

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología
Unidad Valle de las palmas



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL USO DEL ACEITE DE JOJOBA (*SIMMONDSIA CHINENSIS* (LINK.) C.K. SCHNEID) PARA LA PRODUCCIÓN DE BODIESEL

Tesis que para obtener el título de:

INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

Presenta:

Catalina Ayala Ruiz

Directora de Tesis:

Dra. María Cristina Castañón Bautista

Co-Director de Tesis:

Dr. Gerardo César Díaz Trujillo

Tijuana, B. C.

Octubre 2016.

DEDICATORIAS

A todos aquellos que directa o indirectamente me apoyaron a finalizar este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por el apoyo brindado. A la Dra. María Cristina Castañón Bautista por todo el apoyo y las facilidades brindadas para finalizar este trabajo, así como su confianza.

Agradecimientos especiales al Dr. Gerardo Cesar Díaz Trujillo por las facilidades otorgadas para trabajar en el laboratorio de materiales en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de UABC, así como a sus alumnos de posgrado, Q. I. Agustín González Luis y Q. I. Jaime Gabriel Martínez Ortiz por su apoyo y tiempo para apoyarme en la realización de la caracterización de las muestras con los equipos de Resonancia Magnética Nuclear y Espectroscopia de Infrarrojo, respectivamente.

Al M. C. Luis Alberto Montes Zaragoza por el tiempo brindado y las facilidades, así como su consejo sincero para la realización de la germinación.

A mis maestros, Mtro. Eric Efren Villanueva Vega, Dr. Felipe Noh Pat, Mtro. Rene Delgado Rendón por el apoyo brindado durante mi estancia en la Universidad Autónoma de Baja California.

Al Ing. Ricardo Erisel Guevara Loera por su apoyo y paciencia para la realización de este trabajo, así como su consejo.

Mis agradecimientos sinceros a todas las personas que formaron parte de este proyecto y que me apoyaron directa o indirectamente para realizar este trabajo de tesis.

RESUMEN

En este estudio se determinará si la especie de Jojoba (*Simmondsia Chinensis (Link.) C.K. Schneid*) representa una opción para un nuevo cultivo energético dentro de la región de Baja California Norte, para el aprovechamiento del aceite obtenido de su semilla en la producción de biodiesel.

Se realizarán germinaciones de la semilla para observar su adaptabilidad a diferentes tipos de sustratos y se llevara a cabo en laboratorio la reacción de transesterificación con aceite de Jojoba (*Simmondsia Chinensis (Link.) C.K. Schneid*) puro de origen comercial y metanol, utilizando como catalizador dos compuestos inorgánicos: hidróxido de sodio e hidróxido de potasio. Todo lo anterior, con la finalidad de obtener ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) por sus siglas en inglés: Fatty Acid Methyl Ester, mejor conocidos como Biodiesel.

Realizados estos experimentos se determinará si el biodiesel obtenido a partir del aceite de Jojoba (*Simmondsia Chinensis (Link.) C.K. Schneid*), presenta similitudes en composición comparando con otros estudios realizados de biodiesel a partir de aceite de Jojoba y de otras especies oleaginosas. Mediante un análisis químico de espectroscopia de infrarrojo y resonancia magnética nuclear, se compararán los resultados obtenidos en la espectroscopia del infrarrojo y resonancia magnética nuclear con los resultados de biodiesel a partir de aceite de otras especies oleaginosas. Para finalmente concluir si la Jojoba (*Simmondsia Chinensis (Link.) C.K. Schneid*) podría ser apta para su cultivo en las zonas desérticas de la región y el aceite obtenido de su semilla pueda funcionar para la producción de biodiesel, y si no fuese así, realizar las pertinentes observaciones y recomendaciones para la obtención de mejores resultados.

CONTENIDO

INDICE DE TABLAS	6
INDICE DE FIGURAS.....	6
OBJETIVO	8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
INTRODUCCION	9
1. MARCO TEÓRICO	10
1.1 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL Y AGOTAMIENTO DE LOS RECURSOS NO RENOVABLES A CAUSA DEL USO DE COMBUSTIBLES DE ORIGEN FÓSIL.....	10
1.1.1 Emisiones de gases de efecto invernadero a causa del uso de combustibles fósiles.....	10
1.1.2 Agotamiento de los combustibles fósiles.....	12
1.2 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL GENERADA POR EL USO DE COMBUSTIBLES FOSILES	14
1.2.1 Biocombustibles.....	14
1.2.2 Cultivos energéticos	17
1.2.3 Los biocombustibles en México.....	19
1.3 PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.....	22
1.3.1 Primeros descubrimientos en la producción de biodiesel	22
1.3.2 Reacción de transesterificación: Medio básico y ácido	23
1.3.3 Proceso para la obtención de biodiesel	24
1.4 APROVECHAMIENTO DE LAS ZONAS ÁRIDAS DEL NORTE DE MÉXICO Y SUS ESPECIES POTENCIALES.....	26
1.5 DESCRIPCIÓN DE LA JOJOBA Y SU POTENCIAL COMO MATERIA PRIMA PARA LA ELABORACIÓN DE BIODIESEL.....	27
1.5.1 La Jojoba y su hábitat natural.....	28
1.5.2 Cultivo de Jojoba: Principales características, recolección de semilla y recomendaciones	29
1.5.3 Extracción del aceite-cera de la semilla de Jojoba: Prensado en frío y extracción por solventes.....	31
1.5.4 Características fisicoquímicas del aceite-cera obtenido de la semilla de Jojoba	33
1.5.5 Elaboración de biodiesel a partir de aceite-cera de la semilla de Jojoba	34
1.6 TÉCNICAS DE ANÁLISIS	37

1.6.1 Espectroscopia de infrarrojo	37
1.6.2 Espectroscopia de infrarrojo en la caracterización de muestras de biodiesel	38
1.6.3 Resonancia magnética nuclear	40
1.6.4 Resonancia magnética nuclear en la caracterización de muestras de biodiesel.....	41
2. JUSTIFICACIÓN	42
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	43
3.1 RECOLECCIÓN DE SEMILLAS DE JOJOBA.....	44
3.2 GERMINACIÓN DE LAS SEMILLAS DE JOJOBA	46
3.2.1 Materiales y proceso: Germinación en medio húmedo.....	46
3.2.2 Materiales y proceso: Germinación directa	47
3.2.3 Observaciones	47
3.3 ELABORACION DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE-CERA DE SEMILLA DE JOJOBA ESCALA LABORATORIO	49
3.3.1 Materiales y proceso	50
3.3.2 Observaciones	56
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
4.1 RESULTADOS DE LA GERMINACION DE LAS SEMILLAS DE JOJOBA	57
4.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ELABORACION DE BIODIESEL DE ACEITE- CERA DE SEMILLA DE JOJOBA	59
4.2.1 Rendimiento teórico y real de la reacción de transesterificación	59
4.2.2 Análisis de las muestras por espectroscopia de infrarrojo	62
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
6. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	73
BIBLIOGRAFÍA	75

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen de las emisiones de GEI 1990-2010 por tipo de gas en fuente y sumideros en Gg de CO ₂ eq.	11
Tabla 2 Comparación de casos de estudio para la elaboración de biodiesel	36
Tabla 3 Materiales e insumos para la elaboración de biodiesel a partir de aceite-cera de jojoba escala laboratorio	50
Tabla 4 Cantidades obtenidas de los experimentos	59
Tabla 5 Rendimientos porcentuales obtenidos	61
Tabla 6 Señales obtenidas en el análisis por espectroscopia de infrarrojo	64
Tabla 7 Relación Señal RMN/Grupo asignación/Referencia	69

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Proceso de producción de bioetanol	15
Figura 2 Oferta de aceite vegetal en el mundo	18
Figura 3 Reacción de transesterificación de triglicéridos mediante metanol en medio básico ...	23
Figura 4 Proceso para la obtención de biodiesel.....	25
Figura 5 Distribución de las plantas hembras y macho de Jojoba	29
Figura 6 Usos del aceite de semilla de Jojoba	31
Figura 7 Reacción de transesterificación del aceite-cera de Jojoba.....	34
Figura 8 Resumen del proceso de obtención de biodiesel a partir del aceite - cera de Jojoba	36
Figura 9 Espectro IR de biodiesel obtenido de aceite de maíz usado.....	39
Figura 10 Espectro de biodiesel con excesiva interferencia de vapor de agua.....	40
Figura 11 Espectro H RMN de biodiesel obtenido de aceite-cera de Jojoba.....	41
Figura 12 Procedimiento empleado para la germinación de la semilla de Jojoba	43
Figura 13 Fruto de Jojoba maduro	44
Figura 14 Semilla de jojoba al centro y frutos secos de Jojoba	45
Figura 15 Germinación de las semillas de Jojoba por medio húmedo: a) Recipiente preparado para germinación b) Semillas en recipiente c) Semillas cubiertas con una toalla humedecida	46
Figura 16 Germinación directa de las semillas de Jojoba: a) Recipiente preparado para germinación b) Sustrato utilizado para germinación directa c) Siembra directa de la semilla	47
Figura 17 Aceite-cera de Jojoba de origen comercial.....	51
Figura 18 Metodología para la elaboración de biodiesel a partir de aceite-cera de Jojoba	51
Figura 19 Pretratamiento del aceite: a) Aceite de Jojoba b) Aceite a temperatura y agitación constante.	52
Figura 20 Disolución del catalizador: a) Metanol b) Catalizador vertido en el metanol	52
Figura 21 Reacción de transesterificación: a) Vertido del catalizador y el metanol en el aceite b) temperatura y agitación constante c) Aceite en proceso de reacción.....	53

Figura 22 Separación de biodiesel y glicerol: a) Muestra una vez terminado el proceso calentamiento y agitación constante b) Muestra en reposo c) Fases visibles de glicerol y biodiesel	53
Figura 23 Separación de glicerol de la muestra de biodiesel: a) Mezcla de biodiesel b) Glicerol	54
Figura 24 Lavado del biodiesel: a) Agitación y lavado b) Decantación del agua residual c) Separación de agua y biodiesel (Biodiesel limpio).....	54
Figura 25 Muestra de biodiesel obtenido.....	55
Figura 26 Raíces de Jojoba resultado de la germinación por medio húmedo.....	57
Figura 27 Plántula de Jojoba, resultado de la germinación directa.....	58
Figura 28 Glicerol obtenido	59
Figura 29 Espectrómetro FT-IR Modelo Nicolet is5	62
Figura 30 Espectrografía de infrarrojo muestras NaOH	62
Figura 31 Espectrografía de infrarrojo muestras KOH.....	63
Figura 32 Espectrografía de infrarrojo muestra 1 con KOH.....	66
Figura 33 Espectrografía de infrarrojo muestra 2 con KOH.....	67
Figura 34 Espectrografía de infrarrojo muestra 1 con NaOH.....	67
Figura 35 Espectrografía de infrarrojo muestra 2 con NaOH.....	68

OBJETIVO

Evaluar el potencial del aceite de la semilla de jojoba (*Simmondsia Chinensis (Link.) C.K. Schneid*), mediante su uso como materia prima, para la elaboración de biodiesel y caracterizar las muestras obtenidas para corroborar la presencia de metil ésteres de ácidos grasos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Germinar semillas de Jojoba obtenidas por la recolección manual en la zona de Tijuana, en medio húmedo y en sustrato para comparar el índice de éxito de la germinación por ambos métodos.

Elaborar biodiesel de aceite de jojoba (*Simmondsia Chinensis (Link.) C.K. Schneid*) de origen comercial, a escala laboratorio.

Determinar el rendimiento teórico de la reacción y con base en rendimiento real, determinar el rendimiento porcentual de la reacción de transesterificación.

Analizar y evaluar las muestras de biodiesel obtenido con aceite de origen comercial por medio de la técnica de Espectroscopia de Infrarrojo.

Analizar y evaluar las muestras de biodiesel obtenido con aceite de origen comercial a través de la técnica de Resonancia Magnética Nuclear.

Con base en la caracterización fisicoquímica, determinar la presencia de metil ésteres de ácidos grasos de aceite de Jojoba (*Simmondsia Chinensis (Link.) C.K. Schneid*).

INTRODUCCION

Mucho antes de que las sociedades modernas tuvieran a su alcance sistemas de energía basados en combustibles fósiles, la única manera de generar energía o transportarse era a base de fuentes renovables ya que representaban un aprovechamiento de los recursos con los que se contaba en aquel entonces. Ejemplo de ello es el viento que servía para impulsar barcos, la energía del agua para impulsar molinos y utilizar a los animales para realización de tareas agrícolas o de transporte (SAGARPA, SENER, SE, SEMARNAT, & SHCP, 2009).

El primer motor construido por Henry Ford operaba con alcohol de caña, lo que hoy en día conocemos como etanol. Cuando Rodolfo Diesel desarrollo el primer motor diésel utilizó un combustible derivado del aceite vegetal parecido al biodiesel (SAGARPA, SENER, SE, SEMARNAT, & SHCP, 2009).

Así pues, como no se contaba con la suficiente tecnología para aprovechar las fuentes fósiles del planeta, el desarrollo de estos motores, impulsó con ello el desarrollo de la tecnología y la implementación de métodos para la extracción de combustibles fósiles y una mayor utilización de estos en los motores.

En la actualidad nos enfrentamos a otro reto, las fuentes de energía fósil hoy son causantes de uno de los efectos que más ha trastornado al planeta: El calentamiento global. Otro grave problema de esto, es la dificultad que se está presentando en la extracción de petróleo, ya que los yacimientos de aguas profundas requieren una tecnología avanzada. Y el último reto es enfrentar el agotamiento de los combustibles fósiles en el futuro.

Pese a estas problemáticas, surge la alternativa de elaboración de biocombustibles a base del aceite obtenido de semillas oleaginosas, que con su uso prolongado pueden sustituir el uso del petróleo y además reducirían los gases de efecto invernadero. El biodiesel es una alternativa sustentable y energética de bajo impacto ambiental, con un subproducto generado en su preparación, que es la glicerina. Ésta, es popularmente utilizada en la industria cosmética para la elaboración de jabones, geles de baño y cremas cosméticas entre otros usos.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL Y AGOTAMIENTO DE LOS RECURSOS NO RENOVABLES A CAUSA DEL USO DE COMBUSTIBLES DE ORIGEN FÓSIL

Hace ya algunas décadas la sociedad comenzó a preocuparse acerca de los problemas ambientales generados por el uso de los combustibles de origen fósil (carbón, petróleo y gas natural), para la generación de energía y el transporte, prueba de ello fueron los estudios realizados por investigadores en el área, acerca de las posibles consecuencias irremediables si el uso de estos combustibles no se disminuía, incluyendo los productos derivados del petróleo, que además generaban graves problemas de contaminación en aguas y suelos. Dadas las condiciones preocupantes del deterioro ambiental se presenta una revisión acerca de los problemas concernientes a este tema.

1.1.1 Emisiones de gases de efecto invernadero a causa del uso de combustibles fósiles

Existe un interés mundial en el uso a largo plazo de los biocombustibles en el sector transporte, dado que este representa una de las mayores fuentes de las emisiones de gases de efecto invernadero por la utilización de combustible fósil. Uno de las principales motivaciones para aumentar el uso de biocombustibles en el sector transporte es la posibilidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, tales como dióxido de carbono (CO₂), que contribuye al calentamiento global y el cambio climático (Hajbabaei, y otros, 2014) .

Dadas estas implicaciones en los últimos años, las agencias gubernamentales de todo el mundo han implementado una legislación que se dirige cada vez más el uso de biocombustibles en el sector transporte (Hajbabaei, y otros, 2014).

Según el inventario nacional de gases de efecto invernadero comprendido entre los años 1990 y 2010, entre los principales gases de efecto invernadero en México se encontraban, Metano (CH₄), Óxido nitroso (N₂O), Hidrofluorocarburos (HFC), Perfluorocarburos (PFC), Hexafluoruro de azufre (SF₆) y Dióxido de carbono (CO₂), este último es el que presenta el mayor índice de emisiones.

A continuación, se muestra la tabla 1, las emisiones de gases de efecto invernadero por área.

Tabla 1 Resumen de las emisiones de GEI 1990-2010 por tipo de gas en fuente y sumideros en Gg de CO₂ eq.

Año	Emisiones de CO₂	Absorción de CO₂	CH₄	N₂O	HFC	PFC	SF₆	Emisiones totales
1990	407,148.6	-8,070.7	104,325.7	56,178.7	776.5	646.8	29.6	561,035.2
1991	439,561.5	-9,415.8	102,446.7	54,998.6	901.3	306.5	32.1	588,830.9
1992	432,955.6	-10,760.9	101,189.9	54,158.2	618.6	271.0	35.9	578,468.3
1993	436,930.4	-11,356.7	105,631.5	55,633.2	1,270.1	165.5	40.2	588,314.2
1994	454,782.5	-11,956.2	107,018.3	55,847.7	1,173.7	0.0	41.1	606,910.8
1995	428,649.6	-12,548.3	105,981.3	55,428.7	1,723.1	66.9	42.6	579,343.8
1996	437,695.5	-13,144.1	111,325.0	55,441.4	3,135.9	394.3	50.2	594,898.2
1997	448,436.5	-13,739.8	113,169.7	56,217.1	3,852.1	426.0	51.7	608,413.2
1998	465,734.7	-14,335.6	115,873.4	57,453.8	4,075.9	432.4	53.1	629,287.8
1999	454,826.2	-14,931.4	117,490.1	58,285.7	5,075.5	498.6	55.0	620,299.7
2000	471,784.0	-15,527.2	118,978.6	58,142.0	5,686.2	543.3	56.9	639,663.8
2001	460,840.5	-16,123.0	117,860.1	59,667.6	4,913.8	330.7	59.8	627,549.5
2002	446,241.9	-17,091.0	120,219.9	60,722.4	5,824.6	250.4	69.8	616,237.9
2003	456,612.2	-18,058.9	123,372.1	61,358.3	5,935.5	160.5	78.0	629,457.6
2004	487,948.1	-19,026.9	123,970.0	63,329.3	6,404.8	128.4	84.2	662,837.9
2005	482,141.1	-19,994.9	132,606.8	63,589.2	8,351.1	128.4	91.4	666,913.0
2006	495,126.3	-19,617.7	142,139.6	64,694.9	12,496.9	128.4	90.9	695,059.3
2007	513,067.2	-19,240.6	147,614.3	66,448.7	14,077.7	128.4	111.9	722,207.7
2008	526,121.8	-18,863.4	158,330.2	68,332.0	15,189.5	128.4	110.1	749,348.6
2009	506,846.6	-18,486.3	165,454.4	68,602.9	14,905.4	128.4	108.1	737,559.6
2010	511,559.8	-18,109.2	166,716.4	69,140.1	18,692.3	128.4	124.4	748,252.2

Fuente: SEMARNAT. (2013). Inventario nacional de gases de efecto invernadero 1990-2010. D.F., México

En las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) por tipo de combustible en 2010, se observaba que el consumo de gasolina y gas natural representaban la mayor contribución a las emisiones de esta categoría, 25.4% y 31.0%, respectivamente. Les siguen en importancia el diésel y combustóleo, que aportan 14.7% y 9.8%, respectivamente, y el restante 20% corresponde al carbón, coque de carbón, coque de petróleo, gas licuado del petróleo (GLP) y querosenos. En el año 2010 las emisiones de gases de efecto invernadero en unidades de CO₂ equivalentes generadas en la categoría de energía provinieron del transporte, que contribuyó con 33.0% (SEMARNAT, 2013).

1.1.2 Agotamiento de los combustibles fósiles

Dado el aumento de la dependencia del uso de combustibles fósiles, en las últimas décadas se han generado dos tipos de preocupaciones. Desde el año 1992 ha imperado la preocupación por el impacto ambiental generado de la quema de combustibles fósiles (Salaet Fernández & Roca Jusmet, 2010). A la vez surgió una inquietud por la limitación de los combustibles fósiles y el futuro agotamiento de las reservas de estos. En los años sesenta y en los primeros años ochenta dominó en el debate público la preocupación por la limitación de las reservas de petróleo: eran los años en que las fluctuaciones en precios del petróleo afectaron a las economías ricas (Salaet Fernández & Roca Jusmet, 2010). No fue hasta entrado el siglo XXI que se generaron nuevos debates públicos sobre el agotamiento del petróleo dado que en pocos años los precios aumentaron considerablemente (\$ 50 por barril de crudo hasta casi \$ 150 por barril) (Salaet Fernández & Roca Jusmet, 2010).

Algunos autores han advertido desde hace tiempo que las reservas de combustibles fósiles son muy limitadas y que la demanda masiva de energía ha posibilitado que estas fuentes de energía primaria no duraran para siempre (Salaet Fernández & Roca Jusmet, 2010).

En otro estudio argumenta que estamos en el inicio del fin de la era de los combustibles fósiles, que se producirá como resultado de alcanzar el techo de la extracción del petróleo. Además de enfrentarnos a otros problemas derivados del agotamiento de los combustibles fósiles, tales como la alimentación de una población en ascenso, la cada vez mayor demanda de combustibles y el inminente cambio climático derivado del uso de estos combustibles (Fernández, 2007).

Aunque es claro el panorama tan desalentador, en lo que se refiere al fin de la era del crudo y su inminente agotamiento, lo que pareció confirmarse por cerca de una década, no fue un hecho, ya que a finales del siglo pasado se realizaron nuevos descubrimientos y sobre todo la explotación de yacimientos considerados no rentables, al mantenerse creciente el volumen de reservas (Álvarez Béjar & Lina Montes, 2014).

