



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA EN ENERGÍA – ECONOMÍA DE LA ENERGÍA

SUSTENTABILIDAD DE LAS PLANTACIONES DE *JATROPHA CURCAS* PARA  
LA PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES: BIODIÉSEL Y BIOMASA

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
GUADALUPE PÉREZ MORALES

TUTOR PRINCIPAL  
JORGE M. ISLAS SAMPERIO, IER  
COMITÉ TUTOR  
JAVIER E. AGUILLÓN MARTÍNEZ, INGEN  
LUIS F. BARAHONA PÉREZ, CICY  
FABIO L. MANZINI POLI, IER  
RAÚL SUÁREZ PARRA, IER

CIUDAD DE MÉXICO, Diciembre 2019



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. Raúl Suárez Parra

**Secretario:** Dr. Fabio Manzini Poli

**1er. Vocal:** Dr. Jorge Marcial Islas Samperio

**2do. Vocal:** Dr. Javier Eduardo Aguillón Martínez

**3er. Vocal:** Dr. Luis Felipe Barahona Pérez

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Energías Renovables- Universidad Nacional Autónoma de México

## **TUTOR DE TESIS**

---

Dr. Jorge Marcial Islas Samperio

## Dedicatoria

Esta tesis es el producto de nueve semestres de esfuerzo intenso, está dedicado con mucho cariño para todas las personas que aprecio, porque un regalo material no es suficiente para expresar toda la gratitud que siento por ustedes y este logro es también de ustedes:

Para mi mamá por enseñarme a ser perseverante y a mi papá por su ejemplo de trabajo arduo para lograr los objetivos

A mis hermanas Oli, Alicia, Rosy, Tania y Gaby por ser también mis grandes amigas, porque me contagian su buena vibra y su fortaleza para enfrentar cualquier desafío

A Daniel y José Luis mis hermanos que siempre me apoyan en cualquier circunstancia y quienes me han mostrado que llegar a los objetivos no hay límites

A mis sobrinos y ahijados, Miguel Javier, Fernanda, Didier, Edgar Alejandro, Iker Gabriel, Angélica, Dylan Alejandro, Jade y Juan Isaí, por toda la motivación que para trabajar en un mundo mejor para ustedes y con esta tesis le quiero decir que cuando un sueño muera que sea porque haya hecho realidad

Para Balam con todo mi amor y admiración por permitirme compartir ilusiones y esperanzas, mientras volemós juntos nada nos podrá parar.

A mis mejores amigas Lucero, Maritza, Ita, Aurea, Emma y Anacaren, Iris compartir tantas emociones, sueños y batallas, que la felicidad nos mantenga unidas siempre

A mis amigos de IER Camilo, Isaías, Odín, Irving, Erick Cesar y a los compañeros de Laboratorio Christian, Alberto, Itzel y Valeria por todas las pláticas, reflexiones e intercambio de opiniones sobre los temas de la vida

A la Memoria (†) de:

Miguel Ángel

Nunca tuvimos esa conversación,  
nunca te agradecí por cuidar de mí  
Tu presencia en sigue en mi corazón, hermano.

*Canta, corazón canta  
que la luna sigue brillando  
y aguanta con mi garganta  
que la noche está comenzando*  
*Royal club*

## **Agradecimientos**

Agradezco muy sinceramente al Dr. Jorge Islas por todo el apoyo como tutor durante la elaboración de esta investigación doctoral, por todas sus aportaciones y comentarios en beneficio de mi formación.

A mi comité tutorial del IER, Dr. Fabio Manzini y Dr. Raúl Suárez por todas las asesorías y sus valiosos comentarios para desarrollar la investigación de la mejor manera.

A mis tutores externos, Dr. Javier Aguillón y Dr. Luis Felipe Barahora por sus comentarios, críticas y disponibilidad para el desarrollo de esta tesis.

Un agradecimiento con mucho cariño para Dra. Genice Kirat Grande por sus asesorías y comentarios para desarrollar los temas económicos y a M. C. Mirna Guevara García por sus asesorías y paciencia para desarrollar los análisis estadísticos.

Un especial agradecimiento al Dr. Roberto Best y Brown por su apoyo incondicional y por darme la oportunidad para desarrollar las habilidades de docencia académica.

A la técnico académico L.I. María de Jesús Pérez Orózco por todo el apoyo que me proporcionó siempre de manera amable y oportuna.

A Jorge Ramírez Guerreo por su apoyo en el trabajo de campo y sus asesorías de los aspectos agronómicos.

Con mucho cariño les agradezco también a los alumnos Rodrigo, Blanca, Santiago, María José y Dulce Alhelí apoyaron en el trabajo de campo y laboratorio como partes de sus estancias y/o prácticas profesionales.

Sobre todo Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Energías Renovables por permitirme realizar este posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento para realizar este posgrado a través de la beca otorgada.

## ÍNDICE

### Resumen

Introducción.....	1
Objetivos y metodología .....	4
Capítulo 1. Problemática de la producción de biocombustibles y las materias primas utilizadas.....	8
1.1 Los biocombustibles y su producción actual .....	10
1.2 El debate sobre las materias primas para la producción de los biocombustibles .....	15
1.3 Sustentabilidad de los biocombustibles.....	18
1.1.1 Indicadores de sustentabilidad de la bioenergía.....	21
1.2 <i>Jatropha curcas</i> como materia prima sustentable para la producción de biocombustibles .....	24
1.4.1 Características de <i>Jatropha curcas</i> para la producción de biodiesel: Semillas y características del aceite .....	26
1.4.2 Uso alimenticio de <i>Jatropha curcas</i> no toxicas.....	30
1.4.3 Biomasa de <i>Jatropha curcas</i> .....	32
1.4.4 Servicios ecosistémicos de <i>Jatropha curcas</i> .....	33
1.5 Plantaciones de <i>Jatropha curcas</i> en México .....	35
1.6 Análisis de sustentabilidad de <i>Jatropha curcas</i> .....	36
1.6.1 Análisis de ciclo de vida ACV .....	37
1.6.2 Balance de emisiones de CO <sub>2</sub> e .....	38
1.6.3 Balance energético .....	38
1.6.4 Evaluación económica.....	39
1.7 CONCLUSIONES .....	40
Capítulo 2. Evaluación experimental de ecotipos de <i>Jatropha curcas</i> .....	41
2.1 Selección de ecotipos .....	43
2.1.1 Sitio de estudio y material vegetal .....	43
2.2 Metodología .....	45
2.2.1 Selección de ecotipos no tóxicos.....	47
2.2.2 Crecimiento y supervivencia de las plantas .....	48



2.2.3	Producción de semillas y biomasa.....	48
2.2.4	Contenido de aceite.....	49
2.2.5	Análisis estadístico .....	50
2.2.6	Caracterización del aceite y el endospermo .....	51
2.2.7	Análisis del suelo .....	51
2.3	Resultados .....	52
2.3.1	Crecimiento y supervivencia de ecotipos no tóxicos.....	52
2.3.2	Rendimiento de producción de semillas, biomasa y contenido de aceite	58
2.3.3	Propiedades físico-químicas del aceite y el endospermo .....	62
2.3.4	Cambios en las propiedades del suelo .....	66
2.4	CONCLUSIONES.....	67
Capítulo 3 Sistema de producción de biocombustibles y selección de indicadores para el análisis de sustentabilidad.....		
3.1	Enfoque de ciclo de vida .....	72
3.2	Selección de indicadores de sustentabilidad.....	76
3.3	Descripción y límites del sistema de producción que abarca el análisis de sustentabilidad.....	83
3.3.1	Escenarios de producción analizados .....	83
3.3.2	Definición de objetivo y el alcance del análisis de sustentabilidad ....	84
3.3.3	Análisis del inventario de ciclo de vida .....	85
3.4	Hojas metodológicas de los indicadores .....	90
3.4.1	Indicador 1. Emisiones de gases de efecto invernadero .....	90
3.4.2	Indicador 2. Uso de suelo .....	92
3.4.3	Indicador 3. Balance de energía .....	93
3.4.4	Indicador 4. Costos de Producción .....	95
3.4.5	Indicador 5. Valor agregado .....	96
3.4.6	Indicador 6. Empleos creados .....	97
3.5	Índice de sustentabilidad y Normalización de indicadores .....	99
3.6	CONCLUSIONES.....	101

Capítulo 4. Análisis de los indicadores y resultados de la evaluación de sustentabilidad .....	102
4.1 Inventarios de Ciclo de Vida para cada escenario de producción .....	103
4.1.1 Escenario MR .....	104
4.1.2 Escenario MRAS .....	106
4.1.3 Escenario BRAS .....	107
4.2 Evaluación de los Indicadores de sustentabilidad .....	109
4.2.1 Indicadores ambientales .....	109
4.2.2 Indicadores económicos .....	118
4.2.3 Indicadores sociales .....	122
4.3 Índice de sustentabilidad .....	123
4.4 Análisis de la dimensión Institucional .....	126
4.5 Conclusiones .....	128
Conclusiones .....	129
Bibliografía .....	130
Anexos .....	143
Anexo 1 .....	143
Inventarios de ciclo de vida para el análisis económico .....	143
Anexo 2 .....	145
Inventario de ciclo de vida de empleos para el análisis social .....	145
Anexo 3 .....	146
Poder calorífico del biodiésel, aceite y biomasa .....	146
Anexo 4 .....	147
Artículos publicados .....	147

## **ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1 Clasificación de los biocombustibles .....	16
Tabla 2 Principios de cumplimiento de la Norma RSB[46] .....	21
Tabla 3 Aspectos de la sustentabilidad considerados en los principios y criterios de la norma RSB [46] .....	22

Tabla 4 Aspectos de la sustentabilidad considerados en el conjunto de indicadores GBEP [47] .....	23
Tabla 5 Lista de los nombres asignado a los ecotipos, procedencia y número de plantas.....	45
Tabla 6 Concentración de esteres de forbol.....	52
Tabla 7 Crecimiento promedio de los parámetros biofísicos de las plantas monitoreado del periodo del año 2009 al 2018 .....	55
Tabla 8 Rendimiento de frutos y semillas de los ecotipos no tóxicos. Letras iguales significa que no hay diferencias significativas de acuerdo a las pruebas ANOVA y Tukey ( $p \leq 0.05$ ). .....	58
Tabla 9 Rendimiento de biomasa. Letras iguales significa que no hay diferencias significativas de acuerdo a las pruebas ANOVA y Tukey ( $p \leq 0.05$ ) .....	60
Tabla 10 Contenido de aceite y pasta residual de endospermo de los ecotipos de <i>Jatropha curcas</i> no tóxicos. Letras iguales significa que no hay diferencias significativas de acuerdo a las pruebas ANOVA y Tukey ( $p \leq 0.05$ ) .....	61
Tabla 11 Propiedades físicas y composición de acidos grasos del aceite de los ecotipos no tóxicos E1M y E2M .....	62
Tabla 12 Composición química del endospermo de los ecotipos no tóxico E1M y E2M.....	64
Tabla 13 Propiedades del suelo de la plantación experimental antes de la plantación de las plantulas (2008) y a 9 años de edad de las plantas (2018).....	66
Tabla 14 Comparación de indicadores entre la norma RSB y GBEP.....	77
Tabla 15 Indicadores seleccionado para el análisis de sustentabilidad .....	82
Tabla 16 Inventario de ciclo de vida del sistema de producto considerando una hectárea de cultivo de <i>Jatropha curcas</i> mexicano no tóxico .....	89
Tabla 17 Hoja metodológica del indicador Emisiones de gases de efecto invernadero .....	91
Tabla 18 Hoja metodológica del indicador Uso de suelo.....	93
Tabla 19 Hoja metodológica del indicador Balance de Energía .....	94
Tabla 20 Hoja metodológica del indicador costos de producción.....	96
Tabla 21 Hoja metodológica del indicador Valor agregado .....	97
Tabla 22 Hoja metodológica del indicador empleos creados .....	98
Tabla 23 Productividad de 1 hectárea de <i>Jatropha curcas</i> no tóxico de ecotipo E2M.....	103
Tabla 24 Inventario de entradas y salidas de la etapa de obtención de materia prima del escenario MR .....	104
Tabla 25 Inventario de entrada y salidas de la etapa de extracción de aceite del escenario MR .....	105
Tabla 26 Inventario de entradas y salidas de la etapa de producción de biodiesel .....	106

Tabla 27 Inventario de entradas y salidas de la etapa de extracción de aceite del escenario MRAS .....	106
Tabla 28 Productividad de 1 hectárea de <i>Jatropha curcas</i> con la utilización de biofertilizantes y riego.....	108
Tabla 29 Inventario de entradas y salidas en la etapa de materia prima del escenario mejorado.....	108
Tabla 30 Etapas, procesos y entradas con las mayores contribuciones en cada uno de los escenarios analizados .....	112
Tabla 31 Resultados de los indicadores de sustentabilidad.....	123
Tabla 32 Valores normalizados de los indicadores y valor de ponderación .....	124
Tabla A 1 Inventario de ciclo de vida de costos del sistema de producción.....	143
Tabla A 2 Inventario de ciclo de vida de social del sistema de producción .....	145
Tabla A 3 Poder calorífico de los productos obtenidos en el sistema de producción .....	146

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Tipos y tecnologías de conversión de la biomasa en energía útil .....	10
Figura 2 Integración de los pilares de la sustentabilidad.....	20
Figura 3 <i>Jatropha curcas</i> ; a) planta, b) frutos, c) semillas, d) aceite .....	25
Figura 4 Diversas formas de aprovechamiento de las plantas de <i>Jatropha curcas</i> .....	26
Figura 5 Reacción de transesterificación de los triglicéridos con alcohol catalizado con un catalizador básico para la producción de biodiesel .....	27
Figura 6 Distribución de las plantaciones de <i>Jatropha curcas</i> en el mundo.....	28
Figura 7 Estructura molecular y espectro HR-MAS NMR del aceite de <i>Jatropha curcas</i> tomada de [62].....	29
Figura 8 Estructura molecular del forbol y de 12-deoxy-16-hydroxy phorbol [73]..	30
Figura 9 Localización de plantaciones de <i>Jatropha curcas</i> en México [28].....	35
Figura 10 Localización de la plantación experimental de <i>Jatropha curcas</i> en el estado de Morelos.....	43
Figura 11 Promedios mensuales de los parámetros climáticos en el sitio de estudio en el periodo de estudio (2009-2017).....	44
Figura 12 Metodología de evaluación de ecotipos mexicanos de <i>Jatropha curcas</i> .....	46
Figura 13 Ciclo de vida de un producto.....	72
Figura 14 Etapas del ciclo de vida de un producto.....	73

Figura 15 Sistema de producto .....	74
Figura 16 Las cuatro fases del análisis del Ciclo de Vida .....	75
Figura 17 Proceso de desarrollo de los indicadores.....	77
Figura 18 Etapas de ciclo de vida y límites del sistema de producción de biocombustibles con plantaciones de <i>Jatropha curcas</i> .....	85
Figura 19 Procesos incluido en la etapa de materia prima.....	86
Figura 20 Diagrama de los procesos que abarca la etapa de extracción de aceite .....	87
Figura 21 Diagrama de procesos que abarca la etapa de producción de biodiésel .....	89

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Porcentaje de participación del consumo de energía primaria por combustible a nivel mundial [40] .....	11
Gráfica 2 Participación de los combustibles a nivel mundial en el año 2016 a) en el suministro de energía primaria total b) en el suministro de energía renovable [41] .....	11
Gráfica 3 Participación de la bioenergía en el consumo final de energía en los sectores de uso final en el año 2016 (Hales, 2018) .....	12
Gráfica 4 Energía renovable en el consumo de energía final por sectores, año 2015 [2] .....	13
Gráfica 5 Tendencia de producción global de biocombustibles líquidos de 2007 a 2017[2]. .....	14
Gráfica 6 Consumo final de energía en México del año 2017 por sector y por energético [43].....	15
Gráfica 7 Mediciones del crecimiento de los parámetros biofísicos de las plantas en el sitio de estudio en los años 2009 a 2018. (A) Altura de planta; (B) Diámetro de tallo; (C) Cobertura de planta .....	54
Gráfica 8 Tasas de supervivencia por ecotipo a lo largo del estudio.....	57
Gráfica 9 Comparación entre escenarios de las emisiones potenciales en la categoría de calentamiento global.....	109
Gráfica 10 Emisiones potenciales de GEI de los escenarios de producción.....	110
Gráfica 11 Etapas y procesos con el mayor potencial de emisión de gases de efecto invernadero en cada escenario de producción .....	111
Gráfica 12 Comparación de uso de suelo entre escenarios .....	113
Gráfica 13 Indicador de uso de suelo por escenario .....	114
Gráfica 14 Comparación entre escenarios en el consumo de energía del sistema de producción.....	115

Gráfica 15 Balance de energía de los escenarios analizados y consumo de energía de las etapas del sistema de producción .....	116
Gráfica 16 Etapas y procesos con mayor consumo energético en cada uno de los escenarios de producción.....	117
Gráfica 17 Comparación de los costos de producción por escenario y por etapa de proceso de producción. ....	118
Gráfica 18 Costos de producción de la etapa de materia prima en cada uno de los escenarios.....	119
Gráfica 19 Porcentaje de valor agregado del aprovechamiento de subproductos en cada uno de los escenarios.....	120
Gráfica 20 Valor económico adicional por el aprovechamiento de subprodctos	121
Gráfica 21 Empleos creados por unidad de energía en cada uno de los escenarios .....	122
Gráfica 22 Resultados de los indicadores de sustentabilidad en el sistema de producción.....	124

## Resumen

Esta tesis doctoral presenta una investigación sobre la evaluación de la sustentabilidad de una plantación de mínimos recursos de *Jatropha curcas* desarrollada en el estado de Morelos, como materia prima para la producción de biodiésel. De acuerdo a los resultados de la evaluación experimental se concluyó que de un total de 5 ecotipos de *Jatropha curcas*, el ecotipo E2M que es endémico del estado de Morelos y no tóxico de acuerdo a nuestros resultados, tiene las mejores características en términos de crecimiento, rendimiento de semillas, contenido energético y propiedades físicas y químicas del aceite, para ser utilizado como materia prima para la producción de biocombustibles.

De esta manera, en una siguiente etapa de la investigación se propone realizar un análisis de la sustentabilidad de una plantación de mínimos recursos en suelos marginales, mediante la utilización del ecotipo E2M como materia prima del sistema de producción de biodiesel y el aprovechamiento de los siguientes subproductos: (a) las cascaras de los frutos y semillas como una fuente de biomasa para su uso como biocombustible sólido, (b) la pasta residual de la extracción de aceite de las semillas como una materia prima para la producción de productos alimenticios humanos y/o animales, y (c) la glicerina obtenida del proceso de transesterificación. Asimismo, se propone el cultivo de esta planta para mejorar las características físico-químicas del suelo de uso marginal donde se cultivan.

El análisis de sustentabilidad se desarrolló con un enfoque de ciclo de vida en donde el sistema de producción considera las etapas de producción de materias primas, extracción de aceite y producción de biodiesel, considerando los indicadores de emisiones de gases de efecto invernadero, uso de suelo, balance energético, costos de producción, valor agregado y empleos creados. Se analizaron tres escenarios de producción, a saber, MRAS (mínimos recursos con aprovechamiento de subproductos) y BRAS (utilización de biofertilizantes y riego con aprovechamiento de subproductos), obteniéndose que el escenario MRAS obtuvo el mejor índice de sustentabilidad seguido por el escenario BRAS, por lo que se concluye que el sistema de producción de biodiesel con ecotipos mexicanos de *Jatropha curcas* no toxica es sustentable empleando suelos marginales, siempre y cuando se aprovechen los subproductos mencionados y se cuente con un programa de subsidios equivalentes al 30% del costo de producción por GJ de biodiesel, lo cual se justifica para zonas rurales en donde se aliente el uso de suelos marginales, ya que presentan un buen desempeño ambiental y social para estas zonas de escasas oportunidades del país.

## Introducción

Las preocupaciones sobre el ambiente por el calentamiento global causado por los gases de efecto invernadero así como las crisis petroleras del siglo pasado llevo a varios países a considerar la idea de la utilización de biocombustibles como una medida para aminorar los efectos negativos provocados por los combustibles fósiles, en donde los biocombustibles líquidos para el uso del sector transporte son los que tuvieron mayor desarrollo [1].

De acuerdo a los datos reportados por [2], los biocombustibles líquidos proveen más del 90% de la energía renovable del sector de transporte. El etanol el más utilizado en el autotransporte en motores de combustión interna mientras que el biodiésel tiene mayor uso en el transporte ferroviario, y existe gran interés para ser utilizado en el transporte marítimo.

La producción de biodiésel se ha desacelerado en los últimos años debido al debate sobre las materias primas utilizadas, así como a la crítica sobre si los biocombustibles son una fuente sustentable de energía.

El debate sobre las implicaciones ambientales y socioeconómicas de la producción de biocombustible surgió por el rápido crecimiento en la demanda de los biocombustibles ocasionadas por las políticas adoptadas en diferentes países para aumentar participación de biocombustibles en el consumo de energía.

Por un lado, surgieron cultivos dedicados exclusivamente a la obtención de materias primas para la producción de combustibles llamadas plantaciones energéticas. Las plantaciones energéticas utilizaban materias primas comestibles generaron una competencia de la producción de alimentos contra la producción energía. La competencia involucraba la demanda de tierra, agua y recursos para los cultivos, de esta forma, la producción de biocombustibles mostró efectos directos e indirectos sobre la seguridad alimentaria de los países productores de las materias primas [3].

Por otro lado, surgió el cuestionamiento sobre la habilidad de los biocombustibles para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero debido las condiciones de cultivo de las materias primas, tal como, los impactos potenciales sobre el uso de suelo para la producción de las materias primas, particularmente en suelos vírgenes, en suelos con alto valor de conservación y el uso de áreas de bosque para nuevos cultivos. En esos casos la reducción de las emisiones de gases de



efecto invernadero de los biocombustibles resultó ser relativamente baja comparada con los combustibles fósiles y en algunos casos resultó ser menor [4].

Adicionalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero por el cambio de uso de suelo, se manifestaron efectos asociados sobre el hábitat, la biodiversidad, agua, aire y calidad de los suelos debido a la deforestación. El uso de fertilizantes nitrogenados, pesticidas y herbicidas que se requirieron para los cultivos también provocaron la contaminación del suelo y los cuerpos de aguas subterráneos.

Para minimizar la competencia de la producción de alimentos y de energía, en todo el mundo se generaron políticas energéticas para que el mayor porcentaje de bioenergía se desarrollará en cultivos no alimenticios, tales como materias primas lignocelulosas y aceites no comestibles, bajo un enfoque de prácticas de cultivo sustentables y cultivos de bajos insumos [5] en donde el cultivo de estas materias primas deberían tener un enfoque de sustentabilidad.

La *Jatropha curcas* es una planta oleaginosa considerada como una materia prima con potencial para la producción de biodiesel, la razón por la que las plantas de *Jatropha* han llamado la atención como un cultivo energético es por ser un arbusto suculento no comestible, de crecimiento rápido, fácil propagación, resistente a la sequía y su crecimiento en tierras áridas [6,7].

Las características mencionadas son benéficas porque evitan la competencia por el espacio y/o recursos del cultivo de *Jatropha* con otros cultivos convencionales [8], de acuerdo con Wani *et al.* [9] esta planta puede rehabilitar tierras degradadas fijando carbono y mejorando las propiedades físico-químicas en el suelo, puede controlar la erosión [10], así como proveer diversos servicios eco sistémicos [11].

Por las características mencionadas, la utilización de *Jatropha curcas* como materia prima para la producción de biodiesel ha sido considerada sustentable [12,13], Sin embargo los estudios que se han realizado a esta planta se han enfocado en la producción de semillas para la obtención de aceite y poco se ha explorado el potencial para aprovechar los subproductos que se obtienen de toda la cadena de producción de biodiesel para aumentar la sustentabilidad de *Jatropha curcas* como materia prima.

Aunque algunos autores muestran que los sistemas de producción presentan un balance de emisiones y de energía positivo [14,15], la baja producción de semillas es la principal limitante del desarrollo de los cultivos que ha hecho inviables las plantaciones comerciales [16–18].

El análisis de sustentabilidad de la producción de biodiesel utilizando *Jatropha curcas* como materia prima ha sido objeto de estudio de por varios autores y en

varios sitios específicos de países de África y Asia principalmente, esto debido a que sus programas nacionales de producción de biodiesel se centraron en la utilización de *Jatropha curcas* como materia prima.

Entre los países con mayores estudios se encuentra India [19–22], Malasia y China [23,24], y en países de Sudamérica como Argentina, Nicaragua y Brasil [25,26]. La mayoría de los estudios realizados coinciden que la mayor limitación se encuentra en la fase de producción de la materia prima.

A pesar de estos estudios, el uso de *Jatropha curcas* como insumo para la producción de biodiesel no está bien definido si las plantaciones cumplen los requerimientos necesarios para convertirse en una opción sustentable para competir con los combustibles fósiles.

De acuerdo con [27], el enfoque del uso de la *Jatropha* para la producción de biodiesel se ha centrado en dos escenarios de producción, el primer escenario es mediante el uso de tierras marginales utilizando al mismo tiempo una cantidad menor de recursos de agua y fertilizantes principalmente, estas medidas propiciarían beneficios ambientales y sociales positivos.

Con el primer escenario se argumenta que el uso de *Jatropha* podría mejorar la fertilidad de las tierras degradadas y contribuir al desarrollo del sector rural. Bajo este enfoque, la plantación de *Jatropha* se realiza en tierras que no son aptas para la producción de alimentos suprimiendo la discusión entre el uso de las tierras de cultivo para obtener energía versus la producción de alimentos. En este contexto, la producción de biodiesel a partir de *Jatropha* ofrece los mayores beneficios sociales (oportunidades de trabajo), económicos (bajo costo de producción) y ambientales (disminución de emisiones de CO<sub>2</sub> principalmente).

El segundo escenario de cultivo es mediante plantaciones de *Jatropha* a nivel comercial, y en donde se utiliza suelo que compite con otros usos como la producción de alimentos adicionalmente de la utilización de sistemas de irrigación y de fertilizantes. Bajo este sistema de producción, se alerta que las plantaciones comerciales de *Jatropha curcas* podrían generar implicaciones económicas, y ambientales negativas en el largo plazo. Los resultados de sustentabilidad en ambos escenarios muestran una amplia variabilidad en los resultados.

En México, han surgido algunas experiencias de producción de biodiésel a escala industrial con *Jatropha curcas*, sin embargo, la mayoría de las plantaciones de *Jatropha curcas* se utilizó con germoplasma introducido con semillas importadas adaptadas en otros países. Debido a las condiciones ambientales bióticas y

abióticas de donde fueron mejoradas son diferentes a las condiciones en donde fueron plantadas y las plantaciones mostraron bajas productividades [28].

Las plantaciones de *Jatropha* no han tenido el éxito esperado, la producción de biodiesel ha sido marginal por pequeños productores y no ha tenido una contribución importante en el sector energético.

Sin embargo, a nivel mundial existe interés por las plantas de *Jatropha curcas* para la producción de aceite para ser utilizado en la producción de biodiesel y/o bioturbosina, la investigación sobre estas plantas continúa en desarrollo con el enfoque de desarrollar estrategias de mejoramiento para aumentar el rendimiento de semillas y de aceite [29–31].

En México se han localizado variedades de *Jatropha curcas* nativas en los estados de Veracruz, Hidalgo, Puebla Yucatán, Quintana Roo [32] y en el estado de Morelos [33,34].

En estas variedades, además del aceite se pueden obtener otros beneficios. Debido a que estas variedades son llamadas no tóxicas por no contener ésteres de forbol en el aceite y el endospermo puede ser utilizado con fines alimenticios proporcionando un valor agregado adicional a las plantaciones de *Jatropha curcas*. En algunas provincias de Quintana Roo y Veracruz las semillas son utilizadas en la preparación de platillos tradicionales [35].

