



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – SISTEMAS ENERGÉTICOS

“PRODUCCIÓN Y USO SUSTENTABLE DE *Jatropha curcas* PARA PRODUCIR
BIODIESEL”

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. GUADALUPE PÉREZ MORALES

TUTOR PRINCIPAL:
DR. JORGE M. ISLAS SAMPERIO
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES, UNAM

MÉXICO, D. F. ENERO 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Javier Eduardo Aguillón Martínez

Secretario: Dr. Manzini Poli Fabio

Vocal: Dr. Jorge Marcial Islas Samperio

1^{er.} Suplente: Dr. Raúl Suarez Parra

2^{d o.} Suplente: M.C. Mirna Guevara García

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Energías Renovables

TUTOR DE TESIS:

Dr. Jorge M. Islas Samperio

NOMBRE

FIRMA

(Segunda hoja)

ÍNDICE

	Página
Introducción	9
Capítulo 1.	14
Establecimiento de la Plantación experimental de <i>Jatropha curcas</i> .	
1.1 Antecedentes generales del establecimiento de la plantación	14
1.1.1 Ubicación geográfica y entorno natural	14
1.1.2 Ubicación y clima del sitio experimental.	16
1.2 <i>Jatropha curca</i> , especie utilizada.	19
1.2.1 Usos de <i>Jatropha curcas</i>	22
1.3 Diseño y Trazo de la plantación.	25
1.4 Producción de plántulas, introducción al campo y mantenimiento	28
1.4.1 Colecta de germoplasma	28
1.4.2 Propagación de plántulas	28
1.4.3 Introducción a campo	30
1.4.4 Manejo de la plantación	33
Capítulo 2.	37
Método de medición y análisis de datos	
2.1 Medición de los parámetros biofísicos de <i>Jatropha curcas</i>	37
2.1.1 Monitoreo de parámetros biofísicos	38
2.2 Construcción de las bases de datos	40
2.3 Análisis de datos	41
2.4 Estimación de crecimiento de los ecotipos de <i>Jatropha curcas</i> .	42
2.4.1 Metodología estadística	42
2.4.1.1 Verificación de la normalidad de los datos	42

2.4.1.2 Revisión de los datos	44
2.4.1.3 Pruebas de discordancia	44
2.4.1.4 Eliminación de datos desviados	45
2.4.1.5 Pruebas estadísticas de comparación	47
2.5 Supervivencia de las plantas a las condiciones ambientales del sitio experimental	49
2.6 Producción de semillas	51
Capítulo 3.	53
Desarrollo Experimental. Producción de biodiesel y determinación de toxicidad de los ecotipos de <i>Jatropha curcas</i> .	
3.1 Extracción de aceite de las semillas	53
3.2 Obtención de biodiesel a través de reacciones de transesterificación	56
3.2.1 Desarrollo de las reacciones de transesterificación	59
3.2.2 Preparación del alcóxido	59
3.2.3 Mezclado del aceite con la solución de Metanol-NaOH	60
3.2.4. Separación del biodiesel y glicerina	62
3.3 Especificaciones y propiedades del biodiesel	63
3.3.1 Pruebas de calidad	64
3.3.2 Densidad del biodiesel	65
3.3.3 Punto de inflamación	65
3.3.4 Viscosidad cinemática	66
3.3.5 Índice de acidez	66

3.4 Análisis de toxicidad a los ecotipos.	68
3.4.1 Procedimiento del análisis de toxicidad.	68
Capítulo 4.	71
Resultados y discusión	
4.1 Crecimiento morfológico de los ecotipos de <i>Jatropha curcas</i>	71
4.1.1 Comparación de crecimiento entre ecotipos	76
4.2 Supervivencia de los ecotipos en la parcela experimental	78
4.2.1 Comparación de supervivencia entre ecotipos	79
4.2.2 Principales afectaciones a las plantas de <i>Jatropha curcas</i> en la parcela experimental	81
4.3 Producción de semillas	83
4.4 Rendimientos en extracción de aceite	85
4.5 Rendimientos de las reacciones de transesterificación	86
4.6 Pruebas de calidad	90
4.7 Toxicidad	92
Conclusiones	94
Anexos	97
Anexo A1	97
Anexo A2	98
Anexo B	99
Referencias bibliográficas	100
Índice de tablas.	
1.1 Numero de ecotipos, plantas por ecotipo y procedencia	25

2.1 Resultados de las pruebas de discordancia	45
2.2 Resultados de la prueba Anova del conjunto de datos del escenario producción de Temporal	47
2.3 Resultados de la prueba Tukey	48
2.4 Supervivencia de individuos de cada ecotipo	50
2.5 Principales afectaciones en la parcela experimental	50
3.1 Requerimientos de NORMA ASTM D6751-02	64
4.1 Crecimiento anual de Altura total en escenario de temporal	71
4.2 Crecimiento anual de Diámetro en la base	73
4.3 Crecimiento anual de Área foliar	74
4.4 Tasas de supervivencia de los ecotipos	80
4.5 Producción de semillas en la primera cosecha 2013	84
4.6 Rendimientos de extracción de aceite	85
4.7 Cantidades obtenidas de las reacciones de transesterificación	86
4.7 Cantidades obtenidas de las reacciones de transesterificación	87
4.9 Eficiencias de las reacciones de transesterificación por concentración de catalizador	88
4.10 Formación de glicerina en las reacciones de transesterificación	88
4.11 Conversión de aceite a biodiesel por concentración de catalizador	89
4.12 Resultados de las pruebas de calidad	90
4.13 Resultados de los análisis de toxicidad	93

Índice de figuras.

1.1 Ubicación del municipio de Miacatlán en el Estado de Morelos	14
1.2 Ubicación de “El Llano” en el municipio de Miacatlán, Morelos	16
1.3 Temperatura media mensual 2011-2014 del sitio experimental	17
1.4 Precipitación media mensual 2011-2014 del sitio experimental	17

1.5 Análisis de fertilidad inicial del suelo del sitio experimental	19
1.6 Vista aérea de la Parcela experimental	19
1.7 Fotografías de las plantas de <i>Jatropha curcas</i> (a), etapa de floración (b) y etapa de fructificación (c) de <i>Jatropha curcas</i> en la plantación experimental de Miacatlán, Morelos	22
1.8 Diferentes formas de utilización de <i>Jatropha curcas</i>	24
1.9 Distribución de las plantas de <i>Jatropha curcas</i> en la parcela Experimental	26
1.10 Configuración de la parcela experimental	27
1.11 Métodos de cultivo de <i>Jatropha curcas</i>	29
1.12 Fotografías de la fase de cultivo de <i>Jatropha curcas</i> : germinación de semillas (a) y (b) en laboratorio, plántulas en bolsas de polietileno en invernadero (b)	30
1.13 Métodos de propagación	31
1.14 Fotografías de la fase de introducción de <i>Jatropha curcas</i> a la parcela experimental, preparación del terreno (a) y establecimiento de la plantación (b)	32
1.15 Ciclo vegetativo de <i>Jatropha curcas</i> , brotación (a), desarrollo vegetativo (b) y dormancia (c)	36
2.1 Método de medición de los parámetros biofísicos de <i>Jatropha curcas</i>	39
2.2 Fotografías de la toma de mediciones de altura total (a), diámetro en la base (b) y cobertura vegetal (c) en la parcela experimental	40
2.3 Ejemplos de los histogramas de los parámetros biofísico de <i>Jatropha curcas</i> antes de eliminar los valores desviados	43
2.4 Ejemplos de los histogramas después de la eliminación de los valores desviados	46
2.5 Fotografías de las semillas de <i>Jatropha curcas</i> en la parcela experimental	52
3.1 Estructura orgánica del aceite de <i>Jatropha curcas</i>	53

3.2 Representación esquemática de la prensa hidráulica	54
3.3 Fotografías del proceso extracción de aceite en la fase del pesado de las muestras de semillas (a), el vaciado de las semillas en los anillos cilíndricos perforados (b) y la compresión de las semillas en la prensa hidráulica	55
3.4 Fotografías del proceso de extracción en la fase de recolección del aceite y filtrado de aceite (a) para remover las trazas residuales, pesado del aceite (b) y pesado de la pasta residual (c) por muestra	56
3.5 Reacción de transesterificación con aceite de <i>Jatropha curcas</i>	58
3.6 Reacción del hidróxido de sodio y metanol	59
3.7 Fotografías de la preparación del alcóxido. Hidróxido de Sodio y Metanol (a), agregando el Metanol al NaOH (b) y obtención del alcóxido (c)	60
3.8 Diagrama del sistema para llevar a cabo las reacciones de transesterificación	61
3.9 Fotografías del sistema en donde se llevaron a cabo las reacciones de transesterificación. Pesado del aceite (a), montaje del sistema (b), reacción de transesterificación (c)	62
3.10 Fotografías de las separación de los productos resultantes de la reacción de transesterificación, Centrifugación de los productos (a), separación del biodiesel de la glicerina(b),biodiesel y glicerina(c)	63
3.11 Fotografías de las pruebas de calidad del biodiesel, densidad del biodiesel (a), índice de inflamación (b), viscosidad cinemática (c)	68
3.12 Cromatogramas de esteres de <i>Jatropha</i> de ecotipos tóxicos (a) donde después de los 4 minutos de separación se pueden ver los esteres de forbol, y de ecotipos que no contienen esteres de forbol (b) por lo tanto libres de toxicidad	70
3.13 Fotografías de las pruebas de toxicidad, Separación de la mezcla aceite-hexano en SPE (a), disolución de los esteres de forbol en acetronitrilo (b), y Equipo HPLC	70
4.1 Historial de crecimiento del parámetro Altura total	72
4.2 Historial de crecimiento del parámetro Diámetro en la base	74

4.3 Historial de crecimiento del parámetro de Área foliar	75
4.4 Gráfica de comparación de crecimiento en Altura total	76
4.5 Gráfica de comparación de crecimiento en Diámetro en la base	77
4.6 Gráfica de comparación de crecimiento en Área foliar	78
4.7 Historial de Supervivencia de los ecotipos a las condiciones del sitio experimental	79
4.8 Comparación de supervivencia entre ecotipos	81
4.9 Principales afectaciones en los individuos de <i>Jatropha curcas</i>	82
4.10 Historial de afectaciones de los individuos de <i>Jatropha curcas</i>	83
4.11 Producción total de semillas por ecotipos en la parcela experimental	84
4.12 Conversiones de aceite a biodiesel por concentración de catalizador	89
4.13 Densidad del biodiesel	90
4.14 Punto de inflamación	91
4.15 Viscosidad cinemática	92

Introducción.

La crisis del petróleo en 1970 originó interés en los biocombustibles como una alternativa para la sustitución de combustibles convencionales, principalmente para uso en el sector transporte.

En los siguientes años Durante la estabilización y caída de los precios de los combustibles convencionales y por el periodo de tiempo en que se obtuvo el pico del petróleo barato, la producción de biocombustibles en casi todos los países fue desincentivada (Liu D, 2005; Karekezi S, et al., 2004).

Sin embargo, la volatilidad en el precio del petróleo sigue experimentando oscilaciones amplias, a partir de 2005 el precio del petróleo mantuvo una tendencia de aumento hasta llegar a su precio más alto en 2008. En los siguientes 2 años el precio comenzaba a descender, a partir del 2011 y hasta a mediados del 2014 mantuvo un alto precio nuevamente, pero en los últimos meses el petróleo ha tenido un descenso en su precio.

El interés en el uso de los biocombustibles ha resurgido en los últimos años como una alternativa para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y las afectaciones ambientales por las emisiones de CO₂ provenientes de la combustión de hidrocarburos, y por las políticas públicas encaminadas a garantizar el consumo de energía.

Los biocombustibles son una fuente derivada de materia orgánica, los cuales pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos.

Los biocombustibles líquidos se emplean en varios países principalmente en el sector transporte, para la sustitución o en uso en mezclas con gasolinas o diesel, dependiendo del biocombustible (IICA-ARPEL, 2009). De esta forma, se utilizan energías renovables sustitutas de los recursos fósiles para mitigar las emisiones de efecto invernadero GEI, durante el proceso de producción y utilización de los combustibles fósiles.

El biodiesel es un combustible líquido que se obtiene a partir de lípidos naturales, mediante procesos de transformación química. Las principales materias primas son los aceites vegetales y grasas de animales (Gerpen, 2002).

Una materia prima que actualmente causa interés para la obtención de aceite vegetal es la *Jatropha curcas*. Este arbusto produce semillas que tienen un alto contenido de aceite no comestible, el cual se puede aprovechar para la obtención de biodiesel (Achten, et al. 2008; Jongschapp, et al. 2007).

La *Jatropha curcas* es una euforbiácea originaria de México y Centroamérica (Heller, 1996), llega a medir de 5-7 m de altura y tiene una esperanza de vida de 50 años.

Esta planta oleaginosa perenne muestra resistencia a la sequía y a las plagas, y se observa que tiene capacidad de crecer en tierras marginales y sobrevivir usando mínimos recursos (Jongschaap, et al. 2007).

Sin embargo, la *Jatropha curcas* es una planta aún no domesticada por lo cual no se puede asegurar su crecimiento y su rendimiento como un cultivo energético bajo condiciones agroclimáticas variadas y en producción comercial. Por lo cual hay incertidumbre sobre la productividad de semillas y de aceite (Findlater, et al. 2011; Achten, et al. 2008).

Existen algunas investigaciones sobre el crecimiento de *Jatropha curcas*, que solo analizan su crecimiento en periodos cortos de tiempo (Behera, et al. 2010; Srivastava, et al. 2011), o bien sobre la productividad de semillas y extracciones de aceite, que presentan una variabilidad de resultados marcada tanto en plantaciones experimentales como en plantaciones comerciales (Achten, et al., 2010; Kaewcharoensombat, et al. 2011; Pandey, et al. 2011), lo mismo sucede sobre la conversión química con reacciones de transesterificación (Prueksakorn, et al. 2006; Kaewcharoensombat, et al. 2011). La gran variabilidad de los resultados, algunos un tanto contradictorios no permiten, en consecuencia, una conclusión clara sobre la sustentabilidad del uso y la producción de esta opción energética (Achten, 2010).

En México se han establecido monocultivos a gran escala de *Jatropha curcas*, pero la falta de investigación científica, información y asesoría técnica especializada sobre el manejo de este tipo de cultivos energéticos, ha tenido como consecuencia que el desarrollo de las plantaciones ha sido inferior a lo esperado (Valero, P.J. et al. 2011).

Para concluir si las plantaciones de *Jatropha curcas* son una opción sustentable para la producción de biodiesel, se requiere, por un lado, de más investigación experimental y, por otro lado, de la evaluación completa del proceso de producción de biocombustibles que considere desde los aspectos de la fase del cultivo a los procesos de obtención del biodiesel. De esta forma, obtener información sobre las características y riegos del cultivo y manejo de las plantaciones *Jatropha curcas* y su proceso de transformación química a biodiesel, es indispensable para su aprovechamiento sustentable.

El objetivo de la presente tesis es generar información experimental y científica primaria de 14 ecotipos de *Jatropha curcas* que nos permita identificar los mejores ecotipos, en un escenario de cultivo con recursos mínimos, en términos de la producción de biomasa y de las características de productividad y de las propiedades físico-químicas para aprovecharlas en la producción de biodiesel.

Para cumplir con este objetivo la investigación que reporta esta tesis de Maestría se propuso llevar a cabo los siguientes objetivos específicos:

1. Estimar el crecimiento y supervivencia de 14 ecotipos de *Jatropha curcas* ubicados en la parcela experimental de Miacatlán, Morelos, en un periodo de tiempo de cuatro años desde su establecimiento.
2. Obtener la producción de semillas y rendimiento de aceite de cada ecotipo.
3. Determinar la toxicidad de los ecotipos.

4. Determinar la productividad de biodiesel obtenido a través de reacciones de transesterificación con el aceite proveniente de las semillas de *Jatropha curcas* de cada ecotipo.

5. Comprobar que el biodiesel obtenido cumpla con las normas de calidad ASTM 6751-02 para biodiesel

De forma particular, la tesis se enfoca a responder las siguientes preguntas de investigación ¿Cuáles ecotipos son aptos para ser establecidos en las condiciones ambientales y de cultivo del sitio experimental? ¿Cuál es la productividad de semillas de los ecotipos a los 4 años de su plantación? ¿Qué cantidad de aceite por cantidad de semilla se puede obtener de cada ecotipo? ¿Qué ecotipos son tóxicos? ¿Qué rendimientos de conversión de aceite a biodiesel tienen los ecotipos? ¿Cuál es la calidad del biodiesel de cada ecotipo?

La tesis desarrolla el proyecto de investigación a lo largo de 4 capítulos.

En el capítulo 1 presenta los antecedentes generales del establecimiento de la parcela experimental en Miacatlán, Morelos, la descripción general de la *Jatropha curcas* la planta bajo estudio, así como el manejo del cultivo.

El capítulo 2 presenta la metodología empleada en el monitoreo sistemático sobre cuatro parámetros biofísicos de *Jatropha curcas* para evaluar el crecimiento los ecotipos, y la metodología estadística aplicada para el análisis de la información recabada.

La información incluye las mediciones de crecimiento de los individuos de *Jatropha curcas* que involucra los parámetros de altura total, diámetro de la base del tallo y área foliar, y las tasas de supervivencia monitoreados desde el establecimiento de la plantación en el año 2009 hasta 2013, el año más reciente en que se realizaron mediciones. Además, abarca la información sobre la productividad de semillas de los 14 ecotipos de *Jatropha Curcas* en el cuarto año del establecimiento de la plantación experimental.

El capítulo 3 explica la metodología del desarrollo experimental para la obtención del biodiesel, la realización de cuatro pruebas de calidad del biodiesel y la determinación de la toxicidad de los ecotipos.

El desarrollo experimental incluye la extracción de aceite de las semillas de *Jatropha Curcas*.

La obtención del biodiesel es mediante reacciones de transesterificación con catalizadores básicos.

Las pruebas de calidad fueron realizadas bajo las normas ASTM, las cuales son: Densidad del biodiesel, punto de inflamación, Índice de acidez, viscosidad cinemática.

El capítulo 4 presenta los resultados sobre la evaluación de crecimiento y las tasas de supervivencia de los ecotipos, así como la productividad de semillas en el cuarto año de la plantación y la determinación de la toxicidad de los ecotipos.

Este capítulo también presenta los resultados de los rendimientos de extracción de aceite, los rendimientos en la conversión de aceite a biodiesel y los resultados de las pruebas de calidad del biodiesel obtenido.

Finalmente, se presenta las conclusiones de este trabajo de investigación.

Capítulo 1. Establecimiento de la Plantación experimental de *Jatropha curcas*.

El capítulo presenta los antecedentes generales del establecimiento de la parcela experimental de *Jatropha curcas*, los antecedentes geográficos y ambientales del lugar donde se sitúa; así como la descripción de los métodos y tratamientos utilizados para la plantación y el mantenimiento de la misma.

1.1 Antecedentes generales del establecimiento de la plantación

La parcela experimental se estableció en un sitio denominado “El Llano”, en el municipio de Miacatlán, Estado de Morelos, en la región centro-sur de México..

El terreno para la parcela experimental se obtuvo mediante un acuerdo entre la Secretaría de Desarrollo Agropecuario del Estado de Morelos (SEDAGRO) y el Instituto de Energías Renovables de la UNAM.

El proyecto que comenzó a desarrollarse desde el año 2009 y ha sido completamente financiado por el Programa de Apoyo a Proyectos para la Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT-UNAM) a través de proyectos PAPIIT - IT101214, PAPIIT - IT110911.

1.1.1 Ubicación geográfica y entorno natural

El municipio de Miacatlán se ubica geográficamente entre los paralelos 18°45' latitud norte y los 99°21' longitud oeste del meridiano de Greenwich a una altura de 1,054 msnm (metros sobre el nivel del mar).

Limita al norte con el Estado de México y el municipio de Temixco, al sur con los municipios de Puente de Ixtla, Mazatepec y Tetecala, al este con Xochitepec y al oeste con Coatlán del Río y el Estado de México.



Fig. 1.1 Ubicación del municipio de Miacatlán en el Estado de Morelos.

El municipio se caracteriza por ser montañoso en la parte norte con alturas de los 2,000 y 2,250 m. de altura. Las zonas accidentadas cubren el 10% y el 40% de lomerío en la parte norte, al centro y sur se encuentran campos semi-planos que cubren el 50% del territorio municipal.

El clima es de tipo sub-tropical húmedo caluroso, con temperatura media anual de 22°C, en la parte baja y en la región de la montaña el clima es templado.

Su precipitación media es de 1,112 mm al año. El periodo de lluvias comienza en junio y termina en octubre. La evaporación media es de 2,203 mm por año, la dirección de los vientos en lo general es de norte a sur y en sus campos hay poca humedad.

El ecosistema constituido principalmente por selva baja caducifolia de clima cálido, su vegetación consiste en plantas de casahuate, cuahulote, canelillo, cuajote, parotas, huizache, guamúchil, acacias, guajes rojo y verde, copal, cuachalalate, pochotes, mezquites, tepehuajes, camarón y una gran variedad de árboles frutales de clima semi-tropical y plantas de ornato.

Las Características y Uso de Suelo se divide en unidades ecológicas del municipio y son las siguientes:

Primera unidad. Se localiza en la parte norte del municipio, con una fisiografía de sierra, la geología es de roca ígnea extrusiva básica el tipo de suelo es feozem y la vegetación es de selva baja caducifolia.

Segunda unidad. Se localiza en la parte norte y este del municipio, con una fisiografía de sierra y geología de roca caliza, el tipo de suelo es rendzina y la vegetación es de selva baja caducifolia.

Tercera unidad. Se localiza en la parte norte y centro del municipio, con una fisiografía de planicie, la geología es de roca arenisca-conglomerado el tipo de suelo es feozem y la vegetación es de pastizales.

Cuarta unidad. Se localiza en la parte oeste y centro con una fisiografía de planicie, la geología es de roca arenisca-conglomerado y el tipo de suelo es feozem y la vegetación es de bosque mesófilo.

Quinta unidad. Se localiza en la parte oeste del municipio, con una fisiografía de planicie, la geología es de roca caliza, el tipo de suelo es vertisol y es de uso agrícola.

Sexta unidad. Se localiza en la parte centro del municipio con una fisiografía de planicie, la geografía es de roca arenisca conglomerada, el tipo de suelo es feozem y es de uso agrícola.

Séptima unidad. Se localiza en la parte centro sur y este del municipio, con una fisiografía de planicie, la geología es de roca arenisca conglomerado, el tipo de suelo es castañozem y la vegetación es de páramo.

Octava unidad. Se localiza en la parte oeste del municipio con una fisiografía de planicie, la geología es de roca arenisca conglomerado el tipo de suelo es cambisol de uso agrícola.

El 50% del territorio municipal es agrícola y se utiliza para la siembra de cultivos de riego y temporal, el 15% está ocupado con viviendas, el 5% para espacios públicos y el 30% para la ganadería y el cerril.

Del total del territorio 7,900 hectáreas son de uso agrícola, 3,892 de uso pecuario, 7,400 de usos forestal y 1.5 para uso industrial.

1.1.2 Ubicación y clima del sitio experimental.

Fisiográficamente, el sitio donde se estableció la plantación denominado el “El Llano”, se encuentra en la Provincia Sierra Madre del Sur y Subprovincia Sierras y Valles Guerrerenses. Sus coordenadas exactas de localización son $18^{\circ} 47' 41.3''$ N y $99^{\circ} 21' 06.0''$ W, a una a una altitud de 1000 msnm.

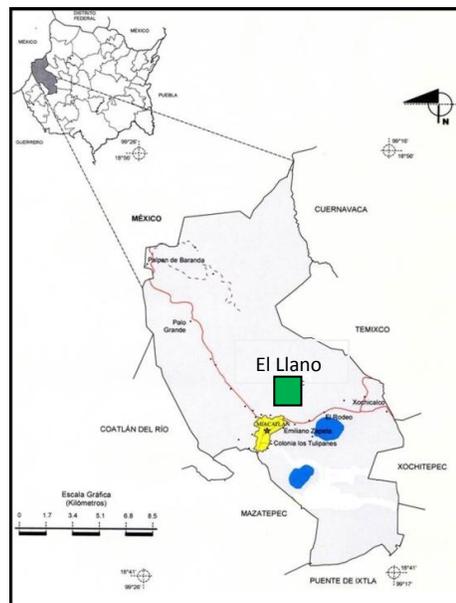


Fig. 1.2 Ubicación de “El Llano” en el municipio de Miacatlán, Morelos.

El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano. El intervalo de precipitación total media anual va de 800 a 1200 mm. Las estaciones de régimen de humedad están bien definidas siendo los meses de mayo a octubre la época de lluvias. La oscilación de la temperatura media es de 20°C a 26°C.

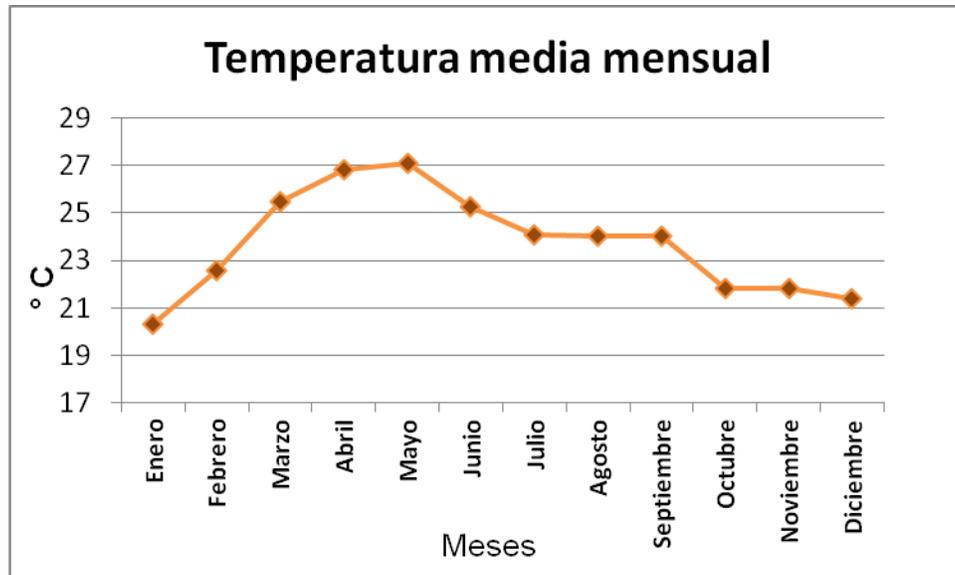


Fig. 1.3 Temperatura media mensual del sitio experimental

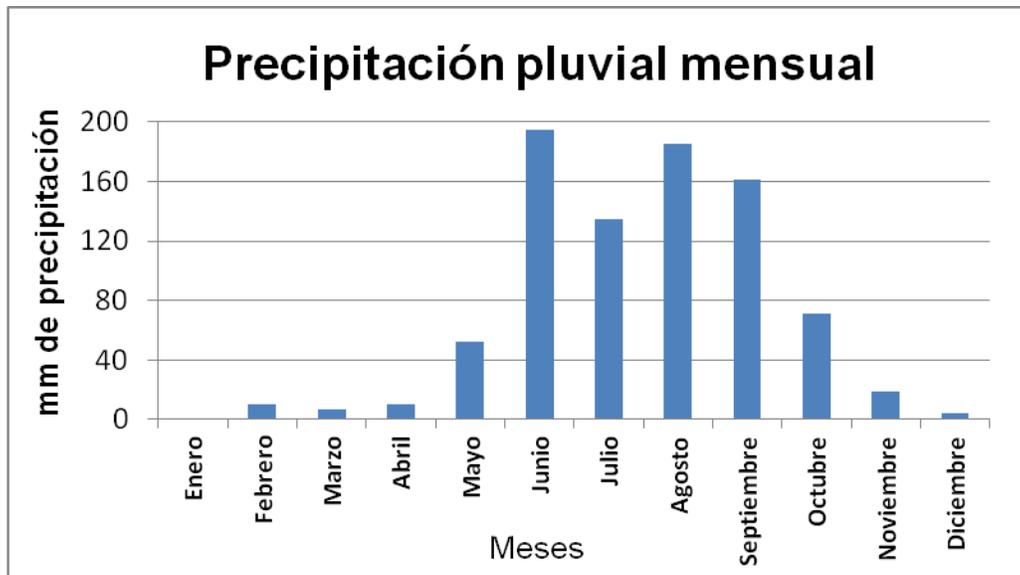


Fig. 1.4 Precipitación media mensual del sitio experimental

Fuente: Datos propios a partir de la Estación Meteorologica Davis, instalada en junio de 2011 en el sitio experimental.

La temperatura y la precipitación han sido monitoreada en los últimos 3 años con una estación meteorológica marca Davis Instruments, la cual coincide con las normales climatológicas de la estación meteorológica instalada en el Municipio de Miacatlán, del Sistema Meteorológico Nacional.

La topografía del sitio experimental es un pequeño valle intermontano, formado a partir de roca sedimentaria y suelo aluvial.

La textura del suelo se refiere a la proporción de arena, limo y arcilla expresada en porcentaje, las proporciones encontradas en el predio son las siguientes:

- Arcilla 52%,
- arena 25%,
- limo 23;

Debido a que el tipo de suelo es vertisol, con contenido de arcilla superior al 50%, se producen grandes grietas durante la época seca.