El ligero repunte en los recursos y su duración se debió a los nuevos descubrimientos en yacimientos denominados no-convencionales, como son las arenas bituminosas, los crudos pesados y ultra-pesados más difíciles de refinar y los que se encuentran en aguas profundas y ultra-profundas (Álvarez Béjar & Lina Montes, 2014).

Si bien no se puede garantizar la permanencia del crudo o determinar el día exacto de su fin, lo que, si podemos estimar, es que nos encontramos en los tiempos del fin del petróleo barato (Álvarez Béjar & Lina Montes, 2014).

Dadas estas problemáticas inminentes se debe hacer frente a esto con otro tipo de opciones para poder solucionar estos problemas, tales como la utilización de fuentes de energía renovable para dar abasto a la demanda energética en un futuro cercano.

1.2 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL GENERADA POR EL USO DE COMBUSTIBLES FOSILES

Una vez conocidos los problemas ambientales, que pueden ser generados por el uso de combustibles fósiles, surge la alternativa de uso de fuentes de energía renovable para la generación de energía y la utilización de biocombustibles en el sector transporte, principalmente.

1.2.1 Biocombustibles

Los biocombustibles tienen componentes que se derivan de la biomasa (materia orgánica), y estos a su vez son los sustitutos perfectos de los combustibles convencionales o de origen fósil, ya que su uso garantiza la reducción de gases de efecto invernadero dióxido de carbono (CO₂).

Los biocombustibles pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos, su última finalidad es liberar la energía que contienen sus componentes químicos mediante una reacción de combustión (Álvarez Maciel, 2009).

Existen diversos tipos de biocombustibles, entre los más “populares” se encuentran bioetanol, biogás y biodiesel (Castro, Coello , & Castillo-Lima, 2007).

El bioetanol se produce por la fermentación de los azúcares contenidos en la materia orgánica de las plantas. En este proceso se obtiene alcohol hidratado, con un contenido aproximado del 5% de agua, que al ser deshidratado se puede utilizar como combustible (García Camús & García Laborda, 2006), en la figura 1 se muestra un diagrama que resume la producción de bioetanol.

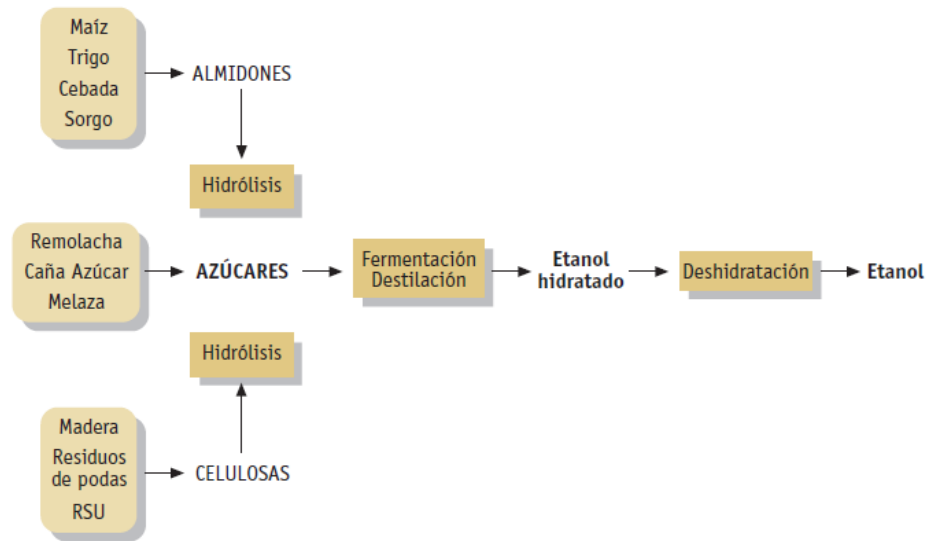


Figura 1 Proceso de producción de bioetanol

Fuente: García Camús, J., & García Laborda, J. (2006). Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol. Madrid: Fundación para el conocimiento madri+d CEIM.

Se utilizan tres familias de productos para la obtención de bioetanol:

- Azúcares: Extraídos de caña, por ejemplo.
- Cereales: Mediante la fermentación de los azúcares del almidón.
- Biomasa: Por fermentación de los azúcares contenidos en la celulosa (García Camús & García Laborda, 2006).

El biogás es el producto de una descomposición anaeróbica de la materia orgánica en presencia de algunos microorganismos. El término anaeróbico se refiere a un ambiente en ausencia de oxígeno (Gutiérrez García, y otros, 2012).

El biogás se compone aproximadamente de 55% metano (CH₄) y 45% de dióxido de carbono (CO₂), además de otros elementos. Se genera a partir de reacciones de biodegradación de la materia orgánica de forma natural o artificial en dispositivos específicos (Gutiérrez García, y otros, 2012).

El biogás se puede generar a partir de los desechos agrícolas, por lo tanto, se puede decir que la materia prima que se utiliza para la producción de biogás se encuentra disponible todo el año.

Para la conversión de la biomasa en biogás es necesaria una digestión o descomposición anaerobia en la cual las bacterias involucradas degradan dicha materia, dando lugar a la producción de biogás al final del proceso (Gutiérrez García, y otros, 2012).

El biodiesel es un combustible líquido producido a partir de materias renovables (aceites vegetales o grasas animales), que actualmente sustituye parcial o totalmente al diésel derivado de petróleo en los motores de combustión interna de alta compresión. Se presume que duplica la vida útil de los vehículos, no obstante, algunas de sus propiedades deben ser mejoradas para poder reemplazar completamente el uso de combustibles fósiles (Medina Ramírez , Chávez Vela, & Jáuregui Rincón , 2012).

Para lograr que el biodiesel se convierta en una alternativa energética real, se necesita que este producto no solo presente características equivalentes a las del diésel de petróleo, sino también que, en el conjunto de procesos de obtención, se logren balances energéticos positivos y que éste llegue al mercado con un costo similar al del diésel de petróleo (Medina Ramírez , Chávez Vela, & Jáuregui Rincón , 2012).

El biodiesel se describe químicamente como una mezcla de ésteres de alquilo (metilo y etilo, principalmente), con cadenas largas de ácidos grasos. Estas cadenas, al estar oxigenadas, le otorgan al motor una combustión más limpia (Medina Ramírez , Chávez Vela, & Jáuregui Rincón , 2012) .

La norma D 6751-03 a de la American Society for Testing and Materials (ASTM) lo define como un combustible constituido por esterres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga, derivados de lípidos renovables como aceites vegetales o grasas animales que pueden ser empleados en motores diésel o en calderas de calefacción (Torossi Baudino, 2006).

1.2.2 Cultivos energéticos

Los cultivos energéticos, son aquellos cultivos destinados a la producción de combustibles de origen vegetal y/o a la producción directa de energía eléctrica a través del aprovechamiento de la biomasa como fuente de calor. Estos cultivos únicamente serán dedicados a la producción de biocombustibles, que finalmente será destinada a la transformación a alguno de sus derivados como lo son el bioetanol o biodiesel (Castro, Coello , & Castillo-Lima, 2007).

Dentro de las características ideales que deben cumplir los cultivos energéticos, las siguientes son las más importantes:

- Altos niveles de productividad en biomasa con bajos costos de producción para que la producción de biocombustibles sea económicamente viable en relación con los combustibles de origen fósil.
- No contribuir a la degradación del medio ambiente, de tal forma que el balance ambiental producido por el cultivo sea mejor al que se produciría si la tierra no estuviese cultivada o fuera ocupada por un cultivo tradicional.
- Posibilidad de desarrollarse en tierras marginales.
- Posibilidad de recuperar fácilmente las tierras después de finalizado el cultivo energético para realizar otros cultivos.
- Requerimientos técnicos convencionales, normalmente disponibles por los agricultores, similares a los empleados para otros cultivos propios de la zona.
- Tener un balance energético positivo, es decir, que la energía neta contenida de la biomasa producida sea superior a la gastada en el cultivo, en la obtención de los productos y en la generación de la energía utilizable (Castro, Coello , & Castillo-Lima, 2007).

Aunque se pueden utilizar múltiples fuentes alternativas para la producción de biodiesel, casi la totalidad del biodiesel que se produce proviene de los aceites de origen vegetal. Los principales cultivos: la palma, soja y la colza. Estos tres cultivos proveen el 75% de la oferta mundial de aceite (se puede apreciar en la figura 2) (IICA, 2010) .

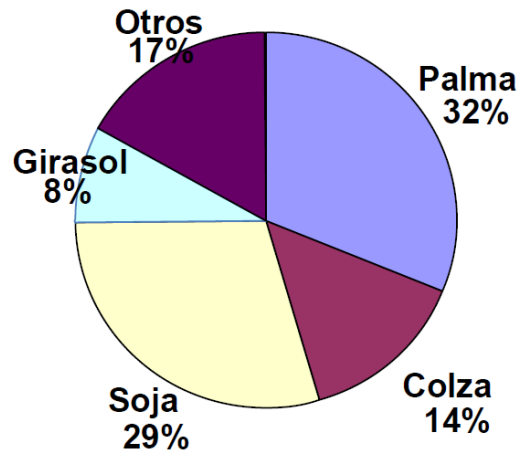


Figura 2 Oferta de aceite vegetal en el mundo
 IICA, I. I. (2010). "Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiesel". San José, Costa Rica.

Dentro de las principales fuentes de aceite en el mundo se encuentran las siguientes especies, Soja (*Glycine max*), Palma aceitera o palma africana (*Elaeis guineensis*), Cocotero (*Cocos Nucifera L.*), higuierilla o ricino (*Ricinus communis*), Piñón (*Jatropha curcas L.*), girasol (*Helianthus annus L.*), cacahuete (*Arachis hypogae*), Canola o Colza (*Brassica napus*), Cártamo (*Carthamus tinctorius*), Palmera (*Mauritia flexuosa*), Sacha inchi (*Plukenetia vlubilis*), Algodón (*Gossypium spp*) y Linaza (*Linum usitatissimum*) (IICA, 2010) .

1.2.3 Los biocombustibles en México

En el año 2007 la Secretaría de Energía (SENER) publicaba el informe: Potenciales y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México, elaborado gracias a una investigación exhaustiva de las alternativas para el uso de biocombustibles en México, el cual dio como resultado un trabajo detallado y complejo sobre todos los aspectos a considerar para la producción de bioetanol y biodiesel y el uso de estos en el sector transporte en México, en un futuro muy cercano. De este informe se derivaron también las estrategias a tomar en cuenta para su introducción en el mercado.

En el caso de bioetanol se proponía como materia prima, la utilización de caña de azúcar, maíz, yuca, sorgo y remolacha azucarera, en cuanto a los escenarios se proponía:

- Sustitución de la producción nacional de MTBE y TAME por ETBE y TAEE, manteniendo las importaciones de MTBE necesarias para satisfacer la demanda de las gasolinas oxigenadas de las Zonas Metropolitanas del Valle de México, Guadalajara y Monterrey.
- Sustitución del empleo de éteres mediante la oxigenación de gasolinas con etanol en las zonas metropolitanas.
- Mezcla del 10% (vol.) de etanol en las ventas totales de gasolinas del país (E10) (SENER, 2007).

Por otra parte, se estudiaron como cultivos oleaginosos potenciales para su transformación en biodiesel, la colza, soya, jatropha, girasol, y cártamo, así como el uso de sebo animal y aceite reciclado, estimándose costos de \$5.3 a \$12.4 pesos por litro equivalente de biodiesel (SENER, 2007).

Al igual que en el caso del etanol, este estudio sugiere una estrategia gradual de introducción del biodiesel en México. De manera inmediata, la introducción del biodiesel podría basarse sobre todo en el uso de materias primas de bajo costo como aceites y grasas recicladas. Como meta a mediano plazo se requerirán algún tipo de incentivos para la introducción del biodiesel de manera masiva a fin de permitir la sustitución de entre el 2% y 5% del diésel de petróleo después del 2012 (SENER, 2007).

Se propone pues para la producción de biodiesel:

- Mezcla del 5% de biodiesel y 95% Pemex Diésel (B-5).
- Mezcla del 10% de biodiesel y 90% Pemex Diésel (B-10).
- Mezcla del 20% de biodiesel y 80% Pemex Diésel (B-20).

Pese a este panorama tan alentador presentado en el año 2007 por SENER, estudios del año 2014 demuestran que el único avance concreto en cuanto a biocombustibles ha sido la emisión de la Ley de Bioenergéticos y su reglamento (Lina Montes & Álvarez Béjar, 2014). En cuanto a desarrollo industrial para la conversión de biomasa en biocombustible se encuentran pocos casos y no se comprueba el estado real de estos proyectos, entre ellos:

- BioFields: en Puerto Libertad, Sonora.
- Propalma: en Lázaro Cárdenas, Michoacán, en colaboración con Daimler Chrysler.
- Biocyclos: en Sinaloa.
- Proyecto Manhattan: en Sonora, cooperación entre el gobierno de México y la empresa Origin Oil Inc. (California).
- Universidad Vasconcelos, en Oaxaca: en 2004 se puso en operación una planta piloto a partir de aceite usado y diseñada por consultores de EE.UU.
- Biodiesel de México: instaló una planta en el estado de Hidalgo que inició operaciones a mediados de 2004 y utiliza soya como materia prima.
- Grupo Energéticos: en 2005 contaba con una planta comercial en Cadereyta, N.L., usando sebo de res.
- Destilería Argentina de Petróleos, S.A. de C.V., Biodiesel Industries Inc. (California), Entaban Ecoenergéticas y BM Bioingeniería Medioambiental (España): Interesadas en las acciones que está llevando a cabo el gobierno de Chiapas.
- JathroBioFuels (Alemania): propuso en abril 2008 invertir en la siembra de jatropha en el país y en una planta de biocombustible una vez que se tenga el volumen suficiente para producción.

Además de Universidades públicas del país que trabajan en distintos campos de los biocombustibles (Lina Montes & Álvarez Béjar, 2014).

1.3 PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

El biodiesel es un biocombustible que se obtiene mediante un proceso químico llamado transesterificación, en el cual los aceites orgánicos son combinados con un alcohol y alterados químicamente para formar un éster etílico o metílico, el cual recibe finalmente el nombre de biodiesel. Estas moléculas resultantes están compuestas por un ácido graso de cadena larga y un alcohol (Castro, Coello , & Castillo-Lima, 2007). En otras palabras, el biodiesel está definido como un combustible compuesto de mono-alquil ésteres de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales (Canoira, Alcántara, García-Martínez, & Carrasco, 2006).

1.3.1 Primeros descubrimientos en la producción de biodiesel

En 1853 los científicos E. Duffy y J. Patrick hicieron los primeros descubrimientos en el área de biocombustibles y desarrollaron la reacción de transesterificación (Balat & Balat, 2008) .

El uso de aceites vegetales como combustibles alternativos ha sido utilizado alrededor de 100 años cuando el inventor del motor diesel, Rudolph Diesel, probó aceite de cacahuete en su primer motor de compresión (Balat & Balat, 2008). En 1930 y 1940 los aceites vegetales fueron usados como combustibles, pero únicamente en situaciones de emergencia (Balat & Balat, 2008). En 1940 las primeras pruebas con metil y etil ésteres de aceites vegetales fueron realizadas en Francia, y al mismo tiempo científicos en Bélgica usaron etil ésteres de aceite de palma en autobuses (Balat & Balat, 2008). Los primeros descubrimientos más exhaustivos fueron hasta finales de 1970 y principios de 1980, cuando la preocupación por los altos precios del petróleo, se elevó motivando así la extensiva experimentación con grasas y aceites como combustibles alternativos (Balat & Balat, 2008). El biodiesel comenzó a ser ampliamente producido a principios de los años noventa y desde allí la producción ha ido incrementando continuamente. En la unión europea, el biodiesel comenzó a ser promovido en 1980 como un medio para evitar el declive de las zonas rurales y para responder a los niveles crecientes de la demanda de energía. Después del año 1995 fue ampliamente desarrollado en la unión europea (Balat & Balat, 2008) .

Desde 1853 varios estudios se han llevado a cabo utilizando una gran variedad de aceites tales como, la semilla de algodón, soja, aceite residual, colza y semilla de girasol entre otros.

Empleando diferentes alcoholes tales como el metanol, etanol y butanol. Así como diferentes catalizadores tales como hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, ácido sulfúrico y fluidos supercríticos o enzimas como las lipasas (Balat & Balat, 2008).

1.3.2 Reacción de transesterificación: Medio básico y ácido

La transesterificación es un término general que se utiliza para designar a las reacciones orgánicas en las cuales se produce un intercambio o sustitución del grupo acilo o alquilo de un éster (Torossi Baudino, 2006) . Esta reacción implica la conversión de un éster a otro tipo de éster (Cantero Vergara & Faber Archila, 2010). La transesterificación se puede definir como la reacción mediante la cual los triglicéridos presentes en los aceites vegetales y grasas animales se combinan con un alcohol en presencia de un catalizador, para formar glicerina y una mezcla de ésteres grasos (Torossi Baudino, 2006). Los alcoholes más recomendados para esta reacción son metanol, etanol y butanol, debido a su bajo costo el más usado comúnmente es el metanol (Cantero Vergara & Faber Archila, 2010). Los esterres resultantes de la reacción reciben el nombre de ácidos grasos y metil-ésteres (FAME (Fatty Acid Methyl Ester), o Biodiesel (Cantero Vergara & Faber Archila, 2010). La reacción se puede apreciar en la figura 3.

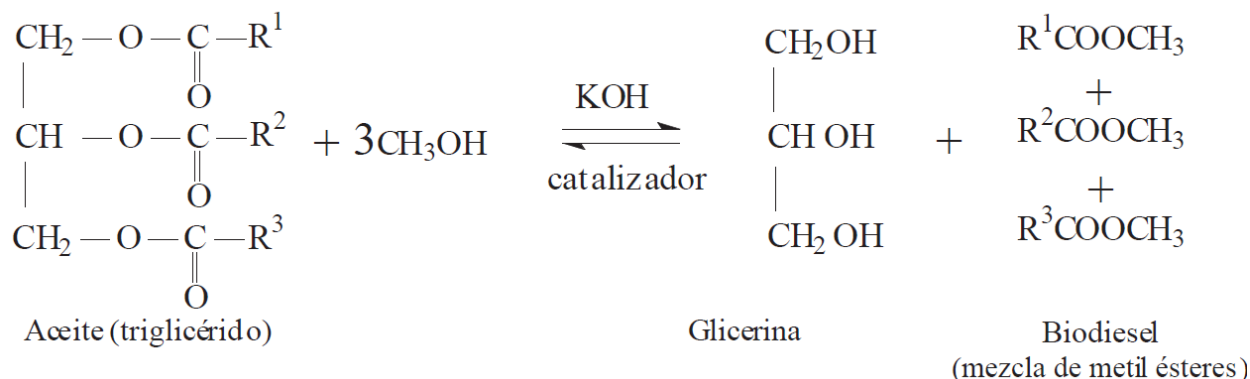


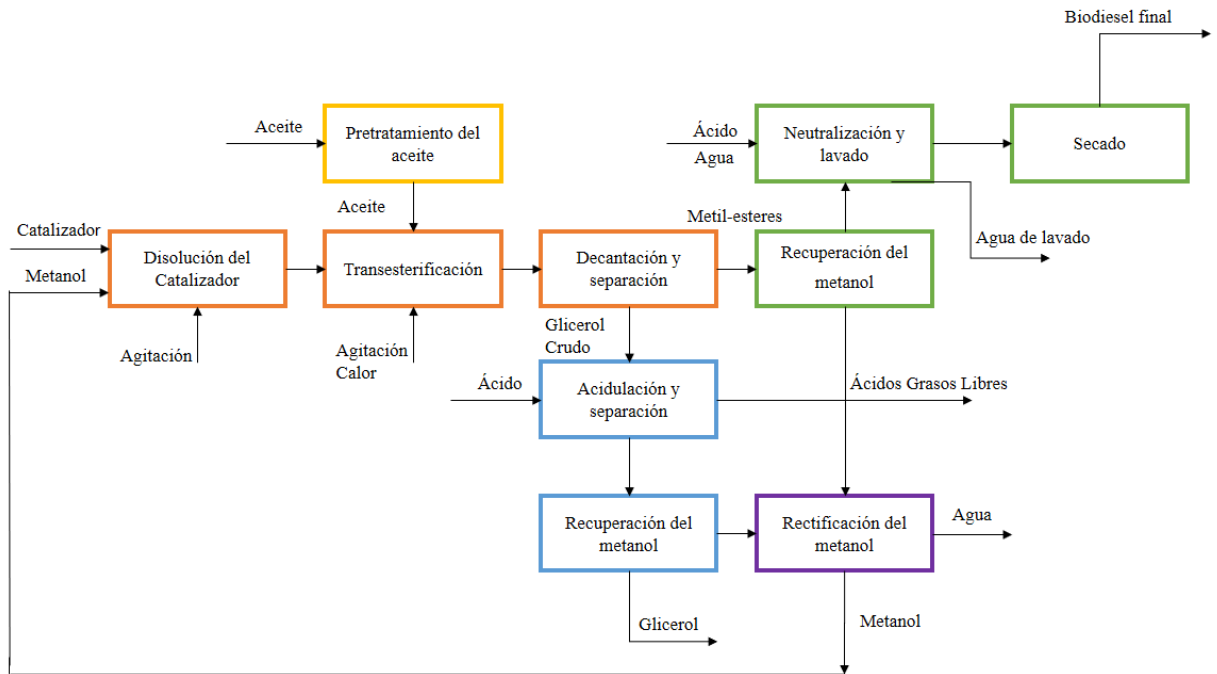
Figura 3 Reacción de transesterificación de triglicéridos mediante metanol en medio básico
Fuente: Torossi Baudino, F. D. / "Reacciones en contexto: la transesterificación en la producción de biodiesel a partir de aceite de fritura usado" 2006.