La biomasa de la planta también puede ser utilizada con fines energéticos, en donde la cáscara de los frutos y semillas pueden ser sometidos a procesos de combustión, pirólisis, gasificación y biogás [36–39].

Las variedades de *Jatropha curcas* originarias de México pueden tener un potencial importante como materia prima por tal motivo es determinante evaluar la sustentabilidad las plantaciones de *Jatropha curcas* como materia prima en el sistema de producción de biodiesel para conocer si son una opción sustentable que pueda ser cultivada en suelos marginales y que ofrezcan oportunidades de desarrollo en zonas rurales.

## **Objetivos y metodología**

El presente trabajo de investigación tiene el objetivo de conocer los beneficios y/o impactos en los aspectos ambientales, económicos, sociales e institucionales del sistema de producción de biocombustibles utilizando una plantación de *Jatropha curcas* con especies nativas de México, considerando el aprovechamiento de los

subproductos, tales como, la biomasa de las cascara y semillas, la pasta residual de la extracción de aceite y la glicerina del proceso de producción de biodiésel.

La investigación se guía con las siguientes hipótesis:

- Las plantaciones energéticas con especies euforbiáceas nativas de México *Jatropha Curcas*, pueden ofrecer una alternativa sustentable de energía siempre y cuando se considere la producción simultánea de biocombustibles, tal como la producción de biodiesel a partir del aceite de las semillas y, por el otro lado, el aprovechamiento de la biomasa contenida en las cáscaras de los frutos y las semillas.
- La integración del uso de los subproductos generados en el sistema de producción, tal como, la pasta residual de la extracción de aceite y la glicerina, aumentaría la sustentabilidad al ser transformados en productos con un alto valor agregado.

Para llevar a cabo esta tesis doctoral fue necesario realizar investigación experimental y teórica, multidisciplinaria y transdisciplinaria, integrando diferentes campos de conocimiento siguiendo la siguiente metodología:

- (i) La investigación experimental se desarrolló para obtener datos reales del potencial de producción de semillas de ecotipos endémicos de México y su crecimiento en el sitio de estudio. Para ello se identificaron ecotipos mexicanos de *Jatropha curcas* que fueron evaluados en una plantación experimental en un escenario de mínimos recursos y en suelos marginales para conocer el desarrollo de estas plantas en tierras que no son utilizadas para cultivar alimentos. Los ecotipos de *Jatropha curcas* de este estudio fueron seleccionados los ecotipos no tóxicos y se evaluó el crecimiento morfológico, supervivencia de las plantas, así como, el rendimiento la producción de semillas, biomasa y contenido de aceite.
- (ii) A los ecotipos que presentaron las mejores características de crecimiento y mayores rendimientos de semillas y aceite se realizó un análisis de las propiedades físico-químicas del aceite para conocer la calidad del aceite es adecuada para la producción de biodiesel. Asimismo, a estos ecotipos se les realizó un análisis bromatológico del endospermo de las semillas para conocer si el valor nutrimental es adecuado para su utilización con fines alimenticios. Por otro lado, también se analizaron los cambios en el suelo donde se cultivaron los ecotipos seleccionados con el fin de conocer el potencial de *Jatropha curcas* para mejorar las propiedades químicas del suelo.

(iii) La investigación teórica se desarrolló para evaluar la sustentabilidad del sistema de producción. Con los datos del ecotipo con las mejores características seleccionado en el desarrollo experimental se modeló el sistema de producción de biodiésel con un enfoque de ciclo de vida considerando los procesos más importantes, estos son: la obtención de materia prima, la extracción de aceite y la transformación de aceite a biodiésel. Se seleccionaron y desarrollaron las hojas metodológicas para siete indicadores de sustentabilidad considerando los aspectos ambientales, económicos, sociales e institucionales. Los indicadores fueron analizados en tres escenarios del sistema de producción, estos son: (1) Escenario MR (Mínimos recursos), que considera las condiciones reales de la plantación experimental y el sistema de producción no considera el aprovechamiento de subproductos, (2) Escenario MRAS (Mínimos recursos con aprovechamiento de subproductos), con las condiciones de cultivo del escenario MR en donde el sistema de producción si considera el aprovechamiento de los subproductos, y (3) Escenario BRAS (con uso de biofertilizantes, riego y el aprovechamiento de subproductos), en donde se consideran mejoras en la etapa de producción de materia prima con la utilización de biofertilizantes y riego y también considera el aprovechamiento de los subproductos.

(iv) La Evaluación de 6 indicadores de sustentabilidad, estos son: Emisiones de gases de efecto invernadero, uso de suelo, balance energético, costo de producción, valor agregado y empleos creados. Después de esto, se desarrolla el análisis comparativo del desempeño de los indicadores de sustentabilidad en cada uno de escenarios del sistema de producción y se integran los resultados de los indicadores en el índice de sustentabilidad. Finalmente, para los aspectos institucionales se realizó un análisis de la normatividad y regulación vigente aplicable a cada una de las etapas del sistema de producción.

El contenido de la tesis doctoral está estructurado en 4 capítulos.

En el capítulo 1 se presenta una revisión y discusión sobre el la problemática de la producción de los biocombustibles, el estado actual de los biocombustibles líquidos, el debate sobre las materias primas utilizadas para la producción de biodiésel y la sustentabilidad de su producción, así como, los marcos metodológicos que se han establecido para analizar la producción de la bioenergía

También se realiza una revisión de los argumentos más relevantes sobre porque *Jatropha curcas* es considerada una materia prima sustentable para la producción de biocombustibles, así como los usos que se han explorado con esta materia

prima. Por último, presenta los estudios de sustentabilidad y las metodologías que se han utilizado para analizar la sustentabilidad de *Jatropha curcas*.

El capítulo 2 presenta el desarrollo experimental la evaluación de las plantas de *Jatropha curcas* en una plantación experimental en condiciones de mínimos recursos de fertilización y riego, siguiendo una metodología que implica la selección de ecotipos no tóxicos, los rendimientos de producción aceite y biomasa, el análisis las características físico-químicas del aceite como producto principal para la producción de biodiesel, la humedad de la biomasa para la producción de biocombustibles sólidos, la toxicidad de las semillas y el análisis bromatológico del endospermo para conocer si puede ser una fuente alimenticia.

También se analizaron los cambios en las características del suelo de la plantación *Jatropha curcas* como un indicador de los servicios eco sistémicos que ofrecen estas plantas.

El capítulo 3 presenta la metodología para evaluar la sustentabilidad del sistema de producción, los indicadores para evaluar los aspectos ambientales, económicos, sociales, e institucionales así como la descripción y los límites del sistema del análisis de sustentabilidad, se describe los procesos considerados en el sistema de producción y los escenarios de evaluación así como las hojas metodológicas para la obtención de los indicadores y la metodología para obtener el índice de sustentabilidad para comparar los indicadores obtenidos en cada uno de los escenarios.

En el capítulo 4 se presentan los resultados de los indicadores de sustentabilidad en cada uno de los escenarios analizados, a partir de los cuales se calcula el índice de sustentabilidad para cada uno de los escenarios y se presenta el análisis de la normatividad y regulación vigente aplicable a cada una de las etapas del sistema de producción.

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

## **Capítulo 1. Problemática de la producción de biocombustibles y las materias primas utilizadas**

Los biocombustibles provienen de la materia orgánica resultante de un proceso biológico o natural también llamada biomasa, estos se pueden obtener al someter a la biomasa a distintos tipos de transformación, desde utilizarse directamente o como el producto obtenido de modificaciones en su sustancia original, tales como, conversiones termoquímicas, bioquímicas y físico-químicas.

Como resultado de las transformaciones de la biomasa se obtienen biocombustibles su forma sólida, líquida y gaseosa, estos biocombustibles se aprovechan en diferentes usos finales, tal como como, para la producción de calor, electricidad y/o como combustibles para el transporte.

El mayor auge del uso de los biocombustibles líquidos se dio poco después del año 2000, debido principalmente a la problemática energética que se presentó sobre el aumento de los precios del petróleo y el incremento en la toma de conciencia de la dependencia de las importaciones del petróleo en los países no petroleros. Por otro lado, gran parte del interés sobre el uso de biocombustibles se debió a la problemática ambiental derivada del consumo no sustentable de los recursos naturales en las décadas anteriores.

El comienzo de la producción masiva de los biocombustibles líquidos se basó en la utilización de productos alimenticios como materias primas, y el rápido crecimiento en la demanda de los biocombustibles con este tipo de materias primas ocasionó el debate sobre las implicaciones ambientales y socioeconómicas de la producción de biocombustibles y el cuestionamiento sobre la habilidad de los biocombustibles para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para minimizar la competencia de la producción de alimentos y de energía se exploraron materias primas de cultivos no alimenticios, tales como materias primas lignocelulosas y aceites no comestibles[5]. Sin embargo, la sustentabilidad de la producción de biocombustibles continúa siendo una preocupación.

En este capítulo se abordan las cuestiones más importantes que han limitado la producción y uso de biocombustibles para satisfacer las necesidades energéticas.

El capítulo comienza presentando una clasificación general de los biocombustibles y el estado actual de la participación de los biocombustibles en el suministro de las energías renovables, así como las formas de usos finales.

El capítulo aborda concepto de la sustentabilidad, su importancia con la producción de la bioenergía y los principales indicadores que enmarcan el análisis de sustentabilidad de biocombustibles.

Posteriormente, se presentan las características de la *Jatropha curcas* como una materia que obtuvo un fuerte interés para la producción de biocombustibles avanzados, las propiedades del aceite para su transformación a biodiesel, la biomasa y otros usos que se han investigado de los subproductos del cultivo de la materia prima.

Se hace una revisión de los principales estudios sobre los impactos ambientales, sociales y económicos que se han realizado a este sistema de producción.

Los objetivos particulares de capítulo son:

- (1) Presentar el estado actual de la producción de biocombustibles y su participación en el sector energético y los usos finales
- (2) Exponer el debate sobre la sustentabilidad de los biocombustibles
- (3) Presentar los argumentos que han llevado a considerar a las plantas de *Jatropha curcas* como una materia prima sustentable y sus limitaciones
- (4) Presentar los indicadores que se ha desarrollado para la evaluación de sustentabilidad de la bioenergía y las principales metodologías para evaluar cada uno de los aspectos de la sustentabilidad



## 1.1 Los biocombustibles y su producción actual

Los biocombustibles en su forma sólida, líquida y gaseosa se obtienen de transformaciones termoquímicas, bioquímicas y físico-químicas de la biomasa. En la Figura 1 se presentan las principales rutas de conversión de la biomasa y su forma de aprovechamiento como la producción de calor, electricidad y/o como combustibles para el transporte

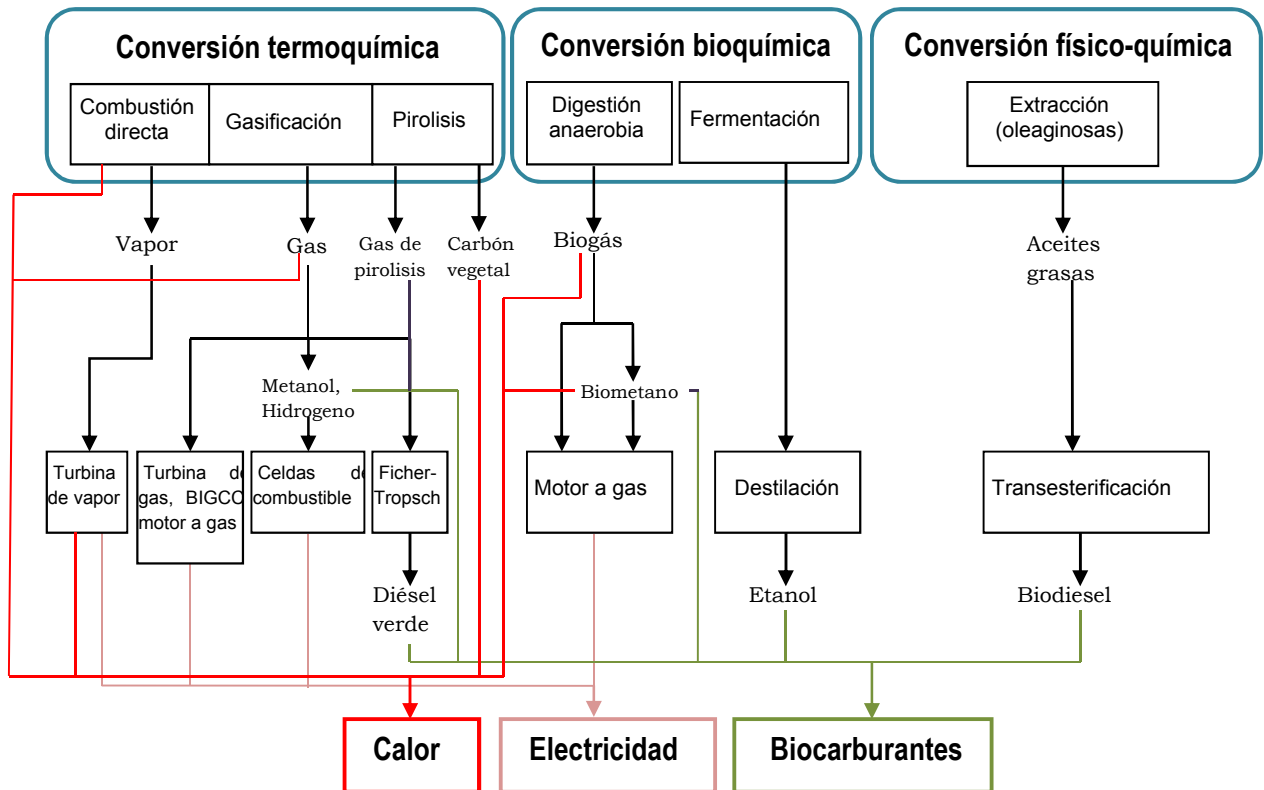
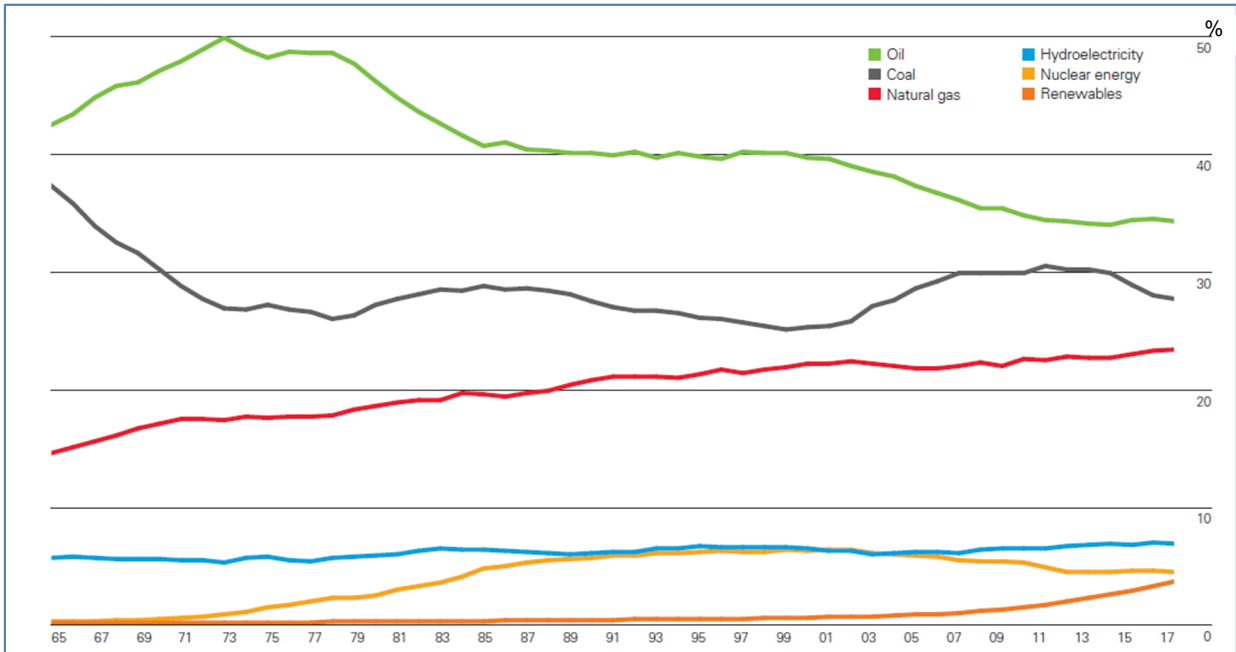


Figura 1 Tipos y tecnologías de conversión de la biomasa en energía útil

A los biocombustibles presentados en la Figura 1 también se les conoce como “biocombustibles modernos”, cuando la biomasa se utiliza directamente para obtener calor en dispositivos simples se clasifica como “biomasa tradicional” e involucra la quema de maderas, carbón vegetal, así como estiércol de ganado

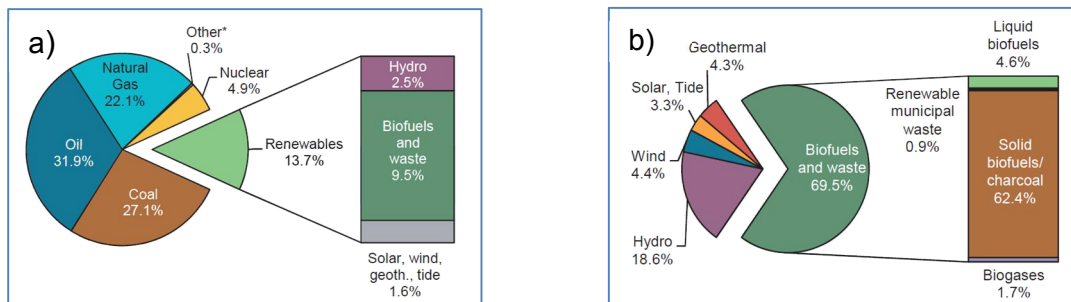
Los biocombustibles tanto en su forma de biomasa tradicional como moderna ha sido la fuente de energía renovable más utilizada a lo largo de la historia, aunque en las últimas décadas las fuentes de energías renovables que conforma el suministro de energía primaria total se encuentra la energía eólica, solar oceánica e hidráulica.

En la gráfica 1 se visualiza la tendencia de participación de las energías renovables (color anaranjado fuerte) en el consumo de energía mundial, a finales de la década de 1980 se comienza a notar una participación de estas y a mediados del año 2000 la participación aumenta considerablemente, sin embargo, comparado con los combustibles fósiles el un porcentaje de participación es bajo de 3.6% al año 2017.



**Gráfica 1** Porcentaje de participación del consumo de energía primaria por combustible a nivel mundial [40]

El conjunto de energías renovables aportó el 13.7% del suministro energía primaria total del año 2016 contabilizado a 13 761 Mtoe en dónde los biocombustibles tienen la mayor participación aportando 9.5% como de observa en la Gráfica 2 en el inciso (a).

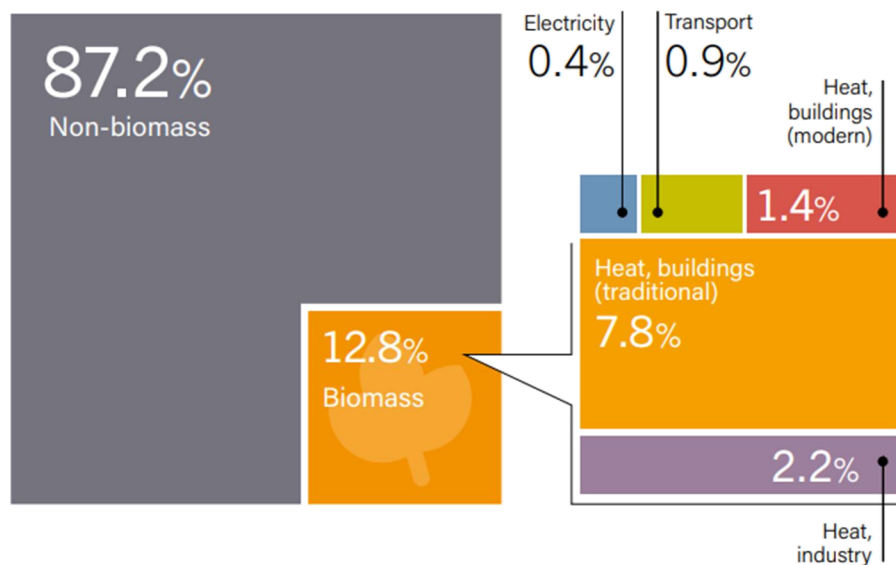


**Gráfica 2** Participación de los combustibles a nivel mundial en el año 2016 a) en el suministro de energía primaria total b) en el suministro de energía renovable [41]

En el inciso (b) de la gráfica 2 se observa que los biocombustibles sólidos son los de mayor participación y los biocombustibles líquidos se encuentran en segundo lugar, aunque la participación es mucho menor que los biocombustibles sólidos.

Con respecto al consumo final de energía, en el año 2016 el consumo fue de 362.2 EJ en donde los biocombustibles aportaron el 12.8 % (46.4 EJ)[2].

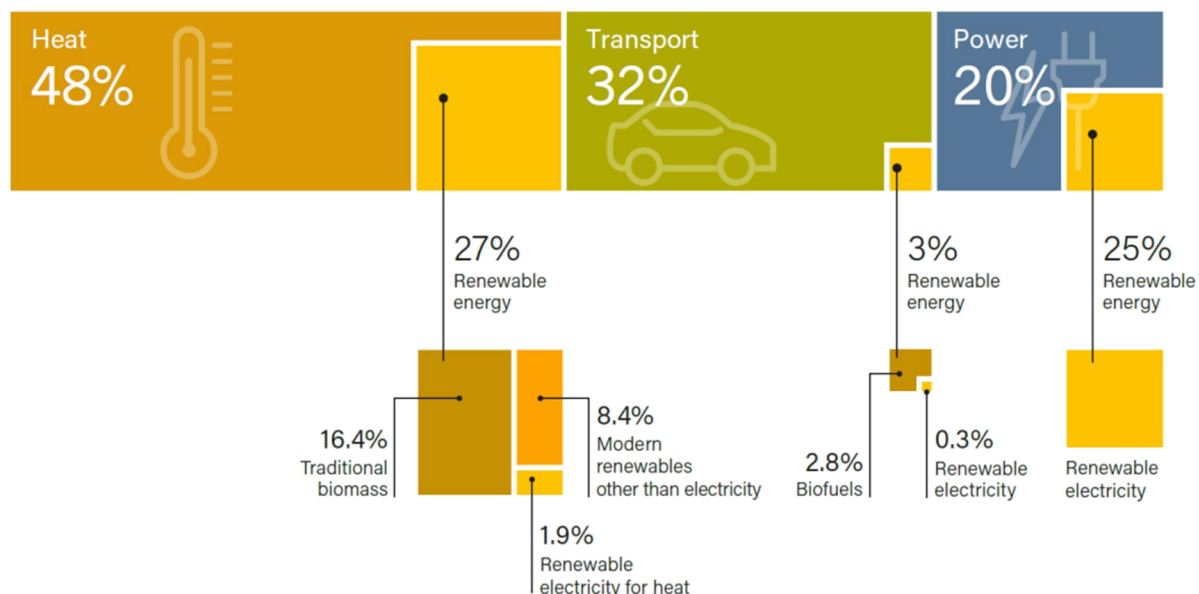
En la figura 2 se muestra que la mayor parte de los biocombustibles son para la obtención de calor para edificios y se obtiene con biomasa tradicional. En segundo lugar, se encuentra el uso para la obtención de calor para industrias a partir de biomasa moderna, generalmente como pellets.



**Gráfica 3 Participación de la bioenergía en el consumo final de energía en los sectores de uso final en el año 2016 (Hales, 2018)**

El uso de biocombustibles para el transporte, como son: Etanol, biodiesel y HVO/HEFA (Hidrotratamiento de aceites vegetales / Hidrotratamiento de esteres de ácidos grasos) tienen mucho menor participación con únicamente 0.9% del total del consumo final de energía.

La energía para el sector transporte es casi la tercera parte del consumo global de energía final que se obtiene principalmente del petróleo, solo una pequeña parte proviene de biocombustibles líquidos como se aprecia en la gráfica 3, siendo el etanol y el biodiesel los biocombustibles que tienen la mayor participación.



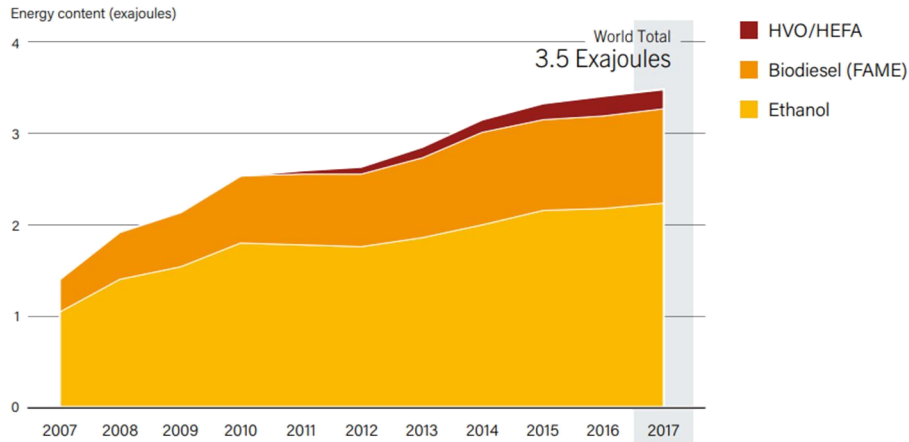
**Gráfica 4 Energía renovable en el consumo de energía final por sectores, año 2015 [2]**

El progreso relacionado a la producción de biocombustibles líquidos ha sido lento desde que retomaron un verdadero interés para la producción de energía, durante la década del año 2000-2010 la producción global de biocombustibles tuvo un aumento exponencial pasando de una producción de biodiesel de menos de 30 PJ en el año 2000 a 572 PJ en el año 2009 y la producción de etanol creció de 340 PJ en el año 2000 a 1540 PJ en 2009 [42].

En la gráfica 4 se muestra el crecimiento de producción de biocombustibles líquidos a nivel mundial ha aumentado considerablemente del 2007 a 2017, pasando de 1.3 EJ a 3.5 EJ. El etanol representa el 65% de la producción total, 29% el biodiesel y el 6% HVO/HEFA.

Los mayores productores de etanol son Estados Unidos y Brasil con 84% de la producción seguido por China, Canadá y Tailandia. La producción de biodiesel, en cambio, es geográficamente más diversa que el etanol y se extiende a más países, el país con mayor producción es Estados Unidos con 16%, Brasil con 11%, Alemania con 9%, Argentina con 9% e indonesia con 7%.

La producción de HVO/HEFA es más reciente, comenzó después del año 2010 y los países con mayor producción son Finlandia, Holanda, Singapur y Estados Unidos [2].



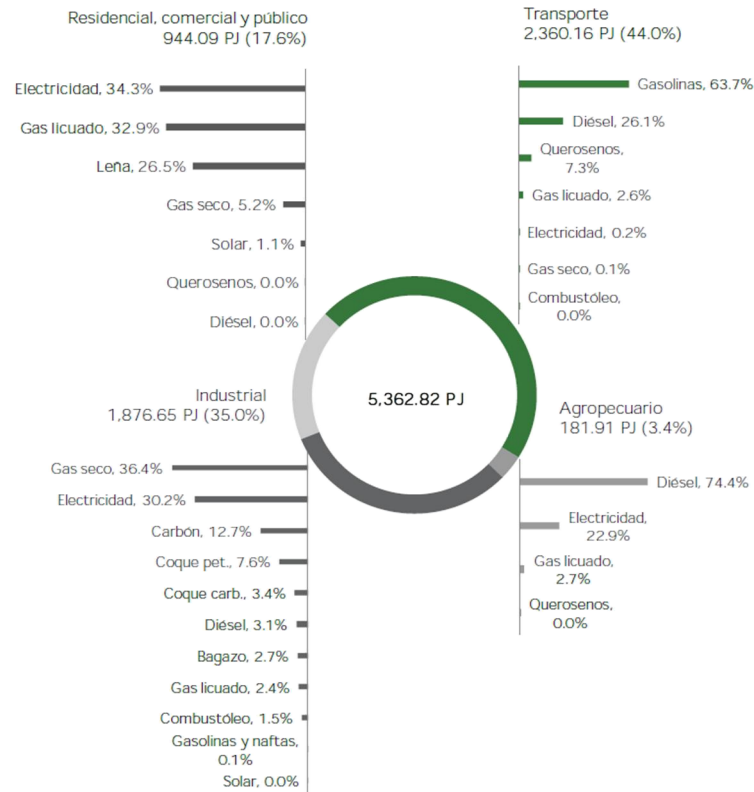
**Gráfica 5** Tendencia de producción global de biocombustibles líquidos de 2007 a 2017[2].