El pH es una propiedad que tiene una influencia indirecta en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, procesos químicos y biológicos y actividad microbiana, por lo que influye en la mayor o menor asimilabilidad de los diferentes nutrientes.

Los suelos de pH fuertemente ácidos, contienen una gran cantidad de aluminio y la actividad microbiana disminuye.

Los suelos alcalinos originan una escasa disponibilidad de elementos menores, excepto molibdeno y muestran una marcada deficiencia de nutrientes.

A la mayoría de especies cultivadas, le favorece un pH entre valores de 5.5 a 7.5.

El pH encontrado en el terreno del sitio experimental es moderadamente alcalino con valor de 7.4.

El diagnóstico de la fertilidad del suelo realizado previamente al establecimiento de la plantación que se muestra en la figura 1.5. indica que se trata de un suelo con muy bajo contenido de nutrientes.

Los elementos nutritivos constituyentes como son Nitrógeno (N), Fósforo (P), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), y cobre (Cu) se encuentran en muy bajos niveles en partes por millón (ppm) y moderadamente bajos ppm en Potasio (K) y Boro (B); solo los nutrientes Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) en niveles muy altos ppm.

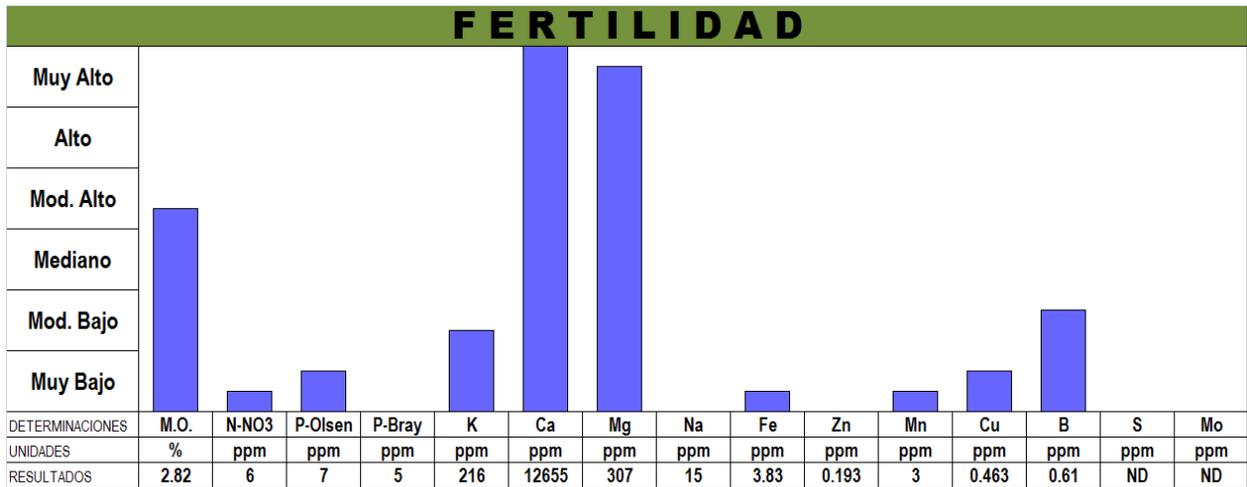


Fig. 1.5 Análisis de fertilidad inicial del suelo del sitio experimental

Previo al establecimiento de la plantación, el sitio había sido usado para cultivo de maíz de riego y temporal, también existía vegetación secundaria, principalmente acacias todas especies arbustivas, con dominancia del huizache, además de otras herbáceas anuales.



Fig. 1.6 Vista aérea de la Parcela experimental.

1.2 *Jatropha curca*, especie utilizada.

La *Jatropha Curcas* es una planta oleaginosa perenne que pertenece a la familia de la euforbiácea originaria de México y Centroamérica.

Su distribución corresponde principalmente a la regiones tropicales de América, África y Asia e incluye aproximadamente 186 especies (Govaerts et al. 2012) de las cuales solo seis especies se encuentran en África y Asia y el resto se

localizan en las regiones tropicales, subtropicales y semiáridas de América (Dehgan y Webster 1979).

En México se encuentran 48 especies de las cuales 39 son endémicas (Steinmann 2002) es decir el 21% del total de esta especie, y se distribuyen en zonas semiáridas (matorrales xerófilos), zonas tropicales y subtropicales (tropical y subtropical latifoliado y bosques secos y húmedos) del país.

DESCRIPCIÓN BOTÁNICA

Reino	Plantae
Subreino	Viridaeplantae
Infrakingdom	Streptophyta
División	Tracheophyta
Subdivisión	Spermatophytina
Infradivision	Angiospermae
Clase	Magnoliopsida
Superorden	Rosanae
Orden	Malpighiales
Familia	Euphorbiaceae
Género	Jatropha
Especies	Jatropha cu

El crecimiento de este arbusto es articulado y morfológicamente discontinuo en cada incremento, llega a medir de 3 a 5 metros de altura y hasta 8-10 metros si las condiciones son favorables; desarrolla 5 raíces: una central y 4 periféricas (Kumar et al., 2008), el tallo es un tronco recto con ramillas gruesas de madera blanda que contienen latex, las hojas son lisas y lobuladas con longitud y anchura de 10 a 15 cm. (Achten et al., 2008) las hojas se desprenden en la estación seca.

Es una planta monoica es decir las flores son unisexuales en la misma planta y en algunas ocasiones hermafroditas (Dehgan y Webster , 1979) . La floración ocurre durante la temporada de lluvias por lo general con dos picos de floración: en verano y en otoño; en las regiones permanentemente húmedas la floración se presenta todo el año (Divakara et al., 2010).

Las flores se forman en la terminal de las ramas de manera individual y pueden ser femeninas (por lo general ligeramente más grandes), masculinas y/o hermafroditas.

Las flores son actinomorfas y dispuestas en racimos, 5 sépalos, de 5-7 mm de largo, corola de color amarillo verdoso campanulada, los pétalos de 0.5–1 cm de largo; 10 estambres unidos en la base con algunos abortivos, los filamentos delgados, las anteras ditécicas, con dehiscencia longitudinal, cinco nectarios

presentes a un costado de la inserción de los estambres, ovario supero, trilobular con una placentación axilar, el estilo concrecente y el estigma dividido en seis partes (Heller, 1996).

En las flores femeninas los sépalos son de hasta 18 mm de largo, cáliz persistente, 4 corolas apenas superior a los lóbulos del cáliz unido dentro de las vellosidades ; ovario 3 - locular , elipsoide de 1.5-2 mm de diámetro, estilo bífido y óvulos solitarios en cada célula; las flores abren de 2 a 4 días. Los sépalos y los pétalos se agrandan gradualmente después de la fertilización de los óvulos y protegen de las condiciones ambientales al embrión.

En las flores masculinas el cáliz es de 5 segmentos elípticos u obviar ; corola es acampanada , 5 lóbulos, cada lóbulo dentro de una glándula en la base , 10 estambres en dos series ,cinco filamentos libres en el exterior y, cinco filamentos connados en el interior. Las flores abren por un período de 8 a 10 días.

La relación de macho a hembra flores oscila entre 13:01 a 29:1 y disminuye con la edad de la planta (Achten et al., 2008).

La polinización se lleva a cabo por insectos, especialmente las abejas de miel. Las flores hermafroditas se pueden auto polinizar (Kumar et al., 2008).

Después de cada polinización, las inflorescencia produce frutos elipsoidales de 4 a 5 cm de largo y 3 a 4 cm de ancho, en estado inmaduro presenta un color verde, y en estado maduro se torna de un color amarillo (Miller, 1962). Las semillas maduran en 3-4 meses después de la floración, son de color negro y dependiendo del genotipo algunas contienen toxinas, tales como esterres de forbol, curcina, inhibidores de tripsina, lectinas y fitatos (Achten et al., 2008).

Las accesiones de *Jatropha* que se producen de forma natural en África y Asia son de la variedad tóxica, es decir, que contienen compuestos llamados esterres de forbol, debido a la presencia de estos compuestos los granos de la semilla de la variedad tóxicos no son comestibles para animales y seres humanos.

Se ha identificado que en las variedades de *Jatropha curcas* que se encuentran en México, las semillas tienen la misma o similar composición química que las variedades tóxicas excepto por el hecho de que carece de los ésteres de forbol (Martínez-Herrera et al., 2006) dicha determinación de la ausencia de ésteres de forbol en plantas de *Jatropha* indica que es una variedad comestible.

Por lo que el interés en este tipo de plantaciones radica en el aprovechamiento que se puede obtener de la planta y de la semilla, por ejemplo la producción de biodiesel a partir del aceite de las semillas de *Jatropha* y subproductos de dicho proceso (glicerina y pasta residual de las semillas), la biomasa como bioenergético sólido, como secuestrador de dióxido de carbono de los gases de efecto invernadero, etc.



Fig. 1.7 Fotografías de las plantas de *Jatropha curcas* (a), etapa de floración (b) y etapa de fructificación (c) de *Jatropha curcas* en la plantación experimental de Miacatlán, Morelos.

1.2.1 Usos de *Jatropha curcas*

Existen diferentes formas tradicionales de aprovechamiento de la *Jatropha Curcas*, es utilizada como cercos vivos para delimitar terrenos o como cercos de protección de campos de cultivo, por ser un arbusto que con amplia cobertura y no puede ser comida por animales. También es utilizada como soporte para otras plantas.

Sus frutos son utilizados como fertilizante; tanto sus semillas, hojas y corteza tienen usos medicinales para enfermedades de la piel, dolores de reumatismo y como antiséptico. El aceite de las semillas tiene usos como insecticida y fungicida para el control de plagas y para la producción de jabón (Heller, 1996).

Recientemente su cultivo se ha enfocado en la producción de semillas para la obtención de aceite, el cual es usado como materia prima para la producción de biodiesel.

Con respecto al aprovechamiento de los subproductos, la pasta residual de *Jatropha curcas* (sin aceite), podría representar una estrategia sustentable en la agricultura al utilizar fertilizantes orgánicos (Das et al., 2011).

También se considera que las semillas contenidas en el fruto de la *Jatropha curcas* no tóxica (por ejemplo en algunas variedades –ecotipos- en México) tienen alto contenido proteínico (Francis et al., 2013), un alto contenido energético (como alimento) y bajas cantidades de fibra, por lo que se sugiere su propagación para consumo humano.

La cascara contiene un valor nutricional comparable a la paja de cereales. La pasta del prensado (de *Jatropha* no tóxica) también puede utilizarse como alimento para el ganado (Makkar et al., 1997).

Las cascara de *Jatropha* presentan un alto contenido de cenizas bajo diferentes condiciones, lo cual, propicia que la cascara de *Jatropha* sea buena candidata para utilizarse como producto directo para combustión (Vyas et al., 2007) o transformarse en pellets que pueden utilizarse para generar energía en el sector doméstico o industrial (Singh et al., 2008).

Otros productos que se podrían obtener de los frutos de *Jatropha curcas* es la producción de biogás (Raheman et al., 2012), e insumos químicos para el sector industrial principalmente (Sathishkumar et al., 2012).

Por otra parte, la biomasa de las plantas de *Jatropha curcas* es vista como almacenes activos de carbón terrestre y como control de tierras erosionadas (Achten et al., 2010).

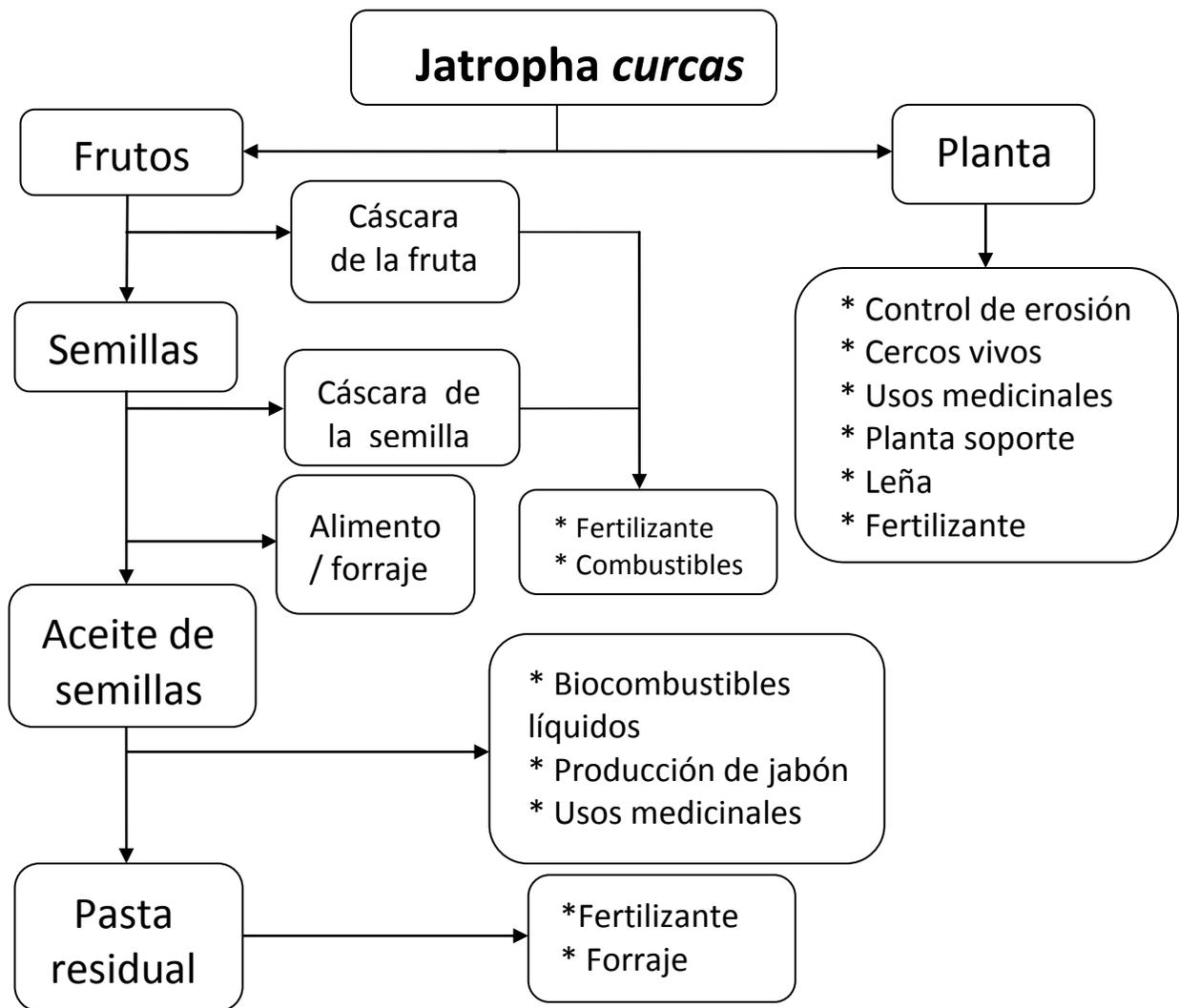


Fig. 1.8 Diferentes formas de utilización de *Jatropha curcas*

1.3 Diseño y Trazo de la plantación.

La parcela experimental consiste en una plantación de 15 ecotipos de *Jatropha curcas*, provenientes de diferentes estados del país y uno de ellos de Brasil. En la tabla 1 se muestra el lugar de procedencia de cada ecotipo y el número de individuos plantados por ecotipo.

Tabla 1.1 Número de ecotipos, plantas por ecotipo y procedencia.

	Ecotipos	Procedencia	No. de individuos
1	Veracruz	Veracruz	78
2	Veracruz-Estaca	Veracruz	74
3	Veracruz 103	Veracruz	68
4	JMI	Morelos	69
5	AMI	Morelos	64
6	CM	Morelos	62
7	TMI	Morelos	62
8	Marcelino	Morelos	57
9	ZOI	Oaxaca	53
10	Puebla	Puebla	50
11	Brasil	Brasil	46
12	Bra-Oax	Oaxaca	43
13	C170	Michoacán	39
14	C62	Michoacán	39
15	VF	Chiapas	35

El terreno tiene una forma irregular que se asemeja a un triángulo rectángulo que tiene 50 metros en la base y 206 en la altura, cubre un área aproximada de 1.3 ha. y tiene una pendiente menor a 5% con orientación Norte-Sur.

El diseño de la plantación fue del tipo tres bolillo, de esta manera se pudo hacer un uso más eficiente del espacio.

En total se establecieron 15 sub parcelas separadas por ecotipos, la separación entre sub parcelas es de 4 metros.

Cada parcela contiene 6 filas en líneas continuas, pero el número de plantas varía. La distancia entre líneas es de 2 m y la distancia entre plantas es de 2.8 m, con lo cual se tiene una densidad de 1250 árboles ha^{-1} .

En la figura 1.9 y 1.10 se ilustran la configuración de la parcela experimental.

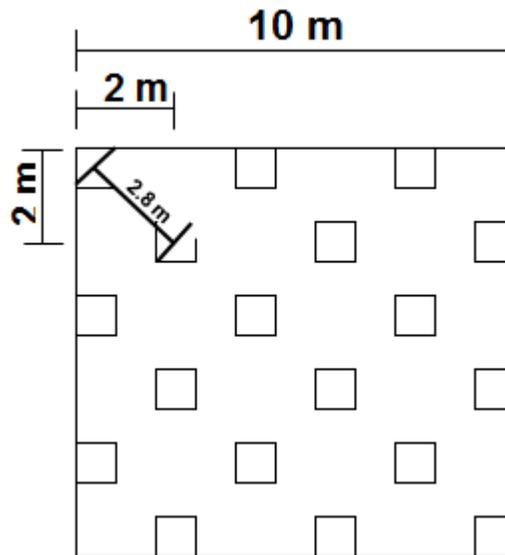


Fig. 1.9 Distribución de las plantas de *Jatropha curcas* en la parcela experimental

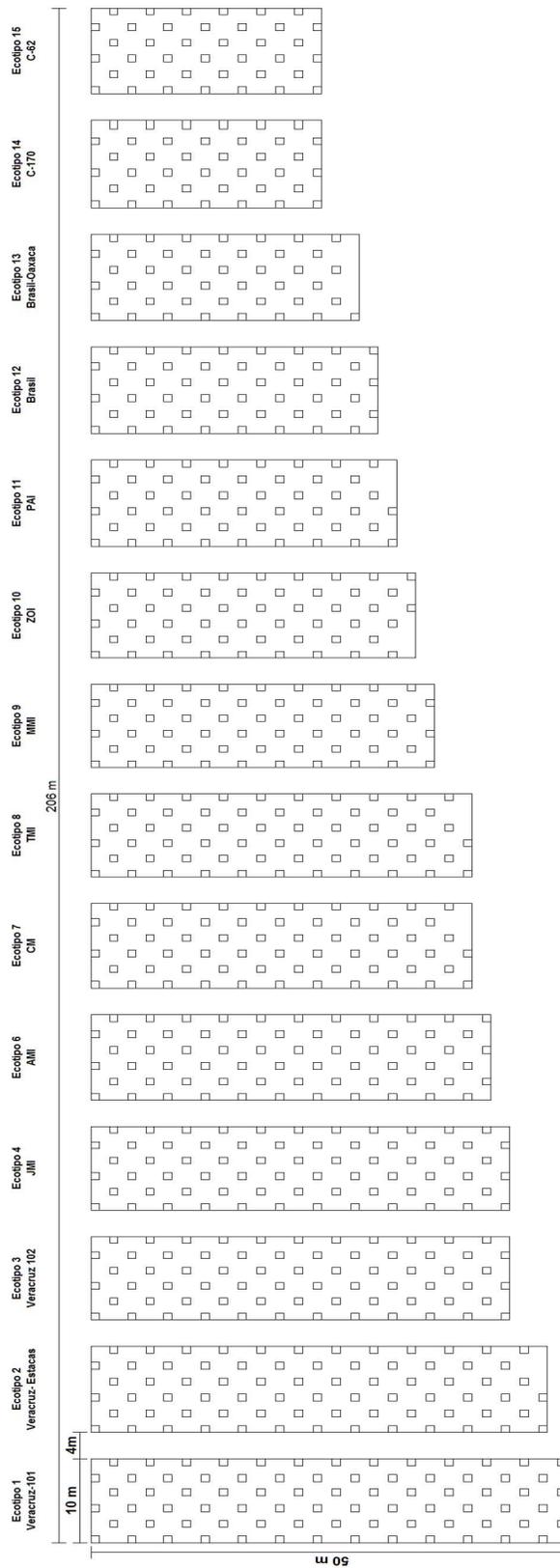


Fig.1.10 Configuración de la parcela experimental.

1.4 Producción de plántulas, introducción al campo y mantenimiento

1.4.1 Colecta de germoplasma

Existe una alta diversidad genética en *Jatropha curcas*, por lo cual es importante contar con una colección representativa, de esta manera se podrían diseñar programas de domesticación y mejoramiento.

Dehgan y Webster postularon que *Jatropha curcas* es el género más primitivo de *Jatropha*. Los cromosomas de *Jatropha Curcas* son aproximadamente 1-2 μm tienen $2n= 22$ cromosomas que corresponde al nivel diploide $x=11$.

La fuente de germoplasma se obtuvo una parte por el Centro de Desarrollo de Productos Bióticos del IPN (CEPROBI-IPN) quien en colaboración, proporcionó semillas de diferentes procedencias de la república mexicana. Otra parte del germoplasma se obtuvo mediante colectas en los sitios de distribución natural de *Jatropha curcas*, huertos de traspatio y en lugares donde esta planta se utiliza como cerco vivo.

Esta colecta permitió formar un banco de germoplasma con más de 40 ecotipos, provenientes de 10 estados de la República Mexicana. De los cuales, solamente 15 ecotipos se establecieron en la parcela experimental.

1.4.2 Propagación de plántulas

Los distintos métodos de cultivo de *Jatropha Curcas* varían según la región y las condiciones climáticas. El cultivo puede ser por siembra directa, pre-cultivo de plántulas (germinación en viveros), trasplante de plantas silvestres y plantación directa de esquejes. En la fig. 1.11 se muestra las diferentes formas de cultivo de la *Jatropha*.

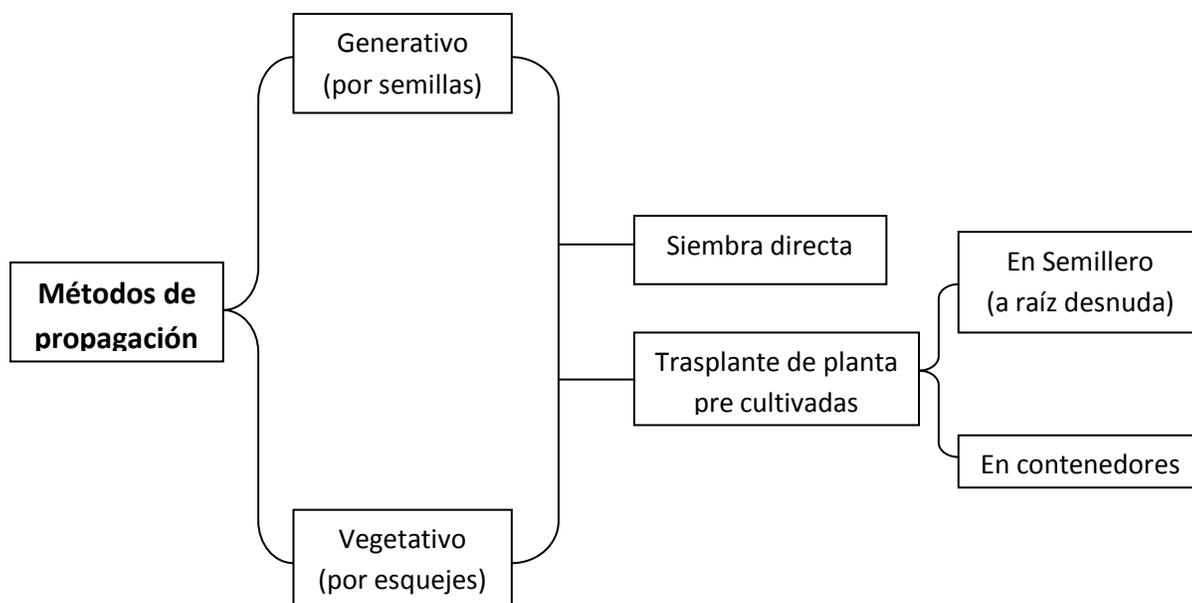


Fig. 1.11 Métodos de cultivo de *Jatropha curcas*

En general la especie es de fácil propagación, tanto por semilla como por esquejes (vegetativa), esta última es utilizada sobre todo cuando se busca mantener el potencial genético de una variedad en particular.

En estos métodos de cultivo se logran altas tasas de germinación de las semillas, altas tasas de germinación de corte y supervivencia.

El método de propagación utilizado es generativo y por trasplante de plantas precultivadas.

La germinación de las semillas se llevó a cabo bajo condiciones controladas en el laboratorio el Centro de Ciencias Genómicas de la UNAM (CCG-UNAM). Las tasas de germinación fueron superiores al 90%.

Una vez que las semillas germinaron, se trasplantaron en bolsas de polietileno y se colocaron en un invernadero, en donde estas plántulas permanecieron de tres a cuatro meses.

Posteriormente, las plantas se trasladaron al terreno, solo se plantaron las plántulas que mostraban aspecto vigoroso, sin daños físicos y libres de plaga y/o enfermedades. Esta selección se realizó en base en su altura y diámetro del tallo, el promedio de altura fue de 40 cm.



a) Germinación de semillas



b) Plántulas en laboratorio



a) Plántulas en invernadero

Fig. 1.12 Fotografías de la fase de cultivo de *Jatropha curcas*: germinación de semillas en laboratorio (a) y (b), plántulas en bolsas de polietileno en invernadero (c).

1.4.3 Introducción a campo

En el establecimiento de un cultivo es de suma importancia tomar en consideración el método de cultivo, ya que de éste dependerá la supervivencia, longevidad y resistencias a enfermedades. La época del año en que se realiza la siembra y la profundidad de la cepa de siembra tienen un papel decisivo en la supervivencia y características de la planta en el campo.

En la Fig. 1.12 se muestran los factores que influyen en el establecimiento del cultivo de las plantas propagadas por diferentes métodos.

Otro importante aspecto es establecer la densidad del cultivo, debido a las coberturas que genera este tipo de plantas como lo es *Jatropha Curcas*; las densidades más favorables son de 2500, 1600 y 1111 plantas por hectárea con los cual la amplitud de siembra es de 2 x 2, 2.5 x 2.5 y 3 x 3 metros respectivamente.

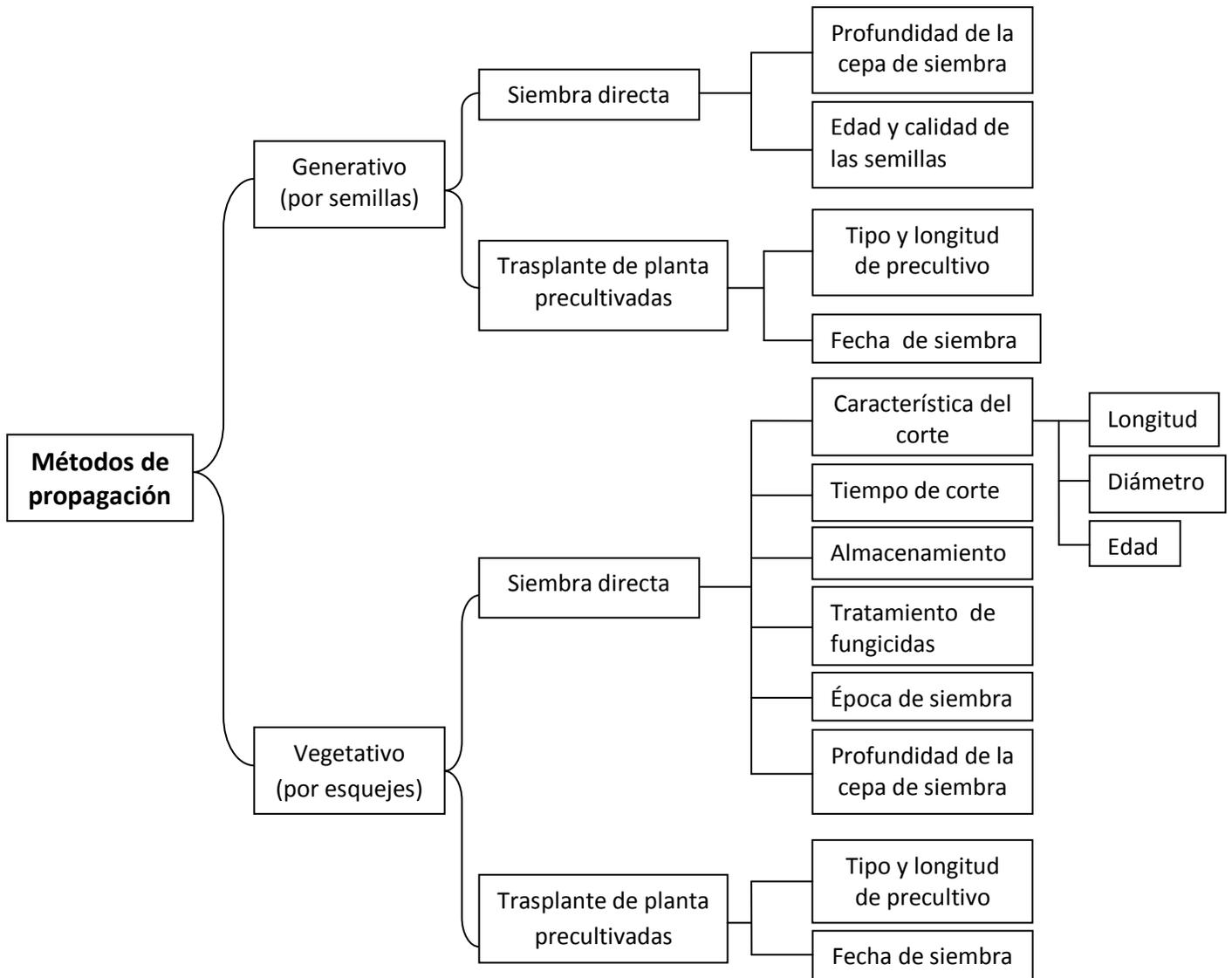


Fig. 1.13 Métodos de propagación.