El proceso de transesterificación por medio ácido ocurre con catalizadores ácidos, preferiblemente por los ácidos sulfónicos y sulfúricos. Estos catalizadores dan muy altos rendimientos en ésteres de alquilo, pero las reacciones son lentas, lo que requiere, típicamente, temperaturas por encima de 100° C y más de 3 horas para alcanzar la conversión completa (Schuchardt, Sercheli , & Vargas, 1998).

El proceso de transesterificación por medio básico, ocurre con catalizadores base, esta transesterificación procede de una manera más rápida que la reacción de transesterificación por medio ácido. Debido a esta razón, junto con el hecho de que los catalizadores alcalinos son menos corrosivos que los compuestos ácidos, en procesos industriales se esta a favor del uso de catalizadores básicos, tales como alcoхidos de metales alcalinos e hidróхidos, así como los carbonatos de sodio o potasio (Schuchardt, Sercheli , & Vargas, 1998) .

1.3.3 Proceso para la obtención de biodiesel

En la figura 4, se muestra un diagrama con el proceso para la obtención de biodiesel: para poder llevar a cabo la reacción de transesterificación es necesario hacer una disolución del catalizador en el alcohol a utilizar (Castro, Coello , & Castillo-Lima, 2007). Una vez hecha la disolución esta es vertida directamente al aceite que previamente a sido pretratado, el cual esta en un medio de agitación y calor, despues de ello podemos obtener el producto de la reacción que se distingue por 2 fases una fase que se sedimenta en el recipiente (glicerol sin tratar) y la fase superior que es una mezcla de los metil-esteres con el alcohol utilizado y en menor cantidad, se puede encontrar el aceite que no logro reaccionar (Castro, Coello , & Castillo-Lima, 2007). Este producto de la reacción es decantado y separado para rescatar el glicerol y el alcohol utilizado y obtener un producto final con la menor cantidad de impurezas. La fase que contiene los metil-esteres es sometida a lavado para finalmente obtener un producto más puro que se conoce como biodiesel (Castro, Coello , & Castillo-Lima, 2007).



Etapas del proceso:

- Pretatamiento del aceite
- Transesterificación
- Postratamiento del biodiesel
- Postratamiento del glicerol
- Reuso del metanol

Figura 4 Proceso para la obtención de biodiesel

Castro, P., Coello, J., & Castillo, L. (2007). "Opciones para la producción y el uso del Biodiesel en Peru". Lima: Soluciones practicas IDTG.

1.4 APROVECHAMIENTO DE LAS ZONAS ÁRIDAS DEL NORTE DE MÉXICO Y SUS ESPECIES POTENCIALES

El desierto del norte de México posee especies vegetales poco estudiadas que pueden aportar soluciones sociales, económicas y ambientales. El guayule (*Parthenium argentatum Gray*), un arbusto nativo del desierto de Chihuahua, a lo largo de la frontera entre México y Estados Unidos, es una fuente de látex natural (Godoy, 2011).

La jojoba (*Simmondsia Chinensis (Link.) C.K. Schneid*) originaria del también fronterizo desierto de Sonora y del de Mojave, en el sur estadounidense, es la única planta que produce cera líquida o éster, empleada en cosméticos, lubricantes, plásticos y biodiesel. La historia de ambos arbustos es muy diferente. La producción de jojoba experimentó una relativa prosperidad, y el guayule fue relegado luego de su explosión comercial en la primera mitad del siglo pasado (Godoy, 2011).

Los principales productores de jojoba, cuyo aceite-cera reemplaza al espermaceti de ballena, son Argentina, Israel, Estados Unidos, Australia, Perú y México (Godoy, 2011).

Dado el desaprovechamiento de los terrenos, las condiciones climáticas de las regiones áridas y el aumento de la demanda en combustibles, surge la propuesta para elaborar biodiesel a partir del aceite contenido en la semilla de la especie nativa de la región de Baja California que crece en regiones áridas y con muy baja precipitación llamada *Simmondsia Chinensis (Link.) C.K. Schneid*, que comúnmente es conocida como Jojoba.

1.5 DESCRIPCIÓN DE LA JOJOBA Y SU POTENCIAL COMO MATERIA PRIMA PARA LA ELABORACIÓN DE BIODIESEL

La jojoba (*Simmondsia Chinensis* (Link.) C.K. Schneid) es un arbusto erecto a ascendente, muy ramificado, de 0.5 a 3 m inclusive hasta 5 m de altura, su follaje se desarrolla siguiendo una estructura de esfera truncada en base a un tallo de 1 a 2 metros de alto. Hojas opuestas, simples, oblongas a ovadas, subsesiles, pubescentes, unidas en la base, sin estipulas, de color verde apagado a azul-grisáceo, gruesas y de consistencia coriáceas, cubiertas de cera, de 2 a 5 cm de largo por 1 a 2 cm de ancho. Ramas rígidas que poseen ramitas finamente pubescentes. La corteza en los crecimientos jóvenes presenta un color verde pálido o verde azulado. Al madurar la corteza se vuelve delgada, lisa y rígida quedando así en los tallos viejos. Tiene flores apétalas unisexuales dioicas. La inflorescencia está compuesta por flores estaminadas (macho) que se encuentran en racimos axilares con un pedúnculo de 2 a 10 mm de largo, redondeados de color amarillo pálido y son más pequeñas que las pistiladas (hembra), que están individuales. Flores pequeñas, radiales, con 5 sépalos sobrelapados y apetaladas. Las flores estaminadas presentan sépalos de 3 a 4 mm de largo, color muy similar al verde, tienen de 8 a 12 estambres, libres, que tienen anteras amarillas elongadas con hendiduras longitudinales. Las flores pistiladas presentan sépalos de 10 a 20 mm de largo, tienen ovario superior, con tres cámaras, tres estilos y estigmas largos, más o menos persistentes en el fruto. Los frutos son una capsula loculicida, ovoides, duras, correosas, triangulada obtusamente con un tamaño de 1 a 2.5 cm, que varían notablemente en tamaño, forma y color, las semillas son de color café oscuro, alargadas con cera líquida, variando en tamaño, y forma, presentándose una semilla por flor pistilada (Vázquez-Yanes, Batis Muñoz, Alcocer Silva, Gual Díaz, & Sánchez Dirzo, 1999).

La época de su maduración está determinada por factores genéticos y ambientales, Regionalmente, la época de floración inicia cerca de mayo - junio y concluye con la fructificación en Julio – Agosto (Montes Zaragoza, 2016). Presentan polimorfismo (diversidad de genes), como una estrategia adaptativa importante. Su raíz consiste en unas pocas raíces pivotantes principales que crecen derechas, son raíces muy profundas con pocas raíces fibrosas a laterales (Vázquez-Yanes, Batis Muñoz, Alcocer Silva, Gual Díaz, & Sánchez Dirzo, 1999) .

1.5.1 La Jojoba y su hábitat natural

Nativa de las Californias y el Desierto Sonorense. Se encuentran en Baja California Norte, Baja California Sur, Sonora, Islas del Golfo de California, Isla Cedros, y Suroeste de Arizona y Sur de California. Ocupan la mayor parte del desierto Sonorense (Vázquez-Yanes, Batis Muñoz, Alcocer Silva, Gual Díaz, & Sánchez Dirzo, 1999).

Originaria de México. Se encuentra principalmente en el noroeste de México, en donde se cuenta con el 70 % del área total de su distribución además de encontrarse entre las regiones montañosas de Arizona y el sur de California. Se le ha introducido a Chile, Argentina, Brasil, Costa Rica, Venezuela, Kenia, Sudán, Israel, Alemania, Australia, Dinamarca, Egipto, Hawai, India, Irán, Japón, Libia y Tailandia (Vázquez-Yanes, Batis Muñoz, Alcocer Silva, Gual Díaz, & Sánchez Dirzo, 1999) .

Las poblaciones nativas se encuentran entre los 23 y 34° Latitud norte. Distribuidas por debajo de los 1400 metros, en los ecosistemas de matorral costero, chaparral, matorral desértico y matorral de gobernadoras (Vázquez-Yanes, Batis Muñoz, Alcocer Silva, Gual Díaz, & Sánchez Dirzo, 1999) .

Prospera en las zonas de más baja precipitación de México, en pendientes de montaña y valles. Las poblaciones más grandes y con mejor crecimiento están en zonas con precipitaciones de 200 a 450 mm anuales y libres de heladas, es decir con temperaturas que raramente caen por debajo de los — 3.5 °C por pocas horas en la noche. También se le encuentra en zonas con precipitación inferior a los 120 mm. No crece en sitios en donde hay lluvias torrenciales que pueden anegar el suelo. Está bien adaptada a las altas fluctuaciones de temperatura que varían de 30 a 40 ° C. Pueden tolerar heladas de hasta 6 °C y altas temperaturas de hasta 50 °C. Crece en una diversidad de suelos, de roca porosa a arcillas, desde levemente ácidas a alcalinas, en suelo desértico, preferentemente con buen drenaje y aireado, derivado de material granítico, por lo general con pH neutro o alcalino de 5 a 8 y rico en fósforo. Se desarrolla mejor en arena y en granito descompuesto (Vázquez-Yanes, Batis Muñoz, Alcocer Silva, Gual Díaz, & Sánchez Dirzo, 1999).

1.5.2 Cultivo de Jojoba: Principales características, recolección de semilla y recomendaciones

La jojoba es un arbusto dioico, lo que significa que sus sexos femenino y masculino se presentan en plantas distintas; siendo la planta “hembra” productora del fruto y la planta “macho” la polinizadora. Al llevar a cabo el cultivo, es necesario reconocer esta diferencia dado que se recomienda distribuir las de tal manera que la relación sea de una planta masculina por cinco femeninas con el fin de maximizar rendimientos en la producción de semilla (Serrano, 1978).

Para ajustar la relación deseada, después que las plantas hayan mostrado su sexo, se seleccionan las plantas del sexo requerido y se eliminan las restantes de tal forma que la distribución en el campo finalmente sea por cada planta masculina cinco femeninas (Serrano, 1978).

En la figura 5, se puede apreciar la distribución de las plantas de acuerdo a su sexo y la dirección de los vientos.

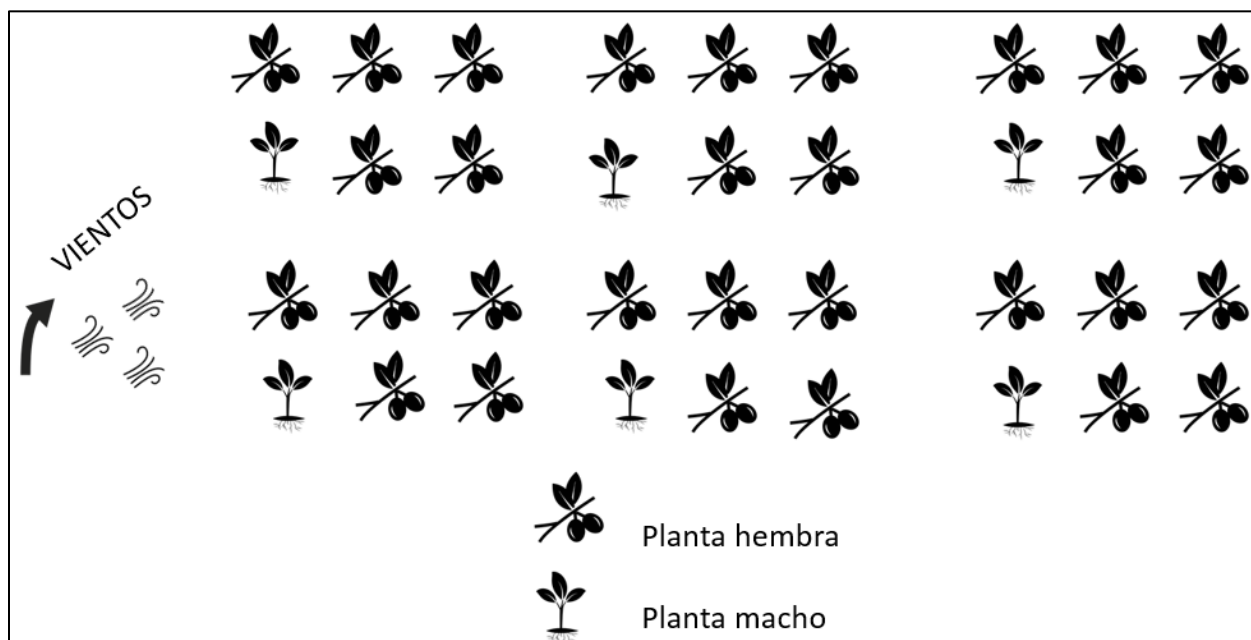


Figura 5 Distribución de las plantas hembras y macho de Jojoba

Fuente: Serrano, C. A. (1978). "El cultivo de jojoba en el estado de Sonora y la importancia de una asociación de productores como impulsora comercial de este nuevo recurso". Sonora.

Debido a estudios realizados, para fines comerciales no resulta conveniente el cultivo de menos de 5 Has., ya que las estimaciones realizadas demuestran que los costos de operación son altos y

los rendimientos bajos, en comparación de las estimaciones realizadas en cultivos de 5 a 10 Has. (Serrano, 1978) .

La jojoba puede prosperar en aquellas áreas cuyo acceso a una fuente garantizada de agua es escaso. La planta requiere siete riegos anuales, éstos son provistos en muchos casos por las lluvias de estación (Serrano, 1978) .

En cuanto a la germinación la mejor época para hacer la siembra directa es en marzo - mayo con una distancia entre líneas de 3.30 m y 1.50 m entre plantas, sin embargo, en su hábitat natural, la germinación ocurre en los meses de lluvia, de diciembre a febrero (Montes Zaragoza, 2016). El trasplante es difícil, cualquier daño ocasionado al sistema radicular de plantas cultivadas en recipientes o bolsas de plástico produce amarillamiento y a veces la muerte de las plantas. Este se debe realizar cuando las plantas tengan alrededor de 5 cm de altura (Real Hardisson & Soria Cabrera, 1992).

La especie responde bien a tratamientos con abonos orgánicos, ya que el componente principal de estos es el nitrógeno, elemento que constituye la mejor ayuda que se puede dar a la planta en su desarrollo. Cabe mencionar que este cultivo es muy sensible a los excesos de agua (Real Hardisson & Soria Cabrera, 1992), se puede optar por solo mantener húmedo el sustrato sin hacer inundación de agua. Otra opción es hacer riegos suaves hasta su ligera inundación, dejar secar el sustrato y volver a repetir el proceso. Su riego se recomienda por las tardes-noches. El riego por goteo ha mostrado excelente aprovechamiento (Montes Zaragoza, 2016).

La recolección se puede efectuar a mano o mediante cosechadoras y sus primeros frutos aparecen alrededor de los 3.5 años, obteniéndose la primera cosecha a los 4 años, aunque el rendimiento óptimo se da a los 7 años. La semilla se puede recoger una vez caída al suelo o un poco antes de que esto ocurra (Real Hardisson & Soria Cabrera, 1992) .

La producción va desde unas pocas semillas a unos 14 kg de grano limpio por planta en casos excepcionales. Los rendimientos pueden ser de 500 kg/ha a los 6 años, esto equivale a 270 gr/planta y aproximadamente a 1850 plantas/ha (Real Hardisson & Soria Cabrera, 1992) .

1.5.3 Extracción del aceite-cera de la semilla de Jojoba: Prensado en frío y extracción por solventes

Las semillas de jojoba contienen aproximadamente 50 % de aceite en peso, esto es más del doble de la cantidad de peso contenido en la soja y poco más que la mayoría de los aceites de semillas oleaginosas (M.K. Abu-Arabi, M.A. Allawzi, H.S. Al-Zoubi, & A. Tamimi, 2000). Aunque cabe mencionar que otros autores también mencionan una cantidad que puede variar desde el 40 % al 55 % de su peso en aceite-cera (Real Hardisson & Soria Cabrera, 1992), (Serrano, 1978), (Al-Widyan & Al-Muhtaseb, 2010) (Canoira, Alcántara, García-Martínez, & Carrasco, 2006) (Tobares, Frati, Guzmán, & Maestri, 2004).

El aceite de su semilla puede ser utilizado en diversas aplicaciones las cuales se muestran en la figura 6.

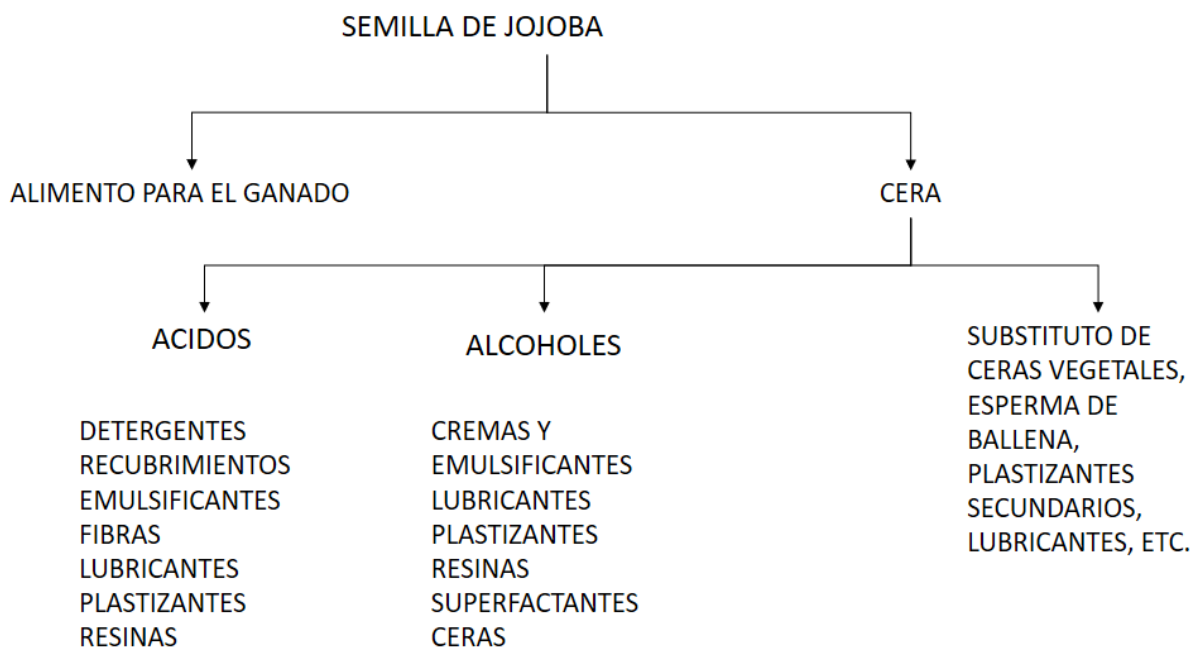


Figura 6 Usos del aceite de semilla de Jojoba

Fuente: Serrano, C. A. (1978). "El cultivo de jojoba en el estado de Sonora y la importancia de una asociación de productores como impulsora comercial de este nuevo recurso". Sonora.

Como puede notarse en la figura 6, los usos que se enlistan para el aceite-cera de jojoba son numerosos. En la actualidad estos usos se han generalizado más incluyendo la industria

cosmética, farmacéuticos, comida dietética (Canoira, Alcántara, García-Martínez, & Carrasco, 2006) . Además, surgió un interés científico dado las características positivas de este aceite, proponiendo nuevas investigaciones para los usos ahora en el área energética, como una alternativa a los problemas en el abastecimiento y costo de los combustibles y una buena solución a la disminución de los gases de efecto invernadero.

Una vez explicado esto podemos proceder al desarrollo de la técnica de extracción del aceite de jojoba, la literatura nos muestra varios tipos de extracción, esta puede realizarse por medio de prensado en frío, extracción por solvente seguido de extracción por prensado en frío y extracción únicamente por solventes (M.K. Abu-Arabi, M.A. Allawzi, H.S. Al-Zoubi, & A. Tamimi, 2000). La extracción por solventes puede ser recomendable, si lo que se busca es extraer la mayor cantidad del aceite y se realiza con solventes de baja toxicidad. El hexano es el más utilizado para este procedimiento, debido a su bajo costo, pero otros solventes tales como el benceno, alcohol, cloroformo son también utilizados (M.K. Abu-Arabi, M.A. Allawzi, H.S. Al-Zoubi, & A. Tamimi, 2000).

En cuanto a la extracción por prensado en frío, esta es de una manera más “natural” y se realiza por medio de una prensa hidráulica. Según el estudio de Abu-Arabi, et al (2000), se realizó la extracción con la semilla entera utilizando una prensa hidráulica manual con una variación de 0 a 15 toneladas métricas en un contenedor cilíndrico, se realizó un primer y segundo prensado y después se extrajo con solvente y se realizó una última prueba únicamente haciendo extracción con solvente. Obteniendo del primer prensado en frío 31.9% de masa en aceite de jojoba, con el segundo prensado en frío 39.5% en total de masa en aceite entre los dos prensados, una vez obtenida esta cantidad, se sometió a una extracción por solvente al residuo restante del segundo prensado, obteniendo 6.0% más aceite lo que da un total de 45.5% de extracción de aceite.