Actualmente, varios países continúan estableciendo políticas para promover los biocombustibles para el transporte terrestre principalmente para vehículos ligeros, tanto en remplazo al 100% de combustibles fósiles por biocombustibles como en mezclas de ambos. Sin embargo, para el subsector de vehículos de carga y tren y los transportes marino y aviación se han promovido muy pocas políticas a pesar de que también son consumidores de grandes cantidades de energía.

Los mandatos de las mezclas de biocombustibles con combustibles fósiles continúan siendo los mecanismos más adoptados en el mundo para el sector de transporte terrestre, países como Brasil tiene como mandato el uso de mezclas B10, Argentina de B9, en Estados Unidos de B20 para biodiésel y Eslovenia con B100 de biodiesel en el 10% de los camiones de carga.

En México, aunque desde el año 2008 se comenzó a promocionar el desarrollo de biocombustibles mediante la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB) que se concentró en la promoción del etanol y biodiesel como sustitutos a la gasolina y el diésel, se ha limitado a establecer mezclas de etanol de 10%.

Actualmente, en México no existe una producción importante de tales biocombustibles por lo que el 100% del sector de transporte utiliza combustibles fósiles. Como se puede ver en la gráfica 6, el sector transporte es el más intensivo de energía representando el 44% del consumo total donde las gasolinas y el diésel son los principales combustibles.



Gráfica 6 Consumo final de energía en México del año 2017 por sector y por energético [43]

## 1.2 El debate sobre las materias primas para la producción de los biocombustibles

El lento crecimiento de los biocombustibles se ha debido en gran parte al debate sobre las materias primas utilizadas para su producción, así como, la crítica sobre si los biocombustibles son una fuente sustentable de energía.

En la producción de los biocombustibles se utilizan materias primas que también tienen usos alimentarios, a estos se le llama biocombustibles de primera generación o biocombustibles convencionales. Las materias primas principales son: en la producción de etanol, azúcares y almidones obtenidos de maíz, caña de azúcar, trigo y yuca; en la producción de biodiesel, son aceites de soya, girasol, palma, colza y grasas animales. En la tabla 1 se muestra la clasificación de los de biocombustibles de acuerdo a la materia prima.

**Tabla 1 Clasificación de los biocombustibles**

Clasificación de los biocombustibles	
<b>Biocombustibles avanzados</b>	<p><b>Primera generación</b></p> <p>Constituyen la utilización de materias primas que también tienen usos alimentarios y utilizan tecnologías sencillas para la transformación. La obtención de etanol es por medio de fermentación y transesterificación para la producción de biodiesel, normalmente utilizan el azúcar o porciones de almidón de algunas plantas como caña de azúcar y azúcar de algunos cereales para producir etanol y semillas de algunas oleaginosas como girasol, soya, etc. para producir biodiesel</p>
	<p><b>Segunda generación</b></p> <p>Utilizan materias primas no comestibles como residuos agrícolas y forestales primarios y secundarios, hierbas perennes, árboles de crecimiento rápido son producidos con tecnologías que transforman los residuos de la biomasa, provenientes de la agricultura o maderables principalmente, en combustibles. Está generación de biocombustibles puede producirse en conjunto con la producción de ciertos alimentos, aunque son preferidas las áreas no destinadas para la producción de los mismos, como de <i>Jatropha curcas</i>, higuera, aceite de palma, etc.</p>
	<p><b>Tercera y cuarta generación</b></p> <p>Se basa en la utilización de cultivos energéticos especialmente diseñados o adaptados para obtener altas productividades. La producción de agro energía y biocombustibles se combina con tecnologías de captura y almacenamiento de carbono a nivel de la materia prima y de la tecnología de proceso, se basan en la producción de biocombustibles líquidos sintéticos a partir de la biomasa sólida principalmente y algas</p>

El rápido crecimiento en la demanda de los biocombustibles de primera generación y las políticas adoptadas por los países para lograr sus metas de participación de biocombustibles ocasionó el debate sobre las implicaciones ambientales y socioeconómicas de la producción de biocombustibles.

Por un lado, surgieron cultivos dedicados exclusivamente a la obtención de materias primas para la producción de combustibles llamadas plantaciones energéticas. Las plantaciones energéticas que cultivaban materias primas comestible generaron una la competencia de la producción de alimentos contra la producción energía. La competencia involucraba la demanda de tierra, agua y recursos para los cultivos, de esta forma, la producción de biocombustibles mostró efectos directos e indirectos sobre la seguridad alimentaria de los países productores de las materias primas, sobre todos los países en vías de desarrollo.

El incremento de la producción de materias primas para biocombustibles detonó un crecimiento en los precios de los alimentos, un estudio realizado por [3] muestra que el incremento de la demanda global de biocombustibles del 2000 al

2007 aumentó el 30% el precio promedio ponderado de los granos, sobre todo en los precios de maíz.

En el análisis realizado por [4] sobre los factores relacionados a los altos precios de los alimentos se concluyó que la razón más importante de tal incremento fue la desviación de una gran proporción de cultivos de granos alimenticios desplazados para producir biocombustibles en E.U. y Europa.

Por otro lado, surgió el cuestionamiento sobre la habilidad de los biocombustibles para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero debido las condiciones de cultivo de las materias primas, tal como, los impactos potenciales sobre el uso de suelo para la producción de las materias primas, particularmente en suelos vírgenes, en suelos con alto valor de conservación y el uso de áreas de bosque para nuevos cultivos.

En esos casos la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de los biocombustibles resultó ser relativamente baja comparada con los combustibles fósiles y en algunos casos resultó ser menor. Estudios sobre los impactos ambientales indican que el cambio de uso de suelos nativos a cultivos energéticos aumenta significativamente las emisiones de CO<sub>2</sub> y crea una deuda de carbono.

Adicionalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero por el cambio de uso de suelo, se manifestaron efectos asociados sobre el hábitat, la biodiversidad, agua, aire y calidad de los suelos debido a la deforestación. El uso de fertilizantes nitrogenados, pesticidas y herbicidas que se requirieron para los cultivos de producción comercial de los biocombustibles también provocaron la contaminación del suelo y los cuerpos de aguas subterráneos.

Debido a estas implicaciones en la producción de los biocombustibles y sus efectos negativos surgió la preocupación sobre la sustentabilidad de tal producción. En todos los países se comenzaron a crear nuevas políticas para proteger tierras amenazadas, asegurar el uso de tierras socialmente aceptables, y dirigir el desarrollo de la bioenergía en dirección a la sustentabilidad.

Para minimizar la competencia de la producción de alimentos y de energía, en todo el mundo se generaron políticas energéticas para que el mayor porcentaje de bioenergía se desarrollará en cultivos no alimenticios, tales como materias primas lignocelulosas y aceites no comestibles, bajo un enfoque de prácticas de cultivo sustentables y cultivos de bajos insumos [5].

En el campo de la bioenergía comenzó una ola de investigación y desarrollo tanto en el sector público como en el sector privado para atacar los problemas de la



cadena de producción de los biocombustibles sobre la conversión de todo el material vegetativo en energía y hacer una mayor la eficiencia de las plantas oleaginosas, almidones y de las materias primas de los biocombustibles de primera generación [4].

En los últimos años la producción de biocombustibles ha tenido un crecimiento bajo retenido por las políticas y regulaciones climáticas relacionadas a la sustentabilidad de las materias primas que varían ampliamente por región.

De acuerdo al reporte de [2] el comercio internacional del biodiesel fue gravemente afectada por los cambios en las tarifas de importación; en Estados Unidos se introdujeron tarifas “anti-dumping” sobre las importaciones de Indonesia y Argentina y en la Unión Europea finalizaron en 2017 las tarifas sobre importaciones de biodiesel.

Sin embargo, existe gran interés de utilizar los biocombustibles en el sector aéreo y marítimo. Aunque cada vez más se está limitando la producción de biocombustibles convencionales producidos con materias primas que también se utilizan como alimento y se va incrementando el interés los biocombustibles avanzados para mejorar la sustentabilidad de la producción de los biocombustibles, que generan menores impactos en el ciclo de vida de carbono e impactos sobre el uso de tierra que los biocombustibles convencionales

### **1.3 Sustentabilidad de los biocombustibles**

El término de Sustentabilidad originalmente proviene de la silvicultura para indicar que la remoción de madera de los bosques debe ser la cantidad de madera que los bosques pueden producir a lo largo del tiempo. Estas prácticas de la silvicultura sobre el cuidado de los bosques y cultivos son la base de un sistema productivo sustentable, donde el término sustentable significa durable, permanente o mantener en existencia [44].

Posteriormente, cuando comenzaron a manifestarse las preocupaciones acerca de los impactos del crecimiento económico sobre los recursos naturales y el medio ambiente, el término de sustentabilidad fue retomado en el documento conocido como “Nuestro futuro común” o “Reporte Brundtland” publicado en 1987 por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CMMAD).

En el “Reporte Brundtland” se definió el concepto de desarrollo sustentable como aquel que satisface las necesidades de la presente generación sin comprometer la

habilidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades, dicho reporte establece que la protección al medioambiente ésta vinculada con el desarrollo global y enfatiza en la responsabilidad que la humanidad tiene con las generaciones futuras.

El concepto de desarrollo sustentable señala la integración de 3 aspectos que están fuertemente vinculados e interactúan dinámicamente entre sí, estos aspectos son: la dimensión económica, la dimensión ambiental y la dimensión social, estas tres dimensiones son conocidos como los pilares de la sustentabilidad [44].

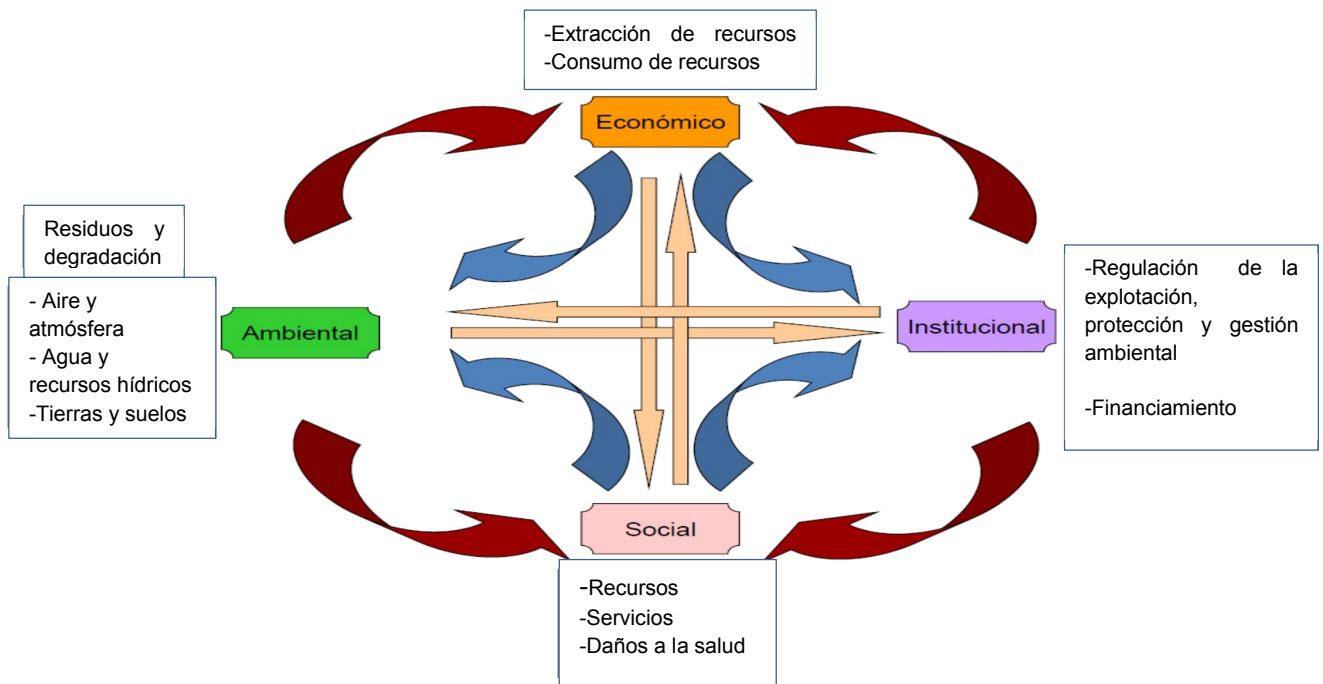
En el programa llamado Agenda 21 creado en 1992 se establecieron los acuerdos de los gobiernos y países para impulsar el desarrollo sustentable bajo los 3 aspectos señalados. Tiempo después, después de la Cumbre Mundial sobre el Medio ambiente de Johannesburgo 2002, se incorporó la dimensión institucional para operacionalizar las demandas de la agenda 21, en esta dimensión se establece que el desarrollo sustentable se vincula con gobernabilidad y la vigencia de condiciones que aseguren el respeto por los derechos del hombre y en donde los conflictos se dirimen a través de mecanismos institucionales que garanticen la consideración de los intereses del conjunto de la sociedad [45].

De esta forma la sustentabilidad considera la integración de los aspectos ambientales, sociales, económicos e institucionales para lograr la estabilidad económica, equidad social y productividad de los recursos en un sistema, en la figura 5 se ilustra tal integración y los impactos que intervienen en cada uno de los pilares.

En la agenda 21 se explicitaba la necesidad de contar con indicadores de desarrollo sustentable para monitorear el progreso de los países.

Los indicadores son uno de principales instrumentos que facilitan la gestión para el desarrollo de la sustentabilidad para conocer el estado de desarrollo de un sistema y medir su estado presente y tendencia al futuro para verificar si el sistema progresa o no hacia la consecución del objetivo de la sustentabilidad.

Durante el desarrollo de indicadores para evaluar el desarrollo sustentable se desarrollaron indicadores energéticos que expresaban los aspectos o consecuencias del uso de la energía como un elemento imprescindible para potenciar el bienestar social y económico.



**Figura 2 Integración de los pilares de la sustentabilidad**

La bioenergía moderna es vista como una opción que puede proporcionar múltiples beneficios, que incluyen la promoción del desarrollo de la economía rural, el incremento en los ingresos por hogar, la mitigación del cambio climático, y la posibilidad del acceso a los servicios de energía moderna y que puede contribuir significativamente al alcance de los objetivos de seguridad energética y desarrollo económico. Sin embargo, la bioenergía presenta riesgos tales como la pérdida de biodiversidad, la deforestación, la presión adicional sobre los recursos hídricos y una mayor demanda de insumos agrícolas, la tierra y las materias primas.

Por tal motivo es importante evaluar los beneficios y desafíos de la producción y uso de la bioenergía que refleje el contexto nacional. Se reconoce que si se quiere que la bioenergía tenga un futuro viable a largo plazo entonces debe producirse y utilizarse de modo sustentable.

La sustentabilidad de la producción de la bioenergía podría definirse como la capacidad de una región para lograr un balance entre estabilidad económica, equidad social y productividad de recursos.

Si la producción de biocombustibles líquidos se produce de manera sustentable puede ser considerado como una fuente de energía sustentable debido a que se pueden mezclar fácilmente con los combustibles fósiles, promueven las prácticas

sustentables de agricultura y diversificación de las materias primas, suponen un potencial neutro de CO<sub>2</sub> con un balance de carbón y de energía positivo.

### 1.1.1 Indicadores de sustentabilidad de la bioenergía

La investigación sobre los biocombustibles desde el punto de vista de sustentabilidad que se ha realizado en los últimos 20 años, se han propuesto diferentes métodos para evaluar y analizar la sustentabilidad energética y bioenergética. Estos análisis consideran los aspectos ambientales, económicos y sociales.

A nivel mundial se han desarrollado dos marcos internacionales para evaluar la sustentabilidad de la producción de biocombustibles, entre los indicadores más importantes son los planteados por la Mesa Redonda sobre Biocombustibles (RSB, por sus siglas en inglés, actualmente llamada Mesa Redonda sobre biomateriales sustentables) y el desarrollado por la Asociación Mundial de Bioenergía (GBEP, por sus siglas en inglés).

La Mesa Redonda sobre Biocombustibles se estableció en el año 2006 con el objetivo de proporcionar una base fiable sobre las características y/o especificaciones para asegurar la sustentabilidad de los biocombustibles. Los aspectos considerados se basan en criterios y principios medioambientales, sociales y económicos, de esta manera los estándares abarcan los tres pilares de la sustentabilidad de la producción de materias primas, procesamiento y transportación/ distribución de los biocombustibles líquidos.

Los principios y criterios se plasmaron en la norma RSB, norma de certificación que se volvió operacional en el año 2009. En la última versión de la norma RSB, Versión 2.0 realizada en el año 2011 se establecen 12 principios de cumplimiento que cubren las esferas social, medioambiental y económica, tales principios se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2 Principios de cumplimiento de la Norma RSB**[46]

<b>Principios</b>		<b>Objetivos del cumplimiento</b>
<b>1</b>	Legalidad	Todas las leyes y regulaciones aplicables
<b>2</b>	Planeación, monitoreo y mejora continua	Planeación, implementación y mejora continua a través de la identificación, mitigación y monitoreo de los riesgos ambientales y sociales clave
<b>3</b>	Emisiones de gases de efecto invernadero	Mitigación de cambio climático a través de la reducción significativa de emisiones de gases invernadero comparados con los combustibles fósiles
<b>4</b>	Derechos humanos y laborales	No violación de los derechos humanos y laborales, promoción del trabajo decente y el bienestar de los trabajadores
<b>5</b>	Desarrollo social y rural	Contribución al desarrollo social y económico de las

		personas rurales e indígenas y comunidades de regiones de pobreza
<b>6</b>	Seguridad alimentaria local	Asegurar el derecho humano a la comida adecuada y mejorar la seguridad alimentaria
<b>7</b>	Conservación	Evitar los impactos negativos sobre la biodiversidad, ecosistemas y valores de conversión
<b>8</b>	suelo	Mantenimiento de la salud del suelo y/o prácticas para revertir la degradación del suelo
<b>9</b>	Agua	Mantenimiento o mejoramiento de la calidad y cantidad de superficie y agua subterránea y respeto de los derechos del agua a las personas locales
<b>10</b>	Aire	Minimizar la contaminación del aire a lo largo de la cadena de suministro
<b>11</b>	Uso de tecnología, insumos y manejo de desechos	Maximizar la eficiencia y el desempeño social y ambiental y minimizar el riesgo al daño ambiental y las personas
<b>12</b>	Derechos sobre la tierra	Respeto a los derechos de la tierra tradicionales de comunidades indígenas y locales

Los principios de la norma RSB están organizados en aspectos ambientales, socio-económicos, de gobernanza y seguridad alimentaria, y consideran los temas presentados en la Tabla 3.

**Tabla 3 Aspectos de la sustentabilidad considerados en los principios y criterios de la norma RSB [46]**

Aspectos			
Ambiental	Socio-económico	Gobernanza	Seguridad alimentaria
Biodiversidad y servicios ecosistémicos	Tenencia de la tierra/ acceso y desplazamiento	Cumplimiento y Participación transparente	Disponibilidad de alimentos
Capacidad productiva de la tierra	Desarrollo rural y social		Acceso a los alimentos
Manejo de cultivo y uso de agroquímicos	Acceso al agua y otros recursos naturales		Utilización de alimentos
Disponibilidad y calidad del agua	Empleos, salarios y condiciones de trabajo		Estabilidad alimentaria
Emisiones de GEI	Salud humana y seguridad		
Calidad del Aire			
Manejo de residuos	Buenas prácticas de manejo y mejora continua		

La Asociación Global para la Bioenergía (GBEP, por sus siglas en inglés) se estableció también en el año 2006 con el fin de dar apoyo al despliegue de la biomasa y los biocombustibles, especialmente en los países en vías de desarrollo.

La GBEP desarrolló un conjunto de medidas e indicadores considerando los aspectos medioambientales, sociales y económicos para desarrollar el sector bioenergético para alcanzar los objetivos nacionales de desarrollo sostenible, los aspectos considerados se presentan la Tabla 4.

**Tabla 4 Aspectos de la sustentabilidad considerados en el conjunto de indicadores GBEP [47]**

Aspectos		
Ambiental	Social	Económico
Emisiones de gases de efecto invernadero	Precio y oferta de una canasta alimentaria nacional	Disponibilidad de recursos y eficiencias de uso en la producción, conversión, distribución y uso final de la bioenergía
Capacidad productiva de la tierra y los ecosistemas	Acceso a la tierra, el agua y otros recursos naturales	Desarrollo económico
Calidad de aire	Condiciones laborales	Viabilidad económica y competitividad de la bioenergía
Disponibilidad, eficiencia en el uso y calidad del agua	Desarrollo social y rural	Acceso a la tecnología y las capacidades tecnológicas
Diversidad biológica	Acceso a la energía	Seguridad energética
Cambio en el uso de la tierra, incluyendo los efectos indirectos	Salud y seguridad humanas	Diversificación de fuentes de suministro
		Infraestructura y logística de distribución y uso

La norma RSB aborda los cuatro pilares de la sustentabilidad (ambiental, social, económico e institucional), los aspectos los reacomoda en ambientales, socio-económicos, gobernanza y seguridad alimentaria. En cambio, los aspectos que aborda GBEP mantienen los pilares ambientales, sociales y económicos de la sustentabilidad, pero no incluye el aspecto institucional.

En los aspectos que la norma RSB y GBEP coinciden son en los ambientales y sociales, estos muy similares entre ambas, sin embargo, en el aspecto económico no tienen aspectos en común.

Estas diferencias corresponden a que los objetivos de cada organismos son diferentes, los indicadores establecidos en la norma RSB son requisitos de cumplimiento para la certificación de operaciones como procesos sustentables mientras que los indicadores de GBEP se desarrollan con la intención de brindar un conjunto de herramientas analíticas que puedan informar sobre el desarrollo de las políticas y programas nacionales de bioenergía y facilitar el seguimiento del impacto de políticas y programas para lograr los objetivos nacionales de desarrollo sustentable.

Los indicadores de ambos organismos son una herramienta para obtener información para el desarrollo de proyectos de producción de biocombustibles, así como para interpretar y responder a los impactos ambientales, sociales y económicos de la producción y el uso de la bioenergía.

## **1.2 *Jatropha curcas* como materia prima sustentable para la producción de biocombustibles**

El desarrollo de la producción de biocombustibles avanzados se ha enfocado en el uso de nuevas fuentes de biomasa y tecnologías de conversión avanzadas que además de producir energía y eficientar costos de la energía, también busca contribuir a las resolución de problemáticas sociales como el desarrollo rural, seguridad alimentaria y protección ambiental [48]

La *Jatropha curcas* es una planta oleaginosa considerada como una materia prima con potencial para la producción de biodiesel, la razón por la que las plantas de *Jatropha* han llamado la atención como un cultivo energético es por ser un arbusto suculento de crecimiento rápido, fácil propagación, resistente a la sequía y crece en tierras áridas [6,7].

Las características mencionadas son benéficas porque evitan la competencia por el espacio y/o recursos del cultivo de *Jatropha* con otros cultivos convencionales [8], puede rehabilitar tierras degradadas fijando carbono y mejorando las propiedades físico-químicas en el suelo [9], controlar la erosión [10], así como proveer diversos servicios eco sistémicos [11].

La *Jatropha curcas* es un arbusto perene que llegan a medir de 3 a 5 metros de altura y hasta 8-10 metros si las condiciones son favorables. Es una planta monoica, es decir, las flores son unisexuales en la misma planta lo cual beneficia a su reproducción y la formación de frutos [49]. Los frutos se producen después de las inflorescencias, cuando maduran se obtienen las semillas de donde se extrae

aceite no comestible, que es el producto de interés para la producción de biodiesel. En la Figura 3 se puede observar cada una de las partes de *Jatropha curcas*.



Figura 3 *Jatropha curcas*; a) planta, b) frutos, c) semillas, d) aceite

La planta de *Jatropha* pertenece a la familia de las euforbiáceas que incluye aproximadamente 186 especies, su distribución abarca principalmente las regiones tropicales de América, África y Asia, únicamente seis especies se encuentran en África y Asia y el resto se localizan en las regiones tropicales, subtropicales y semiáridas de América [50] en donde la región del golfo de México es considerado como probable centro de origen de *Jatropha curcas* [32].

El aprovechamiento inicial de *Jatropha curcas* fue de forma tradicional utilizado como cercos vivos para delimitar terrenos, como cercos de protección de campos de cultivo por ser un arbusto con amplia cobertura y no que puede ser comida por animales, también se utilizaba como soporte para plantas trepadoras.

Las semillas, las hojas y corteza tenían usos medicinales para tratar enfermedades de la piel, dolores de reumatismo y como antiséptico. El aprovechamiento del aceite de las semillas era como insecticida y fungicida para el control de plagas, así como para la producción de jabón. Los frutos eran utilizados como fertilizante [51].

Las características mencionadas de *Jatropha curcas* y los múltiples usos que se pueden aprovechar de la planta popularizaron su uso como una fuente potencial para la producción de biodiesel y se considera que el cultivo de *Jatropha curcas* como plantación energética es una opción sustentable para la producción de biocombustibles.

En la última década, el cultivo de *Jatropha curcas* se ha enfocado en la producción de semillas para la obtención de aceite y utilizar el aceite para la producción de biodiesel. También se ha explorado el potencial para aprovechar los subproductos que se obtienen de toda la cadena de producción de biodiesel para aumentar la



sustentabilidad de *Jatropha curcas* como materia prima. En la Figura 4 se muestra el aprovechamiento de la *Jatropha curcas* que se ha investigado en los últimos años.

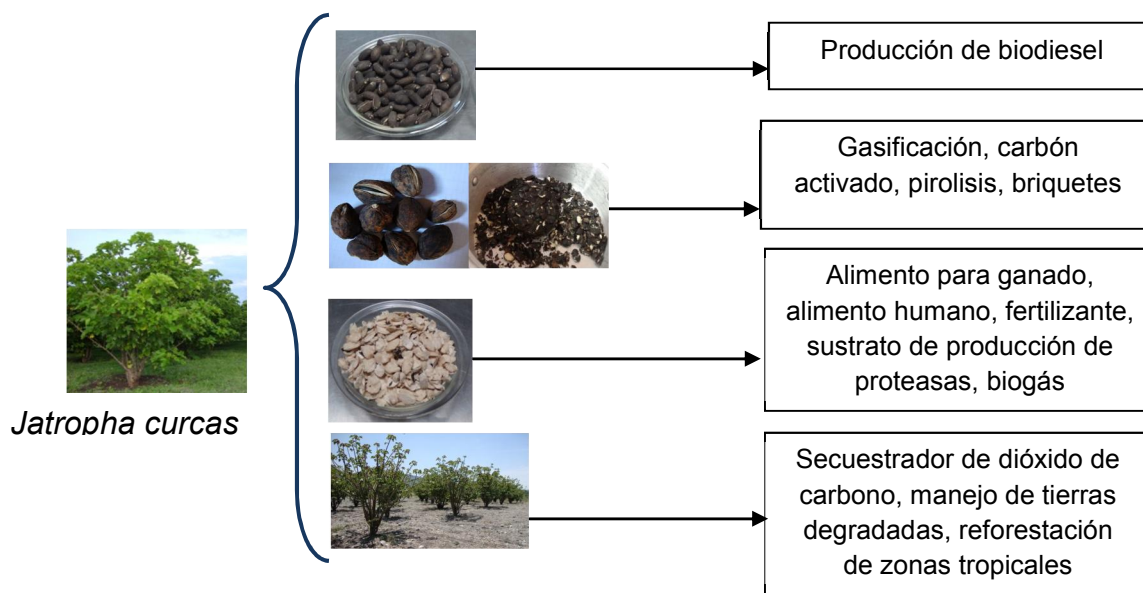


Figura 4 Diversas formas de aprovechamiento de las plantas de *Jatropha curcas*

#### 1.4.1 Características de *Jatropha curcas* para la producción de biodiesel: Semillas y características del aceite

La *Jatropha curcas* como materia prima para producir biodiesel comenzó a ser utilizada durante la segunda guerra mundial en países como Madagascar, Cabo Verde y Benin. A finales de la década de los noventa, el cultivo de *Jatropha* para producir biodiésel comenzó a realizarse en los países de centro América.