La introducción de las plantas en el sitio experimental se realizó durante los meses de marzo a julio de 2009, conforme se fueron produciendo en vivero los las plántulas de los diferentes ecotipos.

El primer paso de la introducción a campo fue la limpieza del terreno, que consistió en quitar restos de vegetación muerta, tanto residuos de maíz como de arbustos secos.

Después, se llevó a cabo un barbecho con tractor esto con la finalidad de modificar la estructura, favorecer la aireación del suelo, así como su capacidad de retención de humedad y al mismo tiempo también sirvió como control de malezas.

Para el trasplante de las plántulas de las bolsas de polietilenos al terreno, se usó la cepa común de 40x40x40 cm, las cuales se elaboraron manualmente con herramientas tales como pala recta, barreta, pico y pala.

Al introducir las plántulas, se podaron las raíces de estas para evitar la formación de raíz en espiral y se agregó una mezcla de composta de 2 kg en cada cepa. Se colocó una plántula por sepa.

La plantación quedó compuesta por el establecimiento de 15 ecotipos, pero únicamente se le ha dado seguimiento a 14 de ellos, debido al bajo número de plantas del ecotipo número 15, ya que no se obtuvo una muestra representativa para su análisis.



a) Preparación del terreno

b) Establecimiento de la plantación

1.14 Fotografías de la fase de introducción de *Jatropha curcas* a la parcela experimental, preparación del terreno (a) y establecimiento de la plantación (b).

1.4.4 Manejo de la plantación

Como cualquier otra planta, *Jatropha Curcas* requiere de CO_2 del aire y H_2O del suelo para que mediante el proceso de fotosíntesis convertir la radiación solar en carbohidratos funcionales CH_2O .

En el crecimiento inicial de *Jatropha Curcas* después de la fase de establecimiento de la plantación no hay competencia entre las plantas por radiación, agua y nutrientes.

En la fase de crecimiento y desarrollo como cualquier cultivo perene, *Jatropha Curcas* destina solo una pequeña fracción de los carbohidratos en el almacenamiento de madera para mantenerse en pie, así en las temporadas en las que requiere de nutrientes solo necesitara los nutrientes necesarios para la formación de ramas, hojas, flores, frutas y semillas.

Dependiendo de las condiciones del cultivo, así como de la distribución geográfica, *Jatropha Curcas* puede alcanzar la madurez y su plena productividad de 3 a 4 años después de la plantación.

El manejo de la plantación es donde existe mayor incertidumbre, dado que aún no existe un modelo agronómico de manejo que pueda implementarse para esta especie semi-domesticada, por lo que el manejo de la plantación debe estar orientado al uso natural de los recursos de radiación solar, agua, fertilidad del suelo y prevención de plagas y enfermedades.

Algunas prácticas que se emplean en el manejo de la plantación son:

Manejo de arvenses.

Se realiza con la finalidad de evitar competencia por nutrientes, agua y luz y consiste en la eliminación malezas y otras hierbas que crecen alrededor.

Al inicio de la plantación, se realizaban actividades de chaponeo de manera manual con machete. Después del primer año se comenzó a utilizar una

desbrozadora de motor de gasolina; esta actividad se llevó a cabo sólo durante los meses de lluvia de junio a octubre, en intervalos de tres semanas. Las principales arvenses son gramíneas y enredaderas.

Podas.

La poda de formación tiene como objetivo inducir el crecimiento de más ramas y por consiguiente mayor floración y mayores rendimientos de semilla. El periodo ideal es la época seca o en invierno una vez que las plantas han perdido las hojas aproximadamente a partir del mes de noviembre hasta febrero.

En la plantación, únicamente se ha realizado poda de saneamiento, que consistió en cortar aquellas ramas afectadas por alguna plaga o enfermedad o bien que hayan sido rotas por causa de animales o el viento.

Fertilización.

Los principales nutrientes necesarios para el material estructural de las raíces, tallos, ramas, hojas, flores, frutas y semillas, están compuestos por Nitrógeno N, Fosforo P y potasio K.

La única aplicación de fertilizante se llevo a cabo durante la fase del trasplante de plántulas de las bolsas de polietileno al terreno, en la cual se agrego una mezcla de composta a cada cepa.

Riego.

El uso de agua es importante para el desarrollo de las plantas, con el agua se crea una solución en el suelo en que se encuentra disueltos los nutrientes y mediante la absorción efectuada por sus raíces, las plantas logran acceder a estos.

Aunque se considera que *Jatropha curcas* es tolerante a la sequia, se desconoce sobre la intensidad del uso de riego para este tipo de plantas y su relación con la producción del cultivo.

La aplicación del riego en la parcela experimental se realizó después de la fase del trasplante de plántulas. Se utilizaron riegos de auxilio en intervalos de 15 días durante tres meses, debido a que el establecimiento se realizó durante la época seca. La aplicación del riego fue tipo rodado, con una lámina aproximada de 20 mm por evento.

Posteriormente, el riego de la plantación se realizó únicamente con el agua de las épocas de lluvias, es decir, se utilizó riego de temporal.

Durante el año 2013 se inició la evaluación del uso de riego en la parcela experimental. Sin embargo, en esta tesis solo se evalúa el escenario de producción temporal.

Control de Plagas y enfermedades.

El ciclo de vida de la planta cultivada, dicta la naturaleza del hábitat, su estructura y textura, longevidad y composición y complejidad de su fauna y flora. Tanto en agrosistemas anuales como perennes, la fenología del cultivo puede causar asincronía entre la disponibilidad de un recurso y el estado del enemigo natural (depredador o parásito) que requiere dicho recurso.

Todos los agroecosistemas son dinámicos y sometidos a diferentes niveles de manejo, de tal manera que los arreglos de cultivos, en tiempo y espacio, están continuamente cambiando de acuerdo con los factores biológicos, culturales, socioeconómicos y medioambientales. Tales variaciones del paisaje determinan el grado de heterogeneidad espacial y temporal característica de las regiones agrícolas, las cuales pueden o no favorecer la protección de las plagas y/o enfermedades en un agroecosistema particular.

El efecto específico resultante o la estrategia a utilizar dependerá de las especies de fitófagos y enemigos naturales asociados, así como de las propiedades de la vegetación, la condición fisiológica del cultivo o la naturaleza de los efectos directos de las especies particulares de planta (Letouran, 1987). El éxito de las medidas puede estar influido por la escala sobre la cual se llevan a cabo, por

ejemplo, parcela, cultivo o región) puesto que el tamaño del campo, la composición de la vegetación dentro del cultivo y el nivel de aislamiento (distancia a la fuente de colonizadores) afectarán a los índices de inmigración, de migración y el tiempo eficaz de permanencia de un determinado enemigo natural en el cultivo. Cualquier estrategia que sea utilizada para la mejora de la diversidad deberá estar basada en un profundo conocimiento de los requerimientos ecológicos de los enemigos naturales.

En la plantación se ha tenido la presencia del barrenador del tallo, el cual ha afectado a individuos de diferentes ecotipos en diferentes proporciones.

Los daños van de afectaciones solo en las ramas hasta afectaciones en la planta completa. Sin embargo no se ha utilizado ningún tipo de insecticidas o fungicidas para el control de plagas y enfermedades.

Las condiciones de cultivo *Jatropha curcas* en la parcela experimental de *Jatropha curcas* es un escenario de mínimos recursos.



a) Brotación

b) Desarrollo vegetativo

c) Dormancia

Fig. 1.15 Ciclo vegetativo de *Jatropha curcas*, brotación (a), desarrollo vegetativo (b) y dormancia (c).

Capítulo 2. Método de medición y análisis de datos.

En este capítulo se presenta el proceso de la recolección y recopilación de la información obtenida de la plantación experimental, tal como la medición de parámetros biofísicos de los individuos de los que consta la parcela. Así como la construcción y organización de una base de datos donde se capturó dicha información.

También presenta el método de análisis de la información empleado para la obtención de variables de evaluación comparativa entre ecotipos. Las variables de evaluación son: crecimiento relativo, supervivencia a las condiciones ambientales del sitio y productividad de semillas de cada ecotipo.

2.1 Medición de los parámetros biofísicos de *Jatropha curcas*

En el establecimiento de plantaciones forestales incluyendo las plantaciones energéticas, la medición de las plantas es fundamental porque con las mediciones de las plantas se puede analizar y comprender cómo las plantas crecen y se desarrollan, así también, se puede determinar la cantidad esperada de los productos de interés y establecer un manejo adecuado de las plantaciones.

Sin embargo muchos parámetros que se necesitan conocer son difíciles de medir o no se pueden medir directamente como por ejemplo el volumen de biomasa que puede haber en un árbol o en una hectárea, en estos casos se utilizan aproximaciones o estimaciones que parten de mediciones que se pueden realizar relativamente fácil y que después se someten a procedimientos matemáticos más o menos complicados.

La recolección de los datos de las mediciones se realizaron directamente en la plantación experimental; la recopilación y organización del conjunto de datos ha sido lo suficientemente robusta para procesar la información y ha permitido comparar estadísticamente variables e indicadores entre ecotipos. La comparación se ha realizado en cuanto a tasas de crecimiento relativo, supervivencia en las condiciones ambientales del sitio experimental y el rendimiento de la producción de semillas de cada ecotipo.

El monitoreo permanente de variables de crecimiento y desarrollo de los 839 individuos plantados, dio inicio una vez establecida la plantación experimental, lo cual se llevo a cabo a finales del mes de marzo del año 2009.

En el mes de mayo del mismo año, 2 meses después de la introducción de las plantas al sitio experimental, se realizaron inspecciones de control para supervisar el estado físico de las plantas y se tomaron las primeras mediciones.

Los meses monitoreados durante el año 2009 fueron mayo, junio, julio, septiembre y noviembre, debido a que el crecimiento de las plantas es mayor durante los primeros meses posteriores a la plantación.

En los años consecutivos del 2009 hasta la fecha se han realizado las mediciones en el mes de Julio, ya que es el momento del año en que el estado vegetativo la planta cuenta con más del 75% de hojas y con floración completa, con lo cual es el mes donde se tiene mayor información sobre el crecimiento de las plantas.

2.1.1 Monitoreo de parámetros biofísicos

Los parámetros biofísicos seleccionados para monitorear fueron:

Altura total: es la distancia vertical desde el nivel del suelo al punto verde más alto del arbusto, incluso si la planta llegará a inclinarse o si las ramas se arquearan. Los arcos o inclinaciones de las ramas son muy comunes en los arbustos perennes como es el caso la *Jatropha curcas*, donde los tallos crecen con discontinuidad morfológica en cada incremento.

La altura total es una medida utilizada para evaluar la rapidez con que los árboles van a crecer en un sitio, es importante porque con este parámetro, se puede calcular la cantidad total de madera contenida en la planta y es la medida más utilizada para evaluar la capacidad productiva de un sitio.

La medición de la altura se realizó con un flexómetro, se tomó directamente la medida vertical en centímetros del nivel de la base del tallo de la planta al ápice.

Diámetro del tallo en la base: El diámetro es la distancia de una recta que pasa por el centro y une dos puntos opuestos de una circunferencia o una superficie cerrada. Aunque los tallos de los árboles nunca son exactamente circulares, debido a que todos los tallos tienen formas irregulares y muestran alguna excentricidad en su forma, de modo que son más anchos en una dirección que en otra, el diámetro del tallo es generalmente una sesgada diferencia del verdadero tamaño del tallo. Sin embargo este sesgo es considerado ser lo suficientemente pequeño que se puede ignorar, así, los tallos de los árboles son tratados como verdaderamente circulares en la sección transversal.

La medición del diámetro es la medida tomada en la base del tallo en milímetros, la cual se realizó con un vernier digital, instrumento que se utiliza para medir los diámetros en la sección transversal particularmente en la medición de árboles de diámetros pequeños.

Diámetros mayor y menor de la cobertura. La Biomasa de las hojas de los árbol tienden a aumentar con la edad hasta alcanza un valor más o menos constante, los árboles seguirán aumentando de tamaño con el tiempo, mientras que la biomasa de la hojas se mantendrán más o menos estables.

La estimación de biomasa en ramas y follaje, debido a la forma física de la *Jatropha curcas*, se obtuvo mediante el cálculo del área foliar.

El cálculo del área foliar se considero como si se tratara de una elipse, las medidas tomadas corresponden a la longitud perpendicular mayor (Diámetro Mayor) y menor (Diámetro Menor) de la cobertura de la planta. Las medidas son reportadas en centímetros.

En la figura 2.1 se indica gráficamente el método de medición realizado.

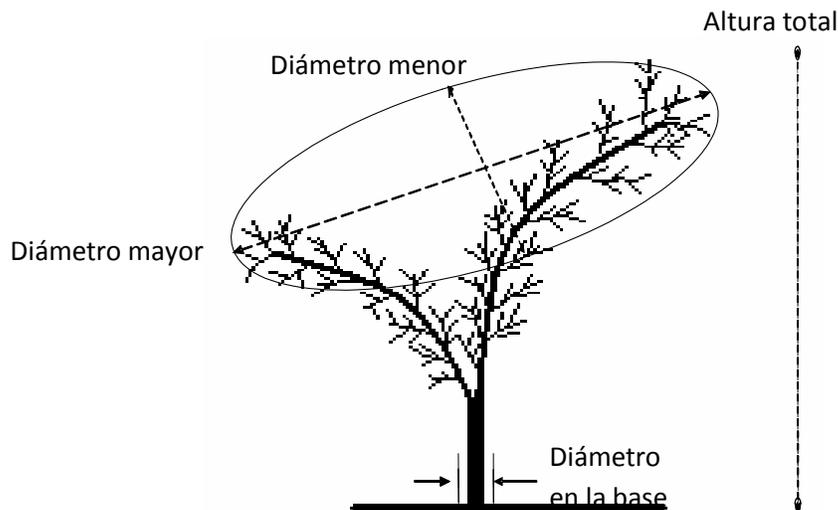


Fig. 2.1 Método de medición de los parámetros biofísicos de *Jatropha curcas*.

Las mediciones de los parámetros biofísico que se tomaron en el sitio experimental se registraron en formatos diseñados para tal actividad, en donde además de las medidas también se registraron las observaciones relevantes sobre cada uno de los individuos por ejemplo la presencia de plagas, enfermedades, sequía, etc.



a) Altura total b) Diámetro en la base c) cobertura vegetal

Fig. 2.2 Fotografías de la toma de mediciones de altura total (a), diámetro en la base (b) y cobertura vegetal (c) en la parcela experimental.

2.2 Construcción de las bases de datos

El conjunto de datos obtenidos de la recolección de las mediciones en la parcela experimental, permitió construir una base de datos [Islas et al., 2013] en un archivo Excel en donde se almacenó la información sistemáticamente.

La estructura de la información en la base de datos consistió en la agrupación de los individuos (plantas sembradas) por ecotipos, con una numeración consecutiva asignado a cada individuo según el orden del layout de la parcela experimental.

La captura de la información de las dimensiones de cada uno de los individuos y sus observaciones relevantes se almacenó por fecha de medición en hojas de cálculo diferentes.

La base de datos consta de 9 hojas de cálculo: May-09, Jun-09, Jul09, Sep-09, Nov-09, Jul-10, Jul-11, Jul-12 y Jul-13 que hacen referencia al mes y año en el que se realizaron las mediciones.

Cada Hoja de cálculo está compuesta por columnas que contienen la información de los diferentes ecotipos, número de individuos en la parcela, y las dimensiones de sus parámetros biofísicos: altura total, diámetro en la base, diámetro mayor y cobertura menor; y por 840 filas que corresponde al número total de individuos plantados y el encabezado de cada columna.

Para poder utilizar la información de la base de datos de los parámetros biofísicos de los 15 ecotipos de *Jatropha Curcas*, se construyó una segunda base de datos, en la cual se reorganizaron los conjuntos de datos.

En la segunda Base de datos se situaron todos los datos del mismo ecotipo en una sola hoja de cálculo, cada hoja de cálculo contiene tablas que corresponden a los datos de altura total, diámetro en la base y área de cobertura esta última estimada con las medidas de la cobertura menor y mayor. Adicionalmente, se integro una tabla en la que se describe de las observaciones que se presentaron año con año en cada individuo.

Cada tabla está compuesta por columnas que indica el número de individuo en la parcela y las fechas de las mediciones: Julio-2009, Julio-2011, Julio-2012, Julio-2013.

De esta forma, la base de datos permite utilizar la información del conjunto de datos históricos de manera individual (por planta) o por ecotipo.

2.3 Análisis de datos.

Para comprender el comportamiento del crecimiento y desarrollo a través del tiempo de cada ecotipo en estudio e incluso de cada individuo, se realizó el análisis de datos utilizando una metodología estadística, la cual permitió llevar a cabo la estimación de crecimiento de los ecotipos y compararlos entre ellos.

La comparación entre ecotipos se desarrolló mediante el análisis de 3 variables que describen las características de cada ecotipo, tales variables son: crecimiento relativo, supervivencia de las plantas a las condiciones ambientales del sitio experimental y producción de semillas.

El análisis de datos se realizó con las mediciones de solo 14 ecotipos, aunque el establecimiento de la parcela experimental consistió de 15 ecotipos, pero debido a que la mayoría los individuos del ecotipo 15 mostraron mortandad, no se obtuvo el número de datos significativos para su respectivo análisis.

La estimación del crecimiento por ecotipos se obtuvo aplicando una metodología estadística que involucra los parámetros biofísicos relacionados con medidas de crecimiento: altura total, diámetro en la base, área foliar.

El análisis de supervivencia se baso en la información obtenida en la inspección y medición periódica de los individuos de cada ecotipo, en los cuales se registro el conteo de plantas vivas y plantas muertas.

La productividad de semillas se evaluó con la producción de semillas de cada ecotipo obtenida en el año 2013, con dicho dato se estimó el volumen de producción por hectárea de cada ecotipo. Este dato solo es indicativo debido a que es la única evaluación que se ha realizado.

El análisis de datos se realizó en el escenario de producción temporal.

El escenario de temporal corresponde a las mediciones realizadas en los individuos que contaron con el recurso de agua solamente en la temporada de lluvias.

2.4 Estimación de crecimiento de los ecotipos de *Jatropha curcas*.

En el crecimiento de las plantas en un determinado sitio es importante considerar la altura dominante de las especies en cuestión ya que esta refleja la capacidad productiva del sitio, es decir, si los árboles han utilizado plenamente los recursos necesarios disponibles para su crecimiento en particular el clima y la fertilidad del suelo.

Los árboles que están creciendo dentro de un área determinada compiten entre sí por los recursos del sitio (agua, luz y nutriente del suelo), por tal motivo el tamaño de los árboles varía entre ellos. La altura es la característica de los árboles competitivamente más exitosos que mejor refleja la capacidad reproductiva del sitio.

2.4.1 Metodología estadística.

La metodología utilizada para comparar el crecimiento entre ecotipos por escenarios de producción, consistió en verificar la normalidad de los datos y sucesivamente la aplicación de pruebas estadísticas de comparación a los datos obtenidos de las mediciones de los parámetros biofísicos de *Jatropha curcas*.

Las pruebas estadísticas utilizadas fueron, análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey de alta diferencia significancia (Tukey HSD, por sus siglas en inglés), para los ecotipos de un mismo escenario de producción.

2.4.1.1 Verificación de la normalidad de los datos

Previo a la aplicación de las pruebas estadísticas de comparación, se examinó el comportamiento de la distribución del conjunto de datos de cada ecotipo.

La verificación de la normalidad de los datos se realizó a través de la construcción de histogramas en el software XLSTAT, por cada parámetro biofísico por cada fecha de medición, y por escenario de producción. En la figura 2.3 se muestra algunos ejemplos de los histogramas de la distribución de los datos que se realizaron.

Los histogramas mostraron una distribución que difería a una distribución normal, ya que presentaban valores desviados o aberrantes (outliers).

Estos valores outliers son un subconjunto de datos de naturaleza extrema, por lo que sus características son sumamente diferentes al resto del conjunto de valores, lo cual dificulta la determinación de la inferencia entre el conjunto de datos.

Los valores extremos ejercen un efecto extremo en los parámetros de dispersión, de tal forma que los parámetros de localización (tendencia central) y de escala (dispersión) no se pueden estimar correctamente si los outliers se tomaran en cuenta, por lo cual fue necesario detectar y posteriormente eliminar dichos valores desviados.

La detección los valores desviados fue realizada de en dos etapas.

La primera etapa de detección outliers fue a través de una revisión rigurosa de cada uno de las mediciones tomadas en campo comparados contra las mediciones de la base de datos.

La segunda etapa consistió en la aplicación de pruebas estadísticas apropiadas para detección y eliminación de los valores desviados.

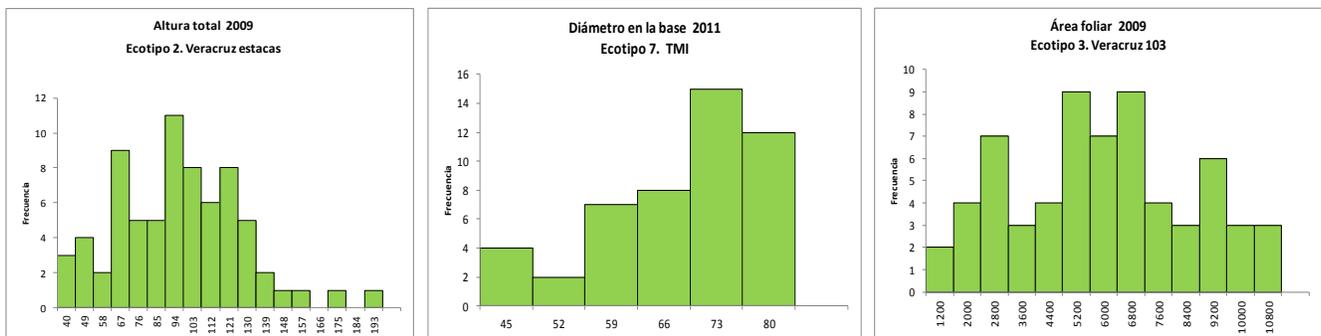


Fig. 2.3 Histogramas ejemplos de las distribuciones los parámetros biofísico de *Jatropha curcas* antes de eliminar los valores desviados.

2.4.1.2 Revisión de los datos

La revisión de los datos consistió en examinar rigurosamente los registros tomados en campo y compararlos contra los datos capturados en la base de datos.

Con esta revisión también se logró corroborar el historial de cada uno de los individuos de la parcela experimental.

Los errores de captura encontrados se corrigieron, y los datos que a primera vista parecían inconsistentes, se investigó sobre las razones de sus inconsistencias.

Los primeros outliers detectados correspondieron a mediciones que pertenecían a individuos que se secaron por alguna condición, tenían afectaciones de plagas, fueron cortadas o se plantaron en un tiempo desfasado a los demás individuos. Estas mediciones y las mediciones posteriores de esos mismos individuos se excluyeron del conjunto de datos en cada uno de los parámetros biofísicos, a partir del año en que fueron afectadas.

2.4.1.3 Pruebas de discordancia

Posterior a la revisión de datos, se realizaron las pruebas de discordancia para detectar y eliminar los valores desviados del conjunto de datos conservados de la primera etapa.

Este procedimiento consistió en la aplicación de cinco pruebas estadísticas:

- Estadístico de la desviación o la dispersión
- Estadístico de la suma de cuadrados
- Estadístico del intervalo total o de dispersión
- Estadístico de exceso o de dispersión
- Estadístico de momento de alto orden

Todas estas pruebas aplicadas simultáneamente al conjunto de datos se realizaron en el Software UDASY (univariante Data Analysis System) [Verma et al., 2012] a un nivel de confianza del 95%.

La tabla 2.1 es un ejemplo de los resultados de las pruebas de discordancia realizadas al conjunto de datos.

Tabla 2.1 Resultados de las pruebas de discordancia.

Ecotipo 4. JMI

Escenario Temporal

Parámetro	Número de datos de entrada	Media de datos de entrada	Desviación estandar de datos de entrada	Número de outliers encontrados	Número de datos de salida	% de outliers	Media de datos de salida	Desviación estandar de datos de salida	Limites al 95.0% de confianza	Número de Tests aplicados a los datos	Tests en los que se detectaron outliers
Altura 2009	69	81,22	22,42	0	69	0	81,22	22,42	74,07 - 88,37	13	
Altura 2011	64	137,45	29,95	0	64	0	137,45	29,95	127,51 - 147,40	13	
Altura 2012	60	147,75	26,82	0	60	0	147,75	26,82	138,53 - 156,97	13	
Altura 2013	29	167,62	24,86	1	28	3,44	170,14	21,20	159,04 - 181,24	13	N1L, N4L1, N8, N9L, N10L.
Diametro 2009	69	29,72	6,89	0	69	0	29,72	6,89	27,52 - 31,92	13	
Diametro 2011	64	67,29	11,83	0	64	0	67,29	11,83	63,37 - 71,22	13	
Diametro 2013	29	93,92	14,69	0	29	0	93,92	14,69	86,39 - 101,46	13	N1U, N2, N4U1, N14, N15.
Cobertura 2009	69	4144,23	2180,85	0	69	0	4144,23	2180,85	3448,44 - 4840,02	13	
Cobertura 2011	64	14452,57	9873,25	7	57	10,93	11899,42	6834,34	9485,57 - 14313,26	13	N1U, N4U1, N14.
Cobertura 2012	60	15182,23	10710,20	8	52	13,33	11827,60	6585,66	9383,93 - 14271,26	13	N14.
Cobertura 2013	29	16587,85	9777,64	1	28	3,44	15699,24	8683,06	11152,78 - 20245,70	13	N14.

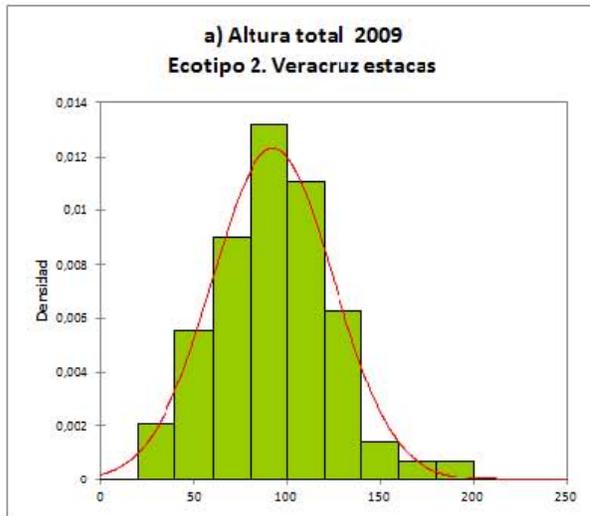
2.4.1.4 Eliminación de datos desviados

Los datos que en una o más pruebas de discordancia resultaron ser un valor desviado se eliminaron de la base de datos.

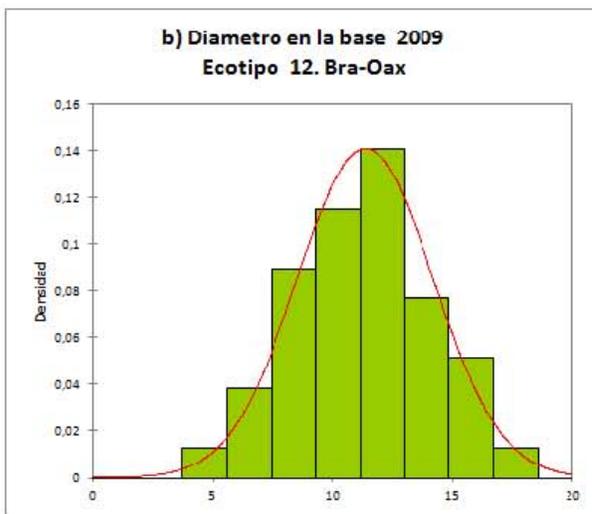
Los datos resultantes después de la eliminación de los valores desviados, se tomaron como un conjunto de datos normales y se construyeron nuevamente histogramas para verificar la normalidad de los datos.

En La fig. 2.4 se muestran los ejemplos de los histogramas del conjunto de datos después de la eliminación de los valores desviados.