En el caso de la extracción únicamente con solvente obtuvo 52% de aceite, utilizando como solvente hexano, siendo este el de mayor rendimiento, lo cual cumple con el porcentaje de aceite que se puede obtener de la semilla de Jojoba y que mencionan Al-Widyan, et al (2010), Canoira, et al (2005), Serrano (1978), Tobares, et al (2010) y Real y Soria (1992).

Abu-Arabi, et al (2000), compara sus resultados con Ruiz, et al (1978) el cual presenta porcentajes mayores de 50% de extracción únicamente utilizando el prensado en frío, pero

operando otro tipo de prensas hidráulicas con mayores rendimientos y realizando un pretratamiento a la semilla (descascarillado, precalentado y controlando la humedad de la semilla en 4% y 6%). Como podemos apreciar en la literatura consultada, se pueden minimizar los costos de extracción si únicamente se utiliza el prensado en frío para extraer este aceite, de esta manera evitamos consumir algún solvente que puede ser tóxico y también evitar generar más residuos. Empleando un equipo de prensado de mayor calidad se pueden obtener resultados similares a los obtenidos por la extracción con solventes.

1.5.4 Características fisicoquímicas del aceite-cera obtenido de la semilla de Jojoba

Las grasas y los aceites provenientes de las semillas de plantas oleaginosas, son triglicéridos. Las ceras son ésteres de un ácido graso de alto peso molecular con un alcohol de alto peso molecular. El aceite-cera de jojoba es único entre los aceites vegetales, ya que se trata de una cera líquida y no de una grasa como tal (González Agramón , 1978).

El aceite-cera de jojoba es en sí una cera líquida poli-insaturada. Químicamente está compuesta principalmente de ésteres de alto peso molecular, ácidos monoetilénicos de cadena lineal y alcoholes monoetilénicos. Los ácidos grasos insaturados son una mezcla de ácidos cis-11eicosenoico (C20) y cis-13-docosenoico (C22), con pequeñas cantidades de oleico (C18) y nervónico (C24). Los alcoholes insaturados son una mezcla de alcoholes cis-11 eicosenol, cis-13-docosenol y cis-15tetracosenol con pequeñas cantidades de alcoholes de bajo peso molecular (González Agramón , 1978).

El aceite de jojoba es más puro que la mayoría de los aceites naturales. El 97% son ésteres de cadena larga (González Agramón , 1978).

Dadas las propiedades que tiene este aceite, además de los diversos usos mencionados anteriormente (farmacéuticos, cosméticos, comida dietética, lubricantes etc.), recientemente se ha extendido ligeramente la investigación como materia prima para la elaboración de biodiesel (Al-Widyan & Al-Muhtaseb, 2010) (Canoira, Alcántara, García-Martínez, & Carrasco, 2006) (Ramírez, 2007) (Noureddin, Sánchez, Martínez, & Aracil, 2015) (Kozliak, y otros, 2013).

1.5.5 Elaboración de biodiesel a partir de aceite-cera de la semilla de Jojoba

Se realizó una revisión bibliográfica apoyándose de otros estudios realizados sobre biodiesel con aceite de Jojoba, biodiesel con aceite de otras semillas oleaginosas y con diferentes metodologías de obtención.

En la figura 7, se muestra la reacción de transesterificación de la cera-aceite de jojoba con metanol. Se aprecia que una vez reaccionado el alcohol (metanol CH_3OH) con la cera-aceite de Jojoba, ocurre la reacción y se separan los metil ésteres de ácidos grasos y el alcohol presente en la cera-aceite de Jojoba (glicerol).

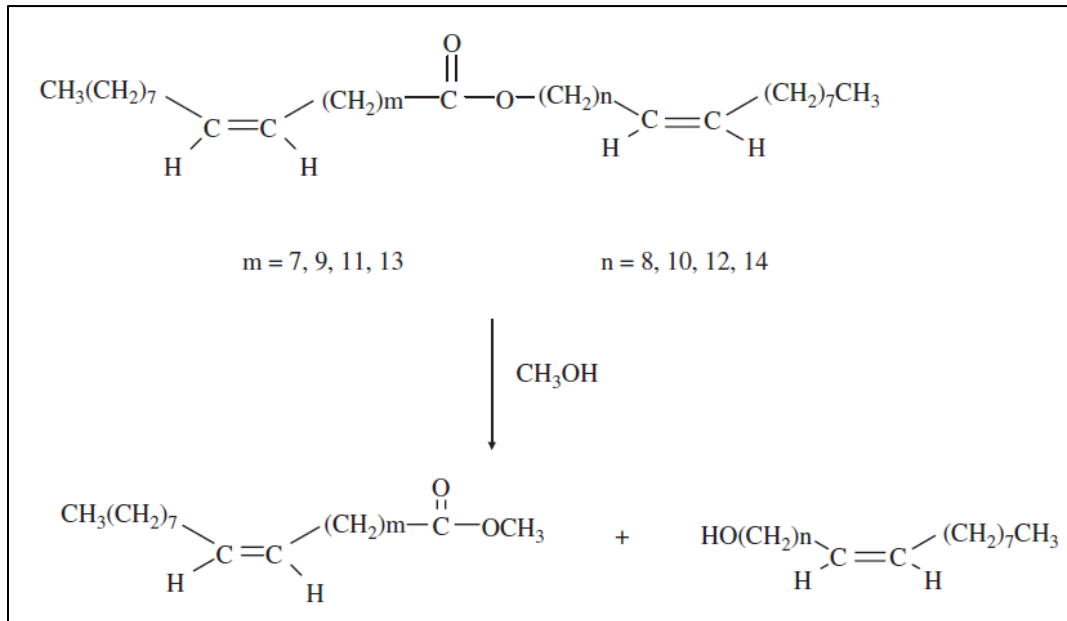


Figura 7 Reacción de transesterificación del aceite-cera de Jojoba
Fuente: L. Canoira et al. / Biomass and Bioenergy 30 (2006) 76-81

Se pueden realizar dos tipos de transesterificación, utilizando un catalizador ácido o básico, el catalizador es una sustancia química que interviene en una reacción para facilitar que se realice, pero no forma parte de los productos finales (Castro, Coello, & Castillo-Lima, 2007).

Canoira, et al (2005), utiliza un catalizador base (hidróxido de sodio (NaOH)), primero se realiza la disolución del catalizador en el metanol, posteriormente la mezcla es vertida al aceite utilizando un autoclave, este instrumento es una cámara que se utiliza para llevar a cabo reacciones químicas a alta presión y temperatura. El contenido se deja a una temperatura de 65°

C por 4 horas con una agitación vigorosa de 600 rpm. Como se trata de una cámara hermética, se tiene menor riesgo de vaporización del metanol.

Por otro lado, Ramírez, (2007) emplea el mismo procedimiento utilizado por Canoira, et al (2005) únicamente variando la temperatura hasta 70 °C y una agitación constante de 300 rpm, pero respetando el tiempo de reacción de 4 horas.

En el estudio realizado por Ramírez (2007), se obtuvieron resultados en la elaboración de biodiesel a partir de la cera-aceite de Jojoba, el biodiesel de jojoba obtenido presento viscosidad alta hasta formar un gel, este gel no permitió la separación de los alcoholes de la fracción de metil ester de jojoba. Sin embargo, a partir de la cromatografía de gases se realizó una cuantificación de los mismos. Este fenómeno pudo haber sido causado por el contenido de agua en la reacción, se ha encontrado que en la reacción de transesterificación la humedad favorece el proceso de saponificación, disminuyendo el rendimiento de la reacción además de que el jabón resultante de la saponificación provoca un aumento de la viscosidad y favorece la formación de geles que interfieren en la reacción, e imposibilitan la separación del glicerol (Medina Ramírez , Chávez Vela, & Jáuregui Rincón , 2012) .

En cuanto a la transesterificación utilizando otros aceites como materia prima, se pueden encontrar diversas recomendaciones para llevar a cabo la reacción de transesterificación (Laiz-Saldaña, Tovar-Miranda, Durán-de-Bazúa, & Solís-Fuentes, 2009), (Castillo Ospina, Velásquez J., & Cuartas Z., 2011), (Zuleta, Bonet, Díaz, & Bastidas, 2007), (Benjumea H., Agudelo S., & Cano, 2004). Estas recomendaciones se pueden ver ilustradas en la tabla 2.

Tabla 2 Comparación de casos de estudio para la elaboración de biodiesel

Autor	Materia prima	Catalizador	Alcohol	Temperatura	Tiempo de reacción	Velocidad de agitación
(Laiz-Saldaña et. al. 2009)	Aceite de almendras de zapote mamey	Hidróxido de potasio (KOH)	Metanol	30° C a 65° C	60 min a 120 min	No menciona
(Castillo Ospina et. al. 2011)	Aceite de semilla de <i>Jatropha Curcas L.</i>	Hidróxido de Sodio (NaOH)	Etanol	75° C	360 min	500 rpm
(Zuleta, Bonet, Díaz, & Bastidas, 2007)	Aceite crudo de palma africana	Hidróxido de potasio (KOH)	Etanol	79° C	120 min	No menciona
(Benjumea H., Agudelo S., & Cano, 2004)	Aceite crudo de palma colombiano	Hidróxido de Sodio (NaOH)	Metanol	60° C	90 min	120 rpm

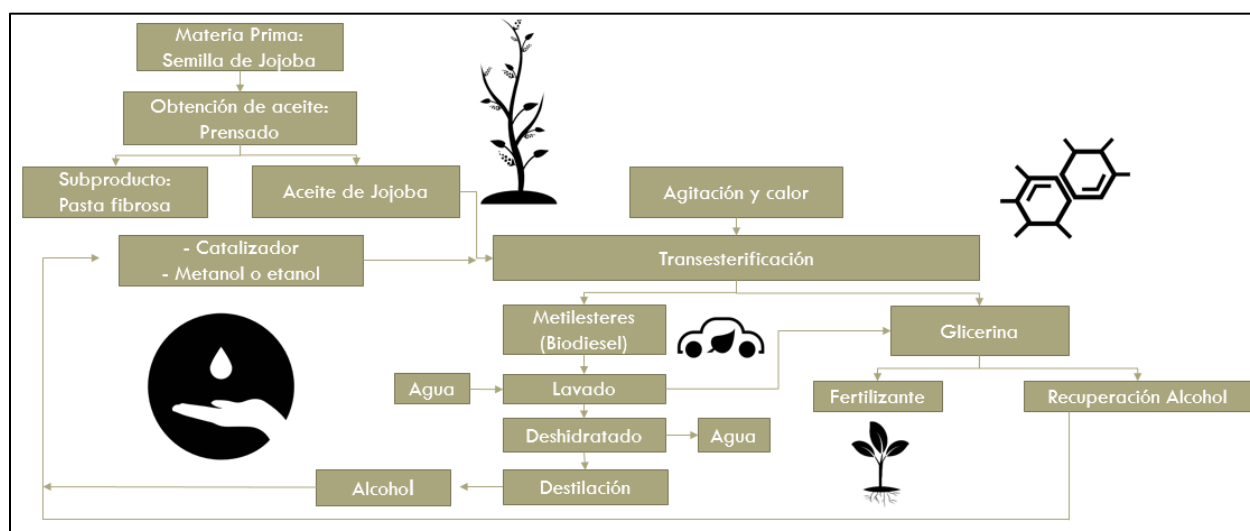


Figura 8 Resumen del proceso de obtención de biodiesel a partir del aceite - cera de Jojoba

Finalizando esta sección, podemos resumir la información descrita en este apartado en la figura 8. Obteniendo la materia prima (semilla de jojoba) se procede a la obtención de su aceite, posteriormente se realiza la reacción de transesterificación en la cual aparte de obtener los metil-esteres de ácidos grasos, se obtiene glicerina.

1.6 TÉCNICAS DE ANÁLISIS

1.6.1 Espectroscopia de infrarrojo

La espectroscopia vibracional fue una de las primeras técnicas espectroscópicas que encontró un uso extendido, en particular la espectroscopia de absorción infrarroja (IR) que recibe su nombre de la región del espectro electromagnético implicada. La región IR del espectro electromagnético se encuentra entre 12800-10 cm^{-1} . Tanto desde el punto de vista de las aplicaciones como de los aparatos se puede dividir en tres zonas: IR cercano (NIR): 12800-4000 cm^{-1} , IR medio: 4000-400 cm^{-1} ; IR lejano: 400-10 cm^{-1} , siendo en el IR medio donde se dan la mayoría de las aplicaciones analíticas tradicionales, aunque desde la década de los 80 la utilización del IR cercano ha experimentado un innegable auge. El IR cercano requiere una mínima o nula preparación de la muestra y ofrece un análisis cuantitativo sin consumir o destruir la muestra (Serrano Martínez, 2004) .

El IR lejano requiere el uso de fuentes y materiales ópticos especiales. Es utilizado para el análisis de compuestos orgánicos, inorgánicos u organometálicos que contengan átomos pesados y proporciona información útil en estudios estructurales (Serrano Martínez, 2004).

En cuanto a lo que respecta al IR medio, existen espectrofotómetros comerciales desde 1940, aunque los avances más significativos en la técnica se produjeron con el desarrollo de instrumentos que incorporan el método de transformada de Fourier (FT-IR), que ha mejorado la calidad de los espectros minimizando el tiempo requerido para la obtención de datos. Hoy en día, casi todos los instrumentos utilizados en espectroscopia infrarroja están equipados con un sistema de análisis que utilizan transformadas de Fourier de haz sencillo (Serrano Martínez, 2004) .

Una de las ventajas de esta técnica de análisis es su versatilidad, ya que permite estudiar prácticamente cualquier muestra independientemente del estado en que se encuentre (Serrano Martínez, 2004).

Entonces ¿Cómo funciona la espectroscopia de infrarrojo para el análisis químico? Para poder resolver esto podemos saber que, como primera aproximación, un espectro IR se obtiene al pasar

radiación a través de una muestra y determinar que fracción de esta radiación incidente ha sido absorbida. La energía particular a la que aparece cada pico en un espectro guarda relación con la frecuencia de vibración de una parte de la molécula (Serrano Martínez, 2004) .

Como en otros procesos de absorción de radiación electromagnética, la interacción de la radiación infrarroja con la materia provoca en esta alguna alteración. En este caso esta alteración guarda relación con cambios en el estado vibracional de las moléculas. El espectro vibracional de una molécula se considera una propiedad física única y por lo tanto característica de esta molécula. El espectro IR se puede usar como “huella dactilar” en la identificación de muestras desconocidas mediante la comparación con espectros de referencia (Serrano Martínez, 2004) .

Los espectros son a menudo complicados y resulta difícil asignar cada una de las bandas que aparecen en ellos a movimientos atómicos específicos. Esto no es siempre necesario para extraer información valiosa, de modo que la información faltante de los espectros no disminuye su utilidad para realizar análisis cuantitativos y cualitativos (Serrano Martínez, 2004) .

La espectroscopia IR es una de las técnicas que forma la base del análisis orgánico cualitativo contemporáneo centrado en la identificación de la estructura molecular de compuestos y mezclas desconocidas, además de ayudar a confirmar los componentes de una muestra por medio de la comparación de espectros de referencia (Serrano Martínez, 2004) .

1.6.2 Espectroscopia de infrarrojo en la caracterización de muestras de biodiesel

El producto principal de la transesterificación de aceite puede ser caracterizado por medio de la espectroscopia de infrarrojo, de esta manera puede confirmarse la presencia de metil-esteres, así como la presencia notable de alcanos posiblemente presentes en el diesel (Medina-Valtierra, Camarillo Martínez, & Ramírez-Ortiz, 2011).

En la estructura química de biodiesel la parte alifática es similar a la larga cadena de carbono del diesel del petróleo (Ramírez-Ortiz, Medina-Valtierra, & Martínez Rosales, 2011). En la caracterización de una muestra de biodiesel a partir de aceite de maíz obtenido de frituras, Ramírez et al (2011), menciona que los átomos de hidrogeno alifáticos son indicados en la región de 2924 cm^{-1} y 2854 cm^{-1} . Una banda intensa del alargamiento C=O para el éster metílico o metil éster aparece en la región aproximada a 1740 cm^{-1} . Se deben esperar las señales C-O en

los rangos de 1260 cm^{-1} , 1203 cm^{-1} , y 1177 cm^{-1} . Señales observadas dentro de 2200 cm^{-1} – 2400 cm^{-1} corresponden al modo de alargamientos de los grupos OH de glicerol (Ramírez-Ortiz, Medina-Valtierra, & Martínez Rosales, 2011) . A su vez se encuentra que el biodiesel al igual que el aceite vegetal absorbe en la región de 2750 cm^{-1} – 3000 cm^{-1} correspondiente a los modos de vibración de $-\text{CH}_2$ y $-\text{CH}_3$ (Medina-Valtierra, Camarillo Martínez, & Ramírez-Ortiz, 2011) (figura 9).

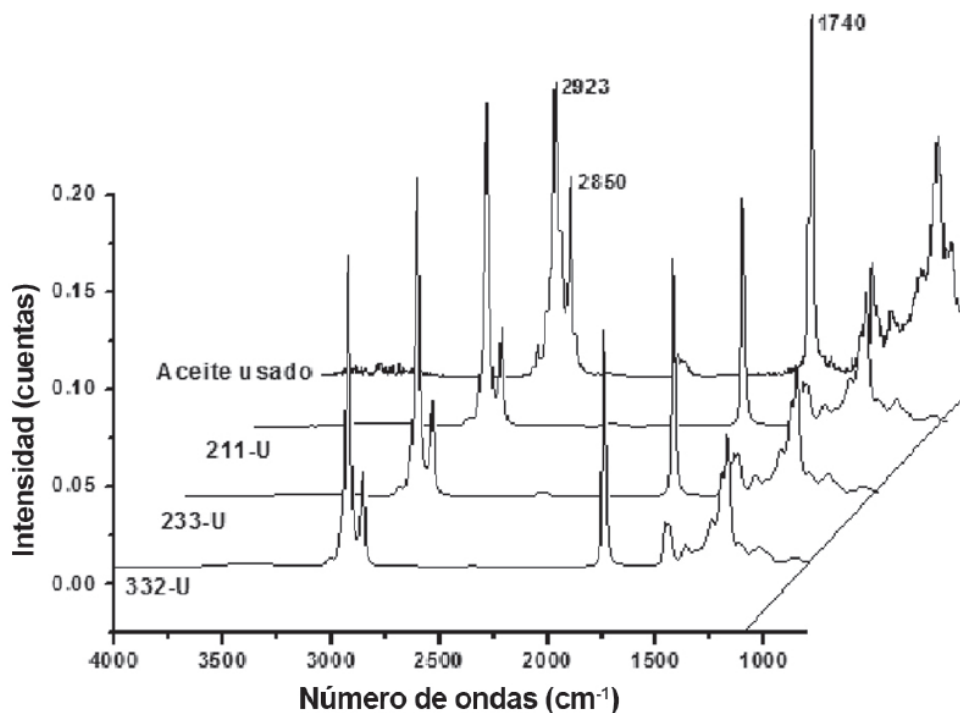


Figura 9 Espectro IR de biodiesel obtenido de aceite de maíz usado

Fuente: Medina-Valtierra, J., Camarillo Martínez, G., & Ramírez-Ortiz, J. (Septiembre de 2011). "Método para monitorear el rendimiento y contenido de metil-ésteres en el biodiesel usando la espectroscopia vibracional IR". *Acta Universitaria, Direccion de Apoyo A la investigacion y al posgrado, Universidad de Guanajuato*, 21(4), pp.27-32.

