable feedstock for biodiesel production. Energy crops. 2011. Royal Society of chemistry, pp. 233-254.

KLEIN-MARCUSCHAMER, D., TURNER, C., ALLEN, M., GRAY, P., DIETZGEN, R. G., GRESSHOFF, P. M., HANKAMER, B., HEIMANN, K., SCOTT, P. T., STEPHENS, E., SPEIGHT, R. AND NIELSEN, L. K. Technoeconomic analysis of renewable aviation fuel from microalgae, Pongamia pinnata, and sugarcane. 2013. En: Biofuels, Bioprod. Bioref. vol 7. p 416–428.

KUBOTA V., GÓMEZ M., DE ORTÍZ, M. Estudio de germinación de semillas de pongamia pinnata (L.) Pierre. Investigación Agraria. 2013. V 11 N2. pp. 45-48.

LÓPEZ, Carlos. Historia del auto eléctrico. Club de autos eléctricos de Chile. 2 de agosto de 2010. [En línea]. Documento electrónico. Consultado en marzo 10 de 2015. Disponible en http://www.autos electricos.cl/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=37&ltemid=60

MAI, HJ. A&B Partners With California-Based Company To Grow Energy Crop On Former Maui Sugar Land. En: Pacific Business News. Junio 21, 2017.

MANKINS JOHN C. Technology Readiness Levels. NASA. Washington D. C. 1995.

MARSHAL J y NAZAROFF W. Environmental Engineering Science, New York. 2006. John Wiley & Sons.

MOSQUERA, M., VALDERRAMA, M., FONTANILLA, C., RUÍZ, E., UÑATE, M., RINCÓN, F., & ARIAS, N. (2016). Costos de producción de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia en 2014 (2016). Palmas, 37(2), 37-53

Naciones Unidas. Objetivos de Desarrollo del Milenio. Informe de 2013. Washington. 2013. Naciones Unidas.

Oficina Europea de I+D. Niveles de madurez Tecnológica - Technology Readiness Levels (TRLs). Universidad Complutense de Madrid. Madrid. 2016. Visto el 23 De octubre de 2017. Disponible en http://oficinaeuropea.ucm.es/index.php?option=com_k2&view=item&id=141:niveles-de-madurez-tecnologica-technology-readiness-levels-trls&Itemid=342

PASHOVA, V. A., & López González, C. A. (2004). El biodiesel a partir de aceites vegetales: una fuente de nuevas bioindustrias. (J. Osorio Gòmez, Ed.) TECNOLOGICAS (13), 9-23

PEREZ, Leticia; SALGUEIRO, José; MACERÍAS, Rocío. Producción de Biodiesel mediante transesterificación in situ a partir de algas marinas. 1 ed. Vigo, España. Meubook. 2016.

Pongamia S.A. Árbol de joyab bio-energy, proyecto: "siembra, cultivo y cosecha de joyab". Ciudad de Guatemala: 100%bio. 2006.

PRASAD, Sytaram. Study of performance and emissions of C.I. Engine with pongamia based biodiesel. Thapar University, Patiala. Punjab, India. 2016.

PRIETO, Maria. Un coche híbrido de 1917. [En línea]. Disponible en Internet. Consultado en marzo 12 de 2015. http://blocly.com/motor-giga/un-coche-hibrido-de-1917/gmx-niv119-con661.htm

PUIG, D. La introducción de la Salud en la COP 20: el reloj no se detiene en el camino a París. Revista Cubana de Salud Pública. 2016. V 42 N1. pp. 176-177.

RAHIMI Eichi, ZENG H., CHOW M. Estudio sobre la Electrificación de Transporte en un Marco de Ambiente Inteligente. Informática Industrial. IEEE. Buenos Aires. 2011.

REYNA, L. Producción y caracterización de biodiesel mediante catálisis heterogénea empleando hidróxidos dobles laminares. Guanajuato: Universidad Autónoma de San Luis de Potosí. 2015.

RIKA Victoria, ENCISO Manuel, VERA Mirtha. Influencia del tamaño de maceta y la composición de sustrato sobre la calidad de Pongamia pinnata (L.) Pierre. Investig. Agrar. 2015. V 17 N1. pp.65-71.

ROMANSKI, J.; NOWAK, P.; KOSINSKI, K.; JURCZAK, J. High-pressure transesterification of sterically hindered esters. Tetrahedron Lett. vol 53. 2012

SÁNCHEZ, Martha Elena. Evolución de los Biocombustibles en Colombia y su incidencia sobre el precio de los alimentos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Económicas, Escuela de Economía. Bogotá. 2015.

SANGWAN S., RAO, D. y SHARMA, R. A review on Pongamia Pinnata (L.) Pierre: A great versatile leguminous plant. Nature and Science. 2010. V 8 N 11. p.p. 130-139.

SANTANA A. E., Obtención de biodiésel por catálisis heterogénea con catalizadores alcalinos. Aceite procedente de cultivos energéticos. Universidad de La Laguna. España. 2017.

SERRANO, Marta. Estudio de la influencia de las materias primas en la producción y propiedades de biodiesel como combustible. Universidad Complutense de Madrid. Tesis doctoral. 2016.

SILVIA, F. y BERNABÉ M. El reemplazo del cultivo de jatropha curcas en Argentina por Pongamia Pinnata. Buenos Aires: Congreso Brasilero de meteorología. 2009.

STUCLEY C., SHUCK S., SIMS R., BLAND J., MARINO B., BOROWITZKA M., ABADI A., BARTLE J., GILES., THOMAS Q., Bioenergy In Australia, Satus and Opportunities. Surrey Hills, Australia. 2012.

Work Energy Outlook. Washington. 2012. E.I.A.

ZAPATA, D. MARTINEZ, I. CASTIBLANCO, E. HENAO, C. Producción De Biodiesel A Partir De Aceite Crudo De Palma: 1. Diseño Y Simulación De Dos Proceso Continuos. Pontificia Universidad Bolivariana. Medellin. Colombia. 2006.