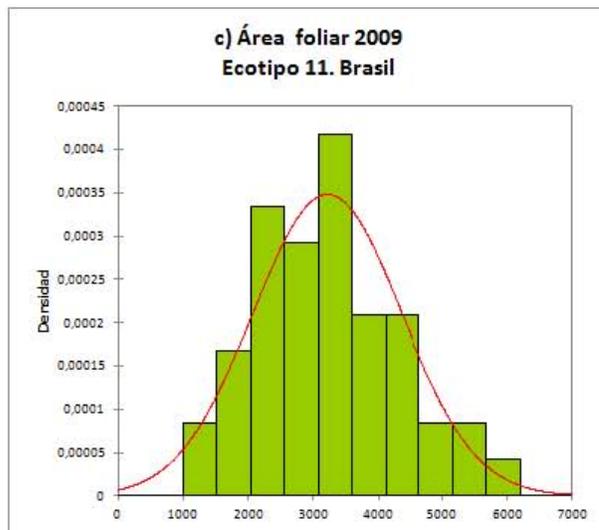
Los histogramas mostraron una tendencia semejante a una distribución normal, con lo cual se procedió a realizar las pruebas de comparación estadística.



Media	92,3
Mediana	92,0
Coefficiente de asimetría	0,3
sesgada positivamente	



Media	11
Mediana	12
Coefficiente de asimetría	0



Media	3219,4
Mediana	3306,9
Coefficiente de asimetría	0,4
sesgada positivamente	

Fig. 2.4 Ejemplos de los histogramas después de la eliminación de los valores desviados

2.4.1.5 Pruebas estadísticas de comparación.

Las comparaciones entre ecotipos se desarrollaron con los conjuntos de datos realizados en el mes de julio de cada año de monitoreo: 2009, 2011, 2012, 2013.

Pruebas estadísticas de comparación entre ecotipos. Con el conjunto de datos normalizados se realizó una prueba paramétrica estándar que evalúa diferencias entre muestras.

Esta prueba de análisis de varianza (ANOVA) se basa en encontrar si existe estadísticamente más variación entre las muestras que la variación dentro de ellas.

La prueba ANOVA se realizó con el Software UDASYS a un nivel de significancia del 95% y de dos colas.

En la tabla 2.2 se puede observar los resultados de la prueba Anova aplicada al conjunto de datos del escenario de producción temporal, dicha tabla indica entre cuales ecotipos existen diferencias en su crecimiento y cuales tuvieron crecimientos semejantes.

Tabla 2.2 Resultados de la prueba Anova del conjunto de datos del escenario producción de Temporal

Altura total					Diámetro en la base					Área foliar				
Fechas	F Calculada	F Crítica	Sin diferencias	Con diferencias	Fechas	F Calculada	F Crítica	Sin diferencias	Con diferencias	Fechas	F Calculada	F Crítica	Sin diferencias	Con diferencias
jul-09	2.23	2.83	4 JMI	1 veracruz	jul-09	1.89	2.43	2 Ver estacas	1 veracruz	jul-09	0.94	2.61	6 CM	1 veracruz
			7 TMI	2 Ver estacas				4 JMI	3 Ver 103				7 TMI	2 Ver estacas
			8 Marcelino	3 Ver 103				5 AMI	10 Puebla				8 Marcelino	3 Ver 103
			11 Brasil	5 AMI				6 CM	11 Brasil				9 ZOI	4 JMI
			14 C62	6 CM				7 TMI	12 Bra-Oax				11 Brasil	5 AMI
			9 ZOI					8 Marcelino	13 C170				14 C62	10 Puebla
			10 Puebla					9 ZOI	14 C62					12 Bra-Oax
12 Bra-Oax					13 C170									
jul-11	2.18	2.31	4 JMI	1 veracruz	jul-11	0.71	2.31	1 veracruz	2 Ver estacas	jul-11	1.85	2.22	2 Ver estacas	1 veracruz
			5 AMI	3 Ver 103				4 JMI	3 Ver 103				3 Ver 103	5 AMI
			6 CM	10 Puebla				5 AMI	10 Puebla				4 JMI	10 Puebla
			7 TMI	11 Brasil				6 CM	11 Brasil				6 CM	11 Brasil
			8 Marcelino	13 C170				7 TMI	12 Bra-Oax				7 TMI	13 C170
			9 ZOI	14 C62				8 Marcelino	13 C170				8 Marcelino	
			12 Bra-Oax					9 ZOI					9 ZOI	
		14 C62		14 C62										
jul-12	2.03	2.14	2 Ver estacas	1 veracruz	jul-12	1.96	2.32	1 veracruz	3 Ver 103	jul-12	2.13	2.14	1 veracruz	5 AMI
			3 Ver 103	10 Puebla				2 Ver estacas	10 Puebla				2 Ver estacas	10 Puebla
			4 JMI	11 Brasil				6 CM	11 Brasil				3 Ver 103	11 Brasil
			5 AMI	13 C170				7 TMI	13 C170				4 JMI	13 C170
			6 CM					8 Marcelino					6 CM	
			7 TMI					9 ZOI					7 TMI	
			8 Marcelino					12 Bra-Oax					8 Marcelino	
9 ZOI		14 C62		9 ZOI										
jul-13	1.81	2.17	1 veracruz	8 Marcelino	jul-13	2.30	2.36	1 veracruz	2 Ver estacas	jul-13	2.09	2.49	1 veracruz	2 Ver estacas
			2 Ver estacas	10 Puebla				3 Ver 103	8 Marcelino				3 Ver 103	5 AMI
			4 JMI	11 Brasil				4 JMI	9 ZOI				3 Ver 103	9 ZOI
			3 Ver 103	13 C170				5 AMI	10 Puebla				4 JMI	10 Puebla
			5 AMI					6 CM	11 Brasil				6 CM	11 Brasil
			6 CM					7 TMI	13 C170				7 TMI	13 C170
			7 TMI					12 Bra-Oax					7 TMI	13 C170
9 ZOI		14 C62		8 Marcelino	14 C62									
12 Bra-Oax				12 Bra-Oax										
14 C62				14 C62										

2.5 Supervivencia de las plantas a las condiciones ambientales en el sitio experimental

La supervivencia de las plantas depende en gran medida de su habilidad para adaptarse y/o resistir los factores limitantes.

Después de la germinación, las plántulas resultantes son individuos muy vulnerables que están expuestos a diversas amenazas bióticas (herbivoría, competencia, alelopatía) y abióticas (deseccación del suelo, niveles de radiación y temperatura inadecuada).

Una vez establecido el cultivo, los individuos son susceptibles a los desastres climáticos, brotes plagas y enfermedades y otras catástrofes, lo cual también limita su supervivencia.

Por lo tanto, el método de propagación y las condiciones de la plantación piloto (de temporal) juegan un papel decisivo en la supervivencia y propiedades de la planta en el campo.

Las tasas de supervivencia no solo dependen de la temporada en que realizó la siembra y el método de la siembra, también depende del año de estudio.

La supervivencia de cada ecotipo hace referencia al porcentaje de individuos vivos en el presente, con respecto al número total de individuos plantados.

Las tasas de supervivencia se obtuvieron del registro en conteo de plantas vivas y plantas muertas en cada inspección y toma de mediciones.

La Tabla 2.4 describe la supervivencia de los individuos de *Jatropha curcas* en la parcela experimental a lo largo de 4 años de evaluación desde su plantación.

Adicionalmente, fue posible determinar las afectaciones más comunes a las plantas en el sitio experimental, a través de los cuatro años de la plantación.

Las afectaciones encontradas fueron 5:

Seca por plaga, que hace referencia a los individuos de *Jatropha curcas* que fueron atacados por una plaga ocasionando la pérdida total de la planta.

Cortada por plaga, hace referencia a la causa anterior, solo que en este caso no hubo pérdida total de la planta, debido a que la plaga solo afectó algunas ramas y hojas las cuales se tuvieron que cortar.

Seca, son los individuos fueron afectadas por la falta de agua o nutrientes.

Cortada, son las plantas que sufrieron cortes en sus ramas u hojas por el paso de animales en el lugar.

Reposiciones, son los individuos que al no mostrar un crecimiento similar al resto de las planta de un mismo ecotipo se retiraron de la parcela y se plantaron otros individuos del mismo ecotipo en su lugar.

Tabla 2.4 Supervivencia de individuos de por ecotipo.

Ecotipo	No. Inicial de individuos	No. de individuos sobrevivientes			
		2009	2011	2012	2013
1. Veracruz	78	78	68	66	55
2. Veracruz - Estacas	74	72	59	45	38
3. Veracruz 103	68	66	66	62	62
4. JMI	69	69	64	60	58
5. AMI	64	60	60	59	57
6. CM	62	62	62	59	57
7. TMI	62	54	53	46	45
8. Marcelino	57	52	50	46	43
9. ZOI	53	44	42	38	34
10. Puebla	50	47	35	25	16
11. Brasil	46	46	44	43	41
12. Bra-Oax	43	42	38	32	28
13. C170	39	39	39	39	39
14. C62	39	38	37	36	32

Tabla 2.5 Principales afectaciones que mostraron a los individuos *Jatropha curcas* en la parcela experimental

principales afectaciones	Presencia de afectaciones				total de incidencias presentadas
	2009	2011	2012	2013	
Seca por plaga	2	31	44	40	117
seca	0	15	53	0	68
cortada por plaga	15	19	12	10	56
reposición	13	9	1	0	23
cortada	4	7	2	0	13
Total de afectaciones anuales	34	81	112	50	277

2.6 Producción de semillas.

La *Jatropha Curcas* es considerada como una planta silvestre, por tal motivo su productividad de semillas es variable.

Al ser la *Jatropha curcas* un arbusto monoico puede producir flores individuales de las cuales se crean frutos maduros en cada racimo.

La reproducción y el crecimiento vegetativo de *Jatropha curcas* están fuertemente relacionados, debido a que la inflorescencia se da en las puntas de las ramas.

El desarrollo de las flores y frutos tarda aproximadamente 3 meses para completar el ciclo de la etapa inicial de botón floral hasta la madurez del fruto.

La parte cosechada de *Jatropha* es el fruto ya que éste contiene semillas. Las semillas constituyen alrededor del 70% del total del peso de la fruta, el 30 % corresponde a la cubierta del fruto.

Los frutos maduros tienen un contenido de humedad de alrededor de 15% y las semillas el 7% aproximadamente.

Las semillas están compuestas por la almendra que es el interior de la semilla en la cual se almacena el aceite, y la cascará que es la cubierta de la almendra.

Las semillas se cosechan cuando los frutos maduran, esto es cuando el color de los frutos cambia de verde a amarillo-marrón, no todos los frutos maduran al mismo momento.

La primera cosecha evaluada se realizó al cuarto año de edad de la plantación. La cosecha se colectó manualmente al igual que la separación de las semillas y las cáscaras del fruto.

La productividad de semillas se evaluó con la producción de semillas de cada ecotipo obtenida en el año 2013, con dicho dato se estimó el volumen de producción por hectárea de cada ecotipo.

La productividad de semillas es un dato indicativo debido a que es la única evaluación que se ha realizado.



Fig. 2.5 Fotografías de las semillas de *Jatropha curcas* en la plantación experimental.

Capítulo 3. Desarrollo Experimental. Producción de biodiesel y determinación de toxicidad de los ecotipos de *Jatropha curcas*.

Este capítulo presenta el desarrollo experimental realizado para la sobre el rendimiento potencial los ecotipos de *Jatropha curcas* para la obtención de biodiesel.

El desarrollo experimental consiste en la realización de una serie de pruebas en condiciones de laboratorio para obtener los rendimientos en la producción de biodiesel de los ecotipos establecidos en la parcela experimental

El desarrollo experimental incluye evaluaciones por ecotipo, desde la etapa de extracción de aceite, el proceso de transformación de aceite a biodiesel a través de reacciones de transesterificación con catalizadores básicos y la realización de las pruebas de calidad del biodiesel obtenido.

Finalmente, se realizaron análisis para determinar la toxicidad de los ecotipos de *Jatropha curcas*.

3.1 Extracción de aceite de las semillas.

El contenido de aceite en las semillas es una característica importante para evaluar la productividad de los cultivos de *Jatropha Curcas*.

Las semillas de *Jatropha curcas* contienen aceite viscoso, la fracción total de aceite, grasas e hidratos de carbono es alrededor de 30 a 35%; el 99% de aceite se almacena en la almendra.

El aceite de *Jatropha curcas* contiene más del 75 % de ácidos grasos insaturados. La composición de estos ácidos grasos es dominado por ácido oleico (C18:1) y ácido linoleico (C:18:2) (Achten et al., 2008)

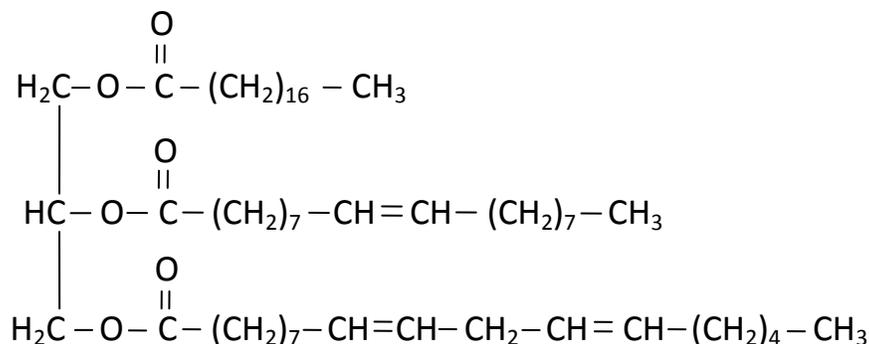


Fig. 3.1 Estructura orgánica del aceite de *Jatropha curcas*.

La extracción del aceite de las semillas es el segundo paso en la cadena de producción biodiesel.

Existen diferentes técnicas para la extracción del aceite de *Jatropha*, los métodos principales métodos son extracción mecánica y extracción química, la fracción de aceite recuperable es claramente afectada por el método de extracción.

La extracción mecánica se realiza mediante la aplicación de presión a las semillas de *Jatropha Curcas*, colocando las semillas completas (almendra y cáscaras) o solo la almendra.

En este método normalmente se emplea una prensa de pistón manual. Comercialmente existen prensas de extracción de pequeña escala, sin embargo, no hay diseños estandarizados.

La extracción química puede ser mediante solventes orgánicos como el n-hexano o heptano, tratamientos enzimáticos acuosos, solventes supercríticos como del CO₂ o solventes renovables como el bio-etanol y el alcohol isopropílico.

Para la obtención de los rendimientos de aceite de las semillas se realizaron extracciones de aceite por ecotipo, utilizando los las semillas de los ecotipos 4,5,6,7,8,10,11,12,13,14 obtenidas en la cosecha del 2013.

La extracción de aceite se llevo a cabo mediante extracción mecánica. Se utilizo una prensa hidráulica de laboratorio diseñada especialmente para este fin y consiste en aplicar presión sobre un volumen dado de semillas de *Jatropha curcas*.

En la fig. 3.2 muestra la representación esquemática de la prensa hidráulica.

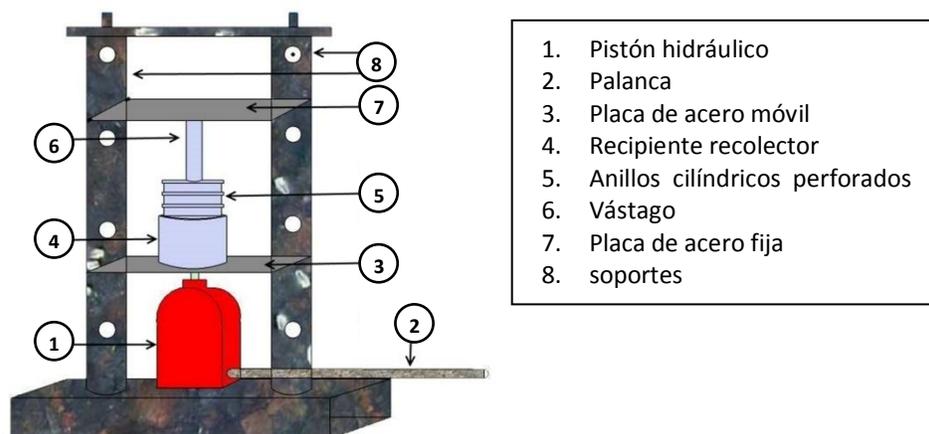


Fig. 3.2 Representación esquemática de la prensa hidráulica.

El funcionamiento de la prensa de extracción es el siguiente:

Sobre la placa de acero móvil (3), se coloca el recipiente recolector (4), dentro del recipiente recolector se colocan los anillos cilíndricos perforados (5), las semillas se depositan en los anillos cilíndricos perforados y sobre las semillas se acopla el vástago (6).

La compresión se da al accionar la palanca (2) la cual aplica presión al pistón hidráulico (1), y este desplaza hacia arriba a la placa de acero móvil contra la placa de acero fija (7), lo que ocasiona que el vástago comprima las semillas y éstas liberan el aceite contenido.

Los anillos cilíndricos perforados solo dejan fluir el aceite, el cual es almacenado en el recipiente recolector, mientras que la almendra y la cáscara de las semillas comprimidas (pasta residual) se conserva dentro de los anillos cilíndricos perforados.

Las extracciones se realizaron con muestras de 250-300 g de semillas de *Jatropha curcas* con cáscara y de 2 a 5 pruebas por cada ecotipo según la disponibilidad de semillas.

La presión aplicada en la prensa hidráulica fue de 1720 lb/in^2 en cada muestra equivalente a 3 toneladas de presión.



a) pesado de semillas

b) Vaciado de semillas

c) compresión de semillas

Fig 3.3 Fotografías del proceso extracción de aceite en la fase del pesado de las muestras de semillas (a), el vaciado de las semillas en los anillos cilíndricos perforados (b) y la compresión de las semillas en la prensa hidráulica.

Posteriormente, el aceite recolectado fue filtrado para retirar las trazas de residuos y/o basuras de las cáscaras de la semilla que se pudieron traspasar.

El contenido de aceite se determinó con la medición en peso (g) y volumen (ml) del aceite recolectado en cada extracción, registrando de la misma forma las cantidades de pasta residual resultantes en dichas extracciones.

Los rendimientos del contenido de aceite de las semillas de cada ecotipo, se presentan en la tabla 3.1 y 3.2. Los porcentajes de extracción de aceite es la relación de la cantidad de aceite obtenido en gramos y la cantidad de semillas utilizadas en gramos.



a) Recolección y Filtración de aceite b) Pesado de aceite c) Pesado de pasta residual

Fig. 3.4 Fotografías del proceso de extracción en la fase de recolección del aceite y filtrado de aceite (a) para remover las trazas residuales, pesado del aceite (b) y pesado de la pasta residual (c) por muestra.

3.2 Obtención de biodiesel a través de reacciones de transesterificación.

El biodiesel es un biocombustible que se obtiene mediante procesos de transformación química utilizando como materia prima lípidos naturales, aceites vegetales o grasas animales.

Existen varios métodos para la producción de biodiesel, entre los principales se encuentran los procesos de dilución, micro emulsificación, pirólisis y Transesterificación.

La transesterificación es el proceso más utilizado para la conversión del aceite de *Jatropha curcas* en biodiesel, debido a las bajas temperaturas (60°C) y presiones

(20 PSI), requeridas en la reacción, además del corto tiempo y el alto factor de conversión (98%) de la reacción.

La transesterificación, también llamada alcoholólisis, es la reacción de una grasa o aceite con un alcohol para romper químicamente la molécula del aceite en bruto, resultando así la formación de ésteres de metilo o de etilo, y glicerol como un subproducto.

Comúnmente se utiliza un catalizador para mejorar la rapidez de la reacción, este catalizador puede un medio alcalino, ácido o por enzimas.

Este tipo de reacciones es de complejidad múltiple debido a que se da en tres etapas. La primera etapa es la más lenta y donde se ejerce una mayor influencia por lo tanto es la etapa controlante.

Teóricamente la transesterificación es una reacción química reversible, por tal motivo, experimentalmente se agrega un exceso de alcohol para desplazar el equilibrio hacia los productos, y de esta manera evitar la reversibilidad.

Las transesterificaciones con catalizador alcalino también llamados catalizadores básicos, utilizan hidróxido de Sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH).

El metanol y el etanol son los alcoholes más usados para diluir los catalizadores, principalmente el metanol, debido a su bajo costo así como sus ventajas químicas y físicas.

El metanol es un alcohol polar de cadena corta que reacciona rápidamente con los triglicéridos.

Las soluciones de un catalizador alcalino con un alcohol se les llaman alcóxidos. Los alcóxidos de sodio están entre los catalizadores más eficientes (West et al., 2008).

Teóricamente para que se lleve a cabo, la reacción de transesterificación se necesita una relación molar de alcohol a triglicérido de 3:1, pero pueden mejorar su rendimiento en la reacción, adicionando un exceso de uno de los reactivos o removiendo uno de los productos.

Normalmente, se utiliza un exceso de metanol del 60% al 100% sobre la cantidad estequiométrica necesaria para llevar a cabo la reacción.

Estas reacciones también requieren del 1% de hidróxido de sodio o del catalizador similar, en base al peso de la cantidad de aceite a utilizar. La mayor

parte de la cantidad de catalizador ocupado en una reacción de transesterificación se convierte en glicerina.

La fig. 3.5 describe la estructura química de la reacción de transesterificación.

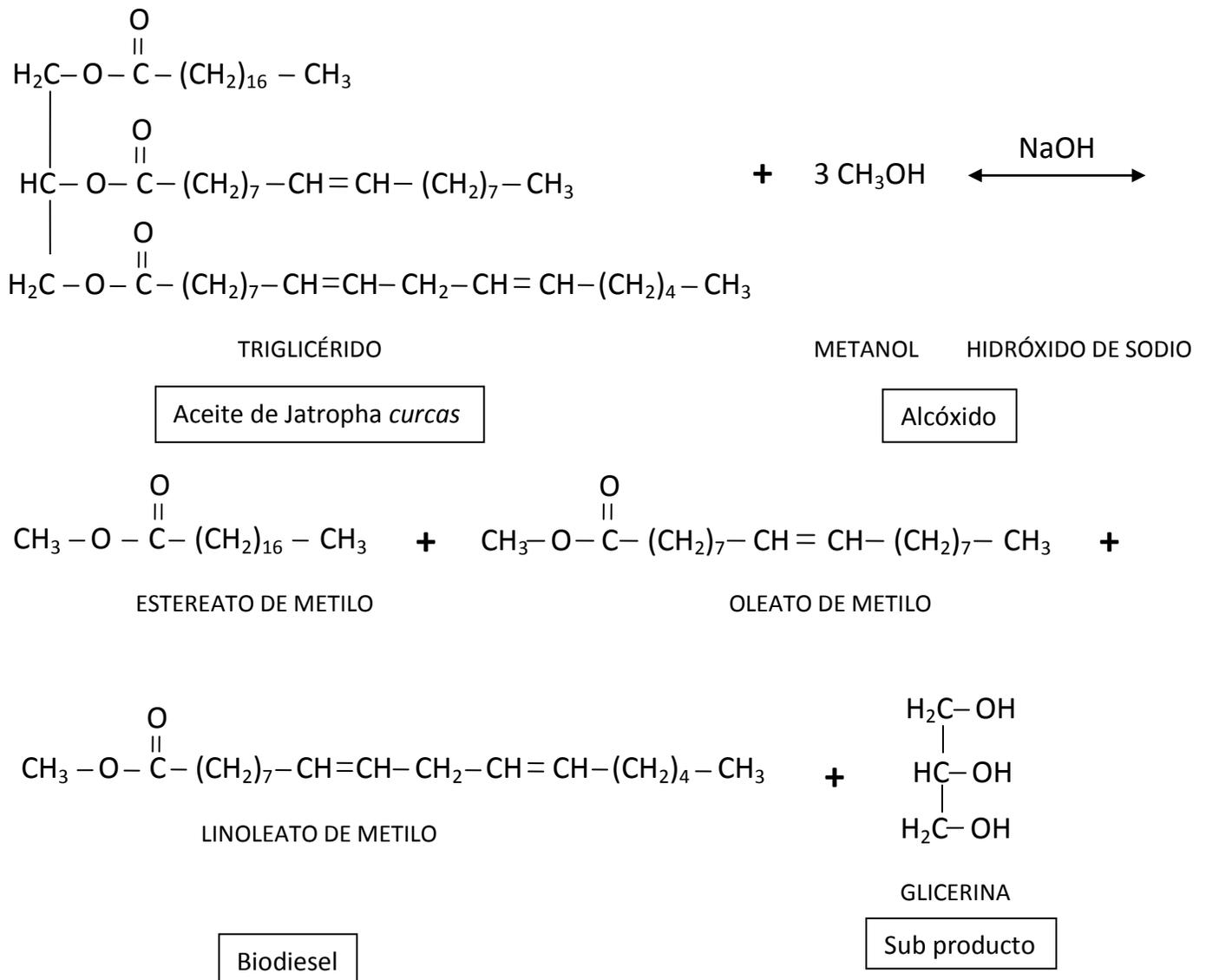


Fig. 3.5 Reacción de transesterificación con aceite de *Jatropha curcas*.

3.2.1 Desarrollo de las reacciones de transesterificación.

Las reacciones de transesterificación que se llevaron a cabo con muestras de 30 g de aceite de *Jatropha* por ecotipo y se realizaron 3 reacciones de transesterificación por ecotipo.

El catalizador seleccionado para las reacciones de transesterificación fue un medio básico, siendo éste, una solución de Metanol CH_3OH e hidróxido de sodio NaOH .

En la primera parte de la experimentación se comparó los rendimientos del proceso de conversión de aceite a biodiesel de dos concentraciones del alcóxido en las reacciones de transesterificación:

En la primera concentración se utilizó 80% de exceso de metanol a la cantidad estequiométrica necesaria y 1% NaOH (ver anexo A.1), con los ecotipo 4, 5, 6, 11 y 12.

En la segunda concentración se utilizó 60% de exceso de metanol a la cantidad estequiométrica y 0.4% NaOH . (Ver anexo A.2).

Con la segunda concentración se utilizó el aceite de las semillas de los ecotipos 4, 5, 6, 11, 12, y adicionalmente los ecotipos 7, 8, 9, 13 y 14, estos últimos debido a que se observó que el rendimiento de la reacción y la conversión aceite a biodiesel mejoraba con la segunda concentración.

3.2.2 Preparación del alcóxido

Los alcóxidos son las reacciones de un alcohol y un catalizador, en la figura 3.6 se muestra la reacción del hidróxido de sodio y el metanol que son el catalizador seleccionado para llevar a cabo las reacciones de transesterificación.

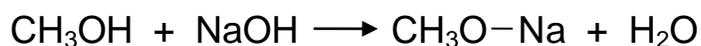


Fig. 3.6 Reacción del hidróxido de sodio y metanol.

La presencia de agua afecta negativamente a la reacción de transesterificación, sin embargo si al inicio de la reacción de transesterificación no existe la presencia de agua, se forma cantidades muy reducidas de ácidos grasos libres. Por lo tanto, éste porcentaje de agua en el sistema puede ser tolerada, de esta manera la reacción de transesterificación tiene lugar a una tasa superior a la saponificación de glicerina que conduce a los ácidos libres.

La preparación de la solución metanol- NaOH, consiste en depositar en un matraz aforado la cantidad estequiométrica necesaria de metanol más el exceso, y agregar el hidróxido de sodio, manteniendo en agitación constante para diluir correctamente los reactivos.



c) Metanol, Hidróxido de Sodio y aceite de *Jatropha curcas*

b) Adición de Metanol al Hidróxido de Sodio

a) Formación del Alcóxido

Fig. 3.7 Fotografías de la preparación del alcóxido. Hidróxido de Sodio y Metanol (a), agregando el Metanol al NaOH (b) y obtención del alcóxido (c).

3.2.3 Mezclado del aceite con la solución de metanol-NaOH

Para mezclar el aceite con el alcóxido, el aceite se debe agitar y calentar a 40 °C, al alcanzar estas condiciones se le agrega la mezcla de metóxido en exceso de metanol.

La figura 3.8 muestra el diagrama de sistema de la reacción de transesterificación.

El sistema para la reacción de transesterificación consta de un matraz de 3 bocas (4) en el cual se deposita el aceite de *Jatropha curcas*. Dentro del matraz de 3 bocas, se coloca un agitador magnético (5) y se coloca sobre una plancha de

calentamiento (6) en la cual se mantienen las condiciones constantes de temperatura 60°C y una agitación 460 rpm.

El condensador (2) se conecta al matraz de 3 bocas para evitar la evaporación del metanol y acopla una válvula de escape (11) para evitar altas presiones en el sistema. El condensador utiliza agua como refrigerante.

Éste sistema se asegura con un soporte universal (1) y pinzas (3 y 10) que sostienen al condensador y al matraz de 3 bocas.

En una segunda boca del matraz se coloca un termómetro (7) con el que se monitorea que la temperatura sea constante y en la tercera boca se agrega la solución de metanol e hidróxido de sodio.