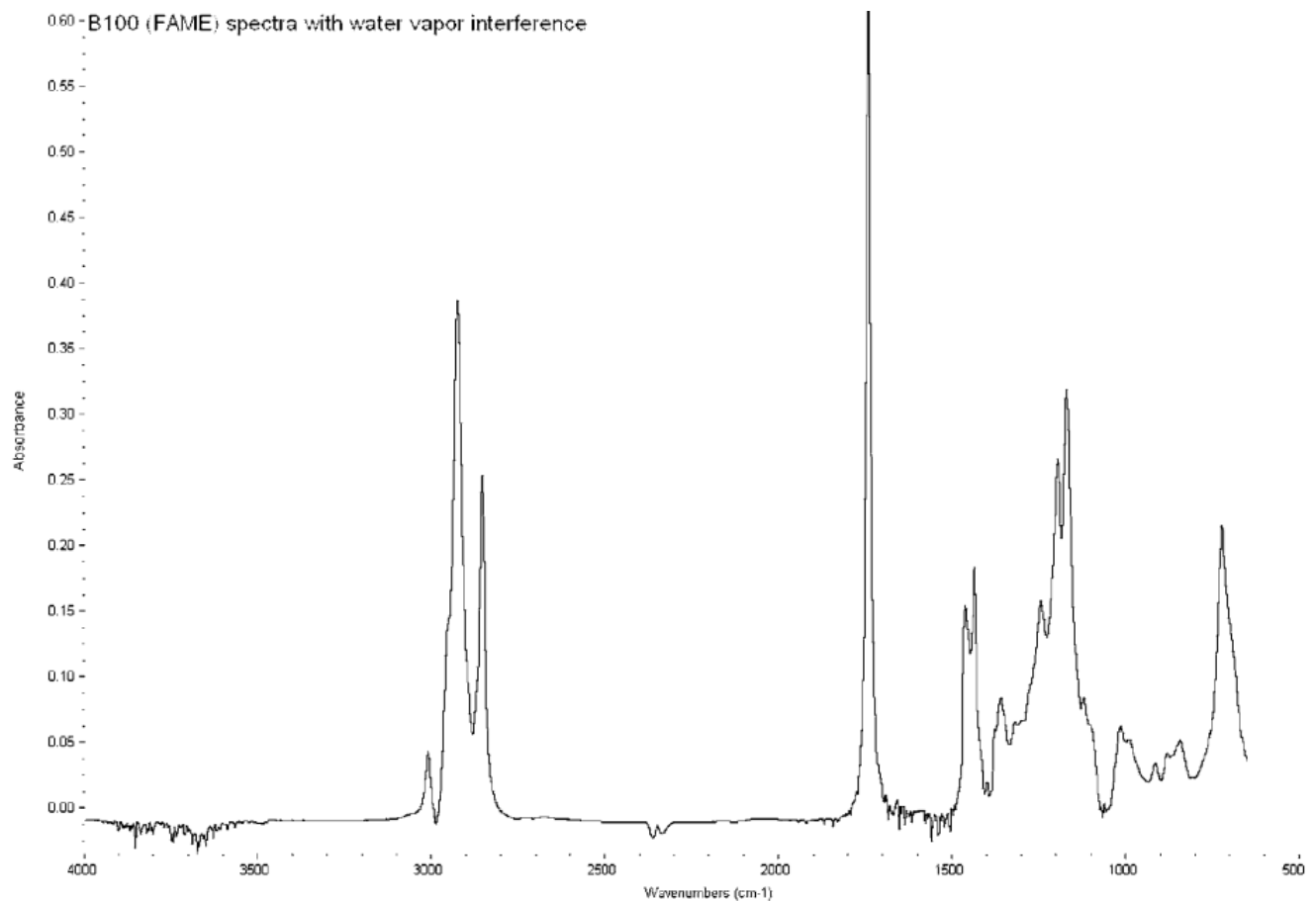


Figura 10 Espectro de biodiesel con excesiva interferencia de vapor de agua
Fuente: ASTM Standard Test Method for Determination of Biodiesel (Fatty Acid Methyl Esters) Content in Diesel Fuel Oil Using Mid Infrared Spectroscopy (FTIR-ATR-PLS Method)

1.6.3 Resonancia magnética nuclear

La resonancia magnética nuclear es un método espectroscópico. Mientras que la espectroscopia infrarroja revela los tipos de grupos funcionales presentes en una molécula, la resonancia magnética nuclear (NMR por sus siglas en inglés) proporciona información sobre el número de átomos magnéticamente distintos que se encuentren presentes en una molécula. Cuando se estudian los núcleos de hidrógeno (protones), por ejemplo, se puede determinar el número de cada uno de los distintos tipos de núcleos de hidrógeno, así como obtener información sobre la naturaleza del entorno inmediato de cada tipo. Información similar puede ser determinada para los núcleos de carbono. La combinación de IR y RMN es a menudo suficiente para determinar por completo la estructura de una molécula desconocida (Pavia, Lampman, & Kriz, 2001).

1.6.4 Resonancia magnética nuclear en la caracterización de muestras de biodiesel

En la literatura se encuentra información relevante acerca del uso de la resonancia magnética nuclear, para identificar y corroborar la presencia de metil esterres característicos del biodiesel. A continuación (figura 11), se muestra un espectro tomado de la transesterificación de aceite de jojoba (Shah, Tariq, Ali, Guo, & Fu, 2014).

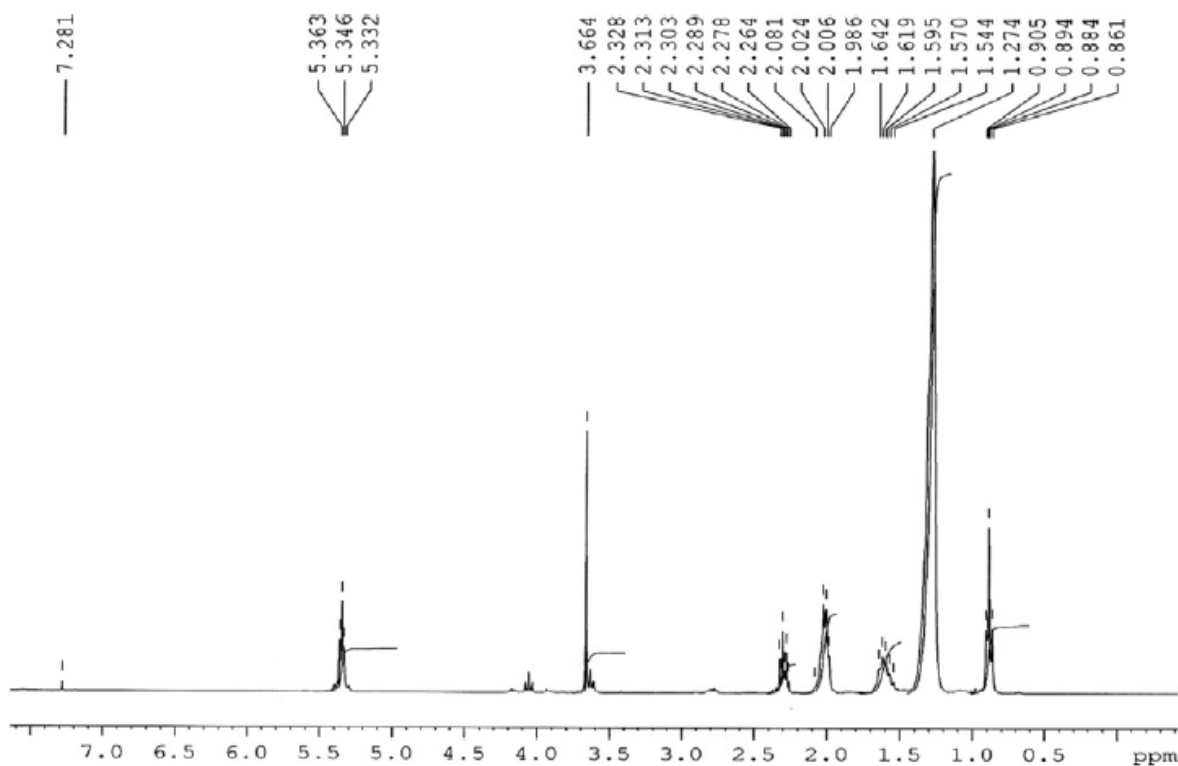


Figura 11 Espectro H RMN de biodiesel obtenido de aceite-cera de Jojoba

Fuente: Shah, M., Tariq, M., Ali, S., Guo, Q.-X., & Fu, Y. (2014). Transesterification of jojoba oil, sunflower oil, neem oil, rocket seed oil and linseed oil by tin catalysts. *Biomass and bioenergy*, 70, 225-229.

La conversión de aceite de jojoba en biodiesel se confirmó por la aparición de un fuerte singlete a 3,664 ppm debido a los protones correspondientes al grupo metoxi y desaparición de las señales en 4.11- 4.21 ppm de protones del grupo metileno y metino en el espectro de H RMN (Shah, Tariq, Ali, Guo, & Fu, 2014).

2. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años se ha implementado el uso de combustibles a partir de fuentes vegetales y animales, para su transformación en un combustible a partir de aceite conocido como biodiesel. La producción de estos biocombustibles comenzó a elaborarse a partir del aceite de semillas oleaginosas. Dicha producción de aceite destinado a su transformación como biodiesel, además de proceder de aceite usado de cocina, fue obtenida a partir de los cultivos energéticos. Actualmente los cultivos energéticos ponen en riesgo el cultivo de productos alimenticios para consumo humano, además de desaprovechar otras zonas semidesérticas en las cuales se pueden cultivar otras especies que son menormente dependientes de agua y que bien podrían aprovecharse sus aceites.

Una opción para esta problemática es la utilización de semillas oleaginosas pertenecientes a una especie nativa de la zona en donde se desee aprovechar este recurso, por consiguiente, la especie a cultivar estará adaptada a la zona y al suelo. Así pues, no se pondría en riesgo el terreno y se repoblaría el sitio con la especie nativa.

En la mayoría de los casos como sucede en la naturaleza, la especie y el suelo están adaptados conjuntamente, de esta manera ambos se proveen de mecanismos para hacer subsistir al otro individuo, ya sea en la misma especie o a otras especies tanto animales como vegetales, en el caso del suelo permitirá que este no se erosione o deslave, por lo tanto, se ofrecería la solución a diversos problemas ambientales de la región y además se solucionaría un problema energético a futuro.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describirán detalladamente los materiales y los métodos utilizados en la parte experimental en el caso de la germinación de las semillas y en la elaboración de biodiesel.

A continuación (figura 12), se muestra un diagrama resumiendo la metodología seguida para la germinación de las semillas de Jojoba. Más adelante se abordará la descripción de este proceso.

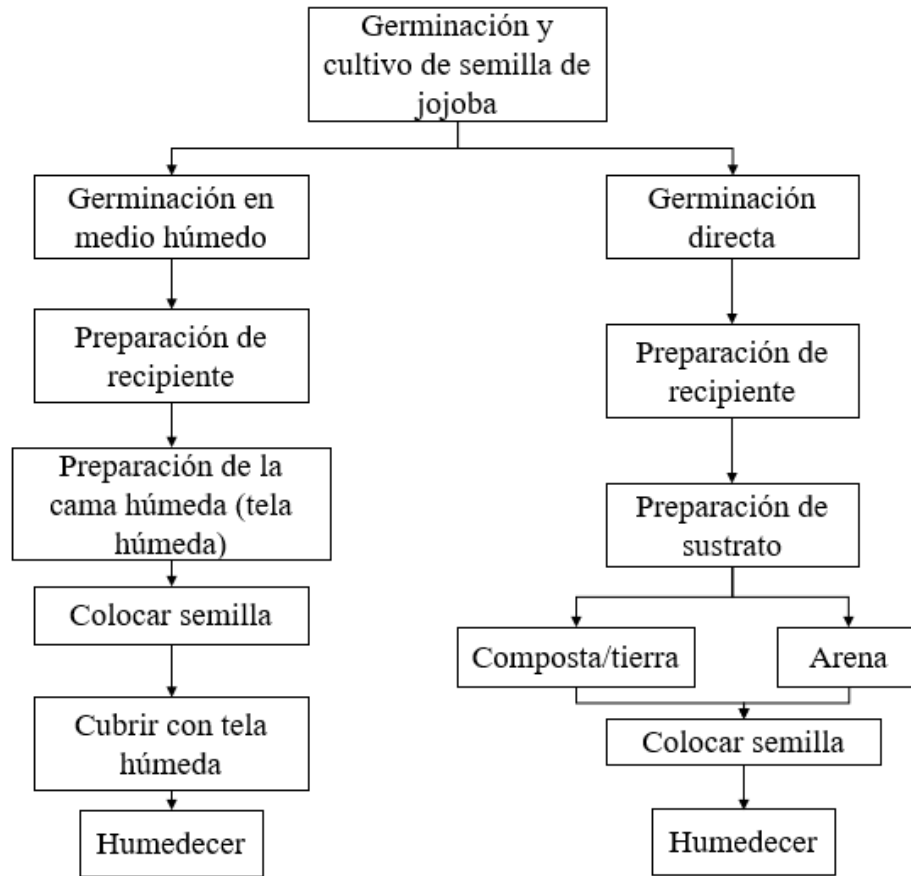


Figura 12 Procedimiento empleado para la germinación de la semilla de Jojoba

3.1 RECOLECCIÓN DE SEMILLAS DE JOJOBA

Las semillas utilizadas en la germinación fueron recolectadas por el Mtro. Luis Alberto Montes Zaragoza en Ecoparque el 11 de junio del 2014. El hábitat es una ladera de cerro con exposición al sur con un remanente de vegetación dentro de la zona urbana.

Después se realizó una recolección en el área de Valle de las Palmas en Tijuana Baja California. La recolección se realizó al finalizar el mes de agosto, se pudo apreciar que las plantas machos presentaban floración y las hembras se encontraban con semillas en sus ramas y algunas ya habían caído al suelo. Aquellas que se encontraban en el suelo fueron recogidas y las semillas en las ramas pudieron tomarse con facilidad, no fue necesario utilizar fuerza para tomarlas de las ramas. En la figura 13 puede apreciarse un fruto de Jojoba maduro visualizado en el área de Valle de las Palmas en Tijuana Baja California.



Figura 13 Fruto de Jojoba maduro



Figura 14 Semilla de jojoba al centro y frutos secos de Jojoba

Las semillas presentan un recubrimiento o una pequeña cascara (fruto) de color amarillo a marrón claro, el cual se ve deshidratado (podemos apreciarlo en la figura 14), para tomar la semilla es necesario pelar el fruto lo cual se realiza fácilmente. Se puede apretar con los dedos y romperlo un poco. Una vez roto, se retira apoyándose de las yemas de los dedos para extraer la semilla.

3.2 GERMINACIÓN DE LAS SEMILLAS DE JOJOBA

Se realizó la germinación de las semillas de Jojoba que fueron recolectadas hace poco más de año y medio de un remanente de vegetación nativa del área de la ladera de rampa Buenavista Otay en la ciudad de Tijuana, Baja California. Estas semillas fueron sometidas a dos diferentes tipos de germinación: Germinación en medio húmedo y Germinación directa, la primera se refiere a la germinación de la semilla en un ambiente poco ventilado con un pequeño trapo humedecido en agua que está en contacto directo con la semilla y la segunda se refiere a la germinación directa de la semilla en tierra, utilizando un bote plástico profundo para facilitar el crecimiento de la raíz las primeras semanas de vida. Ambos procesos estuvieron siendo observados con la finalidad de determinar cuál es el más efectivo y hacer una comparación.

A continuación, se describen ambos procesos.

3.2.1 Materiales y proceso: Germinación en medio húmedo

Para la germinación en medio húmedo, se preparó un recipiente amplio con toallas ligeramente humedecidas, primeramente, se colocó una toalla y posteriormente se colocaron 11 semillas de Jojoba, una vez puestas las semillas se cubrieron con otra toalla humedecida como se muestra en la figura. Finalmente, se cubrió el recipiente con una tapadera con orificios para permitir una ligera ventilación y así evitar el pudrimiento de las semillas. El procedimiento ilustrado se muestra en la figura 16.

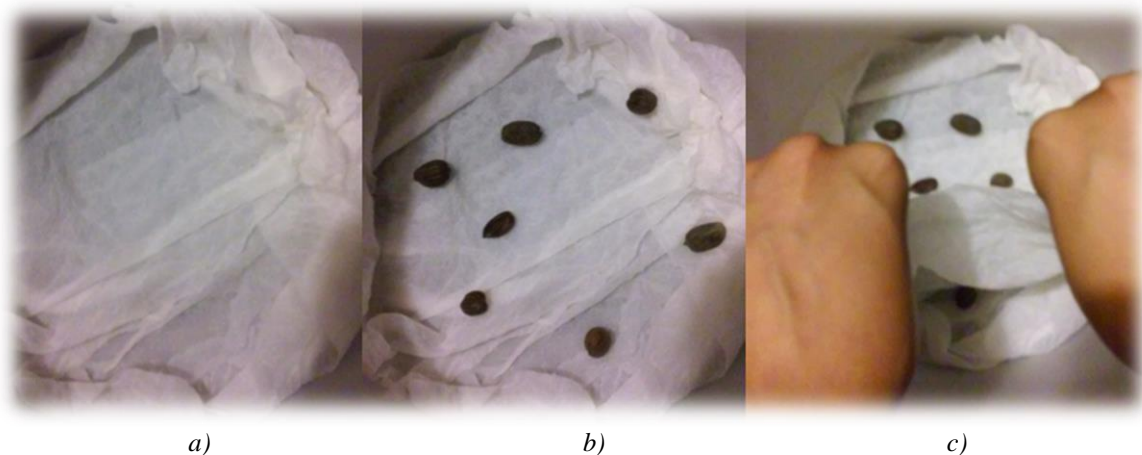


Figura 15 Germinación de las semillas de Jojoba por medio húmedo: a) Recipiente preparado para germinación b) Semillas en recipiente c) Semillas cubiertas con una toalla humedecida

3.2.2 Materiales y proceso: Germinación directa

Se utilizaron dos tipos de sustrato, el primero fue una mezcla de tierra y composta en una proporción de 2:1 y el segundo fue una germinación directa en arena.

Se utilizaron 10 recipientes de plástico circulares con una profundidad aproximada de 15 a 20 cm, 7 recipientes fueron rellenos con arena y 3 recipientes con mezcla composta/tierra, esto con la finalidad de permitir el crecimiento de la raíz profunda de la Jojoba. Se colocaron los sustratos en el recipiente dejando de 3 a 4 cm antes de llegar al borde del recipiente. Con el dedo pulgar se realizó un orificio en la tierra de aproximadamente dos veces el tamaño de la semilla a germinar (figura 16). Se introdujo la semilla en la tierra y se cubrió con la tierra restante. Se vertió agua en el recipiente hasta cubrir de 1 a 2 centímetros del espacio vacío entre el borde del recipiente y la tierra.



Figura 16 Germinación directa de las semillas de Jojoba: a) Recipiente preparado para germinación b) Sustrato utilizado para germinación directa c) Siembra directa de la semilla.

3.2.3 Observaciones

En el caso de la germinación en medio húmedo se revisó diariamente el recipiente para verificar que las toallas no perdieran completamente la humedad, de ser necesario se humedecía completamente la toalla superior y se exprimía vigorosamente para evitar un empapamiento en las semillas. En cuanto a la germinación directa una vez que la parte superior del sustrato perdía completamente la humedad, se volvía a verter agua en el recipiente hasta llegar a 2 a 3 cm antes del borde superior del recipiente.

Una vez obtenidas las primeras raíces del resultado en la germinación en medio húmedo, estas fueron trasplantadas a los recipientes mencionados en la germinación directa pero únicamente con arena como sustrato.

3.3 ELABORACION DE BIODIESEL A PARTIR DE ACEITE-CERA DE SEMILLA DE JOJOBA ESCALA LABORATORIO

Para la elaboración de las muestras se utilizó aceite puro de Jojoba por prensado en frío de origen comercial, así como metanol, hidróxido de sodio e hidróxido de potasio como catalizador.

Para la parte experimental se utilizaron las proporciones propuestas por Ramírez (Ramírez, 2007) y la metodología se ajustó a la disponibilidad de los equipos en el área de laboratorio, por eso se decidió realizar la transesterificación por medio de agitación y temperatura moderada.

Para elegir el tiempo de reacción adecuado se tomó en cuenta, lo señalado por diversos autores, donde sostienen que, en la transesterificación alcalina, el avance de la reacción es nulo para tiempos mayores a 90 minutos (Benjumea H., Agudelo S., & Cano, 2004), así pues, otros autores (Laiz-Saldaña, Tovar-Miranda, Durán-de-Bazúa, & Solís-Fuentes, 2009), mencionan un tiempo de 1 a 2 horas, por tanto, para este trabajo de tesis se elige utilizar una hora a agitación rigurosa (800 rpm).

En cuanto a la temperatura de reacción, se debe señalar que la temperatura de ebullición del metanol es baja (64.7° C) por lo tanto se deben tomar medidas de seguridad apropiadas para que los vapores del metanol, que son altamente tóxicos e inflamables, no sean inhalados (Plata, Kafarov, & Moreno, 2009). Para evitar cualquier accidente se trabajará con temperaturas rondando de los 40° a 50° C, evitando que exceda esa temperatura y ayudando así a que se lleve a cabo satisfactoriamente la reacción evitando la vaporización del metanol.

3.3.1 Materiales y proceso

El proceso experimental se realizó en el Laboratorio de Materiales y Medio Ambiente en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, con la supervisión del Dr. Gerardo Cesar Díaz Trujillo y el apoyo de la Dra. María Cristina Castañón Bautista.

En la tabla 3 se muestran los materiales e insumos empleados.

Tabla 3 Materiales e insumos para la elaboración de biodiesel a partir de aceite-cera de jojoba escala laboratorio

MATERIALES	INSUMOS
Balanza analítica	Metanol = (32ml/muestra)
Placa calefactora con agitación magnética	Hidróxido de sodio en pellets, grado analítico = (0.60 g/muestra)
2 vasos de precipitado (250 ml y 50 ml)	Hidróxido de potasio en pellets, grado analítico = (0.60 g/muestra)
Probeta graduada	Agua destilada = (Aprox. 150ml/muestra)
Agitador magnético	Aceite de Jojoba puro (prensado en frio) de origen comercial = (58 ml/muestra)
Espátula pequeña	
Termómetro digital	
Embudo de decantación con válvula	
Instrumentación para análisis de las muestras elaboradas:	Espectrómetro FT-IR Modelo Nicolet is5 Espectrómetro ¹ H NMR Spinsolve Education con imán permanente

El aceite utilizado (Figura 17) es de origen israelí, comercial y con un tratamiento de prensado en frio. El motivo por el cual se eligió este aceite, es porque Israel al igual que Tijuana y la región de Valle de las Palmas comparten el clima mediterráneo, lo cual emularía un aceite obtenido con las mismas condiciones a las que se obtendría en esta región.

El proveedor, específica y garantiza las siguientes características:

Método de extracción: Prensado en frio

Ingredientes: Aceite puro de Jojoba Orgánico únicamente

Empaque: Transporte en botellas de plástico de grado alimenticio



Figura 17 Aceite-cera de Jojoba de origen comercial

Para identificar el proceso se presenta en la figura 18 la metodología propuesta para este experimento.