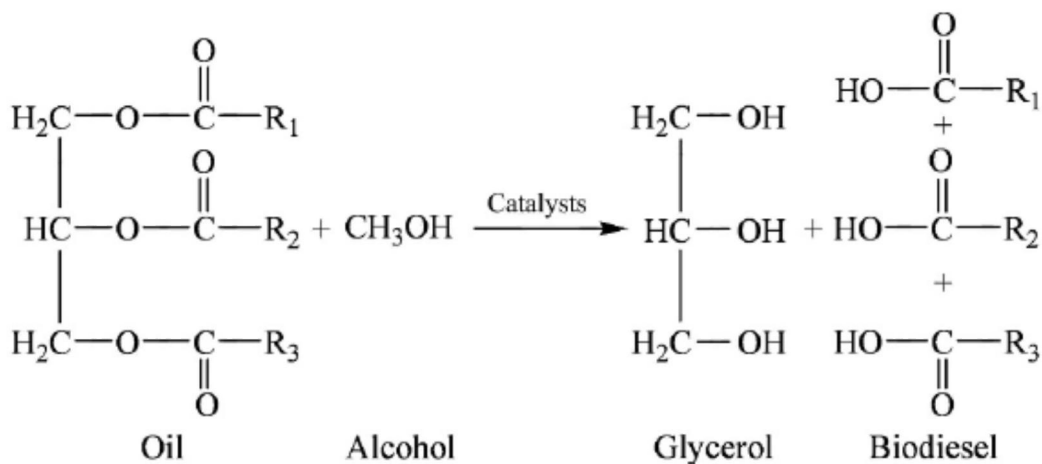
Los cultivos de *Jatropha curcas* en otras partes del mundo comenzaron a desarrollarse en los años siguientes. Entre los países con mayor interés en este tipo de cultivos se encuentra India que a partir del programa de biodiésel nacional que el gobierno puso en marcha en el año 2003. Los gobiernos de otros países como China, Japón, Bélgica, Brasil, Tanzania, México, Tailandia, Malasia, Filipinas y el Este y sur de África adoptaron medidas similares, establecieron sus propios planes para las mezclas de biodiésel y diésel.

El biodiesel es una mezcla de ésteres mono-alquílicos y cadenas largas de ácidos grasos derivados del aceite o de las grasas. 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 en biodiésel 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 [52].

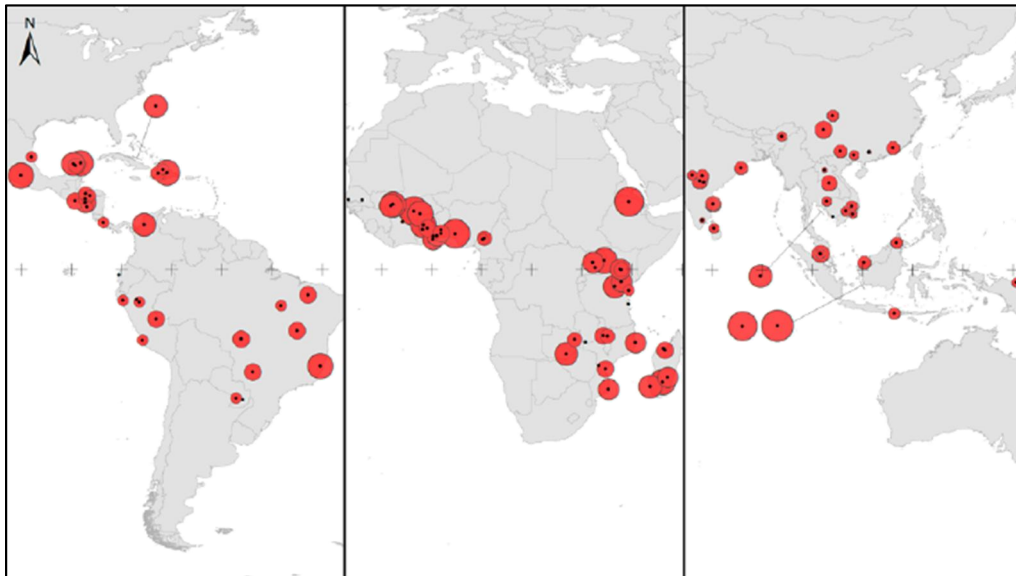
La transesterificación, es la reacción de una grasa o aceite con un alcohol para romper químicamente la molécula del aceite en bruto, resultando así la formación de ésteres de metilo o de etilo, y glicerol como un subproducto [53,54], en la Figura 5 se describe la estructura química de la reacción de transesterificación para convertir el aceite en biodiésel.

Comúnmente se utiliza un catalizador para mejorar la rapidez de la reacción, este catalizador puede un medio alcalino, ácido o por enzimas [55–58]. Las reacciones más utilizadas se realizan con catalizador alcalino también llamados catalizadores básicos, utilizando hidróxido de Sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH).



**Figura 5** Reacción de transesterificación de los triglicéridos con alcohol catalizado con un catalizador básico para la producción de biodiesel

La utilización de *Jatropha curcas* como materia prima para la producción de biodiesel ha sido extensamente estudiada en la última década [12,13], Para el año 2011 se contaba un área total de 1,040,039 ha de cultivo de *Jatropha* en todo el mundo [59]. En la Figura 6 se puede observar la distribución de los lugares donde se has establecido plantaciones de *Jatropha* hasta el año 2011.



**Figura 6** Distribución de las plantaciones de *Jatropha curcas* en el mundo

A pesar de varios estudios que se han realizado sobre este cultivo se ha encontrado una amplia variabilidad sobre los patrones de crecimiento y rendimiento de la producción de semillas, así como de las características fisicoquímicas y de toxicidad que han limitado el cultivo exitoso de *Jatropha curcas*.

La baja producción de semillas es la principal limitante del desarrollo de los cultivos que ha hecho inviables las plantaciones comerciales [16–18] a pesar de que en los sistemas de producción muestra un balance de emisiones y de energía positivo [14,15].

Los rendimientos de semillas que han sido estimados en varios países presentan una variabilidad marcada. Estos rendimientos de semillas son variables porque se reportan en diferentes etapas de maduración, con cultivos de variadas densidades, en escenarios de cultivos con altos y bajos recursos, así como, distintas formas de cultivo cómo monocultivos e intercultivos, además de que el rendimiento de semillas depende de la variabilidad genética de las plantas.

Los rendimientos de semillas por hectárea que se reportan, se encuentran en los intervalos de 26 a 11,250 kg/ha anualmente, con una media global de  $2218 \pm 148$  kg/ha al año [13,18,27].

En consecuencia, la cantidad de aceite que se puede obtener de las plantaciones de *Jatropha curcas* es también muy variada y esto es un factor determinante para la viabilidad de la producción de biodiesel.

El contenido de aceite varía dependiendo de la forma de extracción, que puede ser con prensado mecánico o con solventes químicos. Se reporta que contiene entre 20% a 50% de aceite con respecto al peso de la semilla y de 45 a 68% con respecto al peso del endospermo [13,60].

La composición química del aceite de *Jatropha curcas* es otro factor importante para la producción de biodiésel debido a que los componentes como la longitud de cadenas de carbono, el grado de insaturación y las ramificaciones de las cadenas de carbono determinan las propiedades del biodiésel [61].

El aceite de *Jatropha curcas* presenta un porcentaje entre 72% y 79% de ácidos insaturados conformado por ácido oleico (C18:1) y linoleico (C20:2) principalmente. El porcentaje restante es de ácidos saturados palmítico (C16:0) y esteárico(C18:0), principalmente [62–65]. En la Figura 7 se muestra la estructura molecular del aceite de *Jatropha curcas*.

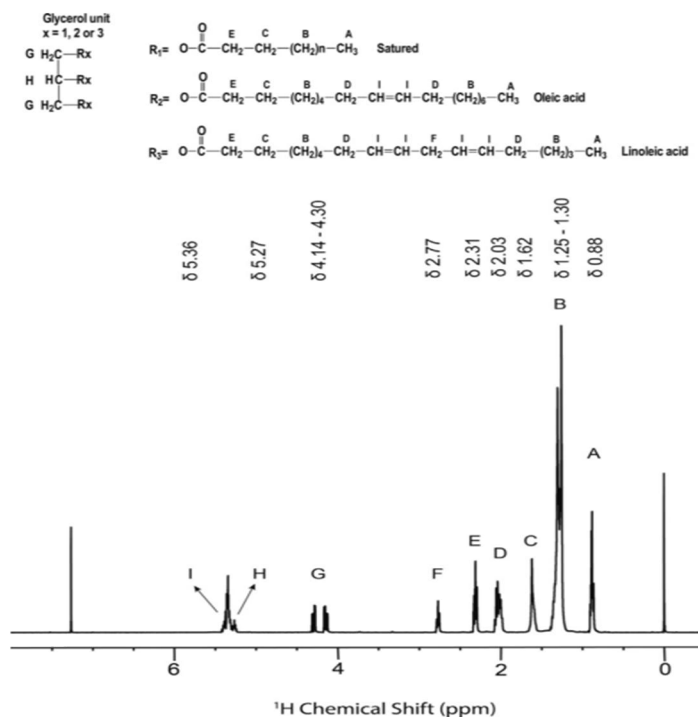


Figura 7 Estructura molecular y espectro HR-MAS NMR del aceite de *Jatropha curcas* tomada de [62]

Otras propiedades que se deben conocer del aceite son la densidad y la viscosidad, debido a que el nivel de pureza del aceite tiene un fuerte impacto en la calidad del biodiesel. Es deseable que el aceite tenga un valor bajo de densidad y

viscosidad para que el biodiesel obtenga propiedades adecuadas para ser usado en motores.

los valores reportados de densidad a 15 °C es de 0.90 g/cm<sup>3</sup> a 0.92 g/cm<sup>3</sup> [66–68]. La viscosidad de reportada como viable para la producción de biodiesel es de valor de 34 cst a 42.88 cst [67–69].

#### 1.4.2 Uso alimenticio de *Jatropha curcas* no toxicas

La composición química de *Jatropha curcas* también diferencia a las distintas variedades que se han reportado; las plantas contienen alcaloides, saponinas, taninos, ésteres, toxoalbúminas y compuestos cianogénicos. En los frutos se encuentran compuestos anti nutricionales como inhibidores de tripsina, fitatos, y compuestos tóxicos, tal como, cursina y ésteres de forbol.

Los compuestos mencionados tienen efectos negativos sobre la salud humana y/o animal, sin embargo, los ésteres de forbol son el principal compuesto reportado como tóxico por su actividad potente como promotor de tumores, proliferación celular, activación de plaquetas sanguíneas mitogénesis de linfocitos, eritema de la piel, producción de prostaglandinas y estimulación de la desgranulación en neutrófilos. [70–72].

La palabra forbol se refiere a un grupo de compuestos que pertenecen a la familia estrechamente relacionadas de dipertenos con estructura policíclica, su fórmula química es C<sub>20</sub>H<sub>28</sub>O<sub>6</sub>.

En los ésteres de forbol en el aceite de *Jatropha* tienen 6 isómeros con diferentes cadenas de grupos hidroxil en donde la principal estructura es 12-deoxy-16-hydroxyphorbol. Todas las estructuras de los ésteres de forbol son comúnmente llamada DHPB [71,73]. En la Figura 8 se presenta la estructura química de los ésteres de forbol.

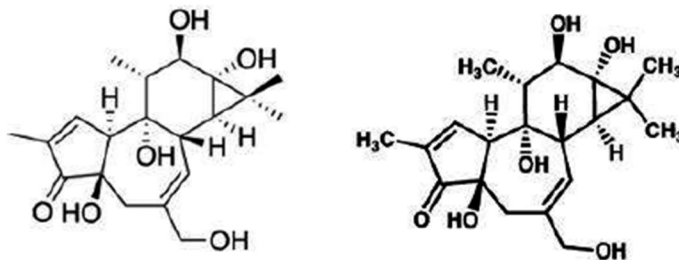


Figura 8 Estructura molecular del forbol y de 12-deoxy-16-hydroxy phorbol [73]

De acuerdo a la concentración de esteres de forbol en las semillas de *Jatropha curcas*, se han clasificado como variedades toxicas y variedades no toxicas.

Las variedades tóxicas contienen intervalos de concentración de ésteres de forbol de 0.35 a 2.34 mg/g de aceite [28] y de 0.60 a 5.15 mg/g de peso de semilla [34,74].

La presencia de esteres de forbol se encuentra principalmente en el aceite y en el endospermo pero se ha reportado que la manipulación de los productos y subproductos de las variedades toxicas pueden generar alteraciones celulares generando problemas dérmicos y oculares [75]. La presencia en los esteres de forbol en *Jatropha curcas* es una limitante para poder aprovechar los residuos de la extracción de aceite.

El endospermo extruido de la extracción de aceite es un subproducto que se obtiene en gran cantidad y que puede proporcionar un valor agregado. Este residuo representa el 65% del peso de las semillas, la composición química del endospermo presenta un alto contenido de proteína cruda (50 a 58%) con niveles de aminoácidos esenciales más altos que la FAO recomienda para el crecimiento de niños de 2 a 5 años [64,76,77]. Estas características sugieren el endospermo puede ser utilizada como una fuente de proteínas y carbohidratos para procesos de fermentación y/o formulación de alimento para humanos y/o para animales.

Sin embargo, las semillas de las variedades toxicas no pueden ser utilizadas para consumo de humanos y animales a menos que las semillas se sometan a tratamiento de detoxificación para remover o inactivar a los ésteres de forbol. Consecuentemente, estos tratamientos actualmente se encuentran en desarrollo y el escalamiento de algunos tratamientos son difíciles de controlar [78,79], otros tratamientos con solventes químicos, tratamiento enzimático, tratamiento alcalinos, y fermentaciones microbianas generalmente suelen ser costosos [80]

Adicionalmente, estos tratamientos no logran reducir los niveles de ésteres de forbol de las semillas a niveles aceptables para su consumo [81,82], se ha reportado que incluso en los niveles de concentración muy bajos de ésteres de forbol en las semillas, de 0.04 a 0.09 mg/g, ha presentado efectos negativos en los animales [79].

Cabe señalar el aprovechamiento de la pasta residual ha sido limitada debido a que las plantaciones de *Jatropha curcas* se han basado en variedades de semillas toxicas que presentan altos niveles de esteres de forbol.

Las variedades no tóxicas no contienen ésteres de forbol o presentan en concentración muy baja, no detectable a 0.02 mg/g de semilla [28,35,74] y se ha detectado que las semillas pueden ser consumidas por humanos y/o animales [77,83]

Estas variedades se han localizado en diferentes estados de la república mexicana, en los estados de Veracruz, Hidalgo, Puebla Yucatán y Quintana Roo en donde tuvo lugar la domesticación por las culturas prehispánicas Mayas y Olmecas [32]. En algunas provincias de Quintana Roo y Veracruz las semillas son utilizadas en la preparación de platillos tradicionales [35].

En el estado de Morelos se ha reportado la existencia de variedades “no tóxicas” en municipios de Cuautla y Yautepec [33,34], sin embargo estas variedades también se distribuyen en otras zonas del estado que no han sido estudiadas.

A pesar de que las variedades no-tóxicas que pueden ser consumidas por humanos y/o animales [77,83], no han sido utilizadas en las plantaciones de comerciales, ni han sido objeto de programas de mejoramiento y únicamente se encuentran en poblaciones naturales.

#### 1.4.3 Biomasa de *Jatropha curcas*

Otra alternativa que se ha explorado para obtener un valor agregado del cultivo de *Jatropha curcas* además de la producción de biodiesel se ha explorado el aprovechamiento de la biomasa.

Se ha explorado el uso de la biomasa con fines energéticos, en donde la pasta residual de la extracción de aceite, es decir, el pericarpio, el tegumento y endospermo son sometidos a procesos de combustión, pirólisis, gasificación y biogás [36–39].

Los residuos del cultivo de *Jatropha curcas* que se obtienen en mayor cantidad son las cáscaras de los frutos maduros de donde se obtienen las semillas (pericarpio), las cáscaras de las semillas (tegumento) y el núcleo de las semillas de donde se extrae el aceite (endospermo), estas biomásas representan poco más del 80% del peso del fruto en base seca y tienen un potencial energético considerable.

La composición de las biomásas mencionadas, es predominante lignocelulosa con un promedio de contenido de cenizas de 2-9%. El pericarpio y el tegumento tienen

un alto contenido de lignina con poder calorífico de 14.9 MJ/kg y 19.2 MJ/kg, respectivamente y de 18.8 MJ/kg de la pasta residual [84].

En el estudio realizado por [84] reporta que el aprovechamiento de las biomásas puede aumentar el rendimiento de energía a más de 90 GJ por año por hectárea que los 30 GJ de energía que se obtienen cuando únicamente se aprovecha el aceite en una hectárea de una plantación con 5 años de edad de las plantas.

El aprovechamiento de las biomásas puede generar un valor agregado a las plantaciones de *Jatropha curcas* llevando a mejorar la rentabilidad de tales plantaciones.

Otros estudios que proponen el uso del pericarpio como carbón activado en el proceso de absorción para remover contaminación de colorantes utilizados extensamente en la industria textil, de colorantes, de impresión de papel y de metales pesados [85]

Por otra parte, se ha estudiado las propiedades larvicidas y antimicrobianas de diferentes partes de *Jatropha curcas*, así como de los residuos que se obtienen del cultivo. Los extractos de la planta de *Jatropha curcas* contienen potentes actividades citotóxicas, antitumorales y antimicrobianas. En el estudio realizado por [86] reportaron que los extractos de la corteza del árbol, raíces, hojas y semillas de *Jatropha curcas* tienen actividad antimicrobiana y efectos larvicidas contra cepas bacterianas patógenas por lo que *Jatropha curcas* tienen potencial para ser utilizado en el tratamiento de enfermedades causadas por patógenos.

#### 1.4.4 Servicios ecosistémicos de *Jatropha curcas*

*Jatropha curcas* es considerada como una planta multipropósito, fue popularizada como una fuente de energía por sus características de resistencia a la sequía, rápido crecimiento, fácil propagación y su amplio intervalo adaptación a diferentes ambientes.[87].

Las plantaciones de *Jatropha curcas* es una de las plantas recomendadas para los usos de tierras degradadas, tierras salinas, recuperación de tierras abandonadas, como sumidero de carbono y que puede crecer en intercultivos, así como tierras que no se utilizan para el cultivo de alimentos. [88].

Es considerada como una planta adecuada para fitoremediación de suelos contaminados. Algunas investigaciones han reportado que *Jatropha curcas* es capaz de extraer metales pesados y metaloides y remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. Estos estudios han probado las plantas de



*Jatropha curcas* en suelos contaminados con metales pesados como, Al, Fe, Cr, Mn, Ar, Zn, Cd, y Pb. [89–91].

Una característica especial de las plantas de *Jatropha curcas* es el alto niveles de absorción de carbono de la atmósfera que la almacena en los tejidos leñosos y la fijación en el suelo.

Las plantas de *jatropha curcas* también son consideradas como sumideros de carbono, [92] reporta que las plantas de dos estaciones experimentales fijaron 3.07 kg C por planta y 2.44 Kg C por planta, respectivamente, en las ramas y raíces.

Se considera que el carbono que *Jatropha curcas* puede almacenar puede ser otro producto de valor y se comerciado como créditos de carbono el mercado mundial de carbono.

Las tasas de secuestro de carbón en el suelo en los sistemas de *Jatropha curcas* aún son inciertos a largo tiempo, la comparación de los cambios del carbono en el suelo ha sido poco reportada aunque algunos autores señalan que los cultivos de *Jatropha curcas* puede mejorar la fertilidad del suelo, [93] reportó el secuestro de 1.5 mg de carbón orgánico del suelo en plantas de 3 m de cobertura.

Otra habilidad de las plantas de *Jatropha curcas* es el control,de la erosión del suelo, las raíces pueden estabilizar el suelo contra deslizamientos de tierra así como controlar la erosión del suelo causado por el viento o el agua. De esta manera esto puede aportar a la reconstrucción de ecosistemas de tierras degradadas particularmente en regiones áridas.

Uno de los principales usos de *Jatropha curcas* que se ha promovido es el manejo de las tierras marginales para mejorar la calidad del suelo y la fertilidad con el fin de rehabilitar los suelos especialmente de las tierras secas de ecosistemas degradados.

Otro impacto en el suelo por el cultivo de *Jatropha curcas* que poco se ha reportado, es el aumento del contenido de carbón y nitrógeno, así como, un aumento en la actividad microbiana en el suelo.

Estos cambios mejoran la fertilidad del suelo y facilita la sucesión secundaria de especies nativas enriqueciendo la biodiversidad local, [11] reporta que los cultivos de *Jatropha curcas* pueden proveer efectos benéficos tanto en de conservación como de restauración del ecosistema incluyendo servicios eco sistémicos como ciclo de nutrientes y polinizadores.

Estas características de *Jatropha* puede jugar un papel importante en la restauración de las tierras degradadas y erosionadas dando beneficios ambientales.

### 1.5 Plantaciones de *Jatropha curcas* en México

Las plantaciones de *Jatropha curcas* en México se desarrollaron después de entraron en vigor dos leyes que se crearon para permitir el desarrollo específico de bioenergéticos en el año 2008.

Un año más tarde, en 2009, de LPDB se derivaron dos programas, el Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y su comercialización por la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA) y el Programa de introducción de bioenergéticos por la Secretaría de Energía (SENER), este programa tuvo como objetivos brindar certidumbre para el desarrollo de la cadena de producción y consumo de biocombustibles, durante este tiempo la *Jatropha curcas* comenzó a ser promocionada ampliamente como insumo industrial para la producción de biodiesel.

Entre 2009 y 2012 se establecieron miles de hectárea de *Jatropha curcas*, fueron plantadas 10,000 ha en Chiapas, 200,000 en Veracruz y 6,000 ha en Michoacán, en la Figura 9 muestra los estados en donde se han establecido plantaciones de *Jatropha curcas*.

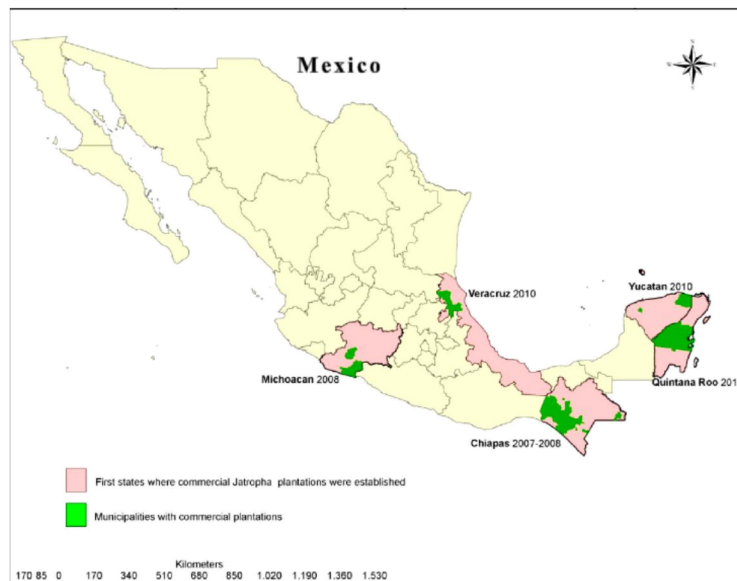


Figura 9 Localización de plantaciones de *Jatropha curcas* en México [28]

En Morelos hasta el año 2014 se han plantado 1600 hectáreas en 6 municipios del estado y se buscaba ampliar hasta 16 000 hectáreas.

Sin embargo la mayoría de las plantaciones de *Jatropha curcas* se utilizó con germoplasma introducido con semillas importadas adaptadas en otros países, estas semillas fueron de la variedad tóxica y por las condiciones ambientales bióticas y abióticas de donde fueron mejoradas son diferentes a las condiciones en donde fueron plantadas y las plantaciones mostraron bajas productividades principalmente por plagas de insectos [28].

Desafortunadamente, las plantaciones de *Jatropha* no han tenido el éxito esperado en el sector energético, en México la producción de biodiesel ha sido marginal por pequeños productores con lotes menores de 500 litros por día (prospectiva de Energías Renovables 2015-2029, 2015).

Muchas de las inversiones y las decisiones políticas sobre *Jatropha* se han tomado sin ningún apoyo científico o tecnológico, muchas de las bondades de esta planta permanecen como supuestos teóricos que no han sido verificados en la práctica.

Al ser una especie no domesticada, los agricultores tienen poco conocimiento de su biología, ecología y fisiología de la planta por lo tanto no conocen sobre sus patrones de crecimiento, requerimiento de nutriente e incidencia de plagas, esta falta de conocimiento de los agricultores sobre nuevas especies ha impedido la estandarización y optimización de prácticas agronómicas [94].

El rendimiento de crecimiento, de producción de semillas y contenido de aceite es variable, en muchas ocasiones las diferencias entre los rendimientos esperados y los rendimientos obtenidos son significantes, estos resultados han puesto en riesgo la producción industrial de *Jatropha curcas* y la expansión de los cultivos.

Actualmente, la investigación sobre esta planta se realiza con el enfoque de desarrollar estrategias de mejoramiento de *Jatropha curcas* para mejorar las características de rendimiento de semillas y de aceite principalmente [29–31], Sin embargo, la selección de las variedades de *Jatropha curcas* no tóxicas podría ser otro aspecto importante para la formulación de programas de mejoramiento, de esta forma los cultivos de *Jatropha curcas* puedan ser integral y sustentable.

Por tal motivo es importante identificar ecotipos mexicanos de *Jatropha curcas* con potencial para establecer cultivos sustentables y consecuentes programas de mejoramiento de cultivo para lograr la sustentabilidad de la producción de biodiesel.

## **1.6 Análisis de sustentabilidad de *Jatropha curcas***

El análisis de sustentabilidad de la producción de biodiesel utilizando *Jatropha curcas* como materia prima ha sido estudiada por varios autores y en varios sitios específicos de países de África y Asia principalmente, esto debido a que sus programas nacionales de producción de biodiesel se centraron en la utilización de *Jatropha curcas* como materia prima. Entre los países con mayores estudios se encuentra India [19–22], Malasia y China [23,24], y en países de Sudamérica como Argentina, Nicaragua y Brasil [25,26].

En la mayoría de estos estudios se analizan las fases de plantación de *Jatropha curcas*, la fase de extracción y la fase de transformación de aceite a biodiesel. De acuerdo a esta literatura especializada, el uso de *Jatropha curcas* como insumo para la producción de biodiesel no está bien definido si las plantaciones cumplen los requerimientos necesarios para convertirse en una opción sustentable para competir con los combustibles fósiles.

Para analizar la sustentabilidad de los estudios mencionado, se han basado en la evaluación del desempeño ambiental y socioeconómico de los procesos de producción. Los métodos utilizados para evaluar la sustentabilidad en la dimensión ambiental se encuentra el Análisis de ciclo de vida, que es utilizada para evaluar los impactos ambientales de la cadena de producción del biodiesel y el Balance de emisiones de Gases de Efecto Invernadero y el Balance Energético, en la dimensión económica se realizan análisis de viabilidad financiera. Estos métodos de evaluación se describen a continuación.