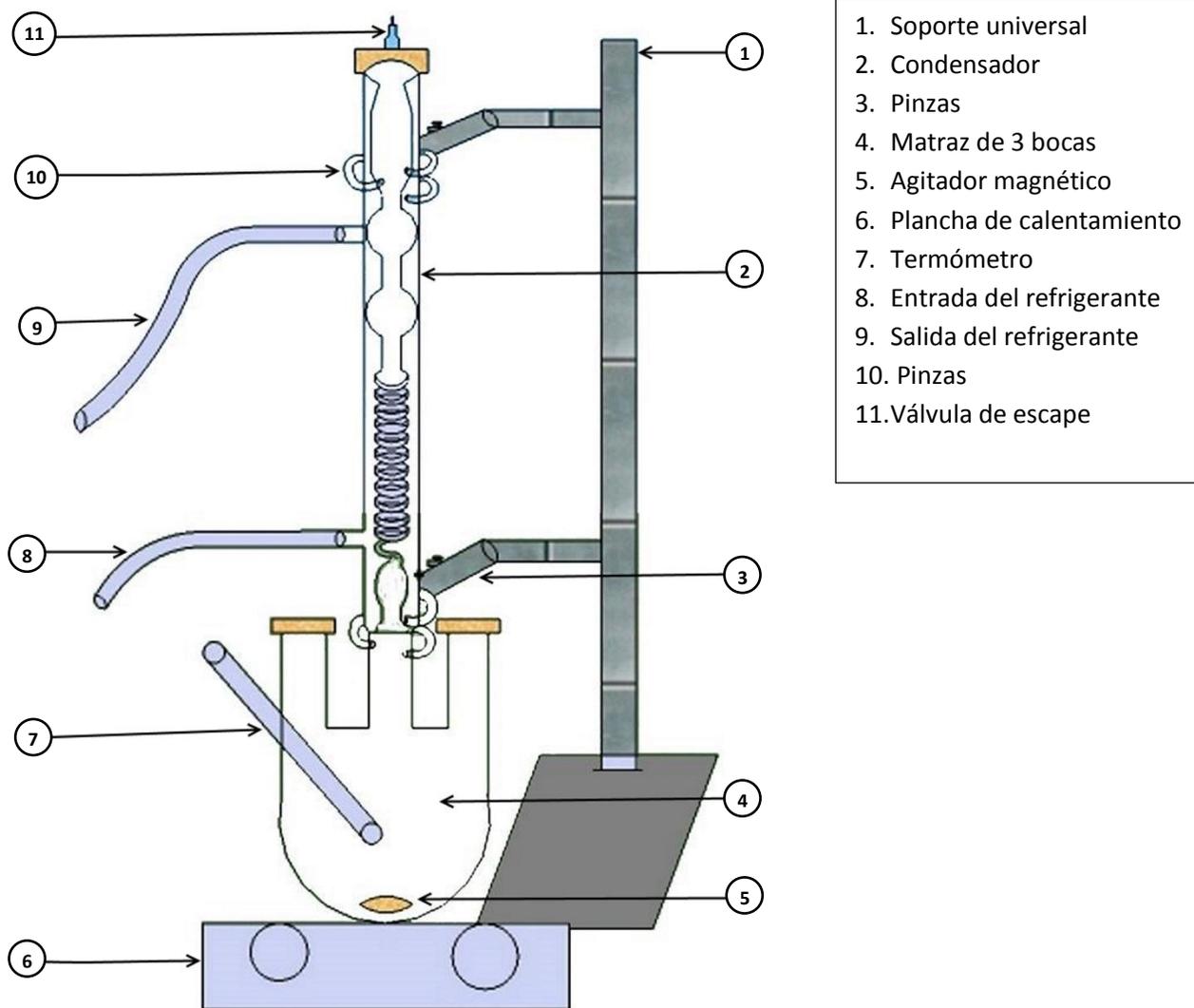


Fig. 3.8 Diagrama del sistema en que se lleva a cabo la reacción de transesterificación.

Cuando el aceite de *Jatropha Curcas* alcanza la temperatura de 40°C en el matraz de 3 bocas, se adiciona la solución de metanol- NaOH.

El aceite con el alcóxido se deja reaccionar hasta alcanzar la temperatura en un intervalo de 58 a 60 °C, a partir de ese momento se mantienen las condiciones de operación por 60 minutos.



c) Pesado de aceite de *Jatropha curcas* para la transesterificación

b) Montaje del sistema para la reacción de transesterificación.

a) Reacción de transesterificación.

Fig. 3.9 Fotografías del sistema en donde se llevaron a cabo las reacciones de transesterificación. Pesado del aceite (a), montaje del sistema (b), reacción de transesterificación (c).

3.2.4 Separación del biodiesel y glicerina

Al concluir la reacción de transesterificación, se realiza la separación de los productos resultantes de la reacción, de la cual se obtiene biodiesel y glicerina como subproducto.

La separación se realiza por centrifugación. El contenido del matraz de 3 bocas después de la reacción se deposita en 2 tubos de centrifuga, los cuales se centrifugan a 3200 rpm durante 1 min.

Una vez finalizada la centrifugación, el biodiesel queda en la fase superior y la glicerina en la fase inferior de los tubos.

El biodiesel y la glicerina obtenida se colocan en vasos de precipitados por separado para pesar las cantidades que se obtuvieron de cada una de las reacciones.

En la tabla 3.3 y 3.4 se describen las cantidades de biodiesel obtenidos por cada concentración de catalizador.



- a) Centrifugación de los productos de la transesterificación b) Separación del biodiesel de la glicerina c) Biodiesel y glicerina obtenida.

Fig. 3. 10 Fotografías de la separación de los productos resultantes de la reacción de transesterificación, Centrifugación de los productos (a), separación del biodiesel de la glicerina (b), Biodiesel y glicerina obtenida (c).

3.3 Especificaciones y propiedades del biodiesel

Una vez obtenido el biodiesel es de vital importancia asegurar que el producto sea de calidad, es decir que el biodiesel cumpla con ciertas especificaciones para que pueda ser usado directamente como combustible o como una mezcla con algún derivado del petróleo y así llevar a cabo la distribución del biocombustible.

Las mezclas más comunes son las B20 (20% de biodiésel y 80% de diésel de origen fósil), las B5 (5% de biodiésel y 95% de diésel de origen fósil), estas mezclas pueden usarse generalmente sin modificar el motor, sin embargo también se puede emplear un 100% de biodiésel pero es necesario hacer ciertas

modificaciones del motor que le permitan evitar problemas de mantenimiento y de desempeño.

3.3.1 Pruebas de calidad

Uno de los aspectos que ha permitido el crecimiento del mercado del biodiésel es el establecimiento de normas de calidad.

En diciembre de 2001 la Asociación Americana para la Evaluación y Materiales (ASTM) publicó una especificación para el biodiesel.

Los estándares de calidad se definen y establecen en la norma ASTM 6751-02, en la cual establece las especificaciones de los esteres de los ácidos grasos que deben contener para poder denominarse biodiesel.

Los valores para las propiedades del biodiésel especificado por la norma ASTM se muestran en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Requerimientos de NORMA ASTM D6751-02.

Propiedad	Método	Limites	Unidades
Punto de inflamación	D 93	130 mín	°C
Agua y sedimentos	D 2709	0.050 máx.	% volumen
Densidad	D 4052	0.86 – 0.90	g/ml
Viscosidad cinemática a 40°C	D 445	1.9 - 6.0	mm ² /s
Ceniza sulfatada	D 874	0.020 máx	% masa
Azufre total	D 5453	0.05 máx	% masa
Corrosión en lámina de cobre	D 130	No. 3 máx	
Índice de cetano	D 613	47 mín.	
Punto de nube	D 2500	A informar por cliente	° C
Residuo carbonoso	D 4530	0.050 máx.	% masa
Número ácido	D 664	0.80 máx	Mg KOH/g
Glicerina libre	D 6584	0.020	% masa

Glicerina total	D 6584	0.240	% masa
Contenido de fósforo	D 4951	0.001	% masa
Temperatura de destilación, equivalente en temperatura Atmosférica, 90% recuperado	D 1160	360 °C máx	° C

Después de la obtención del biodiesel se realizaron experimentalmente cuatro pruebas de calidad que corresponden a densidad del biodiesel, punto de inflamación, viscosidad cinemática e Índice de acidez.

3.3.2 Densidad del biodiesel.

Conforme a método ASTM D4052. Requerimiento 0.86 a 0.90 g/ml.

La densidad es la masa por unidad de volumen de una sustancia a una temperatura dada.

La densidad es un indicador sobre el contenido en energía del combustible. Mayores densidades indican mayor energía térmica y una economía de combustible mejor, pero de igual manera la mayor densidad del biodiesel puede causar problemas en los sistemas de inyección de los motores y, a bajas temperaturas, presenta problemas de solidificación y congelación.

Se obtuvo pesando en la balanza 1 ml de biodiesel.

$$\rho = \frac{\text{masa de 1 ml de biodiesel}}{1 \text{ ml de biodiesel}} = \frac{g}{ml}$$

3.3.3 Punto de inflamación.

Conforme a método ASTM D93. Requerimiento Mínimo 130 °C

El punto de inflamación se define como la temperatura más baja se tiene el punto de ignición del biodiesel bajo una presión barométrica de 101.3 Kpa (760 mm Hg), es decir la temperatura a la cual el biodiesel comienza a evaporarse aplicándole una fuente de calor.

El punto de inflamación es un determinante para la clasificación de flamabilidad de los materiales.

El punto de inflamación típico de los esteres metílicos puros es mayor a 200 °C y se clasifican como no inflamables. Sin embargo, durante la producción y

purificación del biodiesel, no todo el metanol es removido, por tal motivo, este biocombustible es flamable y para almacenarlo puede ser muy peligroso si su punto de inflamación es menor a 130 °C.

El procedimiento para tomar esta temperatura consistió en colocar un termómetro dentro de un vaso de precipitados de 10 ml con 4 ml de biodiesel y calentarlo en la plancha de calentamiento a 400 °C; la temperatura registrada como punto de inflamación fue a la que el termómetro marcaba cuando se comenzó a notar humo blanco en el biodiesel.

3.3.4 Viscosidad cinemática

Conforma a método ASTM 445 a 40 °C. Requerimiento 1.9 a 6.0 mm²/s.

La viscosidad cinemática es la resistencia de un fluido a deslizarse bajo gravedad. La viscosidad cinemática es una especificación de diseño básico para los inyectores de combustibles utilizados en los motores diesel. A muy alta viscosidad el desempeño no es adecuado.

La viscosidad cinemática es la relación de la viscosidad dinámica y la densidad.

La viscosidad dinámica es la relación de la resistencia de un fluido y el tiempo que tarda en fluir a través de un tubo capilar.

El procedimiento para determinar la viscosidad cinemática consistió en obtener la viscosidad dinámica en un viscosímetro digital marca Brookfield.

En una probeta se colocó 21 ml de biodiesel y se calentó a 40 °C, con el viscosímetro se midió la viscosidad dinámica (μ) a 50, 100, 150 y 200 rpm. Las viscosidades dinámicas obtenidas se promediaron.

Posteriormente se calculó la viscosidad cinemática mediante la relación de viscosidad dinámica (μ) y densidad (ρ).

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho} = \frac{mm^2}{s}$$

3.3.5 Índice de acidez

Conforme a método ASTM D664. Requerimiento Máximo 0.80 mg KOH/g

El índice de acidez es la cantidad de base expresada en miligramos de hidróxido de potasio por gramos de muestra.

El número ácido es una medida directa de los ácidos grasos libres en el biodiesel. Estos ácidos grasos libres pueden causar corrosión debido al contenido de agua en el combustible.

Normalmente en un proceso con catalizador básico, la cantidad de ácidos después de la producción puede ser baja porque el catalizador básico separa de los ácidos grasos libres disponibles. Sin embargo, la cantidad de ácidos puede incrementar con el tiempo por que el biodiesel se degrada al tener contacto con la humedad aire o el agua.

El procedimiento consistió en la titulación de KOH 0.1 N a muestras de 1 gramo de biodiesel. Se realizaron 3 muestras por ecotipo.

En un vaso de precipitados de 40 ml se colocó 1 g de aceite al cual se agregó 5 ml de la solución tolueno – etanol y se mantuvo en agitación por 1 min a 360 rpm. Posteriormente, a la mezcla de aceite con solución de tolueno-etanol se le agregó 0.02 ml de fenolftaleína.

Finalmente se tituló con solución KOH-etanol hasta notar un cambio a color en la muestra, de blanco a rosa y que la coloración permaneciera por más de 15 segundos.

Cuando la fenolftaleína no muestra un cambio de coloración indica que se trata de un pH ácido, pero si cambia a una coloración rosa es un Ph básico

La cantidad de la solución KOH 0.1 normal añadida es la medición utilizada para obtener el número de acidez. Ver anexo B.



a) Densidad del biodiesel b) Punto de inflamación c) Viscosidad dinámica

3.11 Fotografías de las pruebas de calidad del biodiesel, densidad del biodiesel (a), índice de inflamación (b), viscosidad cinemática (c).

3.4 Análisis de toxicidad a los ecotipos.

La pasta residual de *Jatropha curcas* resultante de la extracción de aceite contiene un alto valor energético en bruto debido a su contenido de proteínas y nutrientes.

La almendra ésta compuesta principalmente por lípidos, proteínas, lípidos y cenizas, mientras que la cascara ésta compuesta de fibra; por tal motivo la pasta residual podría aprovecharse en la producción de otros co-productos.

Un aspecto importante en las plantaciones de *Jatropha Curcas* es conocer la toxicidad de las plantas, de esta forma se determinan los tipos de co- productos que se podrían obtener, tales como alimento para ganado, fertilizantes, producción de otros tipos de energía, etc.

Los componentes responsable de la toxicidad de la *Jatropha curcas* es la concentración de esteres de forbol, curcina e inhibidores de tripsina los cuales se puede identificar en las semillas, sin embargo, el agente toxico principal es la presencia de esteres de forbol.

Las semillas de *Jatropha curcas* que contiene un alto contenido de esteres de forbol provienen de variedades de *Jatropha curcas* toxicas, en consecuencia, las variedades de *Jatropha Curcas* no toxica son las que en sus semillas no contienen toxicidad o el contenido de toxicidad es mínimo.

El aceite contenido en las semillas y su composición de ácidos grasos es similar en las variedades toxicas y no toxicas, pero debido a que los esteres de forbol están presentes en la almendras de las semillas, la pasta residual contendrá toxicidad si se trata de una variedad toxica, de lo contrario la pasta residual estará libre de toxicidad (Das et al., 2011)

3.4.1 Procedimiento del análisis de toxicidad.

La determinación de la toxicidad de los ecotipos se obtuvo con la cuantificación de los esteres de forbol contenidos en el aceite. La obtención de los esteres de forbol consistió en separarlos y extraerlos del aceite en un medio polar que posteriormente, se analizaron por HPLC (High Performance Liquid Chromatography).

Los análisis de toxicidad se realizaron con 1 gramo de aceite de semillas de *Jatropha curcas* por cada ecotipo.

La separación y extracción de los esteres de forbol es a través de la dilución en tubos de vidrio, de 1 gramo de aceite en 5 ml hexano.

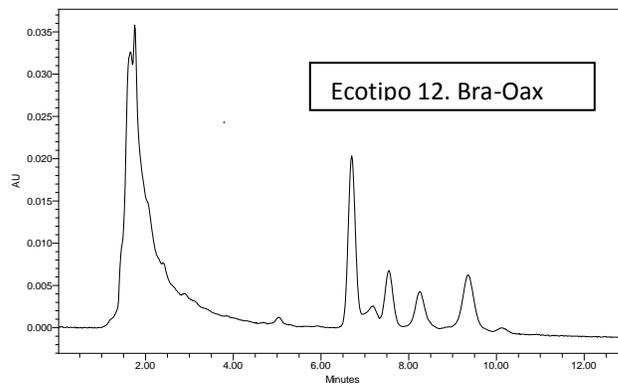
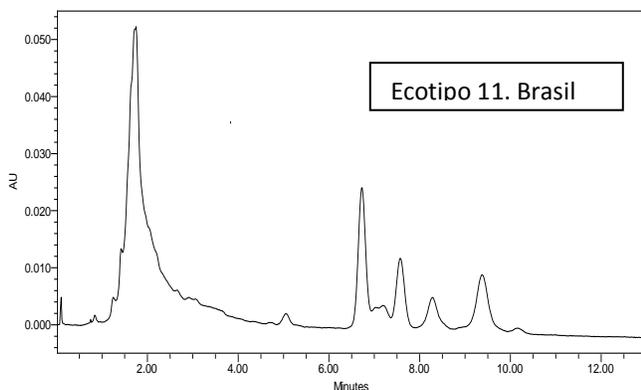
Una vez diluido el aceite de cada ecotipo en el hexano, se vacía la mezcla en empaques de sílica, los cuales se colocan en el SPE (solid Phase extracción), utilizando un empaque por ecotipo.

En el SPE se separan de la mezcla de aceite- hexano y los esteres de forbol, son retenidos en los empaques.

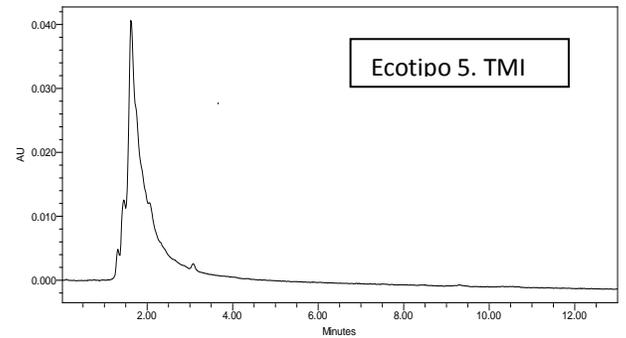
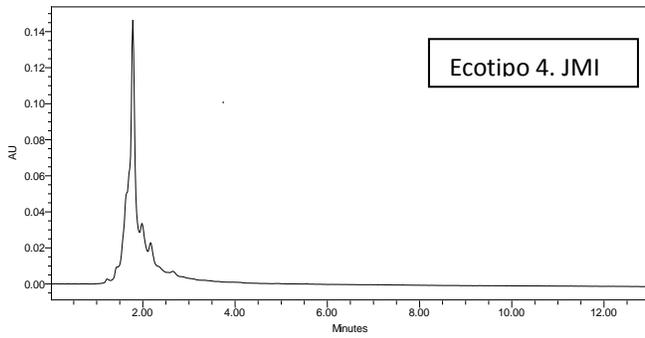
Posteriormente, a los empaques se les agrega 5 ml de metanol en cada empaque, de esta forma se disuelven los esteres de forbol.

Los esteres disueltos en metanol se depositan en un matraz de destilación, en el cual se coloca en un rotavapor a 45 °C y 95 rpm a vacío con la finalidad de destilar el metanol. El rotavapor utilizado es modelo R-215 marca BUCHI.

Finalmente, cuando el metanol se ha evaporado completamente, se agregan 2 ml de acetonitrilo en el matraz de destilación para diluir los esteres nuevamente, y la solución obtenida se coloca en virales dentro del HPLC (High Performance Liquid Cromatography) marca Allience modelo 2695. El HPLC se programó en solventes 75% acetonitrilo – 25% agua con un flujo de 1 ml por segundo y una columna C18.



b) Cromatogramas en ecotipos que contienen esteres de forbol



a) Cromatogramas en ecotipos sin esteres de forbol

Fig. 3.12 Cromatogramas de esteres de Jatropha de ecotipos tóxicos (a) donde después de los 4 minutos de separación se pueden ver los esteres de forbol, y de ecotipos que no contienen esteres de forbol (b) es decir libres de toxicidad.



a) Separación de la mezcla aceite-hexano en SPE



a) Disolución de los esteres de forbol en acetronitrilo



c) Equipo HPLC

Fig. 3.13 Fotografías de las pruebas de toxicidad, Separación de la mezcla aceite-hexano en SPE (a), dilución de los esteres de forbol en acetronitrilo (b), y Equipo HPLC.

Capítulo 4. Resultados y Discusión.

El presente capítulo presenta los resultados sobre la evaluación de crecimiento de los ecotipos de *Jatropha curcas*, la supervivencia a las condiciones ambientales del sitio, la productividad de semillas.

También presenta los resultados sobre los rendimientos de extracción de aceite de los ecotipos, la conversión de aceite a biodiesel a través de reacciones de transesterificación con catalizadores básicos y las pruebas de calidad realizadas al biodiesel obtenido.

Finalmente, presenta los resultados de los análisis de toxicidad.

4.1 Crecimiento morfológico de los ecotipos de *Jatropha curcas*.

El crecimiento en los ecotipos de *Jatropha curcas* se determinó con la comparación de 4 mediciones anuales desde el establecimiento de la parcela experimental. En las tablas 4.1, 4.2, y 4.3 describen las medidas de Altura total, Diámetro en la base y Área foliar respectivamente de los ecotipos.

Tabla 4.1 Crecimiento anual de Altura total de los ecotipos.

Ecotipo	Altura Media estimada \pm SD (cm)							
	2009		2011		2012		2013	
1. Veracruz	119,1	\pm 18,8	166,4	\pm 33,3	176,1	\pm 28,6	168,7	\pm 21,3
2. Ver estacas	92,3	\pm 32,4	139,2	\pm 31,1	160,9	\pm 29,7	152,6	\pm 22,6
3. Ver 103	96,1	\pm 17,3	151,0	\pm 24,8	161,1	\pm 21,4	165,6	\pm 20,4
4. JMI	81,2	\pm 22,4	137,5	\pm 29,9	147,8	\pm 26,8	170,1	\pm 21,2
5. AMI	85,7	\pm 16,8	146,9	\pm 22,1	161,7	\pm 23,7	174,9	\pm 33,0
6. CM	84,4	\pm 21,7	139,9	\pm 21,4	152,8	\pm 21,5	159,7	\pm 27,4
7. TMI	73,7	\pm 25,4	143,8	\pm 30,2	157,1	\pm 25,0	157,8	\pm 17,2
8. Marcelino	72,3	\pm 22,5	138,0	\pm 31,6	154,7	\pm 27,9	145,3	\pm 25,0
9. ZOI	62,5	\pm 23,2	131,1	\pm 35,9	160,8	\pm 43,4	176,8	\pm 37,3
10. Puebla	32,9	\pm 12,9	108,7	\pm 28,4	123,2	\pm 30,0	121,6	\pm 7,3
11. Brasil	73,9	\pm 19,3	184,8	\pm 33,5	200,0	\pm 29,2	192,7	\pm 36,5
12. Bra-Oax	23,1	\pm 6,3	125,9	\pm 44,0	157,8	\pm 39,6	155,2	\pm 45,0
13. C170	100,6	\pm 14,8	200,6	\pm 19,2	241,4	\pm 36,7	264,0	\pm 53,8
14. C62	69,3	\pm 19,6	156,6	\pm 21,8	168,7	\pm 25,1	173,9	\pm 19,0

Las primeras mediciones de altura tomadas 4 meses después de la plantación muestran una rápida adaptación a las condiciones ambientales en los ecotipos 1,2, 3 y 13 con alturas mayores a 90 cm y superiores al resto de los ecotipos que muestran un crecimiento similar entre 70 y 80 cm. En los ecotipos 10 y 12 es notorio su bajo crecimiento de altura entre 20 y 30 cm.

El incremento en altura a los 2 años del establecimiento de la plantación es entre 50 y 70 cm para la mayoría de los ecotipos; solo los ecotipos 11, 12 y 13 tuvieron incrementos de altura mayores a 1 metro.

Los incrementos anuales después del segundo año (2011) y hasta al cuarto año (2013) solo fue entre 10 y 20 cm, el ecotipo 13 tuvo un incremento mayor a 40 cm en 2012 y 23 cm en 2013.

La fase de mayor crecimiento en el parámetro de altura se dio en los 2 años de la plantación.

La altura total promedio de los ecotipos es 150 y 170 cm, siendo los ecotipos más altos el 13 y 11 con una altura total de 264 cm y 193 cm respectivamente, y con menor altura el ecotipo 10.

En la Fig. 4.1 se describe el historial del crecimiento del parámetro altura total de los ecotipos. Las letras indican las similitudes y diferencias entre ecotipos.

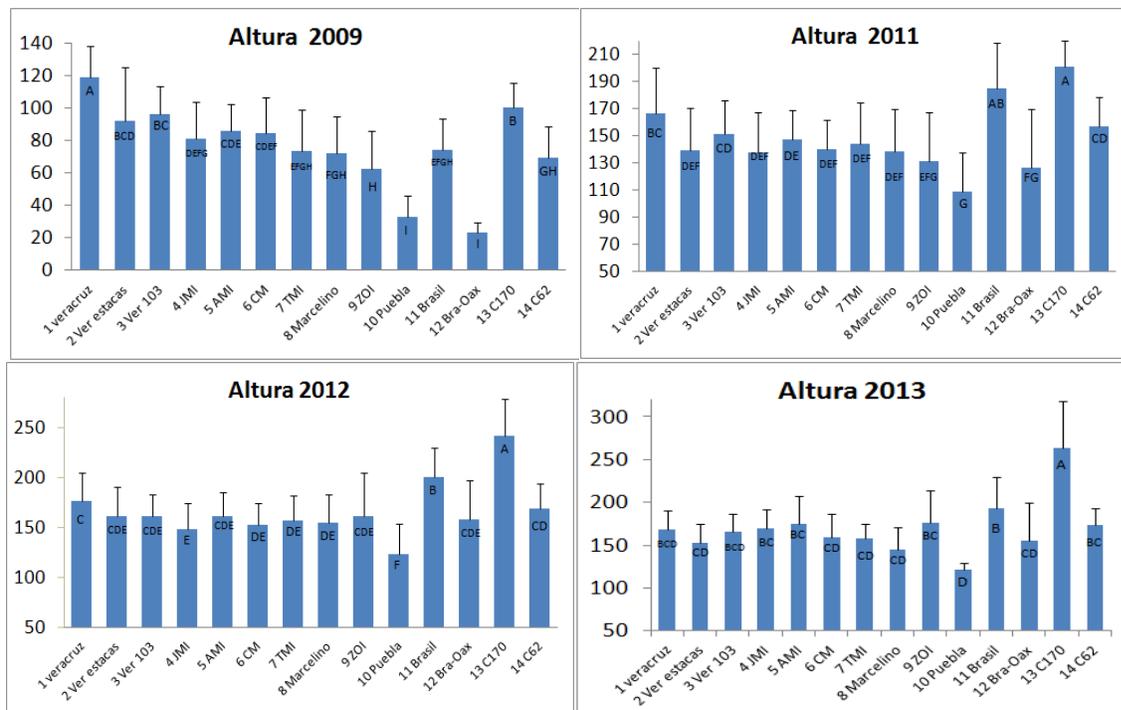


Fig. 4.1 Historial de crecimiento del parámetro Altura total.

Tabla 4.2 Crecimiento anual de Diámetro en la base.

Ecotipo	Diámetro en la base Media estimada \pm SD (cm)							
	2009		2011		2012		2013	
1. Veracruz	3,9	\pm 0,5	6,8	\pm 1,3	7,8	\pm 0,9	8,9	\pm 0,7
2. Ver estacas	2,8	\pm 0,8	5,8	\pm 1,5	7,7	\pm 2,3	6,8	\pm 2,3
3. Ver 103	3,7	\pm 0,6	7,3	\pm 1,1	9,0	\pm 1,5	9,4	\pm 1,5
4. JMI	3,0	\pm 0,7	6,7	\pm 1,2	-	\pm -	9,4	\pm 1,5
5. AMI	3,0	\pm 0,4	6,6	\pm 1,1	-	\pm -	10,0	\pm 2,4
6. CM	2,9	\pm 0,7	6,6	\pm 1,3	7,5	\pm 1,1	8,8	\pm 1,4
7. TMI	2,7	\pm 0,8	6,6	\pm 1,1	7,4	\pm 1,1	8,5	\pm 0,8
8. Marcelino	2,8	\pm 0,6	6,3	\pm 1,1	7,3	\pm 1,1	8,4	\pm 1,0
9. ZOI	2,7	\pm 0,8	6,6	\pm 1,4	8,2	\pm 1,8	11,4	\pm 3,0
10. Puebla	1,5	\pm 0,5	4,9	\pm 0,9	6,0	\pm 1,2	7,2	\pm 0,3
11. Brasil	3,2	\pm 0,7	8,1	\pm 1,4	9,9	\pm 1,9	10,9	\pm 1,6
12. Bra-Oax	1,1	\pm 0,3	5,7	\pm 1,6	8,1	\pm 1,8	9,2	\pm 1,9
13. C170	3,9	\pm 0,5	10,4	\pm 1,7	13,6	\pm 2,1	15,6	\pm 2,9
14. C62	2,5	\pm 0,7	6,6	\pm 1,0	7,9	\pm 1,3	8,7	\pm 1,3

El diámetro en la base de los tallos de los ecotipo de *Jatropha* a los cuatro meses de la plantación de las plántulas fue de 2.5 a 3.9 cm. Para la mayoría de los ecotipos siendo los ecotipo 1, 3 y 13 los ecotipos con tallos más gruesos. Los ecotipos con menores diámetros de tallos fueron los ecotipos 10 y 12 con 1.5 y 1.1 cm de diámetro en la base respectivamente.

Los incrementos anuales en los diámetros de tallo es uniforme en los ecotipos de 1 a 10 y 14 que van de 1 a 2 cm, el ecotipo 13 tuvo incrementos anuales mayores al resto de los ecotipo de 2 a 3 cm por año. Los ecotipos 12 y 9 tuvieron incrementos discontinuos en los primeros años sus crecimiento fueron continuos de 1.5 a 2 cm, en el tercer año el ecotipo 12 tuvo un incremento mayor de 2.4 cm y el ecotipo 9 en el cuarto año tuvo su mayor incremento de 3 cm.