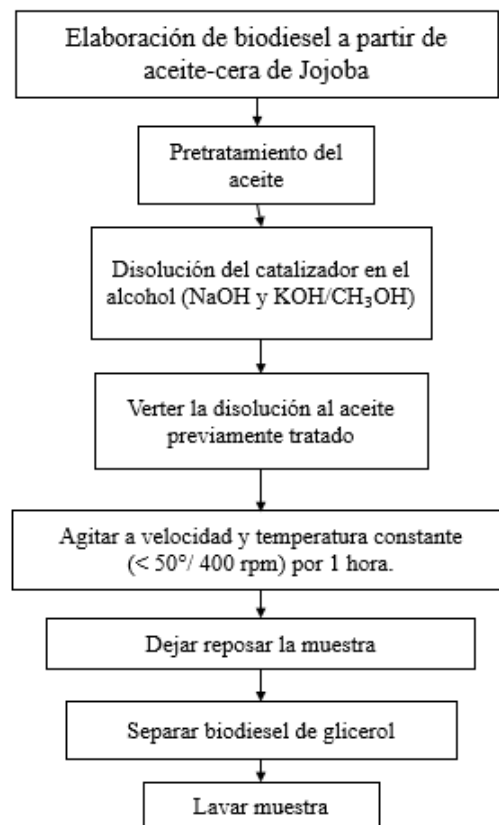


Figura 18 Metodología para la elaboración de biodiesel a partir de aceite-cera de Jojoba

Para el pretratamiento del aceite, únicamente se calentó unos minutos antes de verter el catalizador de hidróxido de sodio (NaOH), sin exceder la temperatura de 50 °C. Primero se tomó la medida del volumen de aceite necesario (58 ml) con la ayuda de una probeta graduada y se vertió en el vaso de precipitado. Se agitó sin alterar la temperatura a 400 rpm utilizando el agitador magnético (Figura 19).

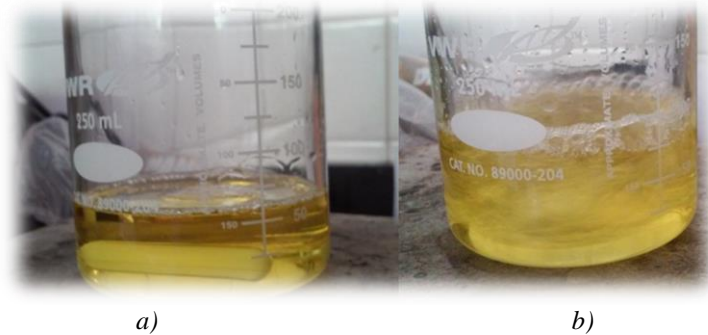


Figura 19 Pretratamiento del aceite: a) Aceite de Jojoba b) Aceite a temperatura y agitación constante.

Mientras el aceite elevaba su temperatura y se sometía a agitación moderada, se pesaron 0.60 gr de Hidróxido de Sodio (NaOH) en pellets, se vertieron en un vaso de precipitado más pequeño y se disolvieron en 32 ml de metanol con ayuda de la espátula (Figura 20).

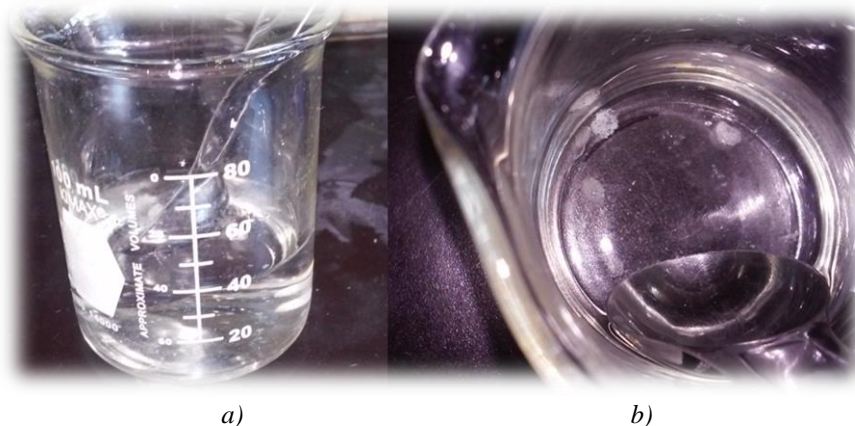


Figura 20 Disolución del catalizador: a) Metanol b) Catalizador vertido en el metanol

Una vez disueltos se vertió la mezcla en el aceite, se elevaron las revoluciones por minuto a 800 rpm y se dejó actuar por 1 hora a agitación constante y sin exceder la temperatura a más de 50° C, pero sin permitir que descienda menos de 40° C (Figura 21).

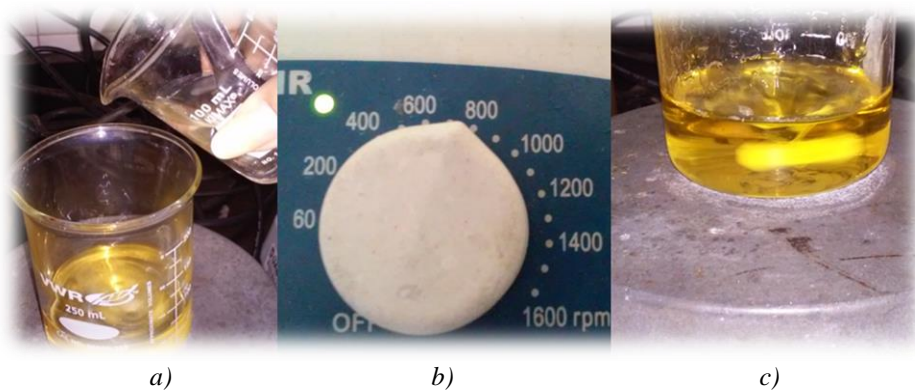


Figura 21 Reacción de transesterificación: a) Vertido del catalizador y el metanol en el aceite b) temperatura y agitación constante c) Aceite en proceso de reacción

Una vez pasada la hora se retiró de la fuente de calor y se dejó de agitar. Se dejó reposar para separar las fases de glicerol y biodiesel, alrededor de 5 minutos. La glicerina se precipita al fondo del vaso de precipitado y el biodiesel se sitúa en la parte más alta como se puede ver en la (Figura 22).

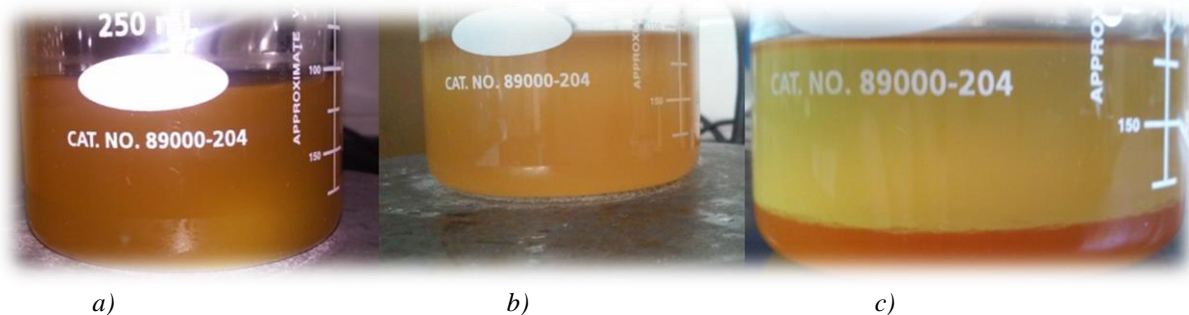


Figura 22 Separación de biodiesel y glicerol: a) Muestra una vez terminado el proceso calentamiento y agitación constante b) Muestra en reposo c) Fases visibles de glicerol y biodiesel

Posteriormente con la ayuda del embudo de decantación con válvula se realizó la separación de la parte del glicerol y se reservó a temperatura ambiente (figura 23).

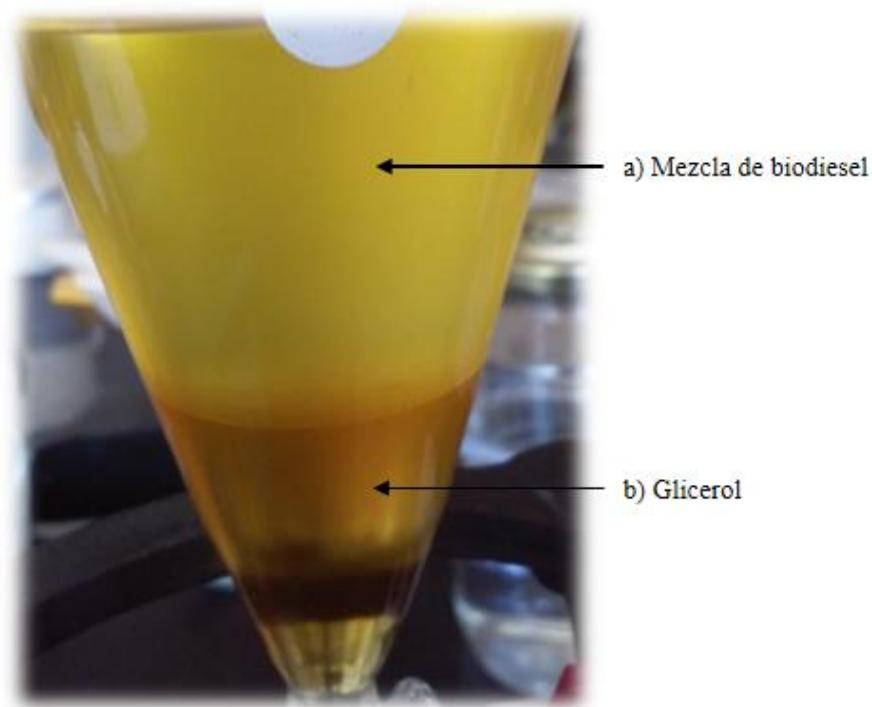


Figura 23 Separación de glicerol de la muestra de biodiesel: a) Mezcla de biodiesel b) Glicerol

Una vez separado se realizaron 3 lavados de la muestra utilizando de 40 a 50 ml de agua destilada por lavado, para comenzar se vertieron primeramente 40 a 50 ml de agua se agito vigorosamente y se esperó a que el agua se separara de la parte del biodiesel. Una vez separada se abrió la válvula para retirar el agua residual y se repitió el proceso dos veces más, hasta obtener agua de aspecto claro (Figura 24). La finalidad del lavado es retirar la mayor cantidad de impurezas y se utiliza el agua destilada ya que el biodiesel es insoluble en agua.

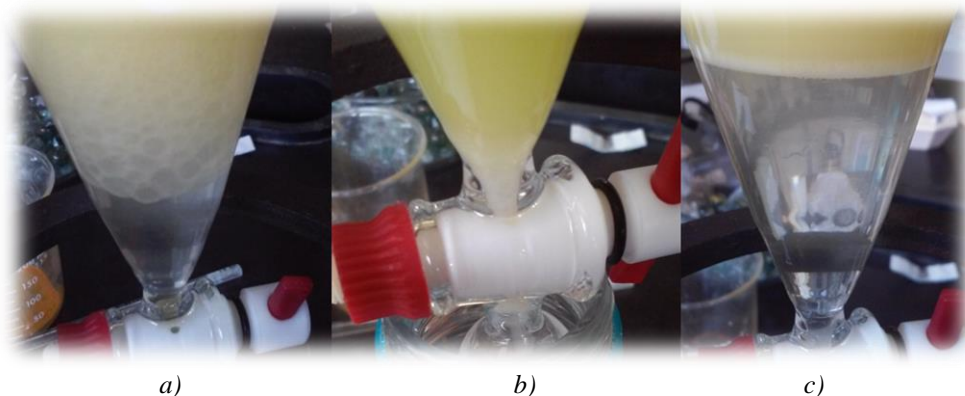


Figura 24 Lavado del biodiesel: a) Agitación y lavado b) Decantación del agua residual c) Separación de agua y biodiesel (Biodiesel limpio)

Al finalizar el lavado, se obtuvo un líquido que presenta una tonalidad amarilla/dorada (Figura 25).



Figura 25 Muestra de biodiesel obtenido

Se repitió el proceso completo para obtener 3 muestras más, variando el catalizador a utilizar, pero respetando las cantidades propuestas (Ramírez, 2007), para contar con 2 muestras empleando como catalizador hidróxido de sodio (NaOH) y 2 muestras utilizando hidróxido de potasio (KOH).

3.3.2 Observaciones

En cuanto al aceite utilizado cabe mencionar que su origen israelí no difiere de las condiciones climatológicas a las que podría encontrarse en las zonas desérticas del estado de Baja California ya que Israel al igual que Baja California presentan clima mediterráneo, el cual es idóneo para la proliferación exitosa de la Jojoba.

En este experimento se pudo observar que la separación del glicerol fue relativamente rápida, una vez terminada la agitación, el glicerol no demora más de 3 minutos en asentarse en el fondo del vaso de precipitado y no hubo mayor complicación al realizar la separación. De igual manera una vez trasladada la muestra al embudo de decantación con válvula para separar el glicerol, este se precipita al fondo del recipiente sin demorarse más de 3 minutos, facilitando la separación de este. Una vez realizada la separación del glicerol, se procedió a realizar el lavado de las muestras. En este caso, al verter el agua destilada dentro del embudo de decantación con la válvula cerrada, este se agita formando una mezcla lechosa, se dejó reposar y se esperó hasta que se separaran las fases, lo cual no tomo más de media hora por lavado, a excepción de la primer muestra que se llevó a cabo con hidróxido de potasio como catalizador, la cual tardo aproximadamente 2 días en separarse en su primer lavado los dos posteriores lavados fueron más rápidos, demorando aproximadamente 30 minutos en separación.

El agua residual fue descartada, y las muestras fueron almacenadas en frascos de vidrio con tapa rosca de metal, previamente lavados y secos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la germinación de las semillas y de la elaboración de las muestras de biodiesel.

4.1 RESULTADOS DE LA GERMINACION DE LAS SEMILLAS DE JOJOBA

En la germinación en sustrato, se obtuvieron 8 plántulas de 10 semillas sembradas (7 en arena y 1 en composta/tierra). En el caso de la germinación por medio húmedo, se obtuvieron 7 plántulas de 11 semillas utilizadas (Figura 26).



Figura 26 Raíces de Jojoba resultado de la germinación por medio húmedo

El tiempo de germinación fue de 6 a 7 días promedio, en el caso de las semillas germinadas por medio húmedo y un promedio de 9 días en el caso de las semillas germinadas directamente en el sustrato.

Las plantas de Jojoba que se cuentan ahora son de aproximadamente 6 meses de vida y presentan alturas que van desde los 12 cm hasta los 18 cm.



Figura 27 Plántula de Jojoba, resultado de la germinación directa

Se presenta mayor crecimiento y adaptabilidad en arena.

4.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ELABORACION DE BIODIESEL DE ACEITE-CERA DE SEMILLA DE JOJOBA

Se obtuvieron 4 muestras de biodiesel utilizando dos catalizadores diferentes y repitiendo el experimento dos veces por catalizador. Las muestras presentan un color amarillo/dorado. Aunque el glicerol obtenido se descartó aun con impurezas muestra una viscosidad similar a la miel, pero con un ligero toque más “pegajoso”. Se lava fácilmente con agua formando muy poca, casi nada de espuma y sin dejar rastro de grasa/aceite (Figura 28).



Figura 28 Glicerol obtenido

4.2.1 Rendimiento teórico y real de la reacción de transesterificación

Para determinar la efectividad de la reacción se realizó el cálculo estequiométrico del rendimiento teórico de la reacción, partiendo desde las proporciones propuestas por Ramírez (Ramírez, 2007). De esta manera, obtenido el rendimiento teórico, se puede comparar el resultado con el rendimiento real de la reacción.

Se obtuvieron las siguientes cantidades de producto (Tabla 4):

Tabla 4 Cantidades obtenidas de los experimentos

Numero de muestra	Catalizador	Peso (g)
M ₁	NaOH	17.47.6
M ₂	NaOH	35.3912
M ₁	KOH	30.3737
M ₂	KOH	38.574

Dónde:

M_1 = Experimento uno

M_2 = Experimento dos

Dadas las cantidades se tiene que para 50.023 g de aceite-cera de Jojoba:

Paso 1

Se convirtieron los 50.023 g de sustancia inicial, aceite-cera de Jojoba, en moles:

$$(50.023 \text{ g AJ}) \left(\frac{1 \text{ mol AJ}}{657 \text{ g}} \right) = 0.076138508 \text{ mol AJ} \quad (1)$$

Paso 2

Se calcularon las moles de metil éster de Jojoba:

$$(0.076138508 \text{ mol AJ}) \left(\frac{3 \text{ mol MEJ}}{1 \text{ mol AJ}} \right) = 0.228415525 \text{ mol MEJ} \quad (2)$$

Paso 3

Se convirtieron moles de metil éster de Jojoba en gramos:

$$(0.228415525 \text{ mol MEJ}) \left(\frac{325.3 \text{ g}}{1 \text{ mol MEJ}} \right) = 74.30357032 \text{ g MEJ} \quad (3)$$

Dónde:

Peso molecular del aceite-cera Jojoba = 657 g/mol¹

Peso molecular de metil éster de Jojoba = 325.3 g/mol²

AJ = Aceite-cera Jojoba

MEJ = Metil éster de Jojoba

Se tiene que para el rendimiento porcentual:

¹ Valor aproximado tomado de N. El-Boulifi et al. (2015)

² Valor aproximado tomado de S. N. Shah et al. (2010)

$$\frac{\text{Rendimiento real}}{\text{Rendimiento teórico}} \times 100 = \text{Rendimiento porcentual} \quad (4)$$

Así pues:

$$M_1 \quad \text{NaOH} = 17.476 \text{ g} \frac{17.476 \text{ g}}{74.30357032 \text{ g}} \times 100 = 23.52 \%$$

$$M_2 \quad \text{NaOH} = 35.3912 \text{ g} \frac{35.3912 \text{ g}}{74.30357032 \text{ g}} \times 100 = 47.63 \%$$

$$M_1 \quad \text{KOH} = 30.3737 \text{ g} \frac{30.3737 \text{ g}}{74.30357032 \text{ g}} \times 100 = 40.87 \%$$

$$M_2 \quad \text{KOH} = 38.574 \text{ g} \frac{38.574 \text{ g}}{74.30357032 \text{ g}} \times 100 = 51.91 \%$$

Tabla 5 Rendimientos porcentuales obtenidos

Numero de experimento	Rendimiento porcentual obtenido (%)
1 NaOH	23.52
2 NaOH	47.63
1 KOH	40.80
2 KOH	51.92

Una vez obtenidos los resultados se puede apreciar en la tabla 5 que el rendimiento porcentual aproximado es más elevado en los experimentos realizados con hidróxido de potasio como catalizador. Dando como resultado un rendimiento general aproximado con KOH de 46.39 %, mientras que en los experimentos realizados con hidróxido de sodio como catalizador se tiene un rendimiento general aproximado de 35.575 %.

La notable variación en el rendimiento de las muestras, aun siendo estas realizadas con las mismas proporciones y catalizador se debe, a que en el segundo experimento se perfecciono la técnica, puede notarse que tanto el segundo experimento utilizando como catalizador hidróxido de sodio como el segundo experimento con catalizador de hidróxido de potasio; muestran un mejor rendimiento, corroborando que la técnica se pulió (Control de temperatura, tiempo y reactivos).

4.2.2 Análisis de las muestras por espectroscopia de infrarrojo

Se analizaron las muestras por espectroscopia de infrarrojo, con el equipo disponible en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de UABC con el Espectrómetro FT-IR Modelo Nicolet is5 (Figura 29).



Figura 29 Espectrómetro FT-IR Modelo Nicolet is5

Se analizaron las cuatro muestras de biodiesel y con el software de apoyo irAnalyze – RAMalyze 3.2 Analytical Software se generaron los siguientes espectros (figura 30 y 31):

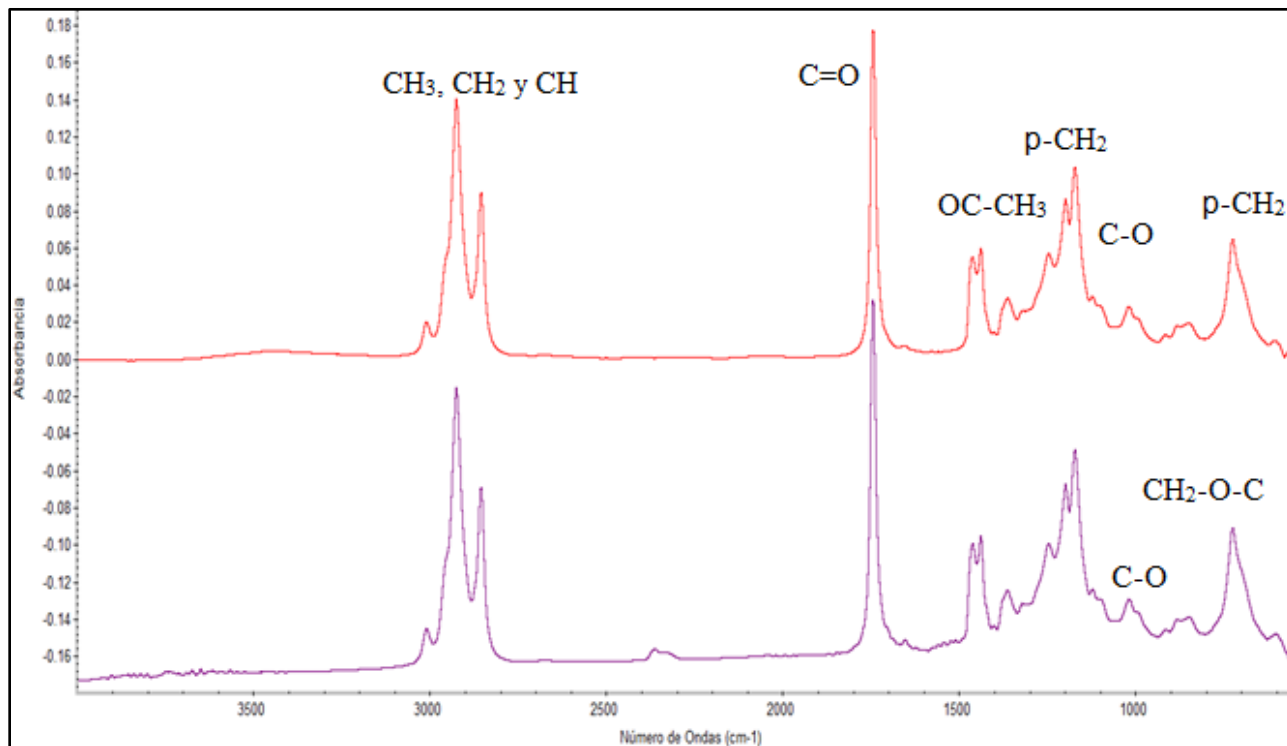


Figura 30 Espectrografía de infrarrojo muestras NaOH

Como puede notarse a simple vista en la figura 30, los picos característicos de las muestras generadas con catalizador de hidróxido de sodio (NaOH) son similares entre si y no varían significativamente a excepción de una ligera variación presentada en la muestra 2 en la región aproximada de 2300 – 2400 cm⁻¹.