#### 1.6.1 Análisis de ciclo de vida ACV

El análisis de ciclo de vida es una herramienta aceptada internacionalmente para evaluar impactos ambientales para un producto o servicio y medir la dimensión ambiental de la sustentabilidad. Es un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad e identificar y cuantificar la energía y los materiales utilizados, así como las emisiones al medioambiente que el proceso genera.

Hay otros métodos para analizar la sustentabilidad, tal como el análisis de entradas-salidas, análisis de masa y energía y contabilidad energética (energía incorporada), sin embargo, el análisis de ciclo de vida es una combinación de estas herramientas y proveen un método más completo.

En los estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la cadena de producción del biodiesel han demostrado que estos pueden ayudar a minimizar el agotamiento de los recursos y el calentamiento global, mientras que otros estudios

han concluido que en algunos biocombustibles podría incrementar los impactos negativos [22,24,95,96].

### 1.6.2 Balance de emisiones de CO<sub>2e</sub>

En la cadena de producción de los biocombustibles hay un número de posibles impactos ambientales, incluyendo la erosión del suelo, secuestro de carbón o emisión de GHG, descarga de gases y líquidos tóxicos, estos impactos pueden ser positivos o negativos.

La contribución del biodiesel de *Jatropha curcas* para reducir las emisiones de GHG es representada por el balance de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2e</sub>). Esto es la diferencia entre la reducción de emisiones de GHG totales y las emisiones en el proceso de producción y el uso del biodiesel de *Jatropha*. Buena parte de la información disponible de estudios respecto a la emisión de CO<sub>2e</sub> muestra resultados positivos en la producción de biodiesel de *Jatropha* en comparación con el diésel fósil. Los valores de reducción de emisiones totales de CO<sub>2e</sub> varían desde 40% hasta 107%, dependiendo de los límites del sistema de producción que se consideren y los supuestos de la unidad de comparación [96].

Los estudios realizados por [97–99] muestran que los mayores contribuyentes de CO<sub>2e</sub> son la fase de plantación con un 52%-90% de las emisiones, debido principalmente al uso de fertilizantes nitrogenados, herbicidas, plaguicidas y riego.

Por su parte el transporte de semillas y aceite de *Jatropha* contribuye con 26% de las emisiones totales, sobre todo cuando se recorren largas distancias. El proceso de transesterificación contribuye con 11%-24% de emisiones en donde el uso de metanol genera el 83% en esta etapa.

### 1.6.3 Balance energético

El balance energético se refiere a la relación existente entre el total de la energía utilizada y el total de la energía obtenida en el sistema de producción e informa de la eficiencia del uso de los diferentes insumos energéticos a lo largo de todas las fases del proceso.

En la literatura se utiliza una variación del ACV con base en información de la cantidad de energía utilizada en cada etapa del proceso de obtención del biodiesel a partir de la obtención de la semilla de *Jatropha* hasta la disposición final de este biocombustible para conocer el consumo energético de la cadena de producción [21,100,101].

En la evaluación de sustentabilidad en el uso de *Jatropha* para la producción del biocombustible, se compara la energía fósil embebida en el sistema de producción con respecto a la energía producida o contenida en el biocombustible.

La mayoría de los estudios reportados, si bien tienen en mayor o menor medida alcances limitados, concluyen que el balance de energía en el ciclo de vida del proceso de producción de biodiesel a partir de *Jatropha* resulta positivo [21,24,102].

#### 1.6.4 Evaluación económica

Para examinar la rentabilidad y competitividad de la producción de *Jatropha curcas*, se utilizan herramientas como el análisis costo-beneficio, esta herramienta examina los gastos e ingresos sobre un periodo de tiempo como un indicador sobre la viabilidad. La viabilidad del cultivo de *Jatropha* es aceptable si el agricultor puede ganar lo suficiente de la venta de aceite y de semillas para cubrir los costos de los insumos y los costos de la labor obteniendo un beneficio neto mayor a 0.

Otros indicadores de económicos que también son utilizados son:

Beneficio Neto, NB. Es calculado como los beneficios restantes después de restar todos los costos que incurridos dentro de un periodo de valor de todos los productos producidos en el mismo periodo.

Beneficio Neto Descontado, DNB. Descuento de los valores de los futuras ganancias y pérdidas para proporcionar los valores presentes. Se necesita escoger una tasa de descuento apropiada.

El Valor Presente Neto, NPV, el valor presente de toda la inversión resumiendo las ganancias futuras descontadas y pérdidas basadas sobre una tasa de descuento determinadas.

La tasa interna de retorno, TIR, es un indicador de la eficiencia de la inversión. Es la tasa de retorno compuesta efectiva anualizado, que se puede ganar en el capital invertido.

La información sobre la viabilidad económica de *Jatropha curcas* en general es limitada y contradictoria [103], en el estudio realizado por [102] reportó que el mayor costo de la producción de biodiesel es en la etapa de cultivo de *Jatropha* debido a los altos costos de los salarios de trabajo para la colección de los frutos que representaron el 51.2%, seguido de los costos de fertilización que representaron el 18.74%. Las etapas de extracción de aceite y refinación fueron

los principales costos de capital fijo y los costos de transesterificación y distribución del biodiesel son bajos.

## 1.7 CONCLUSIONES

Los biocombustibles líquidos que son utilizados para el transporte proporcionan el 90% de la energía renovable para este sector a nivel mundial, debido a que actualmente existen debates sobre la sustentabilidad se han adoptado políticas y medidas que promuevan la sustentabilidad.

La Mesa Redonda sobre biomateriales sustentables (RSB) y la Asociación Mundial de Bioenergía (GBEP) han desarrollado esquemas para evaluar la sustentabilidad de la producción de biocombustibles. Sin embargo, la sustentabilidad de la producción de biocombustibles tampoco ha quedado clara.

Los intentos de producir *Jatropha curcas* a nivel industrial no ha mostrado el éxito esperado al tener productividades muy por debajo de lo pronosticado.

En México que es un probable centro de origen de esta planta las características de las plantas endémicas pueden ofrecer productos de valor agregado además del aceite.

Es importante analizar la sustentabilidad *Jatropha curcas* en la producción de biocombustibles con base al conocimiento en los aspectos como las prácticas agronómicas óptimas y los límites biofísicos, así como el comportamiento del cultivo y el uso de sus subproductos.

## Capítulo 2. Evaluación experimental de ecotipos de *Jatropha curcas*

Las semillas de *Jatropha curcas* contienen una cantidad considerable de aceite no comestible que se puede obtener de las semillas mediante métodos de extracción y convertirlo en biodiesel mediante procesos químicos (Achten, et al., 2008; Bindraban and Brandenburg, 2007). Por tal motivo, el cultivo de *Jatropha curcas* se ha enfocado en la extracción de aceite, sin embargo, los subproductos del cultivo podrían ser aprovechados también como combustible sólido. Otros usos potenciales de la *Jatropha curcas* es usarla como sumidero de carbón y la recuperación de suelos degradados (Banerji et al., 1985; Francis et al., 2005; Makkar and Becker 2009).

También se considera que las semillas contenidas en el fruto de la *Jatropha curcas* no toxica, debido a que tienen alto contenido proteínico (Francis et al., 2013), un alto contenido energético y bajas cantidades de fibra, por lo que es importante como una opción de alimento para consumo humano (Gübitz et al., 1997).

El potencial de las plantaciones de *Jatropha curcas* en la producción de energía ha sido estimado en cultivos comerciales en varios países tales como India, Taiwan, Nicaragua (Achten et al., 2010; Kaewcharoensombat et al., 2010; Foidl et al., 1996). Se considera también que la capacidad de producir frutos es alta y el balance energético favorable (Findlater and Kandlikar, 2011).

Sin embargo, los resultados del crecimiento de la planta, producción de semillas, características fisicoquímicas y de toxicidad muestran una amplia variación (Bindraban and Brandenburg, 2007; Divakara et al., 2010; Misra and Murthy, 2011; Mofijur et al., 2012). Su desempeño en crecimiento y su rendimiento en diferentes escenarios agroclimáticos es incierto (Divakara et al., 2010), lo cual dificulta predecir los rendimientos de las plantaciones en otros sitios.

Por tal motivo su utilización ha sido limitada debido a la baja producción de semillas y la presencia de toxicidad en el endospermo de la semilla que ha impedido el uso de los residuos de la extracción de aceite en productos de valor agregado.

Una clave para optimizar la producción de cualquier plantación es entender el patrón de crecimiento de las variedades de *Jatropha curcas* bajo las condiciones específicas del lugar de cultivo y es necesario llevar a cabo un monitoreo sobre el crecimiento en un periodo suficiente para obtener predicciones fiables de la productividad de *Jatropha curcas*.



En este capítulo se presenta el desarrollo experimental conocer el potencial de producción de ecotipos mexicanos no tóxicos de *Jatropha curcas*.

Los cuales fueron evaluados en una plantación experimental en un escenario de mínimos recursos y en suelos marginales para conocer el desarrollo de estas plantas en tierras que no son utilizadas para cultivar alimentos.

Los ecotipos fueron evaluados sobre el crecimiento morfológico, la producción de semillas, el potencial de producción de aceite, pasta residual y biomasa de las plantas con 9 años de edad.

A los ecotipos que presentaron las mejores características de crecimiento y mayores rendimientos de semillas y aceite se realizó un análisis de las propiedades físico-químicas del aceite para conocer si tiene la calidad necesaria para la producción de biodiesel. Asimismo, a estos ecotipos se les realizó un análisis bromatológico del endospermo de las semillas para conocer si el valor nutrimental es adecuado para su utilización con fines alimenticios. Finalmente, se analizaron los cambios en el suelo donde se cultivaron los ecotipos seleccionados con el fin de conocer el potencial de *Jatropha curcas* para mejorar las propiedades químicas del suelo.

Los objetivos particulares son los siguientes:

- (1) Evaluar el crecimiento y la producción de semillas, biomasa de ecotipos no tóxicos para seleccionar los más productivos
- (2) Analizar las propiedades físico-químicas del aceite de los ecotipos más productivos para saber si son adecuados para la producción de biodiesel.
- (3) Analizar si los subproductos son adecuados para ser aprovechados para la producción de otros productos
- (4) Analizar si el cultivo proporciona mejoras en el suelo donde se cultivan

## 2.1 Selección de ecotipos

El desarrollo experimental presentado en este capítulo es la continuación de una primera evaluación de ecotipos de diferentes lugares de México reportados en [104] en donde se evaluaron 15 ecotipos de 4 años de edad de dichas plantas. La evaluación se realizó con datos obtenidos del año 2009 al 2013.

En dicha evaluación 5 ecotipos de Morelos no tóxicos tuvieron resultados sobresalientes y presentaron las producciones de semillas más altas en los primeros años del cultivo.

La presente selección de los ecotipos de *Jatropha curcas* es sobre la evaluación del comportamiento de 5 ecotipos originarios del estado de Morelos analizando su comportamiento a largo de 8 años (del 2009 al 2017).

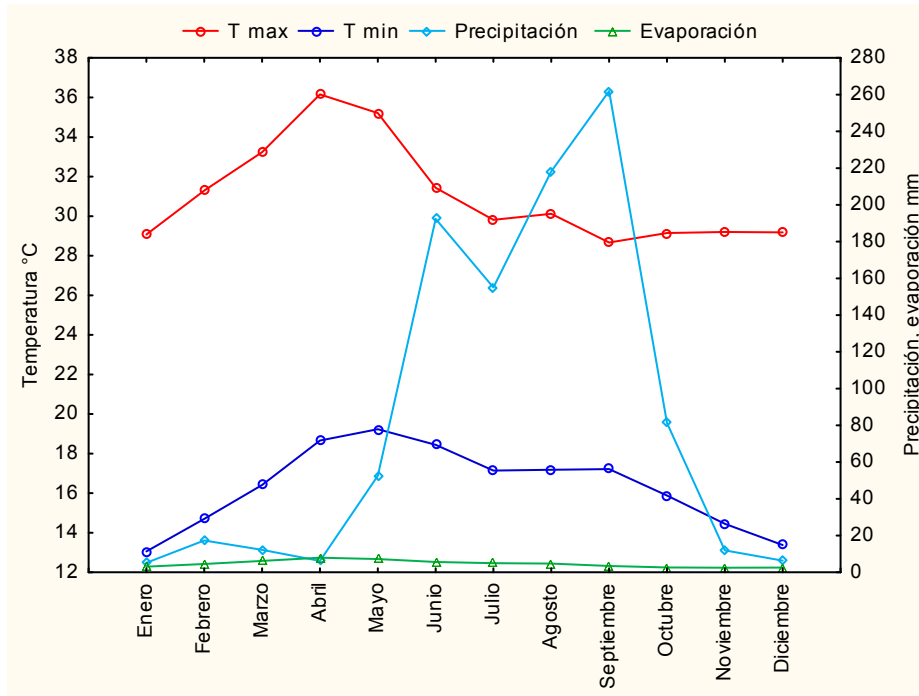
### 2.1.1 Sitio de estudio y material vegetal

La plantación experimental de *Jatropha curcas* se localiza en el municipio de Miacatlán del estado de Morelos, México (latitud 18° 47' 43.3"N, longitud 99° 21' 04.0" W at 1000 masl, Figura 10).



Figura 10 Localización de la plantación experimental de *Jatropha curcas* en el estado de Morelos

El clima del sitio es cálido-húmedo con lluvias en verano. Durante el estudio se registró una temperatura promedio de 23.7°C, alcanzando la temperatura máxima de 36.2 °C en el mes de mayo y una temperatura mínima de 13.1 °C en enero. El promedio anual de precipitación registrada fue 1020.8 mm, presentando la máxima precipitación en los meses de Junio-Octubre con 908.9 mm y el régimen de mayor cantidad de evaporación en el periodo de Marzo-Mayo (Figura 11).



**Figura 11 Promedios mensuales de los parámetros climáticos en el sitio de estudio en el periodo de estudio (2009-2017)**

La plantación se estableció sobre un sitio abandonado que anteriormente se utilizaba para actividades agrícolas, el tipo de suelo del sitio es vertisol, textura del suelo arcilla 52% y moderadamente alcalino de pH de 7.4.

El sistema de cultivo establecido fue de mínimos recursos con baja intensidad de manejo, la utilización de fertilizantes se realizó en una única ocasión durante la fase del trasplante de plantas, en la cual se agregó una mezcla de composta en cada sepa.

Con respecto a la aplicación de agua a la plantación, principalmente ha sido por precipitación pluvial natural. Se utilizó riegos de auxilio durante 3 meses después del trasplante de plantas haciendo uso de riego rodado con láminas de 20 mm de agua en intervalos de 15 días.

Para el control de plagas y enfermedades no se ha utilizado ningún tipo de insecticidas o fungicidas, únicamente se realizaron podas de saneamiento, que

consistió en cortar las ramas afectadas por alguna plaga o enfermedad, o que fueron cortadas por animales o el viento.

Para la obtención de las plantas de *Jatropha curcas* se utilizó el método de propagación generativo, el germoplasma se obtuvo mediante una colecta en sitio de población natural. La germinación de semillas se llevó a cabo bajo condiciones controladas de laboratorio y las plántulas obtenidas permanecieron en invernadero durante 3 meses. La plantación de *Jatropha curcas* se estableció en el año 2009 en donde se realizó el trasplante de las plantas en la parcela experimental utilizando una cepa común de 0.4x0.4x0.4 m y una amplitud de siembra de 2 m x 2.8 m, estableciendo así una densidad de cultivo de 1250 plantas por hectárea.

La plantación experimental originalmente quedó conformada por 15 ecotipos provenientes de Michoacán, Morelos y Oaxaca cubriendo alrededor de 1 ha área de cultivo entre todos los ecotipos.

En la selección previa reportados en [104] los ecotipos no tóxicos que fueron seleccionados se muestran en la Tabla 5. Los nombres de estos ecotipos son E1M, E2M, E3M, E4M, y E5M todos originarios de Morelos.

Tabla 5 Lista de los nombres asignados a los ecotipos, procedencia y número de plantas

	Ecotipos	Procedencia	No. de individuos
1	E1M	Morelos	69
2	E2M	Morelos	64
3	E3M	Morelos	62
4	E4M	Morelos	62
5	E5M	Morelos	57

## 2.2 Metodología

La metodología utilizada para realizar la selección se presenta en la Figura 12 y consiste en la obtención de datos sobre la toxicidad de los ecotipos, el crecimiento y supervivencia de las plantas, el rendimiento de semillas y biomásas, el rendimiento de aceite.

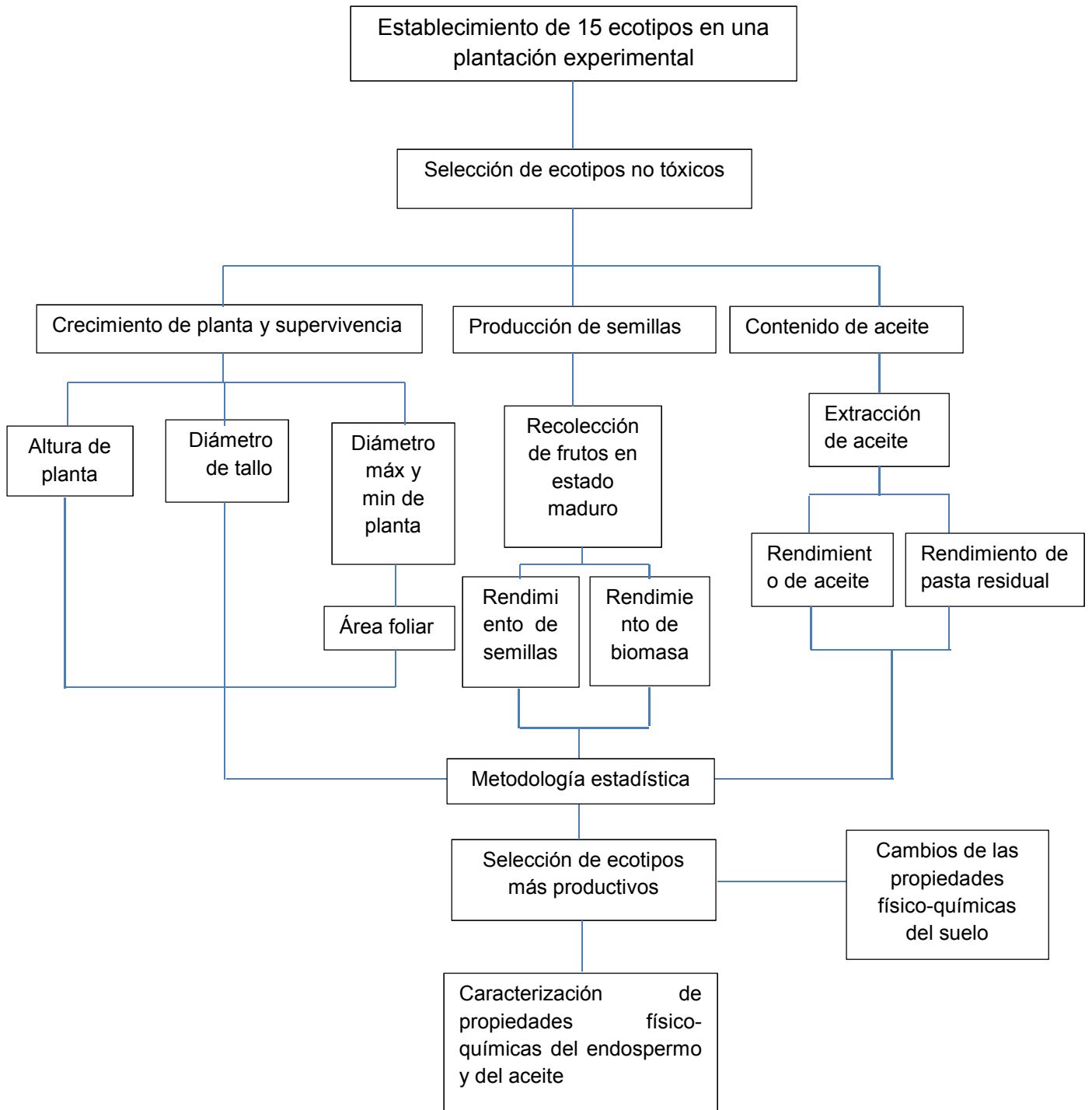


Figura 12 Metodología de evaluación de ecotipos mexicanos de *Jatropha curcas*

Los datos obtenidos en cada uno de los aspectos fueron evaluados estadísticamente para diferenciar a los ecotipos sobresalientes de esta forma se seleccionaron a los ecotipos que mostraron mejores características.

Los ecotipos seleccionados sometidos a una segunda evaluación de las propiedades físico-químicas del aceite y la pasta residual para determinar si el aceite cuenta con las características adecuadas para la producción de biodiesel y la pasta residual para conocer si puede ser utilizada con fines alimenticios.

Finalmente se evalúan los impactos sobre las propiedades fisicoquímicas de suelo en donde se cultivaron de los ecotipos.

### 2.2.1 Selección de ecotipos no tóxicos

La identificación de ecotipos tóxicos y no tóxicos se llevó a cabo mediante estimación de la concentración de ésteres de forbol en el aceite de los frutos de los diferentes ecotipos analizados. Esta evaluación se llevó a cabo a los cuatro años de edad de las plantas y esta reportado en [104].

El análisis se llevó a cabo con HPLC (LC/MS instrument 1100, Agilent) basado en un método modificado de Haas (2002). Por cada ecotipo se utilizó 1.5 g de aceite pesado con una balanza electrónica (+/- 0.0001 g) y diluida con 5 ml de éter.

Las muestras fueron tratadas con un dispositivo de extracción de fase sólida. La columna fue activada y acondicionada con éter. Se purificaron y lavaron con 5 ml de éter y 3.5 ml de acetona para eliminar los contaminantes o interferencias de la columna.

El paso final fue la elución de los ésteres de forbol con 5 ml de metanol y 5 ml de etanol. El metanol y etanol fueron evaporados y la muestra se diluyó con 2 ml de acetonitrilo para el análisis en HPLC.

El análisis cuantitativo se llevó a cabo con el mismo método [105] pero con la modificación de que se adicionó 40 µl de forbol 12-myristate 13-acetate (SIGMA) con concentración de (0.005 mg/µL) como el estándar de referencia.

Las muestras fueron colectadas de la una columna fase reversa Agilent Eclipse XDB C18 (5 µm-150 x 4.6 mm). Las condiciones de separación fueron: flujo de fase de 1 ml/min, fase móvil 75/25 acetonitrilo-agua y modo isocrático.

### 2.2.2 Crecimiento y supervivencia de las plantas

Después de que las plántulas de *Jatropha curcas* fueron plantadas en el sitio experimental se realizó un monitoreo permanente de parámetros de biofísicos de crecimiento de las plantas.

Se colectaron datos los datos de crecimiento de altura de planta, diámetro de tallo, y el diámetro máximo y mínimo de la cobertura de planta. Las mediciones se realizaron en cada una de las planta por ecotipo.

Las mediciones de altura de planta se realizaron tomando la distancia vertical de nivel del suelo a la parte verde más alta de la planta, el diámetro de tallo se midió en la sección transversal del tallo a la altura del ápice y las mediciones del diámetro mínimo y máximo de la cobertura de planta utilizaron para calcular la cobertura de planta asumiendo una forma elipsoidal como la mejor aproximación a la forma de las planta.

Las mediciones de los parámetros biofísicos de crecimiento que se realizaron en desde el primer al cuarto año de las plantas (mediciones de los años 2009 a 2013) registraron en una base de datos [106]. Durante estas mediciones también se monitoreó la supervivencia de las plantas a las condiciones del sitio experimental mediante el conteo de plantas vivas.

Los resultados de la evaluación estadística de dichos datos, que se detalla en párrafos posteriores, están publicados [104]. De dicha la evaluación de crecimiento de los parámetros biofísicos así como de la evaluación de toxicidad se realizó una previa selección de ecotipos.

A los ecotipos seleccionados en esa primera fase se continuó con el monitoreo de los parámetros biofísicos de crecimiento de planta y supervivencia hasta los 9 años de edad de las plantas (año 2018).

### 2.2.3 Producción de semillas y biomasa

El rendimiento de la producción de semillas de los ecotipos no tóxicos se analizó en los años 8 y 9 de edad de las plantas, durante la primera evaluación realizada a los 4 años de edad de las plantas se estimó por primera vez el rendimiento de producción de semillas sin embargo esta estimación no fue consistente por lo que se modificó la metodología para estimar este aspecto.

Los frutos en estado maduro fueron colectados individualmente por cada planta en los meses de agosto y septiembre de los años 2017 y 2018. Se registró el peso de

los frutos recolectados por planta para estimar el rendimiento de producción de frutos.

Los frutos fueron secados al aire y se limpiaron manualmente separando el pericarpio y las semillas.

Con una parte de los frutos recolectados se realizaron los análisis del contenido de humedad del pericarpio y las semillas, los análisis se realizaron en el Laboratorio de materiales lignocelulósicos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) mediante el Protocolo para la determinación del contenido de humedad de biocombustibles sólidos BCS-004. La humedad de del pericarpio seco al aire fue de 14.1% y la humedad de las semillas de 8.1%.

Posteriormente, los rendimientos de semillas fueron obtenidos mediante la separación de las semillas y las cascaras del fruto (pericarpio) y estimando la proporción de peso correspondiente a la semilla y al pericarpio.

Se obtuvo el porcentaje de composición de las semillas y el pericarpio con respecto al peso del fruto y con la densidad de plantas cultivadas en la parcela experimental de 1250 plantas por hectárea se estimó la producción de frutos, semillas y biomasa de pericarpio por hectárea.

Posteriormente, se prepararon 10 muestras de 100 g de semillas por ecotipo. Las semillas fueron limpiadas manualmente para separar el tegumento y el endospermo. Se obtuvo el porcentaje de composición del endospermo y tegumento con respecto al peso de las semillas para estimar primeramente el rendimiento de endospermo y posteriormente biomasa de tegumento por hectárea. De esta manera los rendimientos de la biomasa del pericarpio y del tegumento se sumaron para obtener el rendimiento de biomasa residual por hectárea.

#### 2.2.4 Contenido de aceite

El contenido de aceite se estimó por medio de extracción mecánica del endospermo sin cascará, se utilizaron 10 muestras de 100 g de semillas por cada ecotipo.

El aceite extraído a una humedad de 6.1% se separó de las partículas sólidas del aceite y posteriormente fue filtrado, el rendimiento de contenido de aceite fue calculado como:

$$\% \text{ de aceite} = \frac{\text{Peso del aceite extraído (g)}}{\text{Peso de la muestra de la semilla (g)}} \times 100$$



El aceite obtenido fue recolectado y almacenado en el laboratorio para un análisis posterior. Con el porcentaje de extracción de aceite y el potencial de producción de semillas se estimó el potencial de producción de aceite por hectárea.

La pasta residual, es decir, el endospermo extruido resultante de la extracción de aceite fue pesada para calcular el rendimiento de pasta residual de la siguiente forma:

$$\% \text{ de pasta residual} = \frac{\text{Peso del endospermo extruido (g)}}{\text{Peso de la muestra de la semilla (g)}} \times 100$$

De la misma forma que el aceite, se estimó el potencial de producción de pasta residual por hectárea.

### 2.2.5 Análisis estadístico

Esta metodología estadística también se utilizó en el análisis previo de los datos de crecimiento de los parámetros biofísicos recolectados del año 2009 a 2013.

Los datos fueron analizados utilizando un enfoque estadístico, al conjunto de datos de cada uno de los aspectos monitoreados se aplicaron pruebas estadísticas para encontrar los patrones, identificar similitudes o diferencias entre los ecotipos no tóxicos previamente seleccionados.

La metodología involucró los siguientes pasos:

- (i) Revisión exhaustiva de todos los datos recolectados en campo y laboratorio para evitar datos erróneos.
- (ii) Se graficaron histogramas para revisar la normalidad de la distribución de los datos
- (iii) Se realizaron análisis de outliers para identificar datos discordantes y analizar si se eliminaban o se conservaban
- (iv) Se aplicaron pruebas de significancia ANOVA y Tukey HSD para comparar las tendencias de los parámetros contra el conjunto de datos normales.