Los ecotipos con tallos mayores son los ecotipos 13 con 15.6 cm de diámetro en la base, seguidos por los ecotipos 9 y 10 con 11.4 y 10.9 cm respectivamente. Los ecotipos con los tallos más pequeños son los ecotipos 2 y 10, las medidas de sus

diámetros en la base son 6.8 cm y 7.2 respectivamente. El resto de los ecotipos tienen diámetros de tallo similares en un intervalo de 8 a 10 cm.

Fig. 4.2 Graficas historial de crecimiento del parámetro de Diámetro en la base.

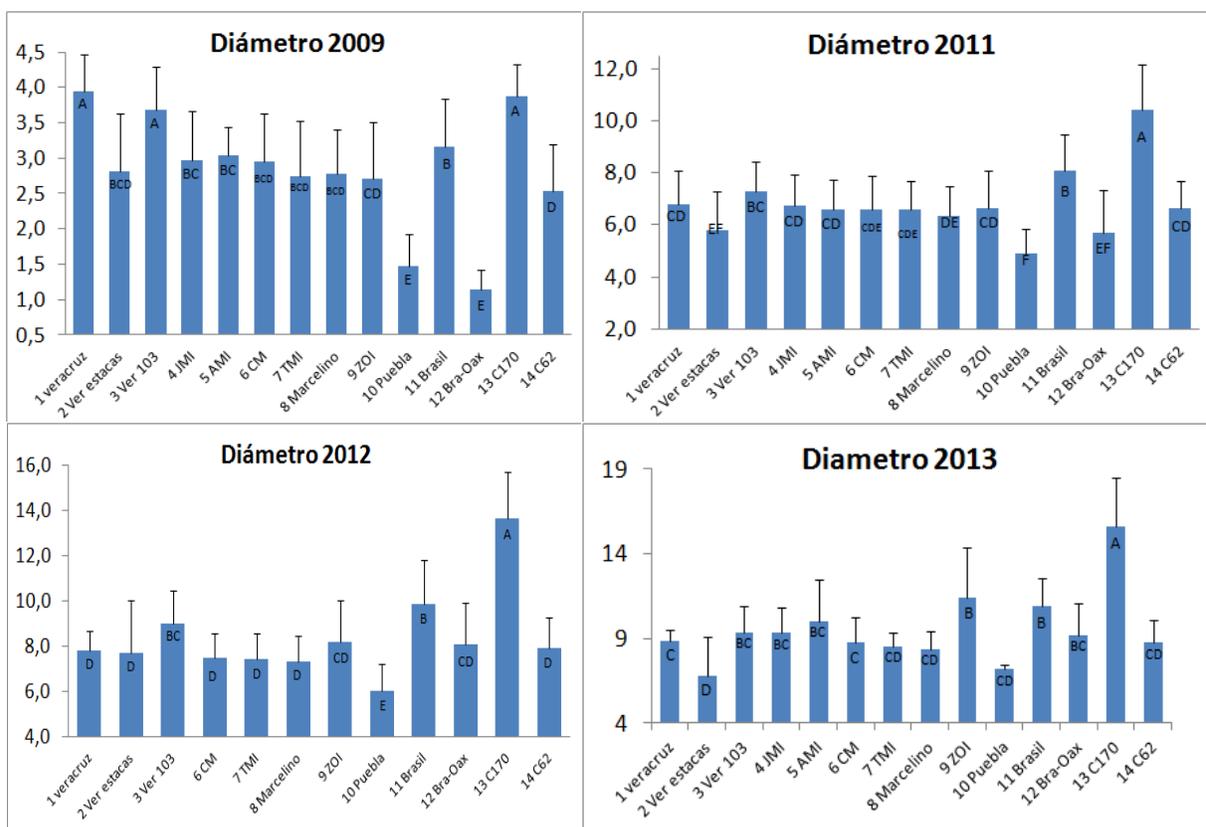


Tabla. 4.3 Crecimiento anual del Área foliar.

Ecotipo	Área foliar Media estimada \pm SD (cm ²)							
	2009		2011		2012		2013	
1. Veracruz	5690,0	\pm 2211,6	18034,8	\pm 7059,5	16355,3	\pm 6249,3	12123,5	\pm 4605,6
2. Ver estacas	4220,9	\pm 2801,3	14733,0	\pm 11352,2	17640,4	\pm 12754,8	8770,3	\pm 4035,0
3. Ver 103	5769,6	\pm 2754,2	14450,8	\pm 6990,0	13691,3	\pm 6757,9	14242,5	\pm 6687,2
4. JMI	4144,2	\pm 2180,9	11899,4	\pm 6834,3	11827,6	\pm 6585,7	15699,2	\pm 8683,1
5. AMI	4220,3	\pm 1700,5	20162,5	\pm 9400,7	20358,5	\pm 10239,5	23433,9	\pm 12761,2
6. CM	3328,5	\pm 1409,4	13838,2	\pm 7677,2	15078,9	\pm 6975,2	17568,9	\pm 10138,2
7. TMI	2908,5	\pm 1492,6	12414,6	\pm 7096,5	13314,6	\pm 6714,9	11628,5	\pm 4396,2
8. Marcelino	3162,4	\pm 1638,3	13125,1	\pm 6783,7	13275,7	\pm 6569,9	11765,6	\pm 5570,9
9. ZOI	3086,8	\pm 1504,0	13122,6	\pm 8082,0	16966,0	\pm 11476,6	36302,4	\pm 27516,5
10. Puebla	1287,5	\pm 583,1	5072,7	\pm 2945,0	5773,2	\pm 4562,7	4935,4	\pm 714,7
11. Brasil	3219,4	\pm 1146,4	21561,7	\pm 11469,0	24891,6	\pm 13971,4	24193,4	\pm 15588,1
12. Bra-Oax	1299,7	\pm 711,2	9961,4	\pm 8135,3	14687,3	\pm 13646,9	12605,1	\pm 12200,6
13. C170	8023,7	\pm 2208,0	49095,0	\pm 17096,4	58404,6	\pm 20122,4	49054,5	\pm 20507,4
14. C62	2770,5	\pm 1243,0	15424,1	\pm 8361,8	15074,3	\pm 8709,8	8075,9	\pm 2355,1

En los ecotipos existen diferencias muy marcadas en la formación de hojas y ramas, en la primera medición los ecotipos 13, 1 y 3 las áreas de sus follajes fueron 8000 cm² y 5700 cm² para los ecotipos más grandes y 1290 cm² en los ecotipos 10 y 12 que son los de menor área foliar. Los ecotipos 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11 y 14, el área foliar tuvieron un intervalo de 4200 y 3200 cm².

El mayor incremento se obtuvo en los 2 años posteriores a la plantación de los ecotipos, en los siguientes años el área se mantuvo en las mismas cantidades para la mayoría de los ecotipos, solo el ecotipo 9 mostró un incremento mayor en el último año.

Los incrementos mayores los obtuvieron los ecotipos 13 y 9 de 33 000 y 41 000 cm², en los ecotipos 4, 5, 6, 11 y 12 tuvieron incrementos medios altos de 11 000 a 21 000 cm², los ecotipos 1, 2, 3, 7, 8 y 14 llegaron solo a 4 500 a 8 500 cm². El incremento más bajo lo obtuvo el ecotipo 10 con 3 500 cm².

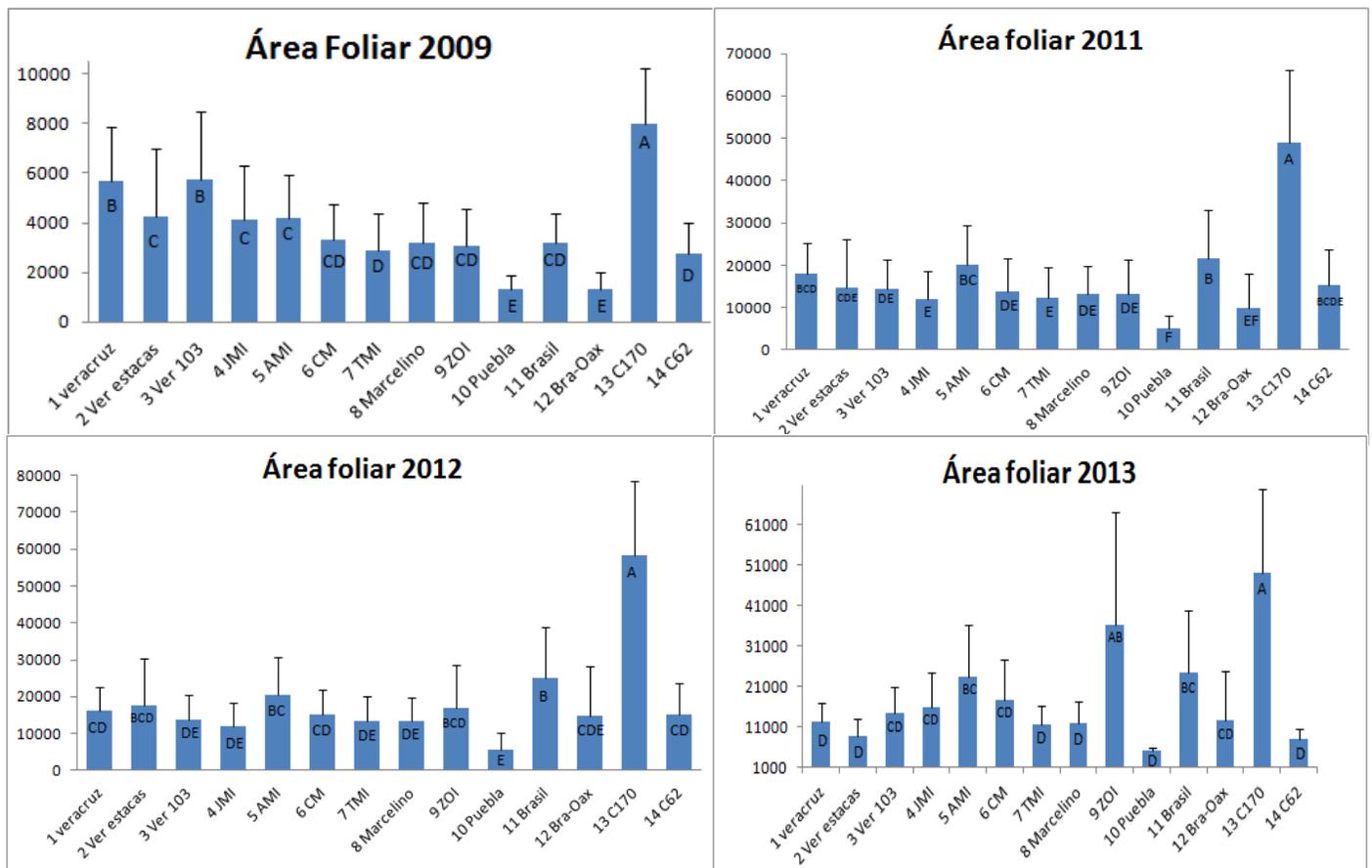


Fig. 4.3 Graficas del historial de crecimiento del parámetro Área foliar.

4.1.1 Comparación de crecimiento entre ecotipos.

El crecimiento en los ecotipos de *Jatropha curcas* en la parcela experimental dadas las condiciones del establecimiento, tienen una tendencia de crecimiento similar entre ellos, solo 2 ecotipos muestran diferencias contrastantes al resto, un ecotipo con crecimiento mayor y el otro con un crecimiento menor.

En las Fig. 4.4, 4.5, y 4.6 se muestran el comparativo de crecimiento entre ecotipos en los parámetros biofísicos monitoreados, Altura total, Diámetro en la base, y Área foliar respectivamente.

Los ecotipos con mayor altura es el ecotipo 13 con 264 cm y con menor altura el ecotipo 10 con 122 cm, los cuales mostraron esa tendencia de crecimiento desde el establecimiento de la plantación.

Los intervalos de altura total de la mayoría de los ecotipos son de 146 a 176 cm.

El ecotipo 12 que en un inicio mostraba una baja altura, creció a los intervalos de altura media. El ecotipo 10 que en un inicio se encontraba a los intervalos de baja altura, obtuvo una altura mayor que el promedio con 193 cm.

Los ecotipos más altos son los ecotipos 13 y 11; el ecotipo más bajo es el 10.

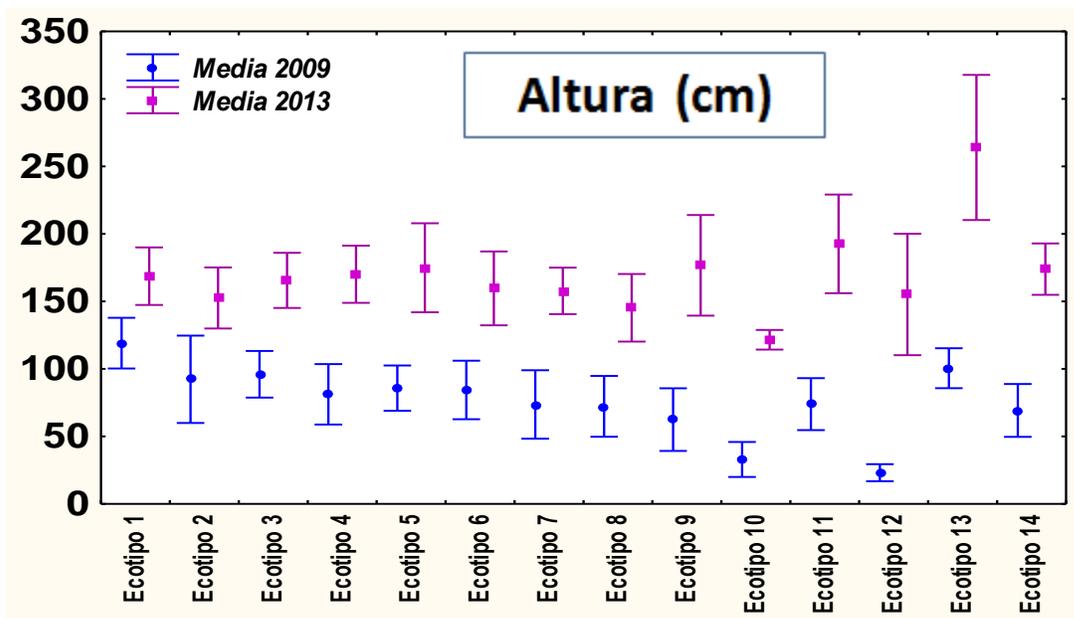


Fig. 4.4 Gráfica de comparación de crecimiento en Altura total

Los ecotipos mostraron la misma tendencia de crecimiento en el diámetro del tallo desde el plantación, siendo el 13 y 1 los de mayores tamaños de tallo y los ecotipos 10 y 12 los de menores tamaños de tallos. Aunque posteriormente, los ecotipos 1 y 12 obtuvieron un crecimiento similar al resto de los ecotipos.

Los ecotipos con tallos más gruesos son el 13 con 15.6 cm de diámetro, 9 y 11 con 11.4 cm de diámetro, mientras que el ecotipo 2 y 10 tiene tallos más delgados que miden 6.8 y 7.2 cm de diámetro respectivamente.

El diámetro de tallo medio entre los ecotipos es de 8.4 a 10 cm.

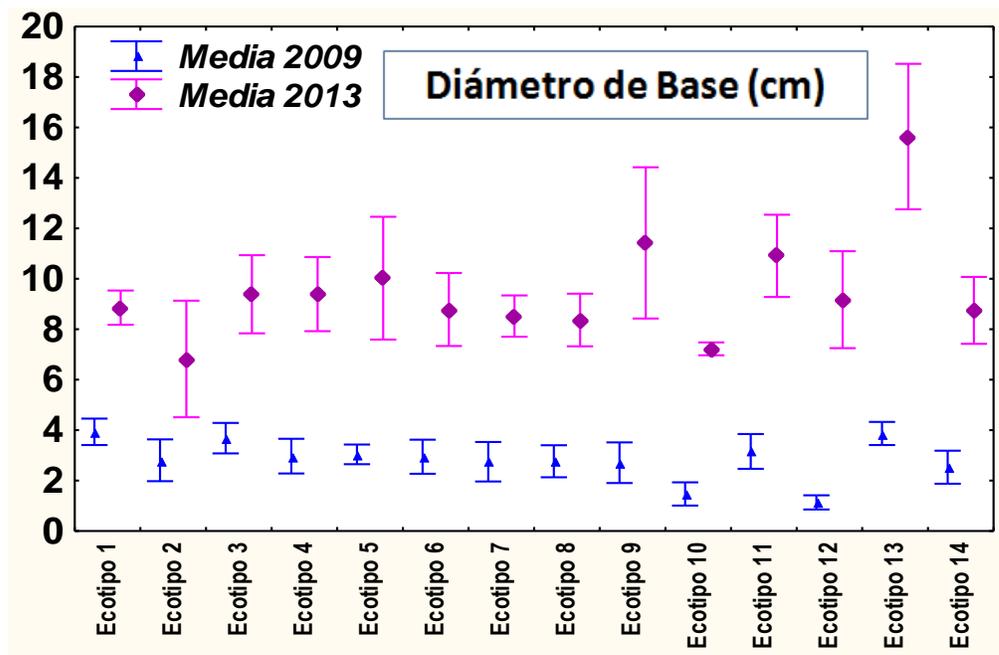


Fig. 4.5 Gráfica de comparación de crecimiento en Diámetro del tallo.

El área foliar es variable entre los ecotipos, el ecotipo 13 también mostró un crecimiento mayor en su área foliar con 49 000 cm² muy superior al área foliar del resto, los ecotipos 9, 11 y 5, también muestran un área foliar medianamente alta entre 23 000 y 36 000 cm², el área foliar de los ecotipos 6,4,3,12,1,8 y 7 esta entre 17 500 y 11 000 cm². Los ecotipos con menores áreas foliares son los ecotipos 2,14, y 10 de 4900 a 8700 cm².

Los ecotipos con mejor adaptación a las condiciones medioambientales del sitio de la parcela experimental y las condiciones de cultivo en el escenario de temporal son los 13, 9, 11 y 5, los que muestran un mayor crecimiento en cada

uno de los parámetros biofísicos monitoreados por lo que también tienen una mayor generación de biomasa al resto de los ecotipos.

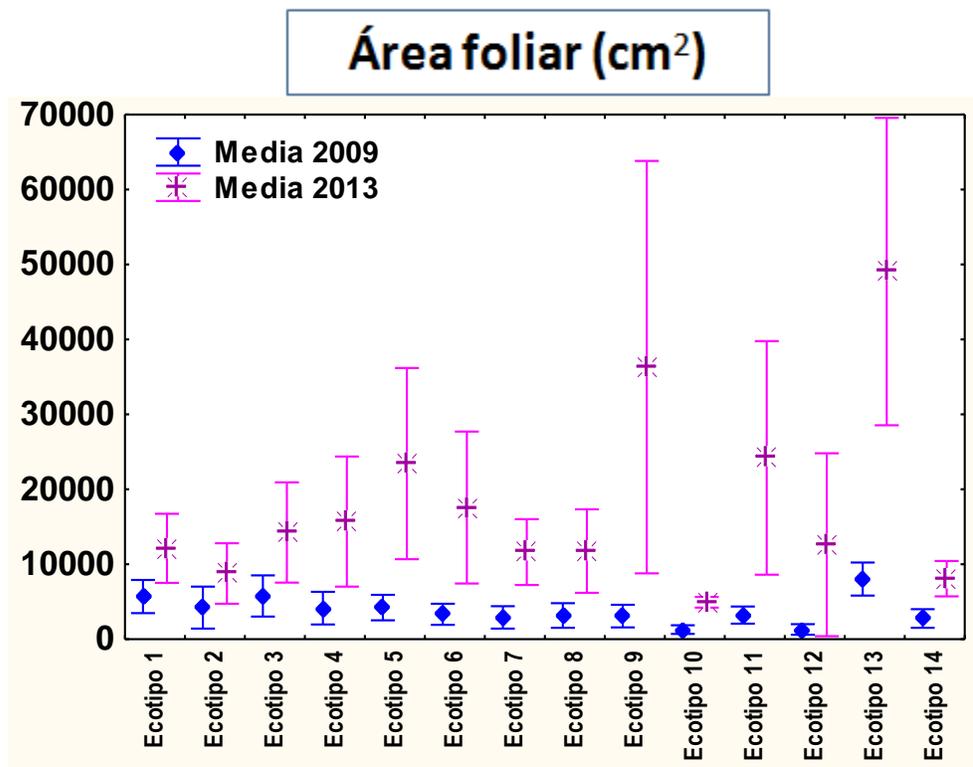


Fig. 4.6 Gráfica de comparación de crecimiento en Área foliar.

4.2 Supervivencia de los ecotipos en la parcela experimental.

En la fig. 4.7 presenta los resultados del análisis de supervivencia de los ecotipos a lo largo del estudio.

A los cuatro meses posteriores a la plantación, los ecotipos 1, 4, 6, 11 y 13 mantuvieron una supervivencia del 100%, mientras que la mitad de los ecotipos tuvieron una supervivencia del 91 al 97%. Las supervivencias menores se presentaron en los ecotipos 7 y 9 con 87% y 83% respectivamente.

En los siguientes 2 años solo los ecotipos 6 y 13 mantuvieron su población total con el 100% de supervivencia; los ecotipos 3, 11, 14, 4 y 5 presentaron mortalidad del 3 al 7 % del total de plantas establecidas, en los ecotipos 12, 1, 8, 7 y 2 la supervivencia fue del 80 al 88%; los ecotipos que presentaron menor supervivencia son 9 y 10 con 70 y 79% respectivamente.

Para el tercer año de análisis, el ecotipo 13 mostró mayor supervivencia con 100% y el ecotipo 10 con menor supervivencia mostrando solo el 50%. Los ecotipos 7, 12, 9 y 10 tuvieron una mortandad adicional al año anterior del 11 al 18%. Para la mitad de los ecotipos la mortandad adicional es del 2 al 9%.

En el último año de análisis solo el ecotipo 13 mantuvo la supervivencia del 100% y los ecotipos 3 y 6 un porcentaje mayor al 90%; los ecotipos 5, 11, 4 y 14, su supervivencia bajo del 90% al 82-89%. Los ecotipos 8, 1, 7, 12, 9 quedaron en una supervivencia del 64 al 75%. Los ecotipos con menores tasa de supervivencia continuaron siendo los ecotipos 2 y 10 con una reducción adicional del 10 y 18% respectivamente.

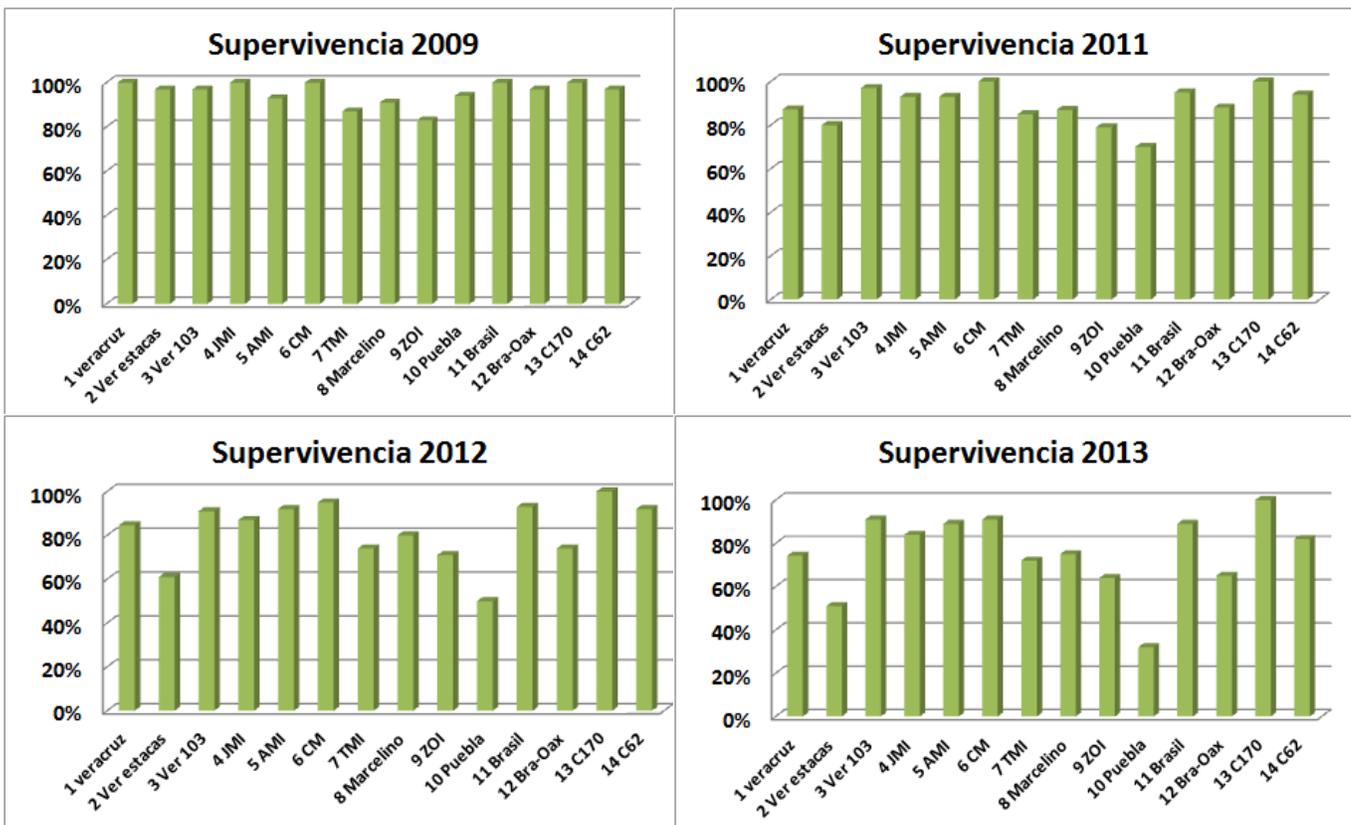


Fig. 4.7 Historial de supervivencia de los ecotipos en las condiciones del sitio experimental.

4.2.1 Comparación de supervivencia entre ecotipos.

En la tabla 4.4 se muestran los porcentajes de supervivencia al último año de análisis con respecto al total de individuos establecidos.

Tabla 4.4 Tasas de Supervivencia de los ecotipos.

Ecotipo	No. Inicial de individuos	No. de individuos en 2013	% de supervivencia
1. Veracruz	78	55	74
2. Veracruz - Estacas	74	38	51
3. Veracruz 103	68	62	91
4. JMI	69	58	84
5. AMI	64	57	89
6. CM	62	57	92
7. TMI	62	45	73
8. Marcelino	57	43	75
9. ZOI	53	34	64
10. Puebla	50	16	32
11. Brasil	46	41	89
12. Bra-Oax	43	28	65
13. C170	39	39	100
14. C62	39	32	82

El ecotipo 13 mostro una mayor adaptabilidad y supervivencia a las condiciones del sitio experimental, obteniendo el mayor crecimiento en el escenario de temporal y conservando el 100% del total de su población en los cuatro años de estudio, los ecotipos que le proceden son el 5 y 11, los cuales también se encuentran entre los ecotipos con mayor crecimiento y supervivencias entre el 89 y 91 %, teniendo una pérdida del 4 y 10% respectivamente desde el análisis inicial.

Los ecotipos 3, 6 y 11 también mostraron una baja mortandad en sus poblaciones con el 6, 9 y 11%, sin embargo sus crecimientos registrados se encuentran entre los ecotipos medios.

Los ecotipos con supervivencia media registraron tasa de pérdidas del 15 al 32% de sus poblaciones.

Los ecotipos menos aptos para las condiciones medioambientales de ésta regiones son los ecotipos 10 y 2.

El ecotipo10 tiene una pérdida de su población del 68% y el menor crecimiento en el escenario de temporal.

El ecotipo 2 tuvo una pérdida casi del 50% de su población y su crecimiento fue el segundo más bajo.

En la fig. 4.8 se muestra la comparación de supervivencia de los ecotipos desde el establecimiento de la plantación al último año de análisis.