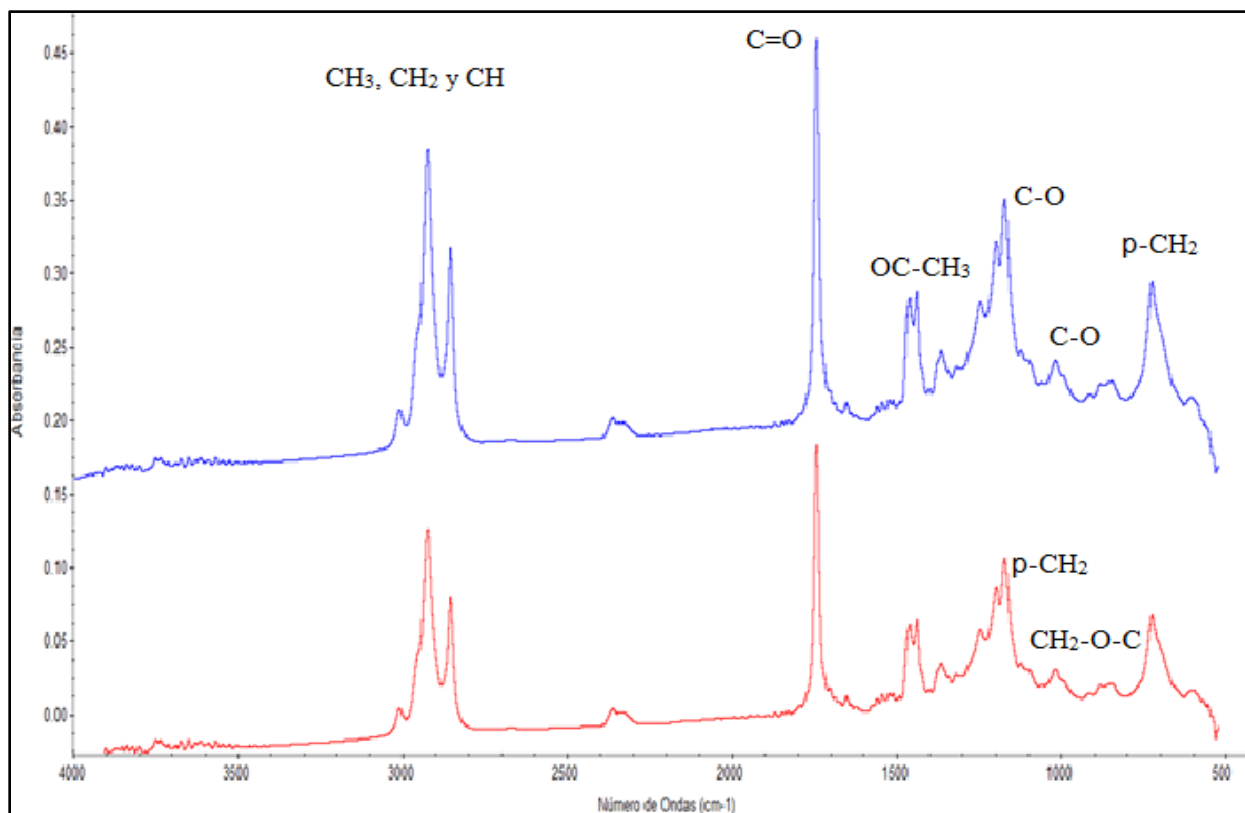


Figura 31 Espectrografía de infrarrojo muestras KOH

Se aprecia que además de ser similares los picos característicos en las muestras generadas con catalizador de hidróxido de potasio (KOH) también son similares a la muestra 2 generada con catalizador de hidróxido de sodio (NaOH) en la región aproximada de 2300 – 2400 cm⁻¹.

A continuación, se muestra la tabla 6 con las señales obtenidas:

Tabla 6 Señales obtenidas en el análisis por espectroscopia de infrarrojo

Enlace	ν (cm^{-1})
Cadenas Alifáticas CH_3 , CH_2 y CH	3000 - 2800
Enlace Carbonilo $\text{C}=\text{O}$	1743
Flexión Asimétrica de enlace $\text{OC}-\text{CH}_3$	1462 – 1435
Vibración de Flexión $\text{p}-\text{CH}_2$	1361 – 1319
Deformación Axial Asimétrica $\text{C}-\text{O}$	1246 – 1196 -1169
Vibración de Flexión $\text{p}-\text{CH}_2$	1169
$\text{C}-\text{O}$	1119 – 1061
$\text{C}-\text{O}$	1014
Distensión Enlace $\text{CH}_2-\text{O}-\text{C}$	879 – 845
Vibración de Flexión $\text{p}-\text{CH}_2$	721

En cuanto a la interpretación de estos espectros, como lo menciona la literatura en la caracterización de una muestra de biodiesel a partir de aceite de maíz obtenido de frituras, Ramírez et al (2011), menciona que los átomos de hidrógeno alifáticos son indicados en la región de 2924 cm^{-1} y 2854 cm^{-1} , así pues, en las 4 muestras se aprecia un alargamiento en las regiones aproximadas que menciona el autor; indicando la presencia de estos átomos en las muestras.

Una banda intensa de alargamiento $\text{C}=\text{O}$ para el éster metílico o metil éster aparece en la región aproximada a 1740 cm^{-1} (Ramírez-Ortiz, Medina-Valtierra, & Martínez Rosales, 2011). En los resultados obtenidos de este estudio de investigación utilizando aceite-cera de Jojoba; tanto las muestras con hidróxido de potasio e hidróxido de sodio como catalizador presentan un alargamiento superior en la región aproximada de 1750 cm^{-1} y 1740 cm^{-1} , concordando nuevamente con la bibliografía y corroborando la presencia de metil esterres los cuales componen enteramente al biodiesel.

El biodiesel al igual que el aceite vegetal absorbe en la región de 2750 cm^{-1} – 3000 cm^{-1} correspondiente a los modos de vibración de $-\text{CH}_2$ y $-\text{CH}_3$ (Medina-Valtierra, Camarillo Martínez, & Ramírez-Ortiz, 2011) propios de las cadenas alifáticas (Peñaranda Rincón, Sepúlveda Ortiz, Álvarez Pacheco, González-Delgado, & Kafarov, 2011), en las muestras obtenidas de biodiesel de Jojoba, se presentan sin excepción en los resultados de espectroscopia, las señales en las regiones antes mencionadas.

Así pues, Urribarrí et al (2014), menciona que los ésteres tienen dos fuertes bandas de absorción características derivadas del grupo carbonilo ($C = O$) alrededor de 1750-1730 cm^{-1} y el del grupo C-O en 1300-1000 cm^{-1} . Las vibraciones de estiramiento de CH_3 , CH_2 y CH aparecen en 2980-2950, 2950-2850 y 3050-3000 cm^{-1} , mientras que las vibraciones de flexión (CH_2) de estos grupos aparecen en 1475-1350, 1350-1150 y 722 cm^{-1} , respectivamente (Urribarrí, y otros, 2014).

4.2.3 Análisis de las muestras por resonancia magnética nuclear

El Equipo utilizado de Espectrómetro ^1H NMR fue Spinsolve Education con imán permanente. Especificaciones: Frecuencia de 43 MHz de Protón; núcleo ^1H y 11 de MHz de Carbono; núcleo C., Resolución de 50 % ancho de línea 0.7 Hz. (16 ppb)

Temperatura de 28.5 °C y utilizando un tubo de muestra de 5 mm WG-1000-7 W/Mad Lab Glass NE de 7-8 cm de Longitud y capacidad 300 micro litros de muestra. La calibración fue con una solución de 10% de H_2O - 90% de D_2O .

Se generaron los siguientes espectros (Figura 32, 33, 34 y 35):

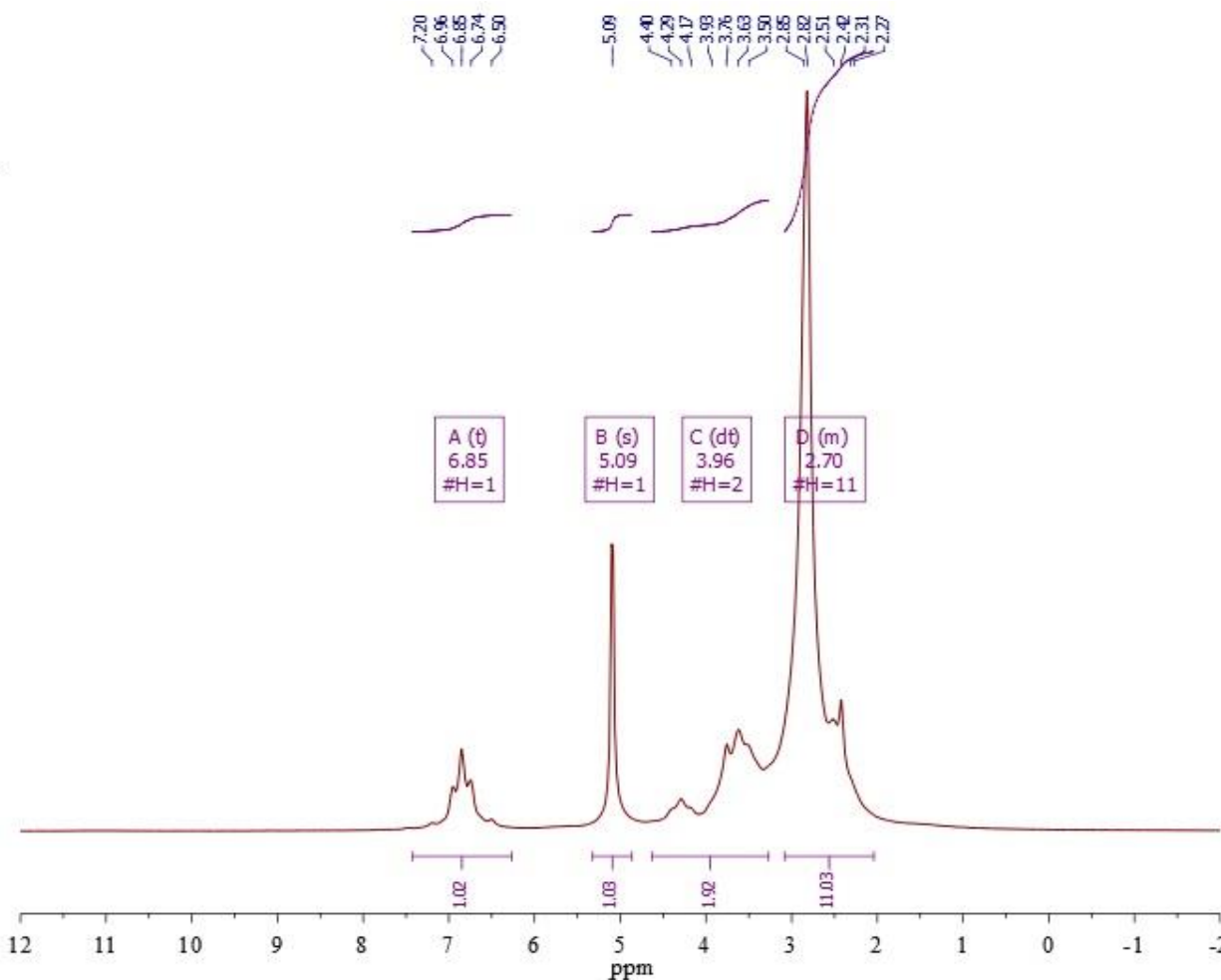


Figura 32 Espectrografía de infrarrojo muestra 1 con KOH

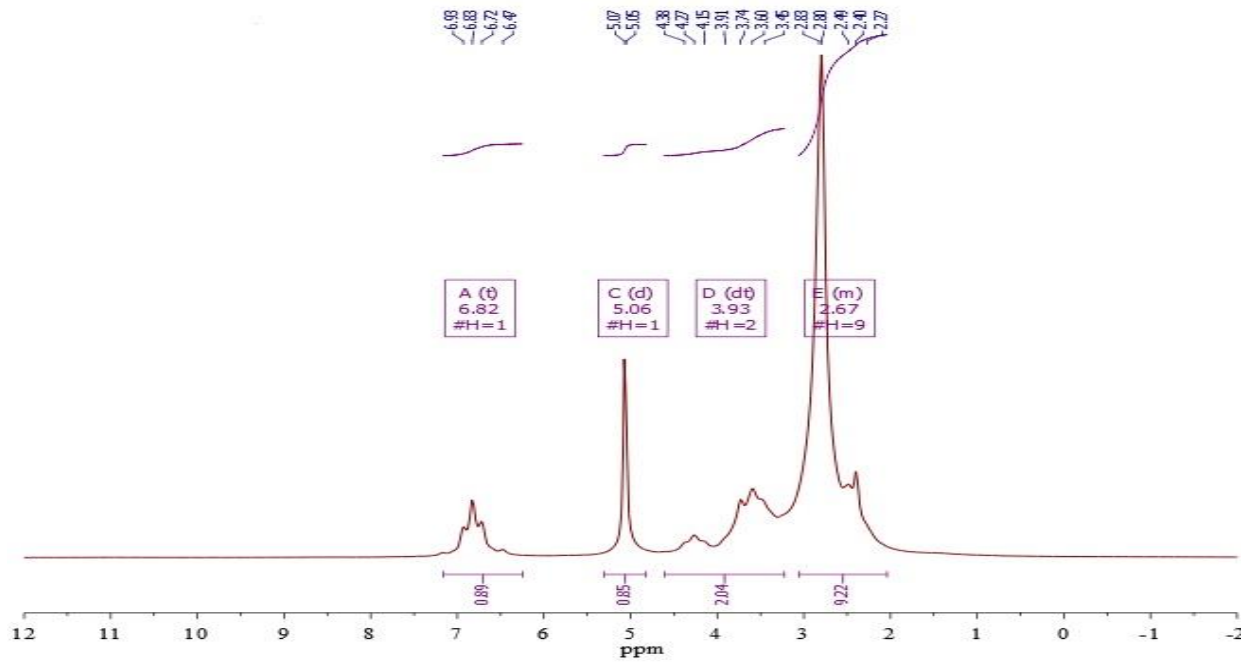


Figura 33 Espectrografía de infrarrojo muestra 2 con KOH

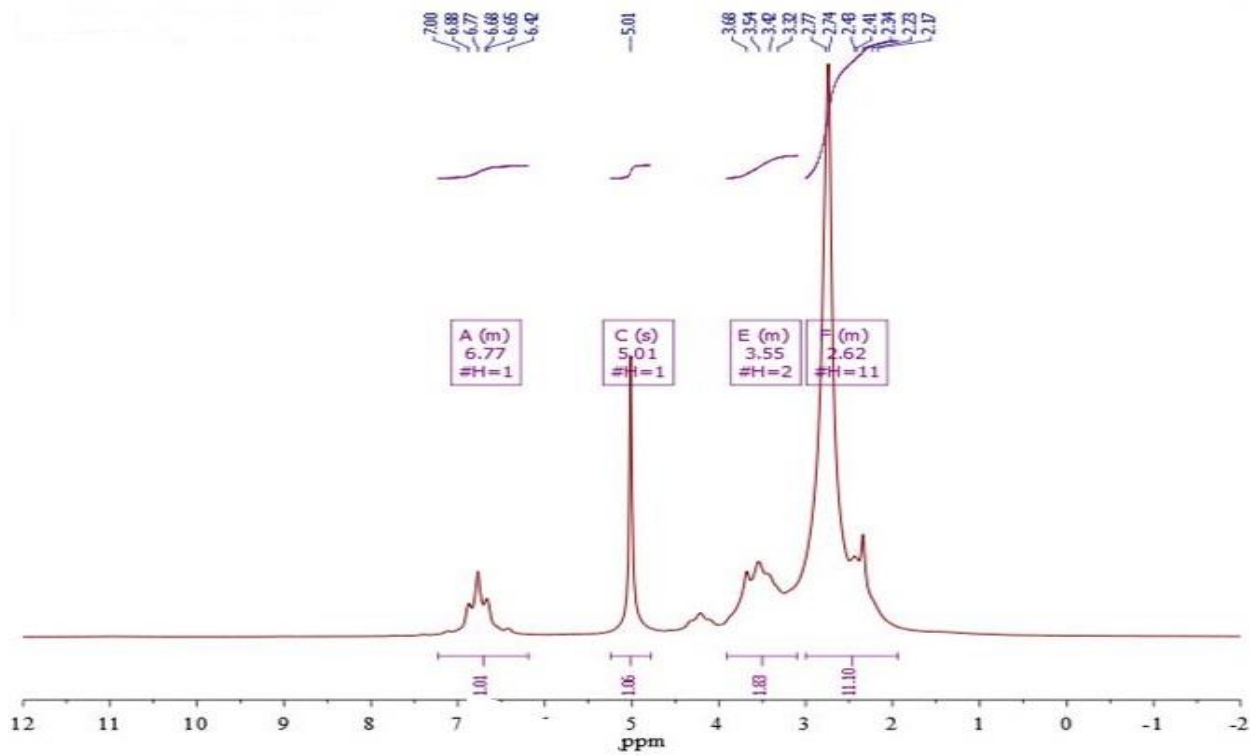


Figura 34 Espectrografía de infrarrojo muestra 1 con NaOH

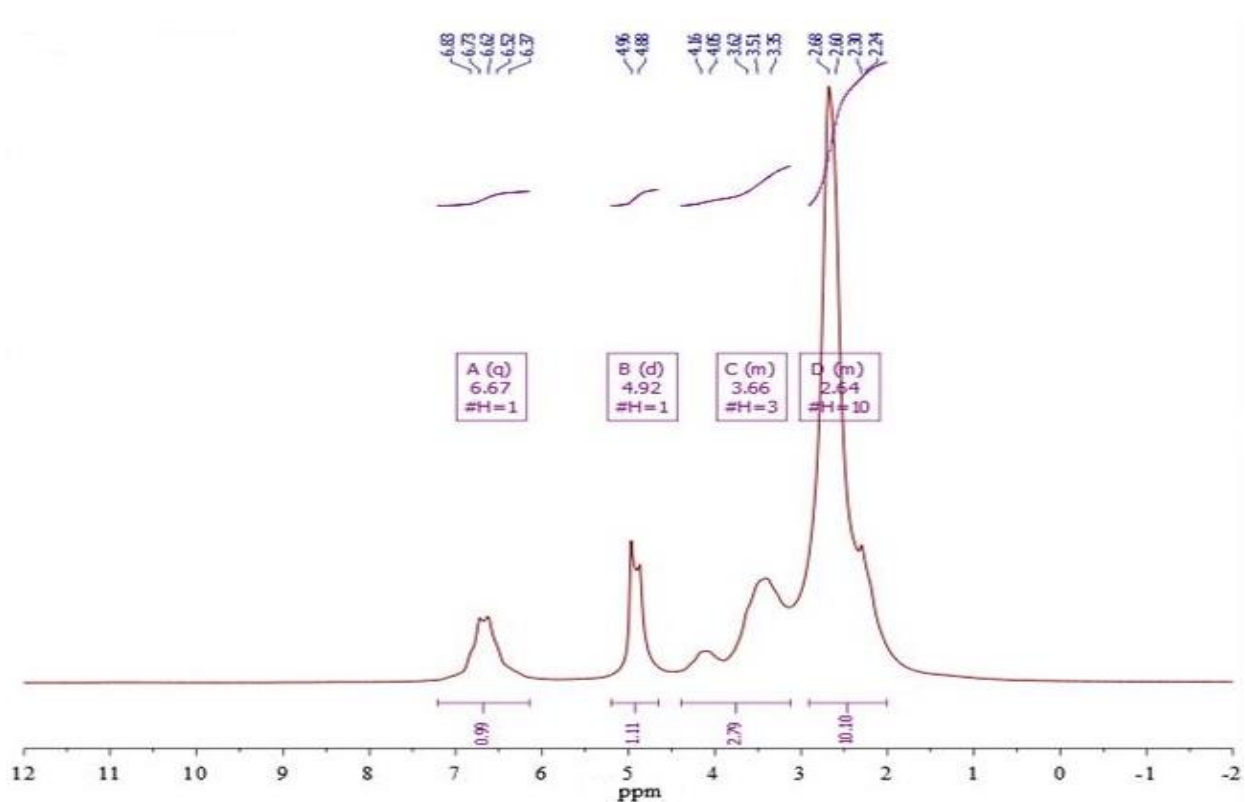


Figura 35 Espectrografía de infrarrojo muestra 2 con NaOH

Las figuras 32 y 33 presentan la serie de Espectros ^1RMN de biodiesel obtenidos por medio de síntesis de aceite-cera de Jojoba con metanol, utilizando como catalizador hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio NaOH (Figura 34 y 35). Se puede apreciar una similitud entre los espectros, se identifica la presencia de los principales grupos funcionales propios del biodiesel, identificables por medio de Resonancia Magnética Nuclear y citado en la serie de referencias (Tabla 7) triplete entre 6.67 y 6.85 ppm que corresponde a protón en enlace $=\text{CH}$, un pico singlete en el intervalo de 4.92 a 5.09 ppm atribuido a protón de OH de fenol y se traslapa con protón de enlace $=\text{CH}_2$. Se puede atribuir de igual forma la presencia de singlete de protón de metoxi (metil éster) entre 3.96 y 3.55 ppm. Finalmente, y considerando los picos de mayor intensidad, se obtiene un singlete que se atribuye a protones de CH_3 α -o y se traslapan con aquellos incluidos en CH_2 , CH a aromático en un intervalo de 2.62 y 2.70 ppm.