Las pruebas de discordancias y de significancia se aplicaron al nivel de confianza de 95% (0.05 nivel de significancia)

Con los resultados de esta metodología estadística se seleccionaron a los ecotipos no tóxicos con los mejores resultados en crecimiento, supervivencia y rendimiento de semilla y de aceite. A los ecotipos seleccionados se evaluaron las

propiedades físico-químicas del aceite y del endospermo así como las propiedades físico-químicas en el suelo.

#### 2.2.6 Caracterización del aceite y el endospermo

Las propiedades físicas del aceite analizadas fueron las siguientes:

a) la densidad del aceite (a 15°C), se determinó con un densímetro Anton Paar DMA 500

b) la viscosidad (a 40°C), se determinó con un viscosímetro BROOKFIELD AMETEK MINIVIS II

c) el poder calorífico obtenido con un calorímetro 6400 Automatic Isoperibol Calorimeter de Parr Instruments Company.

Las propiedades químicas analizadas fueron la composición de ácidos grasos del aceite que se determinó por cromatografía de gases por la metodología AOAC (Association of Official Agricultural Chemists, por sus siglas en inglés), 2005 963,22-969,33.

El endospermo fue sometido a un análisis bromatológico. El contenido de proteínas, fibra cruda, carbohidratos disponibles, azúcares reductores totales, cenizas y contenido energético se realizó por los métodos de las normas nacionales NMX-NORMEX y NOM SCFI, bajo la normatividad de AOAC específico para cereales-semillas-oleaginosas.

#### 2.2.7 Análisis del suelo

Para monitorear los cambios en las propiedades físico-químicas del suelo se realizaron 2 mediciones de la fertilidad del suelo de la parcela experimental, previo a la plantación de las plántulas de *Jatropha curcas* y a 9 años edad de las plantas (en los años 2008 y 2018).

El análisis de suelo se realizó de acuerdo a la norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Se recolectaron muestras de suelo en el área de cultivo, cada muestra de suelo se obtuvo de 5 puntos aleatorios del área de cultivo a 0.30 metros de profundidad.

La parte proporcional de materia orgánica fue determinada por la metodología Walkley y Black, el Nitrógeno inorgánico se determinó por arrastre de vapor por el método Kejedahl, la concentración del Fósforo se estableció por el método

OLSEN, la concentración de Potasio se determinó por espectrofotometría de emisión de flama.

## 2.3 Resultados

### 2.3.1 Crecimiento y supervivencia de ecotipos no tóxicos

El contenido de ésteres de forbol reportados en la Tabla 6 muestra que en los ecotipos E1M, E2M, E3M, E4M y E5M no se detectó la presencia de ésteres de forbol, por tal motivo estas variedades se identifican como no tóxicas.

Estos resultados concuerdan con reportes previos de semillas de genotipos de *Jatropha curcas* del sureste del país en donde no se detectan ester de forbol y las semillas son consumidas por los lugareños. [34,74].

De acuerdo a [28] los ecotipos tóxicos presentan una concentración de ester de forbol en niveles de 0.6 a 1.6 mg/g de aceite

Consecuentemente, las plantaciones de *Jatropha curcas* de los ecotipos “no tóxicos” identificados podrían tener un segundo producto de valor que puede generar beneficios económicos, ya que además de la obtención del aceite se podría utilizar la pasta residual para otras aplicaciones como la industria alimenticia.

Tabla 6 Concentración de ester de forbol

Ecotipos	Procedencia	Contenido de ester de forbol * (mg/ml)
E1M	Morelos	No detectado
E2M	Morelos	No detectado
E3M	Morelos	No detectado
E4M	Morelos	No detectado
E5M	Morelos	No detectado

\* La cuantificación de ester de forbol se llevó a cabo utilizando el aceite de las semillas de *Jatropha* de acuerdo a [105]

De acuerdo a la metodología antes descrita, se continuó con el monitoreo del crecimiento y la supervivencia de los ecotipos no tóxicos. Las mediciones de los

parámetros biofísicos de los ecotipos E1M, E2M, E3M, E4M y E5M se presentan en la Gráfica 7, en donde se muestra el crecimiento de los parámetros biofísicos desde el año 2009 al último año de estudio (2018).

El conjunto de datos fue revisado para verificar la normalidad de los datos mediante un método gráfico. Para la detección y eliminación de valores desviados se utilizó el software UDASYS [107], que aplica varias pruebas estadísticas (i.e. Dixon, Grubbs, etc.), a un nivel de confianza de 95%.

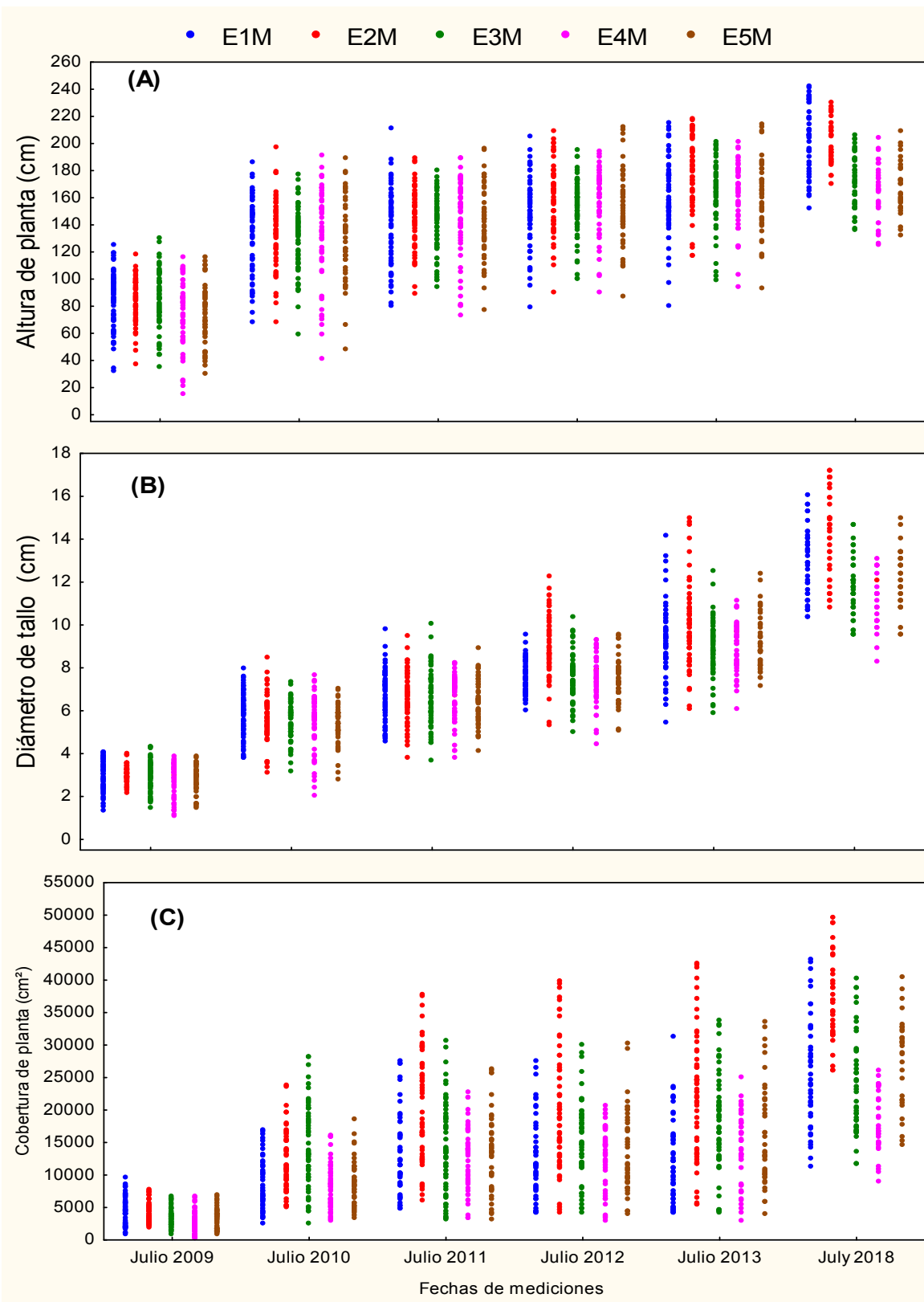
Al conjunto de datos normalizados se aplicaron las pruebas de comparación de parámetro de tendencia central. La primera prueba fue al análisis de varianza (ANOVA) de dos colas y la segunda fue la prueba Tukey para comparaciones múltiples (Tukey HSD), ambas pruebas se aplicaron a un nivel de confianza del 95% en el software xlstat.

Como se observa en la Gráfica 7, todos los ecotipos mostraron una tendencia de crecimiento similar a lo largo del estudio. Las plantas de los ecotipos E1M y E2M presentaron buen crecimiento desde los primeros meses de ser plantadas en la parcela experimental y siguieron con esa tendencia al final del estudio llegando a tener las plantas con el mayor crecimiento.

En la Tabla 7 presenta las medidas del crecimiento promedio y la desviación estándar en altura de planta, diámetro de tallo y cobertura de planta de los ecotipos “no tóxicos”. Así mismo, se presentan las diferencias estadísticas significativas de acuerdo con las pruebas ANOVA ( $p \leq 0.05$ ) y la clasificación de diferencias de acuerdo a la prueba Tukey ( $p \leq 0.05$ ), estas diferencias se marcaron con diferentes letras, estas son: (A) el mayor crecimiento; (AB) crecimiento alto; (B) crecimiento medio; (BC) bajo crecimiento; y (C) el menor crecimiento.

De acuerdo con la Gráfica 7 y la Tabla 7, se observa un incremento en las dimensiones de altura de la planta durante las mediciones realizadas en el mes de julio de los años 2009 y 2010. Mientras que los incrementos fueron menores en mediciones posteriores realizadas en los años 2011, 2012, 2013 y 2018.

En la primera medición realizada (Julio 2009), todos los ecotipos presentaban diferencias significativas en la altura de planta, el ecotipo E2M registró el mayor crecimiento mientras que los ecotipos E4M y E5M presentaron el crecimiento más bajo. Posteriormente, en las medidas registradas en julio de 2010, 2011 y 2012, todos los ecotipos mantuvieron crecimientos de planta similares sin diferencias significativas entre ellos.



Gráfica 7 Mediciones del crecimiento de los parámetros biofísicos de las plantas en el sitio de estudio en los años 2009 a 2018. (A) Altura de planta; (B) Diámetro de tallo; (C) Cobertura de planta

**Tabla 7 Crecimiento promedio de los parámetros biofísicos de las plantas monitoreado del periodo del año 2009 al 2018**

Crecimiento promedio		Ecotipos																			
		E1M			E2M			E3M			E4M			E5M							
Altura de planta (cm)	Julio 2009	83.4	+	21.6	AB	85.7	+	16.8	A	84.4	+	21.7	AB	74.2	+	25.5	B	73.6	+	22.5	B
	Julio 2010	132.9	+	28.6	A	135.3	+	25.2	A	129.1	+	24.7	A	132.8	+	35.3	A	129.7	+	29.7	A
	Julio 2011	140.0	+	28.6	A	146.9	+	22.1	A	139.9	+	21.4	A	143.8	+	30.2	A	141.6	+	26.7	A
	Julio 2012	148.7	+	26.5	A	160.5	+	25.3	A	152.8	+	21.5	A	157.1	+	25.0	A	154.7	+	27.9	A
	Julio 2013	163.0	+	28.8	B	177.1	+	25.8	A	162.9	+	24.4	B	162.3	+	24.3	B	161.1	+	27.2	B
	Julio 2018	203.5	+	28.9	A	200.0	+	19.4	A	170.4	+	22.4	B	162.5	+	16.9	B	170.2	+	26.1	B
Diámetro de tallo (cm)	Julio 2009	3.0	+	0.7	A	3.0	+	0.4	A	2.9	+	0.7	A	2.8	+	0.8	A	2.8	+	0.6	A
	Julio 2010	5.8	+	1.0	A	5.6	+	1.1	A	5.5	+	0.9	A	5.4	+	1.3	A	5.3	+	0.9	A
	Julio 2011	6.8	+	1.2	A	6.6	+	1.1	A	6.6	+	1.3	A	6.6	+	1.1	A	6.3	+	1.1	A
	Julio 2012	7.6	+	0.8	B	9.0	+	1.5	A	7.5	+	1.1	B	7.4	+	1.1	B	7.3	+	1.1	B
	Julio 2013	9.2	+	1.7	AB	10.0	+	2.0	A	8.9	+	1.3	B	8.9	+	1.2	B	9.1	+	1.4	B
	Julio 2018	13.1	+	2.0	AB	14.3	+	2.3	A	11.7	+	1.3	C	11.0	+	1.2	C	12.1	+	1.3	BC
Área de cobertura (cm <sup>2</sup> )	Julio 2009	4383.5	+	2230.3	A	4227.5	+	1582.7	AB	3328.5	+	1409.4	BC	2646.5	+	1588.2	C	3162.4	+	1638.3	C
	Julio 2010	6962.3	+	2391.6	B	11383.7	+	4210.3	A	6114.7	+	3291.9	B	6321.8	+	2982.2	B	5854.9	+	2986.9	B
	Julio 2011	12613.4	+	6740.6	B	20573.4	+	9281.2	A	13838.2	+	7677.2	B	11994.6	+	7297.9	B	13125.1	+	6783.7	B
	Julio 2012	12047.3	+	6669.9	B	20411.3	+	10412.3	A	15078.9	+	6975.2	B	13314.6	+	6714.9	B	13275.7	+	6569.9	B
	Julio 2013	11751.7	+	6766.7	C	22399.5	+	11102.3	A	17943.2	+	9339.9	B	13683.9	+	7810.2	BC	16312.1	+	8100.6	BC
	Julio 2018	26393.3	+	13727.1	AB	39072.9	+	10521.0	A	24199.3	+	9746.8	BC	18804.7	+	5526.6	BC	31465.84	+	11952.3	AB

\* Las diferentes letras indican diferencias significativas de acuerdo a las pruebas ANOVA y Tukey ( $p \leq 0.05$ )

En las mediciones realizadas en Julio de 2013, el E2M nuevamente obtuvo el mayor crecimiento mostrando diferencias significativas con respecto a los ecotipos restantes. En la última medición realizada en Julio de 2018, las plantas del E1M presentaron un incremento en la altura de planta finalizando en una altura similar a las plantas del E2M. Al final de estudio los ecotipos E1M y E2M obtuvieron el mayor crecimiento de altura de planta.

Con respecto al crecimiento del diámetro de tallo, las dimensiones mostraron un aumento constante a lo largo del periodo de monitoreo. Las mediciones de julio 2009 a julio 2011 mostraron crecimientos similares en todos los ecotipos sin presentar diferencias significativas.

A partir de las mediciones realizadas en Julio 2012 y hasta las de 2018 se presentaron diferencias significativas entre los ecotipos, las plantas del E2M fueron las de mayor crecimiento promedio seguido por las plantas del E1M.

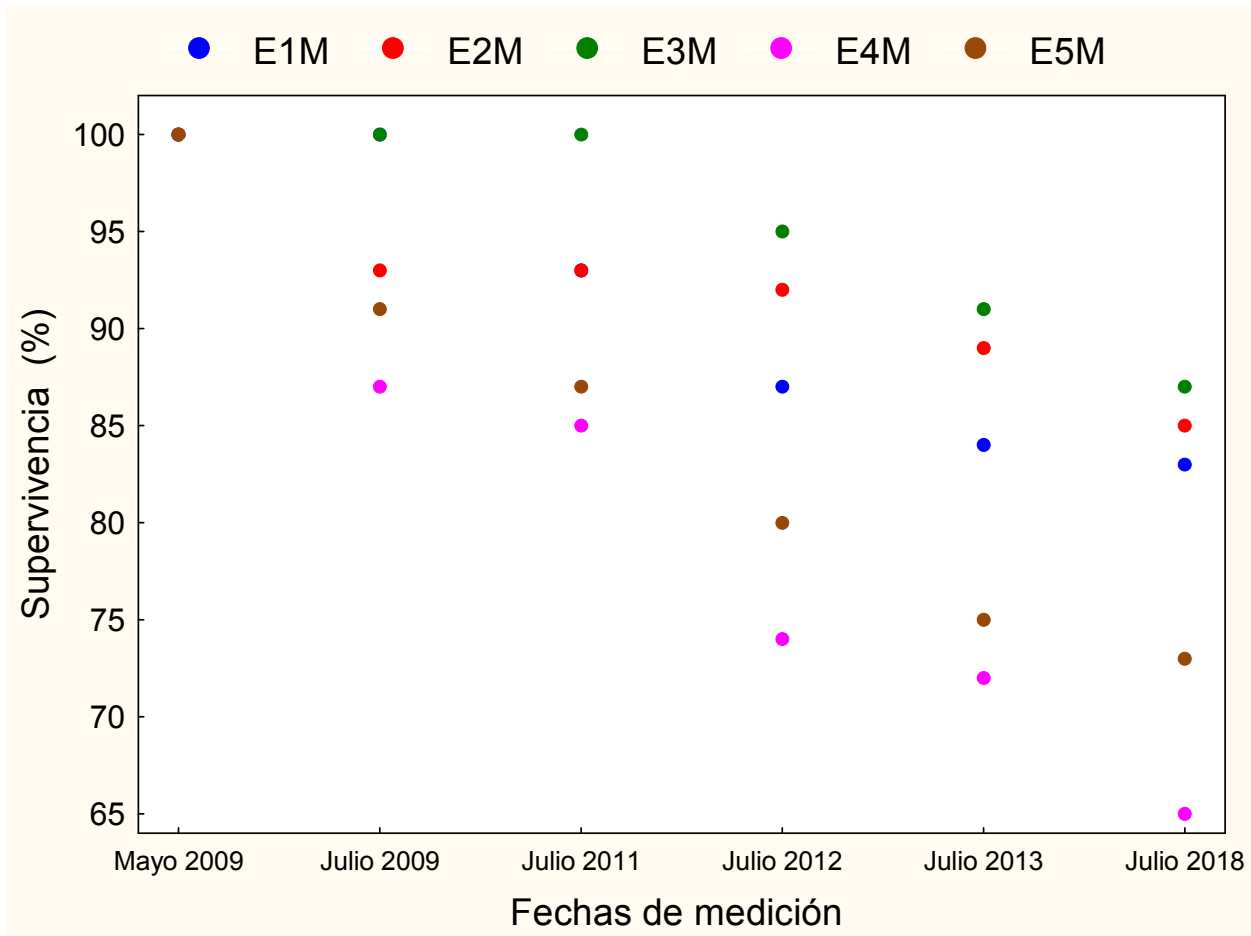
Las diferencias en el crecimiento promedio de los ecotipos fueron más notorias en el parámetro de cobertura de planta, ya que a lo largo del estudio se presentaron diferencias significativas en todos los ecotipos. De la misma forma que en los parámetros de altura de planta y diámetro de tallo, las dimensiones de cobertura de planta presentaron aumentos acentuados en las mediciones entre el 2009 y 2010, posteriormente, mostraron aumentos ligeros a partir de las mediciones de Julio 2010 hasta Julio 2018. A lo largo de todo el estudio, el E2M también presentó el mayor crecimiento en este parámetro.

Al final del periodo monitoreado, el valor promedio de todos los datos obtenidos en altura de planta fue  $162.5 \pm 16.9$  cm a  $203.5 \pm 28.9$  cm, diámetro de tallo  $11.0 \pm 1.2$  cm a  $14.3 \pm 2.3$  cm y en cobertura de planta  $18804.7 \pm 5526.6$  cm<sup>2</sup> a  $39072.9 \pm 10521.0$  cm<sup>2</sup>.

En resumen, en orden ascendente, el crecimiento de altura de planta por ecotipo es: E4M > E5M > E3M > E2M > E1M; para el diámetro de tallo es: E4M > E3M > E5M > E1M > E2M; y para la cobertura de planta es: E4M > E3M > E5M > E1M > E2M. Como se puede observar, el ecotipo E1M presentó el mayor crecimiento en altura de planta y el E2M presentó el mayor crecimiento de diámetro de tallo y cobertura de planta.

En cuanto a la supervivencia de las plantas, la Gráfica 8 se muestra la tendencia de supervivencia de los ecotipos. Todos los ecotipos mantuvieron el 100% de supervivencia de plantas en los primeros meses después de que se plantaron las plantas hasta la primera medición realizada en mayo del 2009, indicando una buena adaptación a las condiciones de la plantación experimental. Sin embargo, en la segunda medición realizada en Julio 2009, a cuatro meses de edad de las

plantas en el sitio experimental, se presentó la pérdida de plantas menor al 10% para los ecotipos E2M y E5M y 13% para el ecotipo E4M.



**Gráfica 8 Tasas de supervivencia por ecotipo a lo largo del estudio**

En la medición realizada en Julio 2012, al tercer años de edad de las plantas, se presentó la mayor pérdida de plantas debido a la presencia de la plaga de barrenador (*Diatraea saccharalis*), afectando principalmente a los ecotipos E4M Y E5M.

Finalmente, entre las mediciones realizadas en Julio 2013 y 2018 la perdida de plantas fue mínima para los ecotipos E1M, E2M y E5M mientras que los ecotipos E3M y E4M presentaron un porcentaje alto de pérdida de plantas. Sin embargo, en el último año de monitoreo, Julio de 2018, el ecotipo E3M presentó el mayor porcentaje de supervivencia con 87% seguido por los ecotipos E2M y E1M con 85% y 83%, respectivamente, mientras que los ecotipos E4M y E5M presentaron el porcentaje más bajo de 65% y 73%, respectivamente.



### 2.3.2 Rendimiento de producción de semillas, biomasa y contenido de aceite

Los rendimientos de producción de semillas y biomasa de los ecotipos seleccionados de *Jatropha curcas* se presentan en la Tabla 8. Se analizaron dos cosechas de frutos de *Jatropha curcas* para estimar la producción de semillas. La primera recolección de frutos maduros se realizó a los 8 años de edad de las plantas, en los meses de agosto y septiembre en el año 2017. La mayor producción de frutos se presentó en los ecotipos E1M y E2M, por tal motivo la segunda recolección de frutos del año 2018 se realizó únicamente en dichos ecotipos.

**Tabla 8 Rendimiento de frutos y semillas de los ecotipos no tóxicos. Letras iguales significa que no hay diferencias significativas de acuerdo a las pruebas ANOVA y Tukey ( $p \leq 0.05$ ).**

Ecotipos	Producción de frutos			% de peso respecto al fruto **			Rendimiento de semillas		
	kg/planta	kg/ha		Semillas	Pericarpio	kg/planta	kg/ha		
<b>E1M</b>	*0.75 + -	0.26	A	946	65.3	34.7 + -	4.9	0.49	618
<b>E2M</b>	*0.81 + -	0.39	A	1021	68.5	31.5 + -	2.9	0.56	700
<b>E3M</b>	0.24 + -	0.06	B	303	70.3	29.7 + -	1.2	0.17	213
<b>E4M</b>	0.10 + -	0.01	B	120	64.1	35.9 + -	3.7	0.06	74
<b>E5M</b>	0.37 + -	0.08	B	459	69.4	30.6 + -	0.7	0.25	318

\* Promedio de producción de frutos de las cosechas de los años 2017 y 2018

\*\* % de peso del fruto en base seca

La producción de frutos maduros fue variada. De acuerdo con la prueba Anova y Tukey ( $p \leq 0.05$ ), se mostraron dos grupos con diferencias significativas. En el primer grupo se identificaron los ecotipos E2M y E1M con la mayor producción de frutos por planta, el ecotipo E2M con un rendimiento de 0.81 kg/planta y el ecotipo E1M con 0.75 kg/planta (Tabla 8, columna 2, letra A). Mientras que en el segundo grupo se mostraron los ecotipos con las producciones más bajas, E5M con 0.37 kg/planta, E3M con 0.24 kg/planta y E4M con 0.10 kg/planta (Tabla 8, columna 2, letra B).

Consecuentemente, los ecotipos E2M y E1M presentaron la mayor producción de frutos por hectárea con un potencial de 1,021 kg/ha para el ecotipo E2M y 946 kg/ha para el ecotipo E1M considerando la densidad de cultivo de 1,250 plantas por hectárea (Tabla 8, columna 3).

La cantidad de semillas contenidas en los frutos de *Jatropha curcas* varía entre 3 y 4 semillas. El peso de las semillas representó entre 64.1% y 70.3%, mientras que el peso del pericarpio (cascara del fruto) representó entre 29.7% y 35.9%, del peso total del fruto de los ecotipos (Tabla 8, columnas 4 y 5).

De esta forma, el rendimiento de semillas por planta en los ecotipos con mayor producción de frutos fue 0.56 kg para el ecotipo E2M y 0.49 kg para el ecotipo E1M con un rendimiento de semillas por hectárea de 700 kg y 618 kg, respectivamente. Los ecotipos E5M, E3M y E4M presentaron los rendimientos de semillas por planta más bajos con producciones de 0.25 kg, 0.17 kg y 0.06 kg, así como el potencial de producción por hectárea de 318 kg, 213 kg y 74 kg, respectivamente.

A nivel mundial, el rendimiento de semillas de las plantaciones de *Jatropha curcas* tiene una amplia variación. Dicho rendimiento se encuentra en un intervalo de entre 26 kg/ha a 11,250 kg/ha con un promedio global de 2,218 kg/ha  $\pm$  148 kg/ha [18]. Mientras que los rendimientos de semillas reportados para México se encuentra en el intervalo de 346 a 1980 kg/ha [13].

Bajo un escenario de producción sin irrigación y sin la aplicación de fertilizante y en condiciones de precipitación y temperatura similares a las presentadas en este estudio [108], una variedad elite de *Jatropha curcas* nativa de India, registro rendimientos de entre 858.3 kg/ha y 922 kg/ha, en la ciudad de Bhavnagar; y de entre 69.4 kg/ha y 58.65 kg/ha, en la ciudad de Hyderabad, ambas plantaciones con un espaciamiento de 2.5 m x 2.5 m.

Aunque el rendimiento de semillas que mostraron los ecotipos identificados como los más productivos, E2M y E1M, se encuentran por debajo del promedio global, la producción de semillas por planta de dichos ecotipos es superior a la producción reportada en la ciudad de Hyderabad, antes citada, donde sus cuatro mejores variedades produjeron entre 0.24 kg/planta y 0.39 kg/planta [69].

Sin embargo, cabe mencionar que los ecotipos E2M y E1M se encuentran dentro del intervalo de rendimiento de semillas a nivel nacional. Por lo que, los rendimientos de semillas de los estos ecotipos son atractivos para promover programas de mejoramiento del cultivo a fin de aumentar su producción de semillas.

Con respecto a la estimación de la producción biomasa, se realizó la separación de las semillas del endospermo y el tegumento, el endospermo es el núcleo de la semilla donde se almacena el aceite que es el principal producto que se busca en

las plantas de *Jatropha curcas* mientras que el tegumento es la biomasa que cubre al endospermo y no es considerado un producto relevante.

El endospermo representa del 55.8% al 60.5% del peso de la semilla (Tabla 9, columna 2). Entre los ecotipos con mayor y menor porcentaje de endospermo existen diferencias significativas de acuerdo con las pruebas Anova y Tukey ( $p \leq 0.05$ ). El porcentaje del peso del endospermo es mayor en el E1M con 60.5% del peso de la semilla que para el E2M con 58.8% del peso de la semilla, pero al presentar una producción de semillas mayor su potencial de producción de endospermo por hectárea es mayor con 411.3 kg/ha que para el E1M con 375.7 kg/ha.