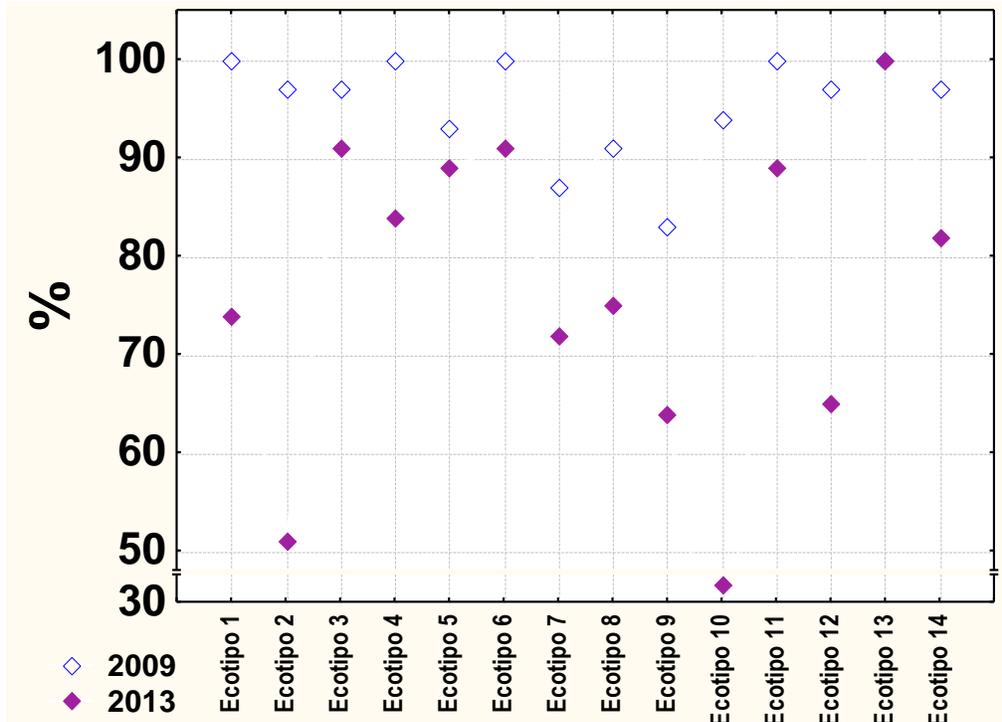


Fig. 4.8 Comparación de supervivencia entre ecotipos.

4.2.2 Principales afectaciones a las plantas de *Jatropha curcas* en la parcela experimental.

Las causas de las tasa de supervivencias se dieron por varias afectaciones que se presentaron en diferentes proporciones en los ecotipos y en distinto momento.

Estas afectaciones se presentan en la fig. 4.9 y describe el porcentaje del total de los individuos que fueron afectados por las diferentes causas.

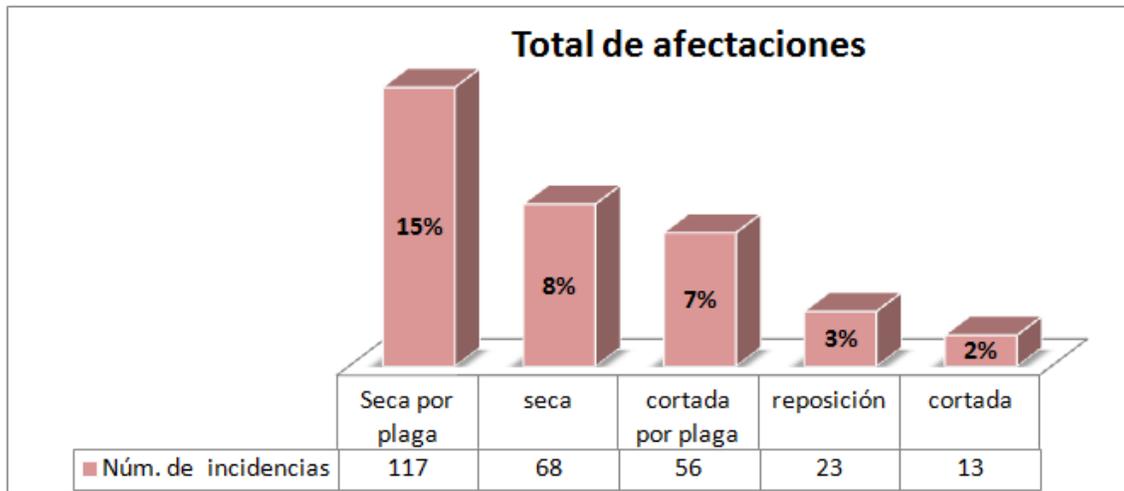


Fig. 4.9 Principales afectaciones en los ecotipos de *Jatropha curcas*.

La mayoría de las afectaciones fueron causadas por la presencia de plaga.

Ésta plaga es un insecto llamado Barrenador, el cual dañó al 22 % del total de individuos sembrados. De los cuales 117 individuos tuvieron una pérdida total de la planta y en 56 individuos solo causó el corte de sus ramas y partes dañadas.

El Barrenador es una plaga que naturalmente ataca los cultivos de caña, de este modo la plaga de los cultivos de caña que se encuentran en los alrededores del lugar, se trasladó a la parcela experimental.

Los individuos que se secaron por no adaptarse a las condiciones del sitio fueron en total 68 que representan el 8% del total de los individuos plantados. En la Fig. 4.13 muestra la presencia de estas afectaciones a través de los 4 años de análisis, en el cual se observa que la mayor cantidad de plantas que se secaron fue en 2012. El año 2012 es el año en que se presentaron el mayor número de afectaciones.

Los individuos cortados y con reposición son representados el 2 y 3% respectivamente del total, de los cuales las reposiciones son mayores en el 2009 año del establecimiento y cortada en 2011. Al lograr controlar ambas afectaciones en el 2012 se presentaron pocas incidencias y en el último año de estudio no se presentó más.

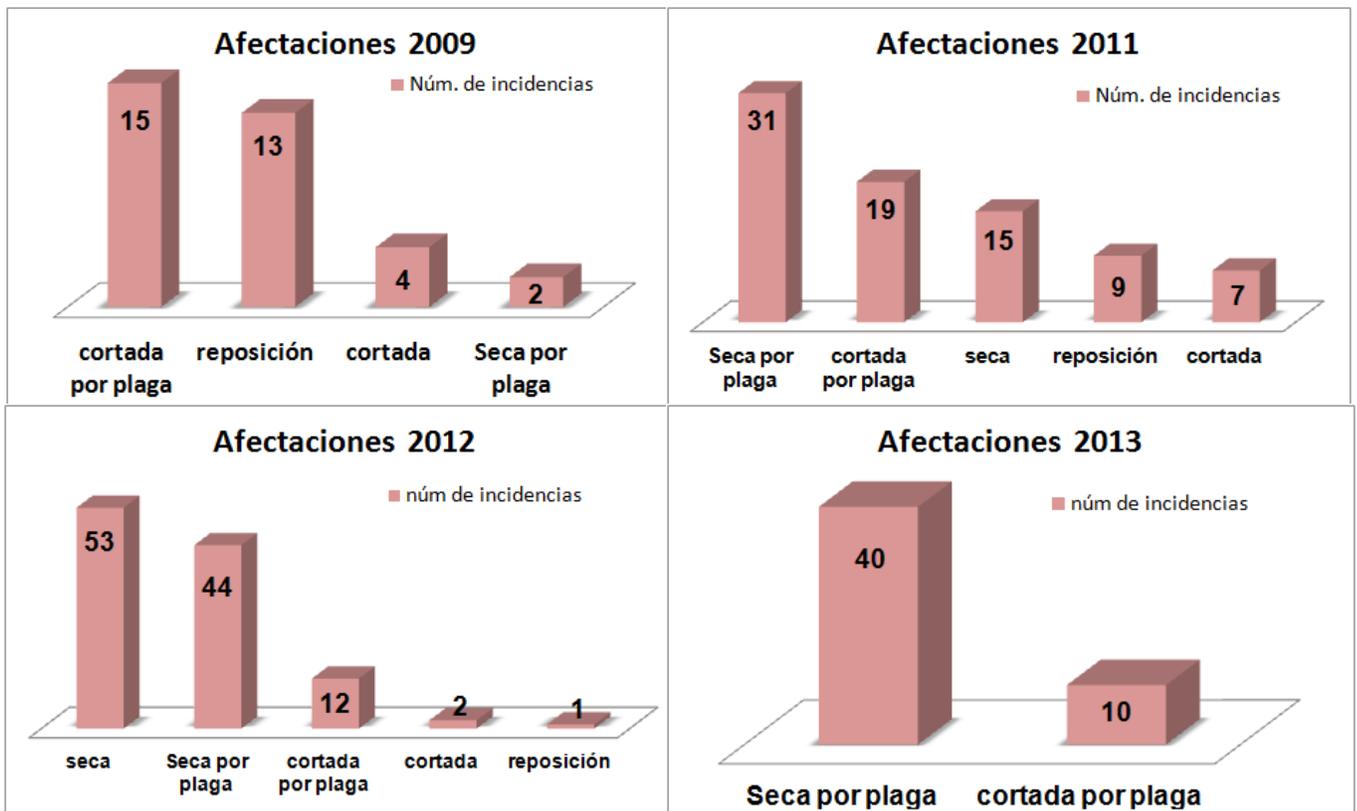


Fig. 4.10 Historial de afectaciones a los individuos de *Jatropha curcas*.

4.3 Producción de semillas

En la tabla 4.5 se reportan las cantidades de semillas por ecotipo que se obtuvieron en la parcela experimental y las cantidades de semillas que se obtendrían por hectárea.

En los ecotipos 1, 2, 3 y 10 no se realizó correctamente la recolección de semillas por debido a un error de logística en el momento de la cosecha, por tal motivo no se reportan sus resultados.

La Producción de semillas que se obtuvo es variable entre ecotipos, como se puede observar en la fig. 4.11 el ecotipo 12 es el que tienen mayor con una producción con 140 kg/ha muy por arriba de los ecotipos 6 y 7 que le proceden con 82 y 83 kg por hectárea.

Tabla 4.5 Producción de semillas de la primera cosecha en 2013.

Ecotipo	Producción de semillas (g)	Producción de semillas Escenario temporal (Kg/ha)
4. JMI	1051,5	61,1
5. AMI	806,1	54,5
6. CM	1483,1	82,4
7. TMI	269,1	88,8
8. Marcelino	679,0	62,9
9. ZOI	555,6	69,4
11. Brasil	432,4	34,9
12. Bra-Oax	507,3	140,1
13. C170	41,7	1,7
14. C62	261,5	32,6

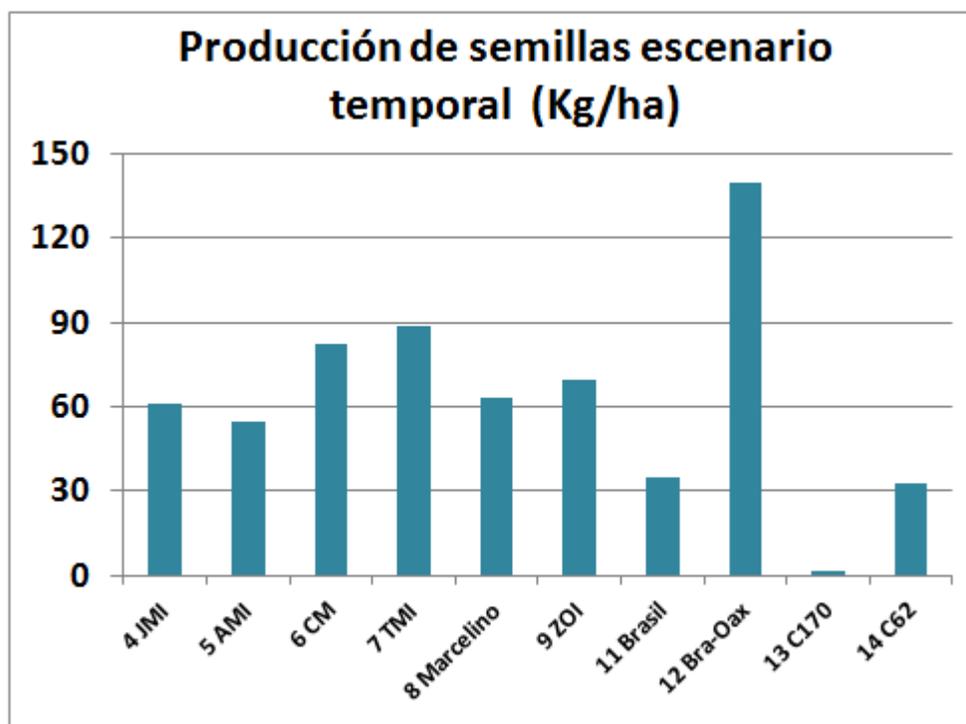


Fig. 4.11 Productividad de semillas de los ecotipos en la parcela experimental.

Los ecotipos 4,8 y 9, tuvieron una producción de 61 a 69 kg/ha

El ecotipo 13 tuvo la producción de semillas más baja, a pesar de que tiene mayor área foliar.

Sin embargo estas primeras productividades están muy por debajo de las productividades colectadas en la literatura, que van desde 572 a 421 kg/ha en condiciones de temporal (Felix, J. G. 2014) y de 1695 a 5000 Kg/ha en donde plantaciones existe un manejo de la plantación con riego, fertilizantes y otras prácticas de cultivo (Achten et al., 2010; Kaewcharoensombat et al., 2011; Pandey et al., 2011, Wang et al., 2011; Hou et al., 2011, Xunmin et al., 2009, y Prueksakorn et al. 2006).

4.4 Rendimiento en extracción de aceite

La Tabla 4.6 muestra los porcentajes de aceite obtenidos.

Las semillas del ecotipo 6 mostraron tener la mayor cantidad de aceite con 24%, le suceden los ecotipos 4, 8 y 9 con el 22% de contenido de aceite.

Los ecotipos 7 y 12 tienen rendimientos de 21 y 20% respectivamente, mientras que los ecotipos con bajos rendimientos son los ecotipos 5, 13 con 18% y el ecotipo 14 con 16%.

El ecotipo 11 mostró tener el menor contenido de aceite con solo el 13% .

Tabla 4.6 Rendimientos de extracción de aceite

Escenario de producción de Temporal					
Ecotipos	Núm. de muestras	cantidad por muestra (g)			Rendimiento de extracción %
		semillas	aceite	pasta residual	
4. JMI	3	270	60	202	22
5. AMI	3	250	47	196	18
6. CM	3	280	66	214	24
7. TMI	3	250	53	190	21
8. Marcelino	3	250	54	187	22
9. ZOI	3	250	53	189	22
11. Brasil	3	250	33	210	13
12. Bra-Oax	3	250	50	190	20
13. C170	3	250	45	195	18
14. C62	3	250	41	204	16

Los rendimientos de extracción obtenidos se encuentran dentro de los intervalos de extracción de aceite reportados en literatura que van desde 16 al 27% (Achten et al., 2008; Almeida et al., 2011; Gmünder et al., 2010; Prueksakorn et al. 2006; Kaewcharoensombat et al., 2011; Achten et al., 2010).

4.5 Rendimientos de las reacciones de transesterificación

Las tablas 4.7 y 4.8 reportan las cantidades de biodiesel y glicerina obtenidas de las reacciones de transesterificación por cada concentración de catalizador.

Se realizaron 3 pruebas por cada ecotipo. La prueba 1 es la que corresponde al aceite de *Jatropha curcas* en el escenario de temporal, debido que la cantidad de aceite no fue suficiente para realizar las 3 pruebas.

En las pruebas 2 y 3 se utilizó aceite de los mismos ecotipos pero en el escenario de riego con el fin de completar una muestra representativa para poder evaluar las reacciones de transesterificación.

Tabla 4.7 Cantidades de obtenidas de las reacciones de transesterificación con la concentración de catalizador de 80% de exceso de Metanol y 1% de NaOH.

Transesterificación de concentración 80% de exceso de metanol y 1% de NaOH

Ecotipo	Núm. de pruebas	Biodiesel		Glicerina (g)	Densidad de aceite (g/ml)
		(g)	(ml)		
Ecotipo 4. JMI	prueba 1	27,6	34,0	9,0	0,91
	prueba 2	28,5	33,6	5,2	0,91
	prueba 3	28,3	33,5	5,2	0,91
Ecotipo 5. AMI	prueba 1	29,6	37,0	4,8	0,91
	prueba 2	27,8	32,0	5,1	0,91
	prueba 3	28,5	33,0	5,0	0,91
Ecotipo 6. CM	prueba 1	28,0	32,8	5,4	0,91
	prueba 2	27,0	31,5	5,4	0,91
	prueba 3	28,7	33,9	5,2	0,91
Ecotipo 11. Brasil	prueba 1	27,0	31,0	7,0	0,91
	prueba 2	28,7	33,6	6,1	0,91
	prueba 3	27,4	32,0	5,4	0,91
Ecotipo 12. Bra-Oax	prueba 1	27,5	34,0	6,3	0,91
	prueba 2	27,6	34,0	5,4	0,91
	prueba 3	27,4	32,0	5,4	0,91

Tabla 4.8 Cantidades de obtenidas de las reacciones de transesterificación con la concentración de catalizador de 60% de exceso de Metanol y 0.4% de NaOH.

Transesterificación de concentración 60% de exceso de metanol y 0.4% de NaOH

Ecotipo	Núm. de pruebas	Biodiesel		Glicerina (g)	Densidad de aceite (g/ml)
		(g)	(ml)		
Ecotipo 4. JMI	prueba 1	29,5	34,6	3,9	0,91
	prueba 2	29,2	34,0	3,7	0,91
	prueba 3	29,5	34,5	3,6	0,91
Ecotipo 5. AMI	prueba 1	29,9	35,0	3,9	0,91
	prueba 2	29,8	34,9	2,9	0,91
	prueba 3	29,8	34,8	3,5	0,91
Ecotipo 6. CM	prueba 1	29,6	34,5	4,3	0,91
	prueba 2	29,6	34,6	3,4	0,91
	prueba 3	29,8	35,0	3,5	0,91
Ecotipo 8. Marcelino	prueba 1	27,5	24,2	4,6	0,91
	prueba 2	27,6	24,8	4,9	0,91
	prueba 3	27,9	24,5	4,6	0,91
Ecotipo 9. ZOI	prueba 1	24,2	21,8	6,4	0,91
	prueba 2	27,5	25,0	5,2	0,91
	prueba 3	27,7	24,1	4,7	0,91
Ecotipo 11. Brasil	prueba 1	29,5	38,0	4,8	0,91
	prueba 2	29,5	34,5	4,1	0,91
	prueba 3	29,6	34,6	4,0	0,91
Ecotipo 12. Bra-Oax	prueba 1	29,7	38,0	4,2	0,91
	prueba 2	29,4	34,0	4,0	0,91
	prueba 3	29,6	36,0	4,5	0,91
Ecotipo 13. C170	prueba 1	29,0	25,8	3,7	0,91
	prueba 2	27,4	24,4	4,9	0,91
	prueba 3	27,4	24,1	4,6	0,91
Ecotipo 14. C62	prueba 1	27,7	24,7	4,0	0,91
	prueba 2	28,3	24,9	3,9	0,91
	prueba 3	28,0	24,9	4,3	0,91

Las reacciones de transesterificación mostraron eficiencias diferentes entre concentraciones de catalizador, en la tabla 4.9 muestras los porcentajes de eficiencia del proceso de transesterificación para cada una de las concentraciones.

Tabla 4.9 Eficiencias de las reacciones de transesterificación por concentración de catalizador.

Eficiencia de la reacción de transesterificación		
Ecotipo	concentración de catalizador Metanol-NaOH	
	80% de exceso y 1%	60% de exceso y 0.4%
4. JMI	77%	83%
5. AMI	79%	84%
6. CM	77%	84%
11. Brasil	76%	84%
12. Bra-Oax	76%	84%

Las reacciones de transesterificación con 60% de exceso de Metanol y 0.4% de NaOH mostraron eficiencias en la reacción de 83 y 84%, de 5 a 8% mayor que las reacciones con el 80% de exceso de metanol y 1% NaOH las cuales tienen eficiencias del 76 al 79% .

En consecuencia, en las reacciones con concentraciones de 80% de exceso de Metanol y 1% de NaOH hay una mayor formación de glicerina del 16.6% al 20.6% , mientras que en las reacciones con 60% de exceso de Metanol y 0.4 NaOH la formación es de 11.4 a 14.3 %.

En la tabla 4.10 que en el ecotipo 12 es donde hay una mayor formación de glicerina seguido por en ecotipo 11 con ambas cantidades de catalizador y el ecotipo presenta menor formación de glicerina en las reacciones de transesterificación con ambas concentraciones de catalizador.

Tabla 4.10 Formación de glicerina en las reacciones de transesterificación.

Formación de glicerina en la reacción de transesterificación		
Ecotipo	concentración de catalizador Metanol-NaOH	
	80% de exceso y 1%	60% de exceso y 0.4%
4. JMI	17,3%	12,4%
5. AMI	16,6%	11,4%
6. CM	17,7%	12,4%
11. Brasil	20,6%	14,3%
12. Bra-Oax	19,2%	14,1%

En la tabla 4.11 los porcentajes de la conversión de aceite a biodiesel de acuerdo a la concentración de catalizador utilizada.

Las eficiencias en la conversión de aceite a biodiesel son de 98 a 98.9 % para las concentraciones de 60% de exceso de Metanol y 0.4% de NaOH, mostrando las conversiones más altas en los ecotipos 5 y 6, siendo el más bajo el ecotipo 4, los

cuales aumentaron 3.5, 5.9 y 4.2% con respecto a las reacciones de 80% de exceso de Metanol y 1% de NaOH en las cuales sus porcentajes de conversión fueron 95.4, 93. y 93.8% respectivamente.

En lo ecotipos 11 y 12 el aumento en la conversión de aceite a biodiesel de las reacciones con concentración de 80% de exceso y 1% NaOH a la concentración de 60% exceso de metanol y 0.4% NaOH fue de 6 y 6.2 % respectivamente. La fig. 4.12 es una grafica de comparación en las eficiencias de conversión de aceite a biodiesel por ecotipo, por tanto en la conversión de aceite a biodiesel es mayor en las reacciones con menor cantidad de Metanol-NaOH.

Tabla 4.11 Conversión de aceite a biodiesel por concentración de catalizador.

Eficiencia en la Conversión de aceite a biodiesel		
Ecotipo	concentración de catalizador Metanol-NaOH	
	80% de exceso y 1%	60% de exceso y 0.4%
4. JMI	93,8%	98,0%
5. AMI	95,4%	98,9%
6. CM	93,0%	98,9%
11. Brasil	92,4%	98,4%
12. Bra-Oax	92,2%	98,6%

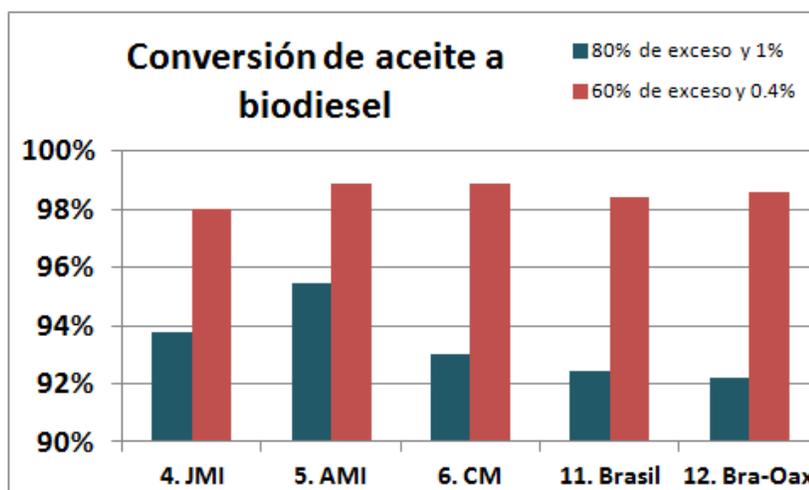


Fig. 4.12 Conversión de aceite a biodiesel por concentración de catalizador.

Al demostrar que con las reacciones de transesterificación con la concentración de catalizador de 60% exceso de metanol y 0.4% de NaOH se obtuvieron mejores resultados, la conversión de aceite a biodiesel para el resto de los ecotipos se realizaron con la misma concentración de catalizador. Por tal motivo en la tabla 4.8

se muestran los resultados de las reacciones de transesterificación del resto de los ecotipos, 8, 9, 13 y 14.

4.6 Pruebas de calidad.

Los resultados de las pruebas de calidad realizadas al biodiesel obtenido se muestran en la tabla 4.12, donde se describen los parámetros de las propiedades que se obtuvieron en cada prueba.

Tabla 4.12 Resultado de las pruebas de calidad del biodiesel obtenido con la concentración de catalizador de 60% exceso de Metanol y 0.4% de NaOH.

Transesterificación de concentración 60 % de exceso de metanol y 0.4 % de NaOH

Ecotipo	Núm. de pruebas	Densidad de biodiesel (g/ml)	Punto de inflamación (°C)	Índice de acidez (mg KOH/gmuestra)	viscosidad cinemática (mm ² /s)
Ecotipo 4. JMI	prueba 1	0,87	165	0,0	2,1
	prueba 2	0,87	168	0,0	6,7
	prueba 3	0,87	138	0,0	6,9
Ecotipo 5. AMI	prueba 1	0,86	138	0,0	3,0
	prueba 2	0,87	152	0,0	2,3
	prueba 3	0,87	110	0,0	6,7
Ecotipo 6. CM	prueba 1	0,87	161	0,0	7,1
	prueba 2	0,87	183	0,0	6,7
	prueba 3	0,87	190	0,0	5,9
Ecotipo 8. Marcelino	prueba 1	0,88	135	0,0	6,9
	prueba 2	0,9	137	0,0	5,1
	prueba 3	0,88	146	0,0	6,0
Ecotipo 9. ZOI	prueba 1	0,9	157	0,0	9,8
	prueba 2	0,91	162	0,0	10,4
	prueba 3	0,87	142	0,0	6,7
Ecotipo 11. Brasil	prueba 1	0,85	138	0,0	4,4
	prueba 2	0,86	163	0,0	1,3
	prueba 3	0,87	162	0,0	6,5
Ecotipo 12. Bra-Oax	prueba 1	0,88	110	0,0	4,0
	prueba 2	0,88	150	0,0	2,6
	prueba 3	0,9	145	0,0	1,1
Ecotipo 13. C170	prueba 1	0,89	172	0,0	4,7
	prueba 2	0,89	140	0,0	6,7
	prueba 3	0,88	133	0,0	6,0
Ecotipo 14. C62	prueba 1	0,89	144	0,0	5,0
	prueba 2	0,88	115	0,0	4,2
	prueba 3	0,89	143	0,0	4,2

Las pruebas de calidad realizadas al biodiesel obtenido utilizando el aceite de las semillas de 9 ecotipos, solo 5 de los ecotipos mostraron estar dentro de las especificaciones que la norma ASTM marca para poder denominarse biodiesel.

En las figuras 4.13, 4.14 y 4.15 se presentan los ecotipos que cumplen con los valores para las propiedades del biodiesel.

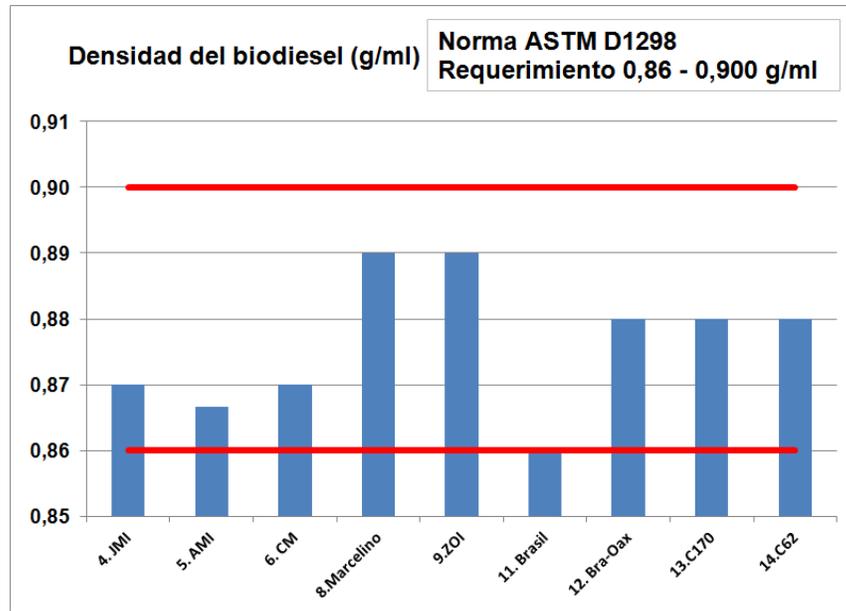


Fig. 4.13 Densidad del biodiesel

En la prueba de densidad del biodiesel, el biodiesel obtenido del aceite de los ecotipos analizados, todos cumplen con la especificación de tener un densidad entre el intervalo de 0.86 y 0.90 g/ml.