Conforme a los resultados de las interpretaciones obtenidas y la comparación de estas con las referencias se puede indicar la presencia de biodiesel.

Tabla 7 Relación Señal RMN/Grupo asignación/Referencia

Señal (ppm)	Grupo asignado	Referencia
KOH exp 1		
6.82	Fenol, =CH aromático monocíclico,	M.R. Monteiro et al. (2009), Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
5.06	OH fenólico	Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
3.93	CH ₂ α a dos anillos aromáticos, Acido Metil Ester	Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
2.67	CH ₂ , CH a aromático, Hidrógenos CH ₃ α-o	Maciel F Cassia A, Tesis Maestría (2011), Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
KOH exp 2		
6.85	Fenol, CH aromático monocíclico	M.R. Monteiro et al. (2009), Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
5.09	OH fenólico	Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
3.96	CH ₂ α a dos anillos aromáticos	Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
2.70	CH ₂ , CH a aromático	Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
NaOH exp 1		
6.77	=CH aromático monocíclico	Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
5.01	OH fenólico	Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
3.55	CH ₂ α a dos anillos aromáticos, Singlete de protón de metoxi.	Tariq M et al. (2011), Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
2.62	CH ₂ , CH a aromático, Grupo Metileno	Morgenstern M. et al. (2006), Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
NaOH exp 2		
6.67	=CH aromático monocíclico	Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
4.92	=CH ₂ en vinilo de olefina monosustituida	Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
3.66	CH ₂ α a dos anillos aromáticos, Singlete de protón de metoxi.	Tariq M et al. (2011), Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)
2.64	CH ₂ , CH a aromático, Grupo Metileno	Morgenstern M. et al. (2006), Avella Moreno E, Tesis Doctoral (2011)

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dado los resultados recabados durante el procedimiento experimental, puede concluirse, que la materia prima para la obtención de biodiesel a partir de cera-aceite de semilla de jojoba (semilla de jojoba), se puede obtener en zonas cercanas de Tijuana, Baja California y la recolección de la semilla no presenta mayor complicación, dado que solo es esperar la temporada de floración y recolectar la semilla cuando ésta ya esté en el suelo, o bien tomarla directamente de la planta.

En cuanto al aceite que esta semilla contiene se pueden resaltar varias características positivas, que incluyen su uso en aplicaciones cosméticas, industriales y además es el único aceite-cera conocido hasta ahora que puede ser el sustituto del espermaceti de cachalote, el cual es un aceite que se encuentra en la cabeza de este y que le permite mantener su flotabilidad cuando se encuentra sumergido (Real Hardisson & Soria Cabrera, 1992) este aceite una vez procesado es utilizado como lubricante. El aceite de Jojoba una vez extraído puede utilizarse puro o procesarlo para destinarlo a sus diversas aplicaciones, si su extracción es por prensado, la pasta resultante de las semillas puede utilizarse como alimento para ganado y la cascara de su semilla como composta (Real Hardisson & Soria Cabrera, 1992) .

La germinación de la semilla es sencilla, encontrándose resultados tanto en germinación directa como en germinación por medio húmedo, mostrándose en este estudio un índice de 80% de éxito y 64% de éxito respectivamente, y un índice general de éxito de 72%. Aun así, estos resultados pueden mejorarse, ya que se han encontrado estudios que muestran un índice de germinación del 100% utilizando regímenes más estrictos de germinación (humedad controlada, tiempos específicos de trasplante y control de la temperatura) (Real Hardisson & Soria Cabrera, 1992).

En lo referente al trasplante de las plantas al suelo, no se puede concluir dado que la literatura recomienda hacer el trasplante cuando las plantas presenten una altura de 5 cm (Real Hardisson & Soria Cabrera, 1992), y en este caso de estudio el trasplante no se realizó.

En la elaboración de biodiesel a partir de aceite de Jojoba comercial, se utilizaron las proporciones propuestas por Ramírez (2007), pero variando el tiempo de reacción, la temperatura y la velocidad de agitación. La elaboración no presento mayor complicación habiéndose efectuado rápidamente la separación de glicerol (no más de 3 minutos) y el lavado (20 a 30 minutos aproximadamente). Aunque el glicerol se descartó aun con impurezas muestra una

viscosidad similar a la miel. Se lava fácilmente con agua formando muy poca, casi nada de espuma y sin dejar rastro de grasa/aceite.

Con respecto a la temperatura de reacción y con base en los resultados obtenidos, se recomienda emplear temperaturas cercanas a la temperatura ambiente, ya que el metanol tiene un bajo punto de ebullición, de esta manera se evita la evaporación del metanol y por ende un menor rendimiento de reacción además de que con esto se reduce el riesgo al manejar altas temperaturas y se disminuye el consumo de energía.

Se realizó el cálculo del rendimiento teórico para compararlo con el rendimiento real y obtener el rendimiento porcentual de la reacción, obteniéndose mejores resultados utilizando como catalizador hidróxido de potasio (52 % aproximadamente en el segundo experimento), en cuanto a los rendimientos individuales, se puede apreciar que el segundo experimento de ambos catalizadores muestra un rendimiento mayor que el primer experimento; consideramos que se debe a que se perfecciono la técnica.

De acuerdo a los resultados del análisis de espectroscopia vibracional IR de cada una de las muestras obtenidas y teniendo como comparación la bibliografía consultada, se llegó a la conclusión que los espectros muestran similitudes considerables, aun utilizando dos catalizadores diferentes. Las muestras presentaban el alargamiento importante en la región aproximada de 1750 cm^{-1} y 1740 cm^{-1} , concordando nuevamente con la bibliografía (Ramírez-Ortiz, Medina-Valtierra, & Martínez Rosales, 2011) y corroborando la presencia de metil ésteres de ácidos grasos de aceite-cera de Jojoba.

En cuanto al análisis ^1RMN de biodiesel obtenidos por medio de síntesis de aceite-cera de Jojoba con metanol, utilizando como catalizador hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH), se puede apreciar una similitud entre los espectros, se identifica la presencia de los principales grupos funcionales propios del biodiesel, identificables por medio de Resonancia Magnética Nuclear y citado en la serie de referencias (Tabla 7).

De las muestras de biodiesel obtenidas a partir de aceite-cera de Jojoba y conforme a los resultados obtenidos de IR y RMN y la comparación de éstas con las referencias, se puede indicar la presencia de biodiesel en todas las muestras obtenidas. En cuanto al catalizador y

comparando el rendimiento porcentual se recomienda utilizar hidróxido de potasio (KOH) ya que se obtuvo mejor rendimiento utilizando este catalizador. La especie de Jojoba presenta potencial para su uso como biodiesel, además de que las características fisicoquímicas que presenta su aceite son únicas, encontrándose su estructura solamente en otra especie (Cachalote (*Physeter macrocephalus*)).

6. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Con las cualidades de este aceite se pueden enlistar una infinidad de aplicaciones que pueden ser investigadas a profundidad y que tal vez no bastarían para terminar de enmarcar las grandes promesas a futuro que cuenta esta especie nativa, cabe resaltar que es un gran acierto de la naturaleza al ponernos al alcance la Jojoba (*Simmondsia chinensis*) como futuros profesionistas, investigadores o académicos; necesitamos explorar más allá de lo que vemos y deberíamos aprovechar la gran ventaja que tenemos a nuestro alcance. Como ya se mencionó anteriormente, este aceite-cera cuenta con muchas ventajas que lo hacen atractivo para diversas aplicaciones, el reto ahora y lo concerniente a este trabajo de tesis es seguir explorando sus capacidades energéticas, la rentabilidad que tendría el realizar la extracción de su aceite en esta zona, la viabilidad económica que tendría el elaborar biodiesel a partir de su aceite en la región y el beneficio ambiental que se obtendría, al restaurar las zonas desérticas de la región con esta especie.

Como futuras líneas de investigación a corto plazo se pueden enlistar las siguientes:

- Realizar la extracción experimental del aceite-cera de las semillas de Jojoba de la región, con la finalidad de obtener resultados de la especie in situ.
- Elaboración experimental de biodiesel a partir de aceite-cera de Jojoba de la región y compararlos con los resultados obtenidos en este estudio y en otros realizados con esta especie.
- Utilizar otras técnicas de caracterización de biodiesel a partir de esta especie.
- Utilizar la metodología que se menciona en este estudio, con aceite-cera de Jojoba extraído de las semillas de Jojoba de la población nativa de Valle de las Palmas.
- Desarrollar una metodología de obtención de biodiesel a partir de aceite-cera de Jojoba utilizando los principios químicos de la reacción de transesterificación, desde la

perspectiva química verde, para obtener mejores resultados y compararlos con este estudio.

Como futuras líneas de investigación a largo plazo, se proponen las siguientes:

- Estudiar la viabilidad económica, ambiental y social de un posible cultivo comercial de Jojoba en la región.
- Realizar un estudio de monitoreo de las plantaciones nativas de la región con la finalidad de registrar las variables ambientales que afectan la productividad de las plantas, registrar su ubicación, producción y la condición de las semillas obtenidas.
- Realizar un estudio energético, económico, ambiental y social del proceso completo de obtención de biodiesel a partir de un cultivo energético de Jojoba.
- Cuantificar y comparar las emisiones de gases de combustión con la utilización de biodiesel a partir de aceite de Jojoba en un motor diésel.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez Béjar, A., & Lina Montes, N. (2014). ¿Son los biocombustibles una opción en la lucha contra el cambio climático? En C. Gay y García, *Biocombustibles en México: Una alternativa para la reducción de la dependencia de los hidrocarburos y la mitigación de los gases efecto invernadero* (págs. 37-57). México: Programa de Investigación en Cambio Climático. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Álvarez Maciel, C. (2009). Biocombustibles: Desarrollo histórico-Tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, pp. 63-89.
- Al-Widyan, M. I., & Al-Muhtaseb, M. A. (2010). Experimental investigation of jojoba as a renewable energy source. *Energy conversion and management*, 51, pp. 1702-1707.
- Avella Moreno, E. (2011). Aplicación de resonancia magnética nuclear para la caracterización de fracciones pesadas del petróleo en el proceso de desfaltado por extracción (DEMEX), Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia.
- Balat, M., & Balat, H. (2 de Mayo de 2008). "A critical review of bio-diesel as a vehicular fuel". *Energy Conversion and Management*, 49, 2727-2741.
- Benjumea H., P. N., Agudelo S., J. R., & Cano, G. J. (Mayo de 2004). "Estudio experimental de las variables que afectan la reacción de transesterificación del aceite crudo de palma para la producción de biodiesel". *Scientia Et Technica*, pp.169-174.
- Canoira, L., Alcántara, R., García-Martínez, M. J., & Carrasco, J. (2006). Biodiesel from Jojoba oil-wax: Transesterification with methanol and properties as a fuel. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 30, pp. 76-81.
- Cantero Vergara, K., & Faber Archila, J. (2010). Simulación de un proceso de producción de biodiesel por lotes a través de medios químicos. *Prospect*, Vol. 8, pp. 32-42.
- Cassia, M. F. (2011). *Síntese e Caracterização de biodiesel metílico e etílico a partir de blendas dos óleos de tungue e de soja*, Tesis Maestría, Universidade Federal Do Rio Grande. Rio Grande Brasil.
- Castillo Ospina, A., Velásquez J., J., & Cuartas Z., P. (Junio de 2011). "Obtención de biodiesel a partir de aceite de Jatropha Curcas L por transesterificación etanólica". *Revista Investigaciones Aplicadas*, 5, pp.34-41.
- Castro, P., Coello, J., & Castillo-Lima, L. (2007). *Opciones para la producción y uso del biodiésel en Perú*. Perú: Soluciones Prácticas-ITDG.
- Fernández, R. (2007). *Nodo 50*. Recuperado el 29 de Mayo de 2016, de <http://www.nodo50.org/ramonfd/eliniciodelfin.pdf>.
- García Camús, J. M., & García Laborda, J. Á. (2006). *Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol*. Madrid: Fundación para el conocimiento madri+d.

- Godoy, E. (4 de Octubre de 2011). México desperdicia riqueza de los desiertos. *Inter Press Service, Agencia de Noticias*.
- González Agramón, M. (Diciembre de 1978). *Obtención de alcoholes grasos cis monoinsaturados por saponificación acuosa de NaOH a partir del aceite de Jojoba*. Hermosillo, Sonora, México.
- Gutiérrez García, G. d., Mondaca Fernández, I., Meza Montenegro, M. M., Félix Fuentes, A., Balderas Cortés, J. d., & Gortáres Moroyoqui, P. (2012). Biogás: Una alternativa ecológica para la producción de energía. *Ide@s CONCYTEG*, pp. 881-894.
- Hajbabaie, M., Karavalakis, G., Johnson, K. C., Guthrie, J., Mitchell, A., & Durbin, T. D. (2014). Impacts of biodiesel feedstock and additives on criteria emissions from a heavy-duty engine. *Fuel Processing Technology, Vol. 126*, pp. 402-414.
- IICA, I. p. (2010). *Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiésel*. San José, Costa Rica: IICA.
- Israel, J. (2016). *Jojoba Israel*. Obtenido de http://sp.jojobaisrael.com/Jojoba_Israel/
- Kozliak, E., Mota, R., Rodriguez, D., Overby, P., Kubátová, A., Stahl, D., . . . Seames, W. (2013). Non-catalytic cracking of jojoba oil to produce fuel and chemical by-products. *Industrial Crops and Products, 43*, 386-392.
- Laiz-Saldaña, J., Tovar-Miranda, R., Durán-de-Bazúa, M., & Solís-Fuentes, J. (Junio de 2009). "Aprovechamiento de residuos agroindustriales: Producción de biodiesel por transesterificación alcalina de aceite crudo de "almendras" de zapote mamey (*Pouteria sapota*)". *Tecnología, Ciencia, Educación, 24*, pp. 48-56.
- Lina Montes, N., & Álvarez Béjar, A. (2014). Los biocombustibles en América Latina y México. En C. Gay y García, *Biocombustibles en México: Una alternativa para la reducción de la dependencia de los hidrocarburos y la mitigación de los gases de efecto invernadero* (págs. 81-104). México: Programa de Investigación en Cambio Climático. Universidad Nacional Autónoma de México.
- M.K. Abu-Arabi, M.A. Allawzi, H.S. Al-Zoubi, & A. Tamimi. (2000). Extraction of jojoba oil by pressing and leaching. *Chemical Engineering Journal, 76*, pp. 61-65.
- Medina Ramírez, E. I., Chávez Vela, N. A., & Jáuregui Rincón, J. (2012). Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, pp.62-70.
- Medina-Valtierra, J., Camarillo Martínez, G., & Ramírez-Ortiz, J. (Septiembre de 2011). "Método para monitorear el rendimiento y contenido de metil-ésteres en el biodiesel usando la espectroscopia vibracional IR". *Acta Universitaria, Dirección de Apoyo A la investigación y al posgrado, Universidad de Guanajuato, 21(4)*, pp.27-32.

- Monteiro, M. R., Ambrozina, A., Lião, L. M., & Ferreira, A. G. (2009). Determination of biodiesel blend levels in different diesel samples by ^1H NMR. *Fuel*, 88, 691-696.
- Montes Zaragoza, L. A. (Agosto de 2016). Características de la Jojoba. (C. Ayala Ruiz, Entrevistador) Tijuana, Baja California, México.
- Morgenstern, M., Cline, J., Meyer, S., & Cataldo, S. (2006). Determination of the kinetics of Biodiesel production using Proton Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy (^1H NMR). *Energy & Fuels*, 20, 1350-1353.
- Noureddin, E.-B., Sánchez, M., Martínez, M., & Aracil, J. (2015). Fatty acid alkyl esters and monounsaturated alcohols production from Jojoba oil using short-chain alcohols for biorefinery concept. *Industrial Crops and Products*, 69, 244-250.
- Pavia, D. L., Lampman, G. M., & Kriz, G. S. (2001). *Introduction to spectroscopy a guide for students of organic chemistry*. Thomson Learning.
- Peñaranda Rincón, L. A., Sepúlveda Ortiz, K. J., Álvarez Pacheco, Y. E., González-Delgado, A. D., & Kafarov, V. (2011). Evaluación de obtención de lípidos y monosacáridos de biomasa de microalgas bajo el concepto de biorefinería. *Rev. ion*, 24, 13-21.
- Plata, V., Kafarov, V., & Moreno, N. (2009). Desarrollo de una metodología de transesterificación de aceite en la cadena de producción de biodiesel a partir de microalgas. *Prospect*, Vol.7, 35-41.
- Ramírez, I. M. (2007). "Transesterificación del aceite de cártamo y jojoba para la producción de biodiesel". Sonora, México.
- Ramírez-Ortiz, J., Medina-Valtierra, J., & Martínez Rosales, J. M. (2011). Obtención de biodiesel con aceite de maíz usado en frituras y metacaolinita como catalizador. *Acta Universitaria, Dirección de Apoyo a la Investigación y al posgrado, Universidad de Guanajuato*, Vol.21, 19-26.
- Real Hardisson, F., & Soria Cabrera, S. (1992). La jojoba una solución para evitar la desertización. *Agricultura*, pp. 785-791.
- SAGARPA, SENER, SE, SEMARNAT, & SHCP. (2009). Estrategia Intersecretarial de los bioenergéticos. D.F., México.
- Salaet Fernández, S., & Roca Jusmet, J. (2010). Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de CO_2 : Algunos posibles escenarios futuros de emisiones. *Revista Galega de Economía*, Vol. 19(Núm. 1), pp. 1-19.
- Schuchardt, U., Sercheli, R., & Vargas, R. M. (1998). Transesterification of Vegetable Oils: a Review. *Soc. Bras. Química*, Vol. 9(Núm. 1), pp. 199-210.
- SEMARNAT. (2013). Inventario nacional de gases de efecto invernadero 1990-2010. D.F., México.

- SENER. (2007). *Potenciales y Viabilidad del uso de bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México*. SENER-BID-GTZ, México, D.F.
- Serrano Martínez, J. L. (2004). *Universidad Politécnica de Cartagena*. Recuperado el 2016, de <http://www.upct.es/>: http://www.upct.es/~minaees/espectroscopia_infrarroja.pdf
- Serrano, C. A. (1978). "El cultivo de jojoba en el estado de Sonora y la importancia de una asociación de productores como impulsora comercial de este nuevo recurso". Sonora.
- Shah, M., Tariq, M., Ali, S., Guo, Q.-X., & Fu, Y. (2014). Transesterification of jojoba oil, sunflower oil, neem oil, rocket seed oil and linseed oil by tin catalysts. *Biomass and bioenergy*, 70, 225-229.
- Tariq, M., Ali, S., Ahmad, F., Ahmad, M., Zafar, M., Khalid, N., & Khan, M. A. (2011). Identification, FT-IR, NMR (1H AND 13C) and GC/MS studies of fatty acid methyl esters in biodiesel from rocket seed oil. *Fuel Processing Technology*, 92, 336-341.
- Tobares, L., Frati, M., Guzmán, C., & Maestri, D. (2004). Agronomical and chemical traits as descriptors for discrimination and selection of jojoba (*Simmondsia chinensis*) clones. *Industrial crops and products*, 19, 107-111.
- Torossi Baudino, F. D. (2006). Reacciones en contexto: la transesterificación en la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura usado. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, pp. 43-49.
- Urribarrí, A., Zabala, A., Sánchez, J., Arenas, E., Chandler, C., Rincón, M., . . . Mazzarri, C. (2014). Evaluación del potencial de la borra de café como materia prima para la producción de biodiesel. *MULTICIENCIAS*, 14(2), 129-139.
- Vázquez-Yanes, C., Batis Muñoz, A. I., Alcocer Silva, M. I., Gual Díaz, M., & Sánchez Dirzo, C. (1999). *Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación*. UNAM, CONABIO-Instituto de Ecología.
- Zuleta, E., Bonet, J., Díaz, L., & Bastidas, M. (Diciembre de 2007). "Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite crudo de plama africana (*Elais guineensis*) con etanol". *Revista Energética*, 38, pp. 47-53.