**Tabla 9 Rendimiento de biomasa. Letras iguales significa que no hay diferencias significativas de acuerdo a las pruebas ANOVA y Tukey ( $p \leq 0.05$ )**

Ecotipos	Rendimiento de endospermo				Rendimiento de tegumento				Rendimiento de pericarpio	Biomasa residual total
	% de peso respecto al peso de semillas		kg/ha		% de peso respecto al peso de semillas		kg/ha		kg/ha	kg/ha *
<b>E1M</b>	60.5	$\frac{+}{-}$ 0.5	A	376	39.2	$\frac{+}{-}$ 0.6	B	243	329	571
<b>E2M</b>	58.8	$\frac{+}{-}$ 1.0	AB	411	41.5	$\frac{+}{-}$ 0.9	AB	290	322	612
<b>E3M</b>	55.5	$\frac{+}{-}$ 4.3	B	118	44.5	$\frac{+}{-}$ 4.3	A	95	90	185
<b>E4M</b>	58.3	$\frac{+}{-}$ 2.7	AB	43	41.9	$\frac{+}{-}$ 2.7	AB	31	43	74
<b>E5M</b>	58.3	$\frac{+}{-}$ 1.1	AB	185	41.9	$\frac{+}{-}$ 1.2	AB	133	140	274

\* Suma del rendimiento de pericarpio y tegumento

La biomasa del tegumento representa de 39.2% a 44.5 % del peso de la semilla (Tabla 9, columna 3), el E2M presenta mayor producción de biomasa de tegumento que el E1M teniendo un potencial de producción de 290 kg/ha para el E2M y 242 kg/ha para E1M.

Si se consideran las biomásas del pericarpio y del tegumento juntas, los ecotipos más productivos presentan un rendimiento de biomasa de pericarpio y tegumento de 612 kg/ha para el E2M y 570 kg/ha para el E1M (Tabla 9, columna 8). Se puede observar que el peso de ambas biomásas representa 60% del peso de la producción de frutos, este porcentaje sugiere que es importante valorizar esta biomasa como otro producto de valor de las plantaciones de *Jatropha curcas*.

La estimación de los rendimientos de contenido de aceite por extracción mecánica se presenta en la tabla 10. El promedio de contenido de aceite fue de 44.8 % a

52.2 % con respecto al peso del endospermo de la semilla y de 26.1% a 31.5% con respecto al peso total de la semilla (tegumento y endospermo).

De acuerdo con las pruebas Anova y Tukey ( $p \leq 0.05$ ) se presentaron diferencias significativas entre los ecotipos con mayor y menor porcentaje de extracción de aceite. El E1M presentó el mayor porcentaje de extracción de aceite con 52.2% con respecto al peso del endospermo y 31.5 % con respecto al peso de la semilla, mientras que el E2M presentó un bajo rendimiento de 46.5% con respecto al peso del endospermo y 27.3 % con respecto al peso de la semilla (Tabla 10, columna 2).

Los rendimientos de extracción de aceite obtenidas en estos ecotipos se encuentran en el intervalo de los porcentajes reportados para diferentes variedades de *Jatropha curcas*; de 45% a 70% de peso de aceite con respecto a el peso del endospermo y de 20% a 50 % con respecto al peso de la semilla [13]. De la misma manera que en el rendimiento de extracción de aceite, el ecotipo E1M presenta el mayor rendimiento de aceite por hectárea de 196 kg/ha seguido por el ecotipo E2M con 191 kg/ha.

**Tabla 10 Contenido de aceite y pasta residual de endospermo de los ecotipos de *Jatropha curcas* no tóxicos. Letras iguales significa que no hay diferencias significativas de acuerdo a las pruebas ANOVA y Tukey ( $p \leq 0.05$ )**

Ecotipos	Rendimiento de aceite					Pasta residual de endospermo					
	% de aceite respecto al peso del endospermo	% de aceite respecto al peso de la semilla*			kg/ha	% de endospermo extruido respecto al peso del endospermo			kg/ha		
<b>E1M</b>	52.2	31.5	$\frac{+}{-}$	2.5	A	196	47.8	$\frac{+}{-}$	2.5	B	180
<b>E2M</b>	46.5	27.3	$\frac{+}{-}$	1.5	B	191	53.5	$\frac{+}{-}$	1.5	A	220
<b>E3M</b>	51.6	28.6	$\frac{+}{-}$	3.8	AB	61	48.4	$\frac{+}{-}$	3.8	B	57
<b>E4M</b>	50.4	29.4	$\frac{+}{-}$	1.7	AB	22	49.6	$\frac{+}{-}$	1.7	A	21
<b>E5M</b>	44.8	26.1	$\frac{+}{-}$	1.1	B	83	55.2	$\frac{+}{-}$	1.1	A	102

\* % de peso en base seca del endospermo y tegumento juntos

La pasta residual, es decir, el endospermo extruido resultante de la extracción de aceite es mayor para el E2M con 53.5% del peso del endospermo con un rendimiento de pasta residual de 220 kg/ha y en el E1M la pasta residual representa 47.8% del peso del endospermo y un potencial de 1798 kg/ha. El porcentaje de pasta residual de estos ecotipos es similar a los reportados por [69] que se encuentra entre 49% y 58%.

Finalmente, al presentar los ecotipos E1M y E2M los mejores resultados de crecimiento de parámetros biofísicos, de productividad de semillas y de rendimiento.

### 2.3.3 Propiedades físico-químicas del aceite y el endospermo

A los ecotipos seleccionados se realizó un análisis de las propiedades físico-químicas del aceite y endospermo para determinar si son materias primas adecuadas para la producción de biocombustibles en el caso del aceite y la utilización de alimentos en el caso de endospermo.

La composición físico-química del aceite, tal como la longitud, ramificación y grado de insaturación de las cadenas de ácidos grasos, determinan las propiedades del biodiesel que se puede obtener de dicho aceite.

La composición de los ácidos grasos del aceite de los ecotipos E1M y E2M se presenta en la Tabla 11, la densidad y la gravedad específica a 15°C para los dos ecotipos fue 0.91 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabla 11 Propiedades físicas y composición de ácidos grasos del aceite de los ecotipos no tóxicos E1M y E2M**

Propiedades físico químicas			E1M	E2M
<b>Densidad a 15°C (g/cm<sup>3</sup>)</b>			0.919	0.918
<b>Gravedad específica a 15°C</b>			0.919	0.919
<b>Viscosidad a 40°C (cSt)</b>			31.88	31.66
<b>Poder calorífico (MJ/kg)</b>			39.45	39.47
% de contenido de ácidos grasos	Mirístico	C14:0	0.217	0.226
	Palmitico	C16:0	10.216	11.215
	Palmitoleico	C16:1	0.415	0.582
	Estearico	C18:0	8.951	7.497
	Oleico	C18:1	42.174	40.169
	Linoleico	C18:2	36.763	39.359
	Linolenico	C18:3	0.318	0.243
	Otros		1.362	0.711
	Total saturados		19.725	19.474
	Total no saturados		80.127	80.352

Para la producción de biodiesel es deseable que la densidad del aceite tenga un valor bajo de densidad. El valor obtenido por los ecotipos E1M y E2M es ligeramente mayor con respecto a los valores reportados en [66,67] con un valor de  $0.90 \text{ g/cm}^3$ . Sin embargo, se encuentra en el mismo valor reportado en [68].

La viscosidad del aceite de los ecotipos E1M y E2M, a  $40^\circ\text{C}$ , es similar en ambas muestras, 31.88 cst y 31.66 cst respectivamente. La viscosidad del aceite es preferible que se encuentre en valores bajos para que el biodiesel obtenga propiedades adecuadas para ser usado en motores. La viscosidad de ambos ecotipos es menor que la reportada como viable para la producción de biodiesel con valor de 34 cst a 42.88 cst [67–69] lo que indica que la viscosidad del aceite de estos ecotipos presenta una características adecuadas para la producción de biodiesel.

El aceite de ambos ecotipos también muestra valores de poder calorífico deseables para la producción de biodiesel, el poder calorífico de ambos ecotipos fue 39.4 MJ/kg superior a los valores reportados en [109,110] de 37.1 MJ/kg y 38.5 MJ/kg.

La composición química del aceite de *Jatropha curcas* es otro factor importante para la producción de biodiésel debido a que los componentes como la longitud de cadenas de carbono, el grado de instauración y las ramificaciones de las cadenas de carbono determinan las propiedades del biodiésel [61].

Conociendo la composición del aceite podemos saber la calidad del aceite para su conversión a biodiésel, el cual está en función del perfil de ácidos grasos. Los aceites están compuestos por ácidos grasos saturados e insaturados, los ácidos grasos insaturados tienen dobles enlaces entre los átomos de carbono mientras que los ácidos saturados no tienen dobles enlaces.

Los ácidos grasos que tienen una sola insaturación se llaman mono insaturados y los que tienen más de dos dobles enlaces entre carbonos se llaman poli insaturados. Para la producción de biodiésel es deseable un bajo contenido de ácidos grasos saturados y alto contenido de ácidos grasos insaturados.

La composición del aceite también es similar entre los ecotipos, presentaron una alta proporción de ácidos grasos insaturado, 80.1 % y 80.3%, respectivamente. El ácido oleico es el más predominante con 42.1% y 40.1% seguido por ácido linoleico con 36.7% y 39.3%, respectivamente.

La composición de ácidos grasos saturados es de 19.7% y 19.4%, presentando en mayor proporción ácido palmítico 10.2% y 11.2 %, seguido por el ácido esteárico

8.9% y 7.4%, respectivamente. En concordancia con la literatura, los ácidos grasos oleico, linoleico, palmítico y esteárico son los de mayor abundancia en el aceite de *Jatropha curcas*, siendo el ácido oleico el de mayor proporción [60,62], esta composición se presenta en otras variedades estudiadas en México [64,111].

Así mismo, se encontraron otros ácidos grasos que no se han reportado en otros estudios, tal como, ácido  $\alpha$ -linolénico (C18:3), ácido Tricosanoico (C23:0), cis-5, 8, 11, 14, 17- eicosapentanoico (C20:5).

El alto contenido de ácidos grasos monoinsaturados proporciona calidad al biodiesel, estos compuestos permiten mejorar el número de cetanos en el biodiesel y puede ofrecer un efecto fuerte en la estabilidad de oxidación y la duración de almacén del aceite y del biodiesel. Las propiedades físicoquímicas del aceite de los ecotipos E1M y E2M tienen características adecuadas para su utilización como materia prima en la producción de biodiesel.

En lo que respecta al endospermo, su composición química se presenta en la Tabla 12, el contenido de proteína cruda es mayor en el ecotipo E2M con 26.0% de proteína cruda mientras que para el ecotipo E1M el contenido de proteína cruda fue de 21.7 %.

**Tabla 12 Composición química del endospermo de los ecotipos no tóxico E1M y E2M**

Composición química	E1M	E2M
Proteína cruda (%) *	21.7	26.0
Lípidos (%) **	60.9	63.3
Cenizas (%) ***	3.0	2.9
Fibra cruda (%) ****	10.7	4
Fibra dietética (%) **	36.3	34.2
Poder Calorífico (MJ kg <sup>-1</sup> ) *****	27.3	28.7

\* Analizado de acuerdo a NMX-F-608-NORMEX-2011

\*\* NOM-086-SSA1-1994

\*\*\* NMX-F-607-NORMEX-2013

\*\*\*\* NMX-F-613-NORMEX-2003

\*\*\*\*\* NOM-051-SCFI/SSA1-2010

La composición de proteína cruda del ecotipo E2M se encuentra dentro del intervalo de 23.7% a 27.2%, reportado para variedades de diferentes partes del mundo [112], así como del reportado para variedades mexicanas de 23.2% a 31.9% [34,35,113].

Aunque el contenido de proteína cruda de los ecotipos E2M y E1M es menor que el reportado para las variedades del estado de Morelos; 32.1% para el municipio de Yautepec y 29.7% para el municipio de Cuautla [33,34]. Es comparable con el contenido de proteína cruda de otros alimentos como la colza (19%), karanja (22.0%), ajonjolí (25.2%), calabaza (26.5%), girasol (23%) y cacahuete (26%).

En cuanto a grasas totales, el porcentaje para el ecotipo E2M es 63.3% y para el ecotipo E1M es 60.9%; estos porcentajes son mayores con respecto a otras variedades de diferentes partes del mundo que se encuentran entre 42.9% a 59.0% [112] y de variedades mexicanas en el intervalo de 51.1% a 64.5% [33–35]. El contenido de grasas totales es más alto que los valores reportados en las variedades de los municipios de Yautepec (55.3%) y de Cuautla (58.7%), en el estado de Morelos.

El contenido de fibra cruda es mayor en E1M con 10.7% y 4% para E2M. El contenido de fibra cruda del E1M es más alto que otras variedades del mundo que van de 3.8% a 6.1% [112] y que en variedades mexicanas que tienen porcentajes de 2.8% a 5.3% [33,34]. El contenido de fibra del E2M es similar al reportado en la variedad de Cuautla Morelos con un valor de 4.0% y más alto que el valor reportado en la variedad de Yautepec Morelos de 3.1%.

Estos ecotipos presentaron un alto contenido de fibra dietética; de 34.2 % para el ecotipo E2M y 36.2% para el ecotipo E1M. Estos contenidos no han sido reportados en otros estudios.

El contenido de cenizas fue similar para ambos ecotipos de 2.9% y 2.8%, estos valores se encuentran por debajo del intervalo reportado para variedades de diferentes partes del mundo que van de 3.4% a 5.0% [112] y de variedades mexicanas de 3.6% a 5.8% [33–35].

La energía bruta que aportada es mayor en el ecotipo E2M (28.7 MJ/kg) que en el ecotipo E1M (27.3 MJ/kg). El contenido de energía que proporcionan estos ecotipos son ligeramente menores que los reportados para variedades de diferentes lugares del mundo que se encuentran entre 28.9 MJ/kg a 31.2 MJ/kg [112], aunque se encuentran entre los valores reportadas en variedades mexicanas de 26.5 MJ/kg a 31.6 MJ/kg [33,34].

En resumen, los niveles de proteína cruda, fibra cruda, lípidos y energía sugieren que el endospermo de las semillas de los ecotipos E1M y E2M tienen características adecuadas para ser una buena fuente de proteína para el consumo humano o de animales, de esta forma el endospermo extruido de la extracción de aceite puede ser un producto con un valor económico importante.



### 2.3.4 Cambios en las propiedades del suelo

El incremento de la materia orgánica del suelo es un indicador del mejoramiento de la calidad del suelo y de la disponibilidad de los nutrientes de las plantas. A su vez, estos son factores importantes para la productividad de *Jatropha curcas*.

Los cambios en las propiedades físicoquímicas del suelo de la parcela experimental se reportan en la Tabla 13. En todos los años monitoreados, el porcentaje de arcilla fue dominante en la textura del suelo, seguido por limo y en menor porcentaje arena, el tratarse de un suelo arcilloso fue benéfico para las plantas de *Jatropha curcas* debido a que los suelos arcillosos tienen la capacidad de retener agua y nutrientes.

Tabla 13 Propiedades del suelo de la plantación experimental antes de la plantación de las plantulas (2008) y a 9 años de edad de las plantas (2018)

Propiedades físicas y química		2008	2018
<b>Textura</b>	Arena (%)	25	18
	Limo (%)	23	25
	Arcilla (%)	52	57
<b>pH</b>		7.6	7.9
<b>CE (dS/m)</b>		0.5	0.4
<b>MO (%)</b>		2.8	3.5
<b>N av (mg/kg)</b>		6.0	9.1
<b>P av (mg/kg)</b>		7.0	10.7
<b>K av (mg/kg)</b>		216.0	364.0

CE: Conductividad eléctrica, % MO: contenido de materia orgánica, N av: Nitrógeno disponible, P av: Fosforo disponible, K av: Potasio disponible

De acuerdo con los valores de referencia de la NOM-021-SEMARNAT-2000, el pH del suelo mantuvo valores ligeramente alcalinos a lo largo del periodo de estudio. Al inicio, el pH fue de 7.6 y al final del estudio fue de 7.9. De igual manera, la conductividad eléctrica (CE) mantuvo valores de baja salinidad; iniciando en 0.5 ds/m y finalizando en 0.4 ds/m. La disminución de C.E. no fue sustancial.

En la composición de materia orgánica (M.O.) se observó un aumento en los años monitoreados. En la primera medición del año 2008 el valor de M.O fue de 2.8%, aumentando en un 20% para el último año de estudio, para finalizar con 3.5% de M.O. El aumento del contenido de materia orgánica está influido por los residuos vegetales de las hojas de las plantas de *Jatropha curcas* que cayeron al piso

durante el periodo de dormancia así como de los residuos de pastos y hierbas que crecieron en la plantación experimental.

La composición de MO del suelo de la plantación experimental se mantuvo en un intervalo de %MO medio (de 1.6 % a 3.5%) de acuerdo a los valores de referencia de la NOM-021-SEMARNAT-2000, sin embargo, el porcentaje de MO al final del estudio se situó en el valor límite para pasar a la clasificación de %MO alta (de 3.6% a 6.0%)

Los macronutrientes presentaron incrementos a lo largo del estudio, el Nitrógeno (N) y el Potasio (K) mostraron un aumento considerable entre la primera y segunda medición, pasando de 6.0 mg/kg a 9.1 mg/kg de N inorg y de 216 mg/kg a 364 mg/kg de K. De acuerdo con los valores de referencia de la NOM-021-SEMARNAT-2000, la concentración de N se mantuvo en el nivel muy bajo. Sin embargo, la concentración final es mayor que en la primera medición. Los cambios en la concentración de K fueron de nivel medio a alto entre la primera y la segunda medición. En el caso del P, presentó un aumento de 7.0 mg/kg a 10.7 mg/kg pero se mantuvo en un nivel medio de acuerdo a los valores de referencia.

Los incrementos antes mencionados en el contenido de materia orgánica y de nutrientes pueden estar relacionados a la interacción de las plantas de *Jatropha curcas* con la fauna, como insectos, polinizadores, roedores y aves, flora y diversos organismos que llegaron a establecerse a lo largo de los años en el que se ha mantenido la plantación de *Jatropha curcas*.

Estos resultados sugieren que el cultivo de los ecotipos E1M y E2M de *Jatropha curcas* pueden mantener y aumentar la materia orgánica del suelo así como favorecer la reserva de elementos nutritivos promoviendo una mejoramiento del suelo. De esta manera, estos resultados coinciden con el estudio realizado por [11] que identificó que las plantaciones de *Jatropha* proporcionan servicios eco sistémicos que dan soporte al ciclo de nutrientes del suelo.

## 2.4 CONCLUSIONES

Los ecotipos no tóxicos E2M y E1M presentaron las mejores características de crecimiento, supervivencia y los mayores rendimientos de producción de semillas y de aceite. Estos ecotipos también mostraron rendimientos importantes de biomasa del pericarpio y tegumento, así como pasta residual del endospermo.

El aceite de estos ecotipos es adecuado para la producción de biodiesel y el endospermo de las semillas presenta una calidad adecuada para ser una fuente de proteína de consumo humano y de animales.

Adicionalmente al aceite de las semillas, la biomasa y la pasta residual son productos que pueden dar un valor agregado adicional al cultivo de los ecotipos seleccionados.

Los ecotipos también mostraron que pueden aumentar la materia orgánica y los nutrientes del suelo por lo que podrían crecer en suelos del estado de Morelos que han sido abandonados y no son utilizados para cultivar alimentos.

De acuerdo a nuestros resultados, se puede concluir que los ecotipos de *Jatropha curcas* E2M y E1M son identificados como una materia prima sustentable con potencial para aprovechar las semillas en la producción de biocombustibles y alimentos así como el cultivo de las plantas para mejorar las propiedades químicas del suelo y ofrecer servicios ecosistémicos favorables a la rehabilitación de suelos.

## **Capítulo 3 Sistema de producción de biocombustibles y selección de indicadores para el análisis de sustentabilidad**

La sustentabilidad considera la integración de los aspectos ambientales, sociales, económicos e institucionales que mediante los indicadores de sustentabilidad se puede medir el estado presente y tendencia al futuro para de un sistema y de esta forma verificar si progresa o no hacia la consecución del objetivo de la sustentabilidad.

En el mismo sentido, la sustentabilidad energética integra los resultados de los indicadores de los aspectos, por lo que en el análisis de la sustentabilidad de la bioenergía es necesario abordar indicadores de cada uno de los pilares de la sustentabilidad.

El trabajo inicial sobre indicadores energéticos fue emprendido por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) con contribuciones del departamento de Asuntos Económicos y Sociales de la Naciones Unidas, la Agencia Internacional de Energía (AIE) en año 2001. Este conjunto de indicadores fue llamado “Indicadores para el desarrollo energético sostenible” (IDES).

Posteriormente, en la Cumbre Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible realizado en Johannesburgo, se examinó el tema de la energía y reconfirmo la importancia del acceso a la energía en el marco del Objetivo de Desarrollo del Milenio (ODM). El conjunto de indicadores energéticos cambió al nombre de “Indicadores energéticos del desarrollo sostenible” (IEDS).

Los ODMs llevaron a que los países buscaran la diversificación de sus fuentes energéticas a modo de promover el desarrollo económico, la seguridad energética y la calidad del medio ambiente, con tal objeto comenzó el impulso a la producción y uso de la bioenergía [114].

Los ODMs fueron modificados y retomados en la Cumbre de Desarrollo Sostenible celebrada en 2015 en donde se adoptó la nueva Agenda de Desarrollo 2030, la cual está conformada por 17 objetivos y 169 metas, que abarcan las dimensiones económicas, sociales y ambientales para lograr un desarrollo sustentable.

La energía continúa siendo un tema fundamental para lograr un desarrollo sustentable, la meta de los ODS 7 “Energía asequible y no contaminante” en donde uno de las metas es aumentar el uso de energías renovables en los sectores de calefacción y transporte.

Actualmente, existen 2 marcos internacionales para evaluar la sustentabilidad de la producción de biocombustibles, los indicadores de la Mesa Redonda sobre Biocombustibles (RSB, Redonda sobre biomateriales sustentables) y los desarrollados por la Asociación Mundial de Bioenergía (GBEP).

El análisis de la sustentabilidad debe contener un enfoque sistemático, es decir, tomar en cuenta el ciclo de vida completo en la obtención de los productos o servicios a fin de reconocer y mejorar el sistema de producción

El objetivo de tener una visión de ciclo de vida en la evaluación de sustentabilidad es para evitar que las mejoras que se realizan en una parte de este sistema no tengan consecuencias negativas en otra parte del sistema que podría superar las ventajas logradas.

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología que tuvo sus orígenes en los años de 1960, iniciado por el interés de determinar de manera cuantitativa el uso de la energía y proyectar en el futuro las fuentes y usos de esta.

Posteriormente el interés mundial en los temas que involucran a los recursos y al ambiente permitió que la metodología de ACV se perfeccionara haciendo un enfoque a los impactos ambientales, fue hasta 1990 que el ACV fue estandarizado bajo las normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) debido a la presión de las organizaciones ambientales de legislar la metodología. Las normas establecidas fueron, ISO 14000, 14041, 14042, 14043 e ISO 14044, desde el año 2006 se encuentran vigentes las ISO 14000 y 14044.

En el año 2002, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC) pusieron en marcha la asociación internacional Iniciativa de Ciclo de Vida. Dentro de la Iniciativa de ciclo de vida se propuso la evaluación de la sustentabilidad mediante el Análisis de la sustentabilidad del Ciclo de Vida[115].

En este capítulo se argumenta la importancia de considerar el enfoque de ciclo de vida en el análisis de sustentabilidad, se presenta el sistema de producción que abarca el análisis de sustentabilidad, los procesos que conforman el sistema y los escenarios de producción que se evalúan.

Se presentan los indicadores con los que se evalúa cada uno de los aspectos de la sustentabilidad así como las hojas metodológicas que describen la evaluación particular de cada uno de los indicadores.

Finalmente se describe la metodología para integrar los indicadores en un índice y su normalización para la comparación de la sustentabilidad entre escenarios.

Los objetivos particulares de este capítulo son los siguientes:

- (1) Describir el sistema de producción del biodiésel utilizando plantaciones de *Jatropha curcas* como materia prima mediante un enfoque de ciclo de vida así como los procesos y consideraciones que conforman el sistema de producción
- (2) Presentar los escenarios de producción del biodiésel utilizando plantaciones de *Jatropha curcas* como materia prima a evaluar.
- (3) Presentar los indicadores para evaluar cada uno de las dimensiones de la sustentabilidad y las metodologías particulares para la evaluación de cada uno de los indicadores
- (4) Presentar la metodología para evaluar la sustentabilidad de cada uno de los escenarios y la comparación entre ellos.

### 3.1 Enfoque de ciclo de vida

Entendida a la sustentabilidad como la interacción de las implicaciones ambientales, sociales y económicas involucrados en los procesos para el aprovechamiento de los recursos naturales, el análisis de la sustentabilidad debe contener un enfoque sistemático, es decir, tomar en cuenta el ciclo de vida completo en la obtención de los productos o servicios a fin de reconocer y mejorar el sistema de producción para encontrar patrones de gestión sustentable en todas las fases que integran el proceso de la producción.

El término de “Ciclo de vida” se refiere a las principales actividades implicadas en la vida útil de un producto, desde su fabricación, uso mantenimiento, hasta su disposición final, incluyendo la adquisición de la materia prima requerida para la fabricación del producto..

En esta visión el ciclo de vida de los productos implica flujos materiales, energéticos y monetarios tomando en cuenta los impactos de producción y consumo en todos los actores a lo largo de la cadena de valor, trabajadores, comunidades locales, consumidores y la sociedad misma.

En las perspectivas del ciclo de vida se consideran todas las etapas del producto o cadena de valor, desde la extracción de los materiales en bruto, la manufactura, uso, tratamiento del fin de vida y la disposición final del producto, en la Figura 13 se muestran las etapas que conforman del ciclo de vida de un producto.



Figura 13 Ciclo de vida de un producto

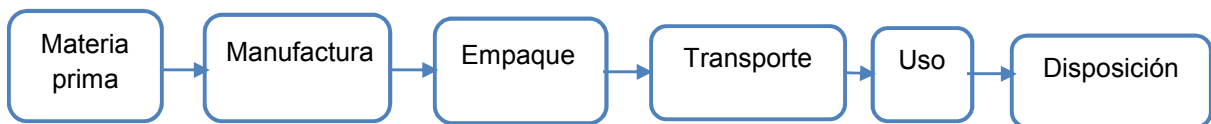
En este concepto de análisis de la sustentabilidad en el ciclo de vida se reconocen los fundamentos aportados por varios trabajos e iniciativas como la

serie ISO 14040 (Gestión ambiental- Evaluación del ciclo de vida- Principios y Marco) junto con ISO 2600 (Responsabilidad Social).

Las series de la norma ISO 14040 proveen un marco técnico riguroso para llevar a cabo la evaluación de la sustentabilidad en la dimensión ambiental.

El Análisis de Ciclo de Vida Ambiental (ACV), es un marco metodológico que estima y analiza los impactos ambientales atribuibles al ciclo de vida de un producto. Esta evaluación además de analizar los impactos ambientales también analiza los impactos potenciales asociados a la fabricación y uso de tecnologías, productos o servicios durante sus etapas del ciclo de vida.

Con el ACV se realiza un estudio llamado “de la cuna a la tumba” de los sistemas de producción. El estudio de la cuna a la tumba es un principio básico de la metodología del ACV y se refiere al proceso en donde involucra todas las etapas de la producción para generar productos, comenzando con la obtención de las materias obtenidas de la tierra y concluye en el momento en que los materiales son devueltos a la tierra, las etapas que abarca el ciclo de vida de los productos se muestran en la Figura 14.