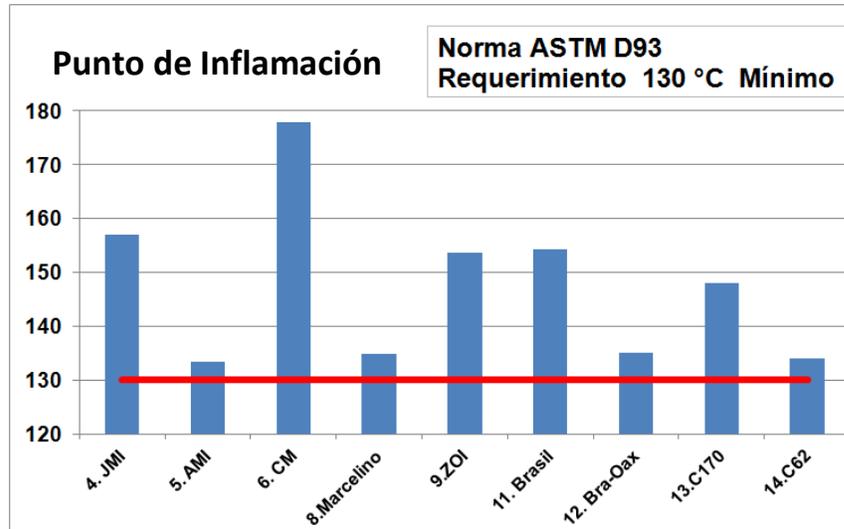
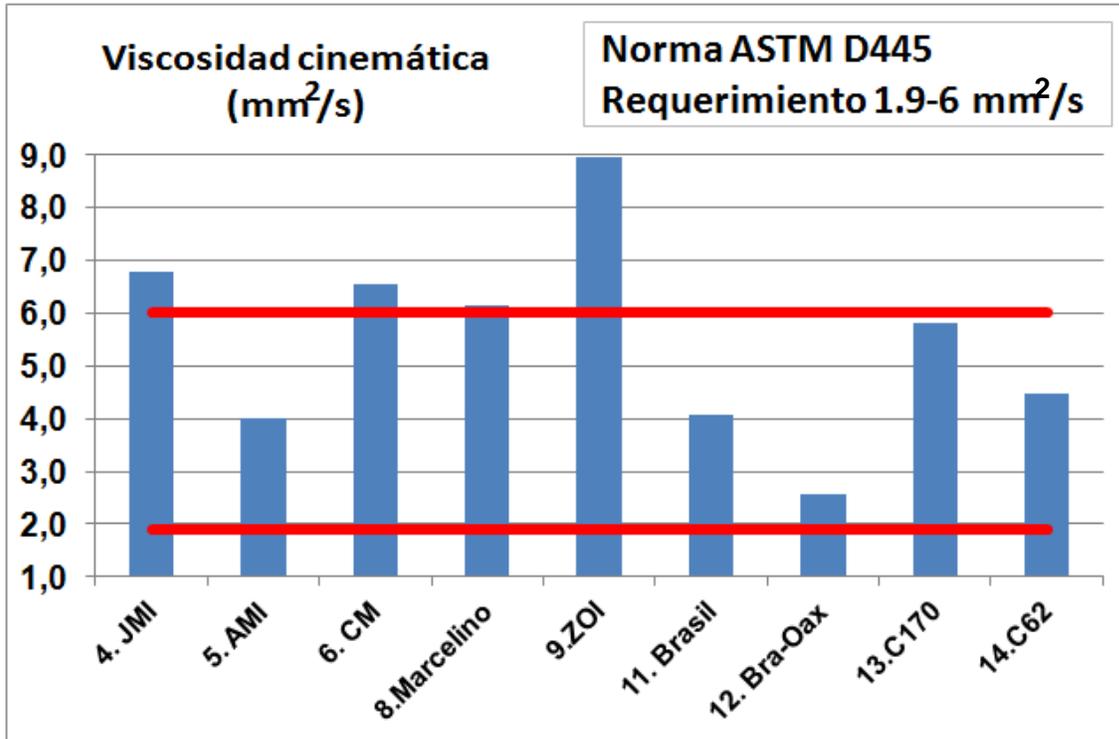


Fig. 4.14 Punto de inflamación.

En la propiedad de punto de inflamación, también todos los ecotipos analizados cumplen con el requerimiento, el cual es 130 °C mínimo.

En la propiedad de índice de acidez, en donde el mínimo es 0.8 gr KOH/gr muestra, todas las pruebas mostraron 0 gr KOH/gr de muestra.

Por último en la propiedad de viscosidad cinemática, los intervalos aceptables para la norma son de 1.9 a 6 mm²/s, solo los ecotipos 5, 11, 12, 13 y 14 se encuentran en ese rango, los ecotipos 4,7,8 y 9 están por encima del máximo.



4.15 Viscosidad cinemática.

4.7 Toxicidad

Los resultados de las pruebas de calidad se muestran en la tabla 4.13.

De acuerdo al análisis de toxicidad realizado a los ecotipos 1, 9, 11, 12, y 13 son tóxicos ya que mostraron un contenido de 110.7, 1495.2, 888.8, 1262.56, 599.3 partes por millón de esteres de forbol respectivamente, siendo los ecotipos 9 y 11 con mayor contenido de esteres de forbol.

Los ecotipos no toxicos son los ecotipos 4, 5, 6, 7, 8, 10 y 14, debido a que su contenido de esteres de forbol es nulo.

Tabla 4.13 Resultados de los análisis de toxicidad.

Ecotipo	Concentración de esteres de forbol (ppm)
1. Veracruz	110,7
4. JMI	0,0
5. AMI	0,0
6. CM	0,0
7. TMI	0,0
8. Marcelino	0,0
9. ZOI	1495,2
10. Puebla	0,0
11. Brasil	888,8
12. Bra-Oax	1262.56
13. C170	599,3
14. C62	0,0

Conclusiones.

Los resultados de las evaluaciones a los ecotipos de *Jatropha curcas* realizadas al la plantación experimental en Miacatlán Morelos con respecto al crecimiento de las plantas, indica que el ecotipo 13 tiene el mayor crecimiento

En la evaluación de supervivencia, también el ecotipo 13 conservó su población total desde el inicio de la plantación hasta el último año de análisis al no presentar ninguna de las afectaciones que se dieron en la parcela experimental.

En consecuencia el ecotipo 13 es el que mejor se adapta a las condiciones medioambientales del sitio y tiene una mayor generación de biomasa, sin embargo, la productividad de semillas es la más baja y su contenido de aceite también es bajo del 18%. Además el ecotipo 13 es tóxico.

El ecotipo 12 aunque no desarrolló alta producción de biomasa, pues su altura media es de 155 cm y 12 605 cm² de área foliar, su producción de semillas es la más alta de los ecotipos con la productividad de semillas de 140 kg/ha. Sin embargo su contenido de aceite es bajo de solamente 20% y supervivencia del 65%. También es un ecotipo tóxico.

El mayor rendimiento de extracción de aceite lo obtuvo el ecotipo 6 con 24%, su producción de semillas es la tercera más alta de 82.3 kg/ha. Su crecimiento es medio con altura de 159 cm y 17 568 cm² de área foliar y su supervivencia es alta de 92%. Es un ecotipo libre de esteres de forbol, por lo que se trata de un ecotipo no toxico.

El ecotipo 11 es el tercer ecotipo más grande con altura de 192.6 cm, diámetro área foliar de 24 193 cm² en el escenario temporal y supervivencia de 89%, sin embargo su producción de semillas es baja de 34.9 kg/ha y contenido de aceite es el más bajo de solamente 13%. Es un ecotipo que presenta toxicidad.

Los ecotipos 4, 5, 7, 8 y 14 son no toxico, su crecimiento es medio con altura de 145 cm a 174 cm, área foliar 8 000 cm² y 15 00 cm², supervivencia entre 79 y 85%.

La productividad de semillas entre de estos ecotipos se encuentra entre 69 y 32 kg/ha. el ecotipo 7 sobresale con la productividad de 88 kg/ha.

Los rendimiento de extracción de aceite en los ecotipos 5, 7, y 8 de 21 y 22% en lo ecotipos. Los ecotipos 5 y 14 tienen los rendimientos de extracción de aceite más bajos de 18% y 13% respectivamente.

Las reacciones de transesterificación con la concentración de 60% de exceso de Metanol a la cantidad estequiométricamente necesaria y 0.4% de NaOH como catalizador, tiene una mayor eficiencia en la conversión de aceite a biodiesel y una menor formación de glicerina.

Los rendimientos de conversión de aceite a biodiesel es de 98 al 99% para todos los ecotipos.

Las cuatro pruebas de calidad bajo la Norma ASTM se realizaron al biodiesel obtenido del aceite de los ecotipos y únicamente los ecotipo 5, 11,12, 13 y 14 están dentro de los parámetros que marca la norma.

En las propiedades de Densidad de biodiesel, Punto de inflamación e índice de acidez todos los ecotipos se encuentran dentro de los parámetros de calidad.

En la propiedad de Viscosidad cinemática los ecotipos 4, 6 y 9 no cumplen con la especificación.

Aunque estas pruebas nos dan indicios de la buena calidad del biodiesel obtenido de estos ecotipos, es necesario realizar todas las pruebas de calidad que marca la norma ASTM para el biodiesel.

Finalmente, el ecotipo 12 tienen los mayores beneficios al ser usado como materia prima en la producción de biodiesel.

Sin embargo, es un ecotipo tóxico lo cual representa un problema para el aprovechamiento, ya que se tendrían que realizar una serie de procesos para poder obtener un valor agregado de sus residuos, tal como la pasta residual.

Los ecotipo 4, 5, 6, 7 y 8 al ser no tóxico se puede aprovechar de mejor forma sus subproductos, por lo tanto es el ecotipo apto para su producción y uso sustentable en la producción del biodiesel.

Esta tesis permite reconocer algunas de las evaluaciones que se deben realizar para analizar la sustentabilidad de plantaciones energéticas de *Jatropha curcas* una como materia prima sustentable en la producción de biodiesel.

Se destaca que posteriormente se continuará con la obtención de más datos del escenario de producción temporal sobre la productividad de las semillas y su contenido de aceite, reacciones de transesterificación, así como completar las pruebas de calidad del biodiesel bajo la Norma ASTM.

Adicionalmente se desarrollará investigación sobre el comportamiento de los ecotipos de *Jatropha curcas* bajo un escenario de riego, del aprovechamiento de los subproductos y co-productos de la *Jatropha curcas* en el proceso de producción de biodiesel.

De esta manera aportará mayor información para determinar si la producción de biodiesel a partir de *Jatropha curcas* es sustentable.

Anexo A. Cálculos de las cantidades de catalizador para llevar a cabo las reacciones de transesterificación.

Para llevar a cabo las reacciones de transesterificación que se muestra en la fig.3.5, se realizaron los siguientes cálculos para obtener las cantidades necesarias de Hidróxido de sodio y Metanol.

Se utilizan 30 g aceite de semillas *Jatropha curcas* por ecotipo.

Las propiedades del aceite utilizado son.

$$\rho = 0.91 \text{ g/ml.}$$

Masa molecular promedio de triglicéridos = 861 g/mol.

Propiedades del metanol

$$\rho=0.79 \text{ g/ml.}$$

Peso molecular= 32 g/mol.

1. Concentración de 80% de exceso de metanol y 1% de NaOH.

Calculo de la cantidad necesaria de metanol:

$$30g_{\text{aceite}} \left[\frac{1\text{mol}_{\text{aceite}}}{861g_{\text{aceite}}} \right] = 0.0348 \text{ mol}_{\text{aceite}}$$

Multiplicando 0.0348 mol de aceite por 3 (por estequiometria)

La cantidad de metanol es 0.1045 mol y multiplicando por su peso molecular:

$$0.1045\text{mol}_{\text{MeOH}} \left[\frac{32g_{\text{MeOH}}}{1\text{mol}_{\text{MeOH}}} \right] = 3.34 g_{\text{MeOH}}$$

Mas el exceso del 80% (2.67 g_{MeOH}) es igual a 6.01 g_{MeOH}

$$6.01g_{\text{MeOH}} \left[\frac{1\text{ml}_{\text{MeOH}}}{0.79g_{\text{MeOH}}} \right] = 7.61 \text{ ml}$$

Calculo de la cantidad necesaria de metanol:

El 1% de 30g es 0.3g

La cantidad necesaria de metanol para la reacción de 30 gramos de aceite son 7.61 ml y 0.3 gramos de NaOH.

2. Concentración de 60% de exceso de metanol y 0.4% de NaOH.

Calculo de la cantidad necesaria de metanol:

$$30g_{aceite} \left[\frac{1mol_{aceite}}{861g_{aceite}} \right] = 0.0348 mol_{aceite}$$

Multiplicando 0.0348 mol de aceite por 3 (por estequiometria)

La cantidad de metanol es 0.1045 mol y multiplicando por su peso molecular:

$$0.1045mol_{MeOH} \left[\frac{32g_{MeOH}}{1mol_{MeOH}} \right] = 3.34 g_{MeOH}$$

Mas el exceso del 60% (2.00 g_{MeOH}) es igual a 5.34 g_{MeOH}

$$5.34g_{MeOH} \left[\frac{1ml_{MeOH}}{0.79g_{MeOH}} \right] = 6.6 ml$$

Calculo de la cantidad necesaria de metanol:

El 0.4% de 30g es 0.12 g

La cantidad necesaria de metanol para la reacción de 30 gramos de aceite son 6.6 ml y 0.12 gramos de NaOH.

Anexo B. Cálculo del número acido.

$$\text{Núm acido} = \frac{G \cdot N \cdot \text{Peq}}{w} = \frac{\text{mg KOH}}{\text{g muestra}}$$

G= Cantidad añadida de KOH 0.1 Normal

N = 0.1 \longrightarrow Concentración del KOH

Peq = 56.1 g/eq-g \longrightarrow Peso eq. del KOH

W = 1 g \longrightarrow Peso de la muestra

Referencias Bibliográficas

Páginas web.

<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM17morelos/municipios/17015a.html>

<http://www.wtrg.com/prices.htm>

Artículos científicos

Achten, W. M. J., Verchot, L., Franken, Y. J., Mathijs, E., Singh, V. P., Aerts, R., and Muys, B. (2008). "Jatropha bio-diesel production and use". *Biomass and Bioenergy*, 32(12), 1063—1084.

Achten, W. (2010). "Sustainability evaluation of biodiesel from *Jatropha curcas* L.". A life cycle oriented study. Katholieke Universiteit Leuven, Groep Wetenschap & Technologie. D/2010/11.109/41.

Achten, W. M. J., Nielsen, L. R., Aerts, R., Lengkeek, A. G., Kjær, E. D., Trabucco, A., ... Muys, B. (2010). "Towards domestication of *Jatropha curcas*". *Knowledge Creation Diffusion Utilization*, 1, 91–107.

Almeida J., Achten W.M.J., Duarte M.P., Mendes B. and Muys B. (2011), "Benchmarking the Environmental Performance of the Jatropha Biodiesel System through a Generic Life Cycle Assessment", *Environmental Science & Technology*, 45, 5447-5453.

Behera, S. K., Srivastava, P., Tripathi, R., Singh, J. P., and Singh, N. (2010). "Evaluation of plant performance of *Jatropha curcas* L. under different agro-practices for optimizing biomass – A case study". *Biomass and Bioenergy*, 34(1), 30–41.

Das, M., Uppal, H. S., Singh, R., Beri, S., Mohan, K. S., Gupta, V. C., and Adholeya, A. (2011). "Co-composting of physic nut (*Jatropha curcas*) deoiled cake with rice straw and different animal dung". *Bioresource technology*, 102(11), 6541–6546.

Divakara, B., Upadhyaya, H., Wani, S., y Laxmipathi, C. (2010). "Biology and genetic improvement of *Jatropha curcas* L.: A review". *Applied Energy*, 87, 732-742.

Findlater K. M. and Kandlikar M. (2011), "Land use and second-generation biofuel feedstocks: The unconsidered impacts of *Jatropha* biodiesel in Rajasthan, India", *Energy Policy*, 39 (6), 3404-3413.

Francis George, Oliver John, Sujatha Mulpuri (2013), "Non-toxic jatropha plants as a potential multipurpose multi-use oilseed crop", *Industrial Crops and Products*, 42, 397-401.

Gübitz, G., Mittelbach, M., Trabi, M. "Biofuels and Industrial Products from *Jatropha curcas*". Symposium "Jatropha 97" Managua, Nicaragua, February 23-27, 1997.

Heller, Joachim. (1996). "Physic nut. *Jatropha curcas* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 1. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/ International Plant Genetic Resources Institute, Rome.

Hou Jian, Zhang Pidong, Yuan Xianzheng, Zheng Yonghong (2011), "Life cycle assessment of biodiesel from soybean, jatropha and microalgae in China conditions", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 5081-5091.

Jain, S., Sharma, M.P. (2011). "Long term storage stability of *Jatropha curcas* biodiesel". *Energy*, 36, 5409-5415.

Jingura, R., Matengaifa, R., Musademba, D., and Musiyiwa, K. (2011). "Characterisation of land types and agro-ecological conditions for production of *Jatropha* a feedstock for biofuels in Zimbabwe". *Biomass and Bioenergy*, 35, 2080-2086.

Kaewcharoensombat Uraiwan, Prommetta Kant, Srinophakun (2011), "Life cycle assessment of biodiesel production from jatropha", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 42, 454-462.

Karaj S., Muller J. (2011), "Optimizing mechanical oil extraction of *Jatropha curcas* L., seeds with respect to press capacity, oil recovery and energy efficiency", *Industrial Crops and Products*, 34, 1010-1016.

Kumar, A., and Sharma, S. (2008). "An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review". *Industrial Crops and Products*, 28(1), 1-10.

Makkar H. P. S., Becker K. (1997), "Potential *J. curcas* Seed meal as a Protein Supplement to Livestock Feed, Constraints to its Utilisation and Possible Strategies to overcome Constraints", Developed from the Symposium "Jatropha 97" Managua, Nicaragua, February 23-27, 1997.

Openshaw, k. (2000), "A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise". Biomass and Bioenergy, 19, 1-15.

Pandey Krishan K., Pragma Namita, Sahoo P.K. (2011), "Life cycle assessment of small-scale high-input *Jatropha* biodiesel production in India", Applied Energy, 88, 4831-4839.

Pecina, V., Anaya, J.L., Zamarripa, A., Montes, N., Núñez, C.A., Solis, J.L., Aguilar, M.R., Gil, H. (2011), "Molecular characterisation of *Jatropha curcas* L. genetic resource from Chiapas México through AFLP markers". Biomass and Bioenergy, 35, 1897-1905.

Prueksakorn Kritana and Ghewala Shabbir H. (2006), "Energy and Greenhouse Gas Implications of Biodiesel Production from *Jatropha curcas* L", The 2nd Joint International Conference on "Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)" 21-23 November 2006, Bangkok, Thailand.

Raheman Hifjur, Mondal Subhrajit (2012), "Biogas production potencial of jatropha seed cake", BIOMASS AND BIOENERGY, 37, 25-30.

R.E.E. Jongschapp, W,J.Corré, P.S. Bindranban and W.A. Brandenburg (2007), "Claims and Facts on *Jatropha Curcas* L. report 158.

Sathishkumar Palanivel, Arulkumar Mani, Palvannan Thayumanavan (2012), "Utilization of agro-industrial waste *Jatropha curcas* pods as an activated carbon for the adsorption of reactive dye Remazol Brilliant Blue R (RBBR)", Journal of Cleaner Production, 22, 67-75.

Silitonga A.S., Atabani A.E., Mahlia T. M. I., Masjuki H. H., Anjum Badruddin Irfan, Mekhilef S. (2011), "A review on prospect of *jatropha curcas* for biodiesel in Indonesia", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 3733-3756.

Singh, R. N., Vyas, D. K., Srivastava, N. S. L., and Narra, M. (2008). "SPRERI experience on holistic approach to utilize all parts of *Jatropha curcas* fruit for energy". Renewable Energy, 33(8), 1868–1873.

Srivastava, P., Behera, S., Gupta, J., Jamil, S., Singh, N., and Kumar, Y. (2011). "Growth performance, variability in yield traits and oil content of selected accessions of *Jatropha curcas* L. growing in a large scale plantation site", *Biomass and Bioenergy*, 35, 3936-3942.

Valero, P.J., Cortina, V. H.S., Vela, C. M.P. (2011), "The Project of biofuels in Chiapas: Experiences of physic nut (*Jatropha curcas*) farmers within the rural crisis framework", *Estudios Sociales*, Volumen XIX, 38.

Vyas, D. K., and Singh, R. N. (2007). "Feasibility study of *Jatropha* seed husk as an open core gasifier feedstock". *Renewable Energy*, 32(3), 512–517.

West, A.H., Posarac, D., Ellis, N. (2008)," Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS.Plant". *Bioresource Technology*, 99, 6587-6601.

Wang Zanxin, Calderon Margaret M., Lu Ying (2011), "Lifecycle assessment of the economic, environmental and energy performance of *jatropha curcas* L. biodiesel in china", *ScienceDirect*, 35, 2893-2902.

Williams, James L.(2011)" Oil Price History and Analysis". WTRG Economics, London, Arkansas 72847.

Xunmin Ou, Xiliang Zhang, Shiyan Chang, Qingfang Gou (2009), "Energy consumption and GHG emissions of six biofuel pathways by LCA in (the) People's Republic of China", *Applied Energy*, 86, S197-S208

Libros.

Altieri, M.A. y Nicholls C.I., 2009. Biodiversidad y Manejo de Plagas en Agroecosistemas. Editorial Icaria, España.

Gerpen, J.Van., Shanks, B., Pruszko, R. and Clements, D., August 2002- January 2004. Biodiesel Production Technology. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Contract No. DE-AC36-99-GO10337.

IICA-ARPEL, Octubre 2009. Manual de Biocombustibles. Núm. De registro. ISBN13: 978-92-9248-121-6.

Verma, S.P.,2005. Estadística Básica para el manejo de Datos Experimentales: Aplicación en la Geoquímica (Geoquimiometría). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 186 p.

West, P.W., 2009. Tree and Forest Measurement. Second Edition. School of Environmental and Management Southern Cross University, Australia.

Referencias Bibliográficas

Páginas web.

<http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM17morelos/municipios/17015a.html>

<http://www.wtrg.com/prices.htm>

Artículos científicos

Achten, W. M. J., Verchot, L., Franken, Y. J., Mathijs, E., Singh, V. P., Aerts, R., and Muys, B. (2008). "Jatropha bio-diesel production and use". *Biomass and Bioenergy*, 32(12), 1063—1084.

Achten, W. (2010). "Sustainability evaluation of biodiesel from *Jatropha curcas* L.". A life cycle oriented study. Katholieke Universiteit Leuven, Groep Wetenschap & Technologie. D/2010/11.109/41.

Achten, W. M. J., Nielsen, L. R., Aerts, R., Lengkeek, A. G., Kjær, E. D., Trabucco, A., ... Muys, B. (2010). "Towards domestication of *Jatropha curcas*". Knowledge Creation Diffusion Utilization, 1, 91–107.

Almeida J., Achten W.M.J., Duarte M.P., Mendes B. and Muys B. (2011), "Benchmarking the Environmental Performance of the *Jatropha* Biodiesel System through a Generic Life Cycle Assessment", Environmental Science & Technology, 45, 5447-5453.

Behera, S. K., Srivastava, P., Tripathi, R., Singh, J. P., and Singh, N. (2010). "Evaluation of plant performance of *Jatropha curcas* L. under different agro-practices for optimizing biomass – A case study". Biomass and Bioenergy, 34(1), 30–41.

Das, M., Uppal, H. S., Singh, R., Beri, S., Mohan, K. S., Gupta, V. C., and Adholeya, A. (2011). "Co-composting of physic nut (*Jatropha curcas*) deoiled cake with rice straw and different animal dung". Bioresource technology, 102(11), 6541–6546.

Divakara, B., Upadhyaya, H., Wani, S., y Laxmipathi, C. (2010). "Biology and genetic improvement of *Jatropha curcas* L.: A review". Applied Energy, 87, 732-742.

Findlater K. M. and Kandlikar M. (2011), "Land use and second-generation biofuel feedstocks: The unconsidered impacts of *Jatropha* biodiesel in Rajasthan, India", Energy Policy, 39 (6), 3404-3413.

Francis George, Oliver John, Sujatha Mulpuri (2013), "Non-toxic *Jatropha* plants as a potential multipurpose multi-use oilseed crop", Industrial Crops and Products, 42, 397-401.

Gübitz, G., Mittelbach, M., Trabi, M." Biofuels and Industrial Products from *J. curcas*". Symposium "Jatropha 97" Managua, Nicaragua, February 23-27, 1997.

Heller, Joachim. (1996). "Physic nut. *Jatropha curcas* L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 1. Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/ International plant Genetic Resources Institute, Rome.

Hou Jian, Zhang Pidong, Yuan Xianzheng, Zheng Yonghong (2011), "Life cycle assessment of biodiesel from soybean, *Jatropha* and microalgae in china conditions", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 5081-5091.

Jain, S., Sharma, M.P. (2011). "Long term storage stability of *Jatropha curcas* biodiesel". *Energy*, 36, 5409-5415.

Jingura, R., Matengaifa, R., Musademba, D., and Musiyiwa, K. (2011). "Characterisation of land types and agro-ecological conditions for production of *Jatropha* a feedstock for biofuels in Zimbabwe". *Biomass and Bioenergy*, 35, 2080-2086.

Kaewcharoensombat Uraiwan, Prommetta Kant, Srinophakun (2011), "Life cycle assessment of biodiesel production from *Jatropha*", *Journal of the Taiwan institute of Chemical Engineers*, 42, 454-462.

Karaj S., Muller J. (2011), "Optimizing mechanical oil extraction of *Jatropha curcas* L., seeds with respect to press capacity, oil recovery and energy efficiency", *Industrial Crops and Products*, 34, 1010-1016.

Kumar, A., and Sharma, S. (2008). "An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review". *Industrial Crops and Products*, 28(1), 1–10.

Makkar H. P. S., Becker K. (1997), "Potential *J. curcas* Seed meal as a Protein Supplement to Livestock Feed, Constraints to its Utilisation and Possible Strategies to overcome Constraints", Developed from the Symposium "Jatropha 97" Managua, Nicaragua, February 23-27, 1997.

Openshaw, k. (2000), "A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise". *Biomass and Bioenergy*, 19, 1-15.

Pandey Krishan K., Pragma Namita, Sahoo P.K. (2011), "Life cycle assessment of small-scale high-input *Jatropha* biodiesel production in India", *Applied Energy*, 88, 4831-4839.

Pecina, V., Anaya, J.L., Zamarripa, A., Montes, N., Núñez, C.A., Solis, J.L., Aguilar, M.R., Gil, H. (2011), "Molecular characterisation of *Jatropha curcas* L. genetic resource from Chiapas México through AFLP markers". *Biomass and Bioenergy*, 35, 1897-1905.

Prueksakorn Kritana and Ghewala Shabbir H. (2006), "Energy and Greenhouse Gas Implications of Biodiesel Production from *Jatropha curcas* L", *The 2nd Joint*

International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)”
21-23 November 2006, Bangkok, Thailand.

Raheman Hifjur, Mondal Subhrajit (2012),” Biogas production potencial of jatropha seed cake”, *BIOMASS AND BIOENERGY*, 37, 25-30.

R.E.E. Jongschapp, W.J.Corré, P.S. Bindranban and W.A. Brandenburg (2007),
“Claims and Facts on *Jatropha Curcas* L. report 158.

Sathishkumar Palanivel, Arulkumar Mani, Palvannan Thayumanavan (2012),
“Utilization of agro-industrial waste *Jatropha curcas* pods as an activated carbon for the adsorption of reactive dye Remazol Brilliant Blue R (RBBR)”, *Journal of Cleaner Production*, 22, 67-75.

Silitonga A.S., Atabani A.E., Mahlia T. M. I., Masjuki H. H., Anjum Badruddin Irfan, Mekhilef S. (2011), “A review on prospect of *jatropha curcas* for biodiesel in Indonesia”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3733-3756.

Singh, R. N., Vyas, D. K., Srivastava, N. S. L., and Narra, M. (2008). “SPRERI experience on holistic approach to utilize all parts of *Jatropha curcas* fruit for energy”. *Renewable Energy*, 33(8), 1868–1873.

Srivastava, P., Behera, S., Gupta, J., Jamil, S., Singh, N., and Kumar, Y. (2011).
“Growth performance, variability in yield traits and oil content of selected accessions of *Jatropha curcas* L. growing in a large scale plantation site”, *Biomass and Bioenergy*, 35, 3936-3942.

Valero, P.J., Cortina, V. H.S., Vela, C. M.P. (2011), “The Project of biofuels in Chiapas: Experiences of physic nut (*Jatropha curcas*) farmers within the rural crisis framework”, *Estudios Sociales*, Volumen XIX, 38.

Vyas, D. K., and Singh, R. N. (2007). “Feasibility study of *Jatropha* seed husk as an open core gasifier feedstock”. *Renewable Energy*, 32(3), 512–517.

West, A.H., Posarac, D., Ellis, N. (2008),” Assessment of four biodiesel production processes using HYSYS.Plant”. *Bioresource Technology*, 99, 6587-6601.

Wang Zanxin, Calderon Margaret M., Lu Ying (2011), “Lifecycle assessment of the economic, environmental and energy performance of *jatropha curcas* L. biodiesel in china”, *ScienceDirect*, 35, 2893-2902.

Williams, James L.(2011) "Oil Price History and Analysis". WTRG Economics, London, Arkansas 72847.

Xunmin Ou, Xiliang Zhang, Shiyan Chang, Qingfang Gou (2009), "Energy consumption and GHG emissions of six biofuel pathways by LCA in (the) People's Republic of China", Applied Energy, 86, S197-S208

Libros.

Altieri, M.A. y Nicholls C.I., 2009. Biodiversidad y Manejo de Plagas en Agroecosistemas. Editorial Icaria, España.

Gerpen, J.Van., Shanks, B., Pruszko, R. and Clements, D., August 2002- January 2004. Biodiesel Production Technology. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Contract No. DE-AC36-99-GO10337.

IICA-ARPEL, Octubre 2009. Manual de Biocombustibles. Núm. De registro. ISBN13: 978-92-9248-121-6.

Verma, S.P.,2005. Estadística Básica para el manejo de Datos Experimentales: Aplicación en la Geoquímica (Geoquimiometría). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 186 p.

West, P.W., 2009. Tree and Forest Measurement. Second Edition. School of Environmental and Management Southern Cross University, Australia.