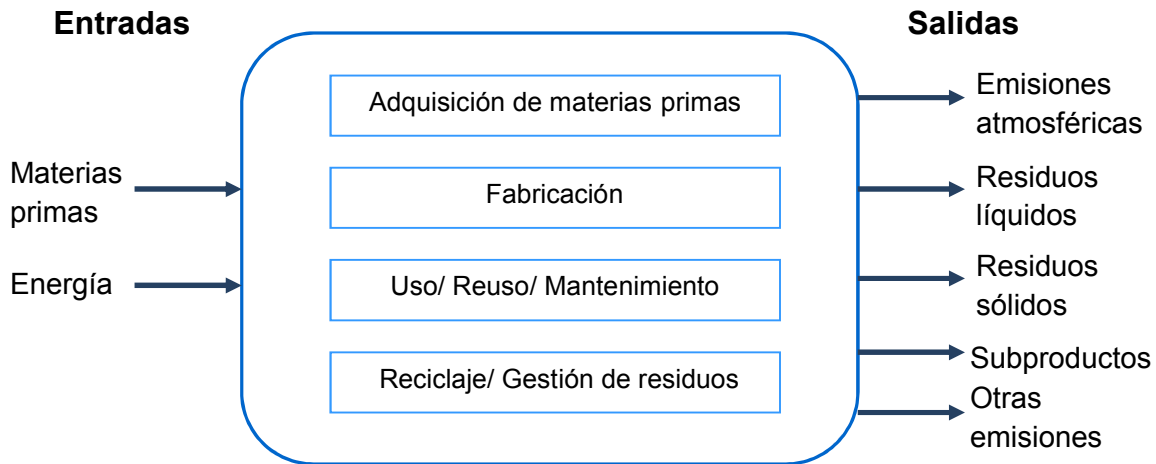
**Figura 14 Etapas del ciclo de vida de un producto**

En el ACV se evalúan todas las etapas de vida de un producto considerando que son interdependientes, lo que significa que una operación da paso a la siguiente. De esta forma se pueden estimar los efectos ambientales acumulativos que resultan de todas las etapas del ciclo de vida de un producto, incluyendo, a menudo, los efectos que no son considerados en la mayoría de los análisis tradicionales.

Otro principio básico del ACV que lo distingue de otros métodos de análisis ambientales es que todos los flujos de masa y energía, los recursos y el uso de tierra y los impactos potenciales relacionados con cada etapa del ciclo de vida se establecen en relación a una “unidad funcional” como medida cuantitativa del beneficio del sistema.

Al considerar los flujos de energía y los materiales asociados en el Ciclo de Vida completo de un producto se obtiene lo que se conoce como sistema del producto, en la Figura 15 se presenta el sistema de producto con las posibles etapas que se pueden considerar en Análisis de Ciclo de Vida Ambiental y sus entradas/salidas típicas que se pueden cuantificar.





**Figura 15 Sistema de producto**

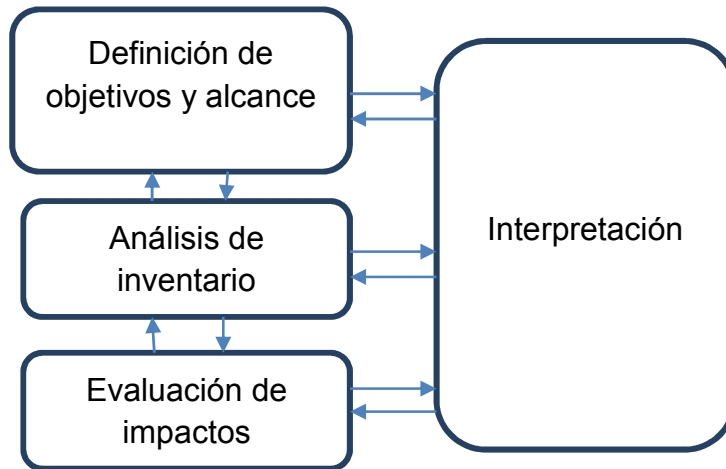
Otro principio básico del ACV es que es esencialmente un método comparativo en donde también se comparan las mejoras del sistema con el status quo. En el análisis de ciclo de vida se desarrollan estrategias que son fundamentales para eficientar el proceso de producción que, a su vez, permitirán reducir de manera importante los niveles de contaminación ambiental al considerar un mejor aprovechamiento del recurso y el reciclado de los materiales involucrados.

El proceso del ACV es un enfoque sistemático y se lleva a cabo en cuatro fases que establece las normas ISO 14040:2006 (Environmental management – Life cycle assessment, principles and framework) y 14044:2006 (Environmental management – Life cycle assessment, requirements and guidelines), estas fases se muestran en la ver Figura 16.

Para analizar la dimensión económica y la dimensión social se utiliza un enfoque similar a la dimensión ambiental, estos son llamados Costeo de ciclo de vida CCV para evaluar los aspectos económicos y Análisis de ciclo de vida social ACV social. En estos análisis se aplican las misma cuatro fases que en Análisis de ciclo de vida ambiental.

#### Fase 1. Definición de objetivo y el alcance del estudio

En esta etapa se precisa y describe el producto, el proceso o la actividad que se analiza, y donde se establece el contexto en que se realiza el análisis e identifica los límites y los efectos ambientales que abarcara el estudio.



**Figura 16 Las cuatro fases del análisis del Ciclo de Vida**

El objetivo y el alcance del estudio deben ser explícito, estos proveen el contexto del análisis y explica quiénes y cómo los resultados vas a hacer comunicados. Esta etapa incluye los detalles de la información técnica como la unidad funcional, los límites del sistema, las suposiciones y limitaciones del estudio, las categorías de impactos, los métodos utilizados, la localización de las cargas ambientales, económicos o sociales, según sea el caso.

#### Fase 2. Análisis de Inventario

En esta fase se identifica y cuantifica el uso de energía, agua y materiales, así como las emisiones al ambiente (emisiones atmosféricas, disposición de los residuos sólidos, descarga de aguas residuales). En esta fase se detallan todas las emisiones liberadas al ambiente y recursos extraídos del ambiente a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto, el inventario se presenta como una lista de flujos elementales.

#### Fase 3. Evaluación del impacto

En esta fase se analizan los impactos del ciclo de vida y se determinan los posibles efectos ambientales y al ser humano debido al uso y consumo de energía, agua y materiales, así como las emisiones ambientales identificadas en el análisis de inventario.

Los resultados obtenidos, llamados indicadores de intervenciones ambientales, son traducidos a impactos ambientales con la ayuda de un método de análisis de impactos.

#### Fase 4. Interpretación

En esta fase se identifica, cuantifica, revisa y evalúa la información de los resultados de Inventario de ciclo de vida y del análisis del inventario de ciclo de vida. En esta se genera un grupo de conclusiones y recomendaciones.

En la metodología ACV ambiental a pesar de su desarrollo y madurez, aunque existen métodos de evaluación de impacto ambientales hay varios campos que necesitan atención, por ejemplo métodos para analizar impactos sobre ecosistemas como el uso de suelo, impactos del uso de agua, así como los impactos de los aspectos económicos y sociales. Por tal motivo se integran los indicadores que informen sobre tales cuestiones.

### **3.2 Selección de indicadores de sustentabilidad**

El término indicador puede aludir a cualquier característica observable de un fenómeno, suele aplicarse a aquellas que son susceptibles de expresión numérica y que son pertinentes o de máxima importancia para el interés público. Estos, son valores que se construyen a partir de estadísticas como señales medibles que reflejan características cuantitativas o cualitativas importantes para hacer juicios o tomas de decisiones.

El indicador debe comunicar claramente una historia pertinente, debe ser una señal que alerta sobre lo que ocurre respecto de un fenómeno, problema, desafío o meta acordada y debe decirlo en forma robusta, clara y contextualizada, sin lugar a dudas o interpretaciones encontradas.

Los indicadores, a menudo resultan de procesar series estadísticas en formas de agregación, proporción, tasas de crecimiento (entre otras), para poder mostrar el estado, la evolución, y las tendencias de un fenómeno que interesa monitorear. Como lo muestra la Figura 17, los indicadores son en sí información selecta y procesada cuya utilidad ha sido predefinida y su existencia justificada.

Los indicadores se diseñan y producen con el propósito de seguir y monitorear algunos fenómenos o conjuntos de dinámicas que requieren algún tipo de intervención o programa. Por lo tanto los indicadores se intencionan desde su origen y requieren de un cuidadoso proceso de producción en que se calibran varios criterios como la disponibilidad y calidad de información, relevancia del indicador y aporte al sistema de indicadores.

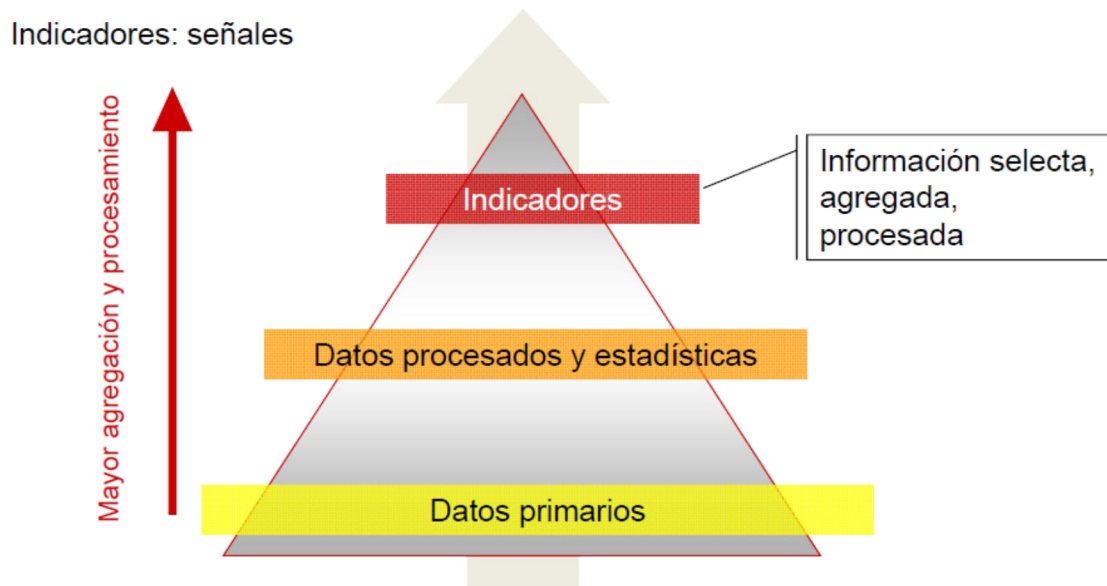


Figura 17 Proceso de desarrollo de los indicadores

Como se mencionó en el capítulo 1, existen 2 marcos internacionales para evaluar la sustentabilidad de la producción de biocombustibles, los indicadores de la Mesa Redonda sobre Biocombustibles (RSB) y los desarrollados por la Asociación Mundial de Bioenergía (GBEP).

El conjunto de indicadores es diferente entre ambos marcos. Mientras que la norma RSB contiene 74 indicadores ambientales, 75 indicadores sociales, 40 indicadores económicos (que tienen que ver con el plan de negocios y la viabilidad económica) y 20 indicadores institucionales, el marco GBEP contiene 24 indicadores en total, 8 indicadores de en cada pilar de la sustentabilidad.

En la Tabla 14 se presentan los indicadores de GBEP y algunos indicadores de la norma RSB con los que tienen mayor similitud con los indicadores GBEP.

Tabla 14 Comparación de indicadores entre la norma RSB y GBEP

Indicadores ambientales		
Aspectos	RSB	GBEP
<b>Emisiones de gases de efecto invernadero</b>	Reducción de las emisiones del ciclo de vida de los biocombustibles en comparación con los combustibles fósiles que sustituyen de acuerdo Metodología de cálculo de RSB-STD-01-003-01	1. Emisiones de GEI en todo el ciclo de vida
<b>Capacidad</b>	Minimizar la erosión del suelo	2. Calidad del suelo

<b>productiva de la tierra y los ecosistemas</b>	manteniendo o mejorando las propiedades del suelo : que las propiedades físicas, químicas y/o biológicas se encuentren en condiciones óptimas de acuerdo al Análisis de impacto de suelo RSB-GUI-01-008-01	3. Niveles de cosechas de recursos madereros
<b>Calidad del Aire</b>	Medidas para controlar y mitigar la contaminación del aire por monóxido de carbón, óxidos de nitrógeno, compuestos volátiles, material particulado, compuestos de azufre, dioxinas y otras sustancias potencialmente dañinas al ambiente y salud humana, mediante un Plan de Manejo social y Ambiental (ESMP, por sus siglas en Ingles)	4. Emisiones de contaminantes que no son GEI, incluyendo sustancias toxicas del aire
<b>Disponibilidad, eficiencia en el uso y calidad del agua</b>	Evitar los efectos negativos del suministro de agua: la reducción o alteración de la calidad o cantidad identificados mediante el Análisis de agua RSB-GUI-01-009-01	5. Uso de eficiencia del agua 6. Calidad del agua
<b>Biodiversidad biológica y servicios ecosistémicos</b>	Manejo para mantener o mejorar áreas de conservación de cualquier importancia global, regional o local identificada mediante Análisis de impactos RSB-GUI-01-002-02	7. Diversidad biológica en el paisaje natural
<b>* Cambio en el uso de la tierra, incluyendo los efectos indirectos</b>	Las áreas de valor de conservación no son convertidas a la producción de biocombustibles, las funciones de los ecosistemas se deben mejorar mediante las prácticas de manejo de ESMP.	8. Uso de la tierra y cambio del uso de la tierra relacionado con la producción de materia prima

Indicadores sociales		
Aspectos	RSB	GBEP
<b>Precio y oferta de una canasta alimentaria nacional</b> <b>*Seguridad</b>	Si las operaciones de la producción de energía se encuentran en una zona de riego de inseguridad alimentaria de acuerdo con la Guia de análisis de seguridad alimentaria RSB-GUI-006-01 debe haber un plan de mitigación de los impactos	9. Asignación y tenencia de tierra para nueva producción

<b>alimentaria</b>	negativos. Medidas para mejorar la seguridad alimentaria Desarrollar sub-productos alimenticios de valor agregado disponibles en el mercado local.	10. Precio y suministro de la canasta básica nacional
<b>Acceso a la tierra, el agua y otros recursos naturales</b>	El uso de los recursos del agua no se encuentra en una disputa entre partes interesadas Los derechos de tierra y del uso de tierra no se encuentran en disputa de acuerdo a RSB-GUI-01-002-02	11. Cambios en ingresos 12. Empleos en el sector de bioenergía
<b>Condiciones laborales</b> <b>*Derechos humanos laborales</b>	<b>y</b> Los trabajadores tienen el derecho de libre organización, negociación voluntaria de sus condiciones de trabajo Los trabajadores contratados no son sometidos al trabajo forzado ni de explotación infantil Los trabajadores no son objeto de ningún tipo de discriminación en la obtención de contratación, remuneración y otro tipo de beneficios laborales. La remuneración de los trabajadores es de al menos el salario mínimo regulado y es igual para hombres y mujeres El máximo número de horas de una semana es de 48 horas. Se cuenta con un kit de primeros auxilios, extinguidores, lo trabajadores conocen y saben utilizar el equipo.	13. Cambio en el tiempo no remunerado de las mujeres y los niños que recogen biomasa
<b>Desarrollo social y rural</b> <b>* Acceso a la energía</b>	Creación de empleos de un año y/o largo plazo para las operaciones de las producción de biocombustibles Establecimiento de estructuras de gobernanza que empoderen a agricultores y comunidades rurales como cooperativas y esquemas de microcréditos. Uso de la bioenergía producida localmente para proveer servicios modernos de energía a las comunidades locales Beneficios sociales para la comunidad local como construcciones o servicios de clínicas, hospitales y escuelas.	14. Bioenergía utilizada para expandir el acceso a servicios de energía moderno
<b>Salud seguridad humana</b>	<b>y</b> Implementación de actividades en el trabajo para minimizar los riesgos a la salud y seguridad relacionada a	15. Cambios en mortalidad y carga de enfermedades atribuibles al humo

	accidentes	
	Los trabajadores tienen equipo de protección personal requerido para el tipo de trabajo que realizan Se tienen medidas de seguridad de riesgos y medidas de prevención para minimizar los riesgos a la salud y seguridad	16. Incidencia de lesiones laborales, enfermedades y muertes

<b>Indicadores Económicos</b>		
<b>Aspectos</b>	<b>RSB</b>	<b>GBEP</b>
<b>Disponibilidad de recursos y eficiencias de uso en la producción, conversión, distribución y uso final de la bioenergía</b>	-	17. Productividad 18. Balance de energía
<b>Desarrollo económico</b>	-	19. Valor agregado bruto
<b>Viabilidad económica y competitividad de la bioenergía</b>	El plan de negocios debe tener viabilidad económica y debe reflejar la situación actual y el desarrollo de los negocios de los biocombustible	20. Cambios en el consumo de combustibles fósiles y biomasa tradicional
<b>Acceso a la tecnología y las capacidades tecnológicas</b>	Los residuos, desechos o subproductos son reciclado y procesados ( quema, fermentación, gasificación) para producir gas, electricidad o calor u otras formas de mejorar la eficiencia de todo el sistema con la apropiada licencia y facilidad o transferida a otros sectores cuando su transferencia puede mejorar el balance de energía, emisiones de gases de efecto invernadero y/o la variabilidad económica	21. Formación y calificación de la mano de obra
<b>Seguridad energética</b>	-	22. Capacidad y flexibilidad del uso de energía
<b>Diversificación de fuentes de</b>	-	23. Diversidad energética

<b>suministro</b>		
<b>Infraestructura y logística de distribución y uso</b>	-	24. Infraestructura y logística para distribución de bioenergía

<b>Indicadores Institucionales</b>		
<b>Aspectos</b>	<b>RSB</b>	<b>GBEP</b>
<b>Cumplimiento legal</b>	Evidencia del cumplimiento de las leyes nacionales y regulaciones, licencias, permisos y requerimientos legales	-
<b>Participación y transparencia</b>	Las partes interesadas son informados, consultados y consensuados incluyendo, grupos indígenas, personas vulnerables, mujeres y jóvenes, de acuerdo a la guía de análisis de impacto RSB-GUI-01-002-01	

Para los fines de evaluación de las plantaciones energéticas de *Jatropha curcas* se seleccionaron 3 indicadores entre ambas metodologías considerando cubrir los aspectos más importantes de la sustentabilidad partiendo de la información disponible con datos específicos del área de estudio presentada en el capítulo 2. Otros 3 indicadores se diseñaron y adecuaron con base en ambas metodologías y considerando la información disponibles para evaluarlos.

Los indicadores ambientales de ambos marcos de evaluación presentados en la tabla 14 se encuentran alineados a los mismos objetivos, en cada uno de los aspectos. Para efectos de este trabajo se seleccionó el indicador de Emisiones de GEI y el indicador de Uso de suelo del sistema de producción se adecuó de acuerdo a la información existente.

Los indicadores económicos son los que tienen menos similitudes entre los marcos, mientras la norma RSB considera la viabilidad económica de las empresas bioenergéticas y las capacidades tecnológicas para aprovechamiento de residuos del proceso de producción, los Indicadores GBEP se analizan en un enfoque macroeconómico en que tiene que ver el sistema energético de una región. Por tal motivo, los indicadores que se pueden obtener con datos de la plantación experimental son indicadores modificados de ambos marcos, estos son:



Costo de producción del biodiésel y Valor agregado por aprovechamiento de residuos que son indicadores modificados de la norma RSB sobre aprovechamiento de residuos.

Otro indicador importante que no es abarcado en ambos marcos es el indicador energético, si bien en los indicadores de GBEP de la dimensión económica incluye el balance de energía en RSB no se abordan aspectos de este tipo, sin embargo, para los temas de bioenergía el indicadores energético es determinante para conocer la sustentabilidad de la producción de los biocombustibles.

En esta tesis se incluye 1 indicador energético llamado Balance de energía, dado que es un indicador que está relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero, este indicador se agrupa con los indicadores de la dimensión ambiental.

Los indicadores sociales en la norma RSB están desarrollados en mayor detalle a temas territoriales y laborales debido a la naturaleza de certificación de operaciones industriales, tal aplicación no está relacionada con el tema analizado. De los indicadores sociales de GBEP se seleccionó el indicador de Empleos relacionados en el sistema de producción ya que esta información se puede obtener con la información directa de la plantación experimental.

Los indicadores institucionales en general son poco abarcados, la norma RSB contempla dos indicadores de este aspecto mientras que GBEP no contempla ninguno. En este indicador se tomará con base al indicador de la norma RSB “Cumplimiento legal” y para su evaluación se realizara un análisis de las regulaciones y normatividad existente en México para la producción de biocombustibles, así como para el aprovechamiento de los subproductos.

En la Tabla 15, se presentan los indicadores seleccionados con una descripción corta de lo que abarca el indicador.

**Tabla 15 Indicadores seleccionado para el análisis de sustentabilidad**

Nombre del Indicador		Descripción del corta
<b>Ambientales</b>	Emisiones de GEI	Emisión de gases de efecto invernadero en el sistema de producción
	Uso de suelo	Eficiencia del uso de tierra para producción de materias primas para la producción de biodiésel
	Balance de energía	la relación entre el total de la energía utilizada y el total de la energía obtenida en el sistema de producción
<b>Económicos</b>	Costo de producción	Costo de producción por unidad de bioenergía

	Valor agregado	Valor agregado de subproductos obtenidos por unidad de bioenergía
<b>Sociales</b>	Empleos relacionados en el sistema de producción	Creación de empleo neto del sistema de producción de biodiesel considerando empleos calificados, no calificados y temporales.
<b>Institucionales</b>	Análisis de las Regulaciones y normatividad existentes para la producción de biodiesel y el aprovechamiento de subproductos.	

### 3.3 Descripción y límites del sistema de producción que abarca el análisis de sustentabilidad

El análisis de sustentabilidad de la producción de biodiésel utilizando como materia prima las plantaciones de *Jatropha curcas* se realizará con el enfoque de análisis de ciclo de vida y se utilizarán los datos del ecotipo mexicano no tóxico E2M que presentó los mejores resultados en la evaluación desarrollada en el capítulo 2.

Este análisis abarcará las etapas de obtención de la materia prima, la extracción de aceite y la producción del biodiesel debido a que son las etapas críticas para la producción de biocombustibles.

El análisis se realizará para tres escenarios de producción que consideran mejoras en el sistema para valorar el desempeño de la sustentabilidad. Estos escenarios se presentan a continuación:

#### 3.3.1 Escenarios de producción analizados

##### 3.3.1.1 Escenario 1. Escenario MR (Mínimos recursos)

En este escenario se toman las consideraciones del cultivo de *Jatropha curcas* en las condiciones experimentales presentadas en el capítulo 2, en donde el cultivo no utiliza fertilizantes y no se tiene un programa de riego por lo que únicamente utiliza el agua de la temporada de lluvias.

Los productos que se obtienen en este sistema son biodiesel como producto principal y la glicerina resultante del proceso de transesterificación como subproducto. Los residuos de biomasa por la extracción de aceite no son aprovechados y son desechados tirándolos a cielo abierto.

### 3.3.1.2 Escenario 2. Escenario MRAS (Mínimos recursos y aprovechamiento de subproductos)

El escenario 2 considera las mismas condiciones de cultivo del escenario MR con la diferencia de que este escenario considera el aprovechamiento de los subproductos. El producto principal es el biodiesel y los subproductos son : (i) las biomásas del pericarpio y tegumento, (ii) la pasta residual que es el endospermo extruido resultante de la extracción e aceite (iii) y la glicerina resultante del proceso de transesterificación. Los subproductos se describen en la sección de análisis de inventario de ciclo de vida.

### 3.3.1.3 Escenario 3. Escenario BRAS (Utilización de biofertilizantes y riego además de aprovechamiento de subproductos)

Este escenario considera una mejora en las condiciones del cultivo adicionando biofertilizantes y riego rodado en la época seca. En este escenario se considera el aprovechamiento de manera similar al escenario MRAS.

## 3.3.2 Definición de objetivo y el alcance del análisis de sustentabilidad

El presente análisis de sustentabilidad tiene el objetivo conocer los impactos ambientales, económicos y sociales, así como la situación institucional del sistema de producción de biodiesel utilizando como materia prima plantas de *Jatropha curcas* de ecotipos mexicanos no tóxicos cultivadas en terrenos marginales y abandonados.

El desempeño de la sustentabilidad en cada uno de los escenarios de evaluación servirá para seleccionar el escenario de producción con los menores impactos ambientales así como con mayores beneficios económicos y sociales.

El análisis que se llevará a cabo es un análisis de la cuna a la puerta, es decir, el sistema de producción abarca etapas de la obtención de la materia prima, la producción de biodiesel. En la Figura 18 se presenta el diagrama de flujo del sistema de producto y las etapas que abarca el de ciclo de vida.

El sistema se ha limitado de esta forma debido a que estas son las etapas críticas que determinan el rendimiento de la producción de energía, en estas etapas es donde se presentan las mayores oportunidades de mejora. Por tal motivo no se analizarán los procesos posteriores como la distribución, uso y disposición final del biodiésel.

El estudio no abarca los procesos subsecuentes para el aprovechamiento las biomazas y glicerina en la producción de otros productos que se mencionaran en la siguiente sección. El estudio tampoco considera la fabricación de los equipo y de recipientes para almacenamiento.

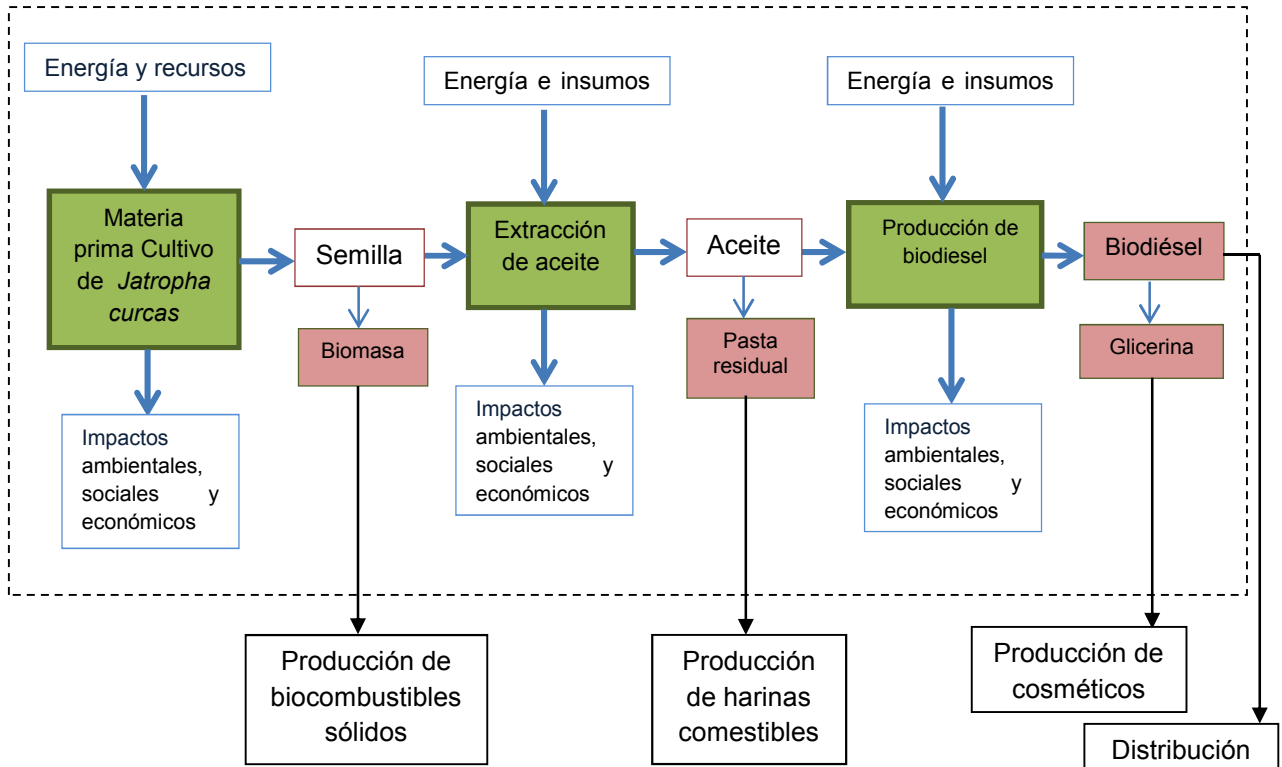


Figura 18 Etapas de ciclo de vida y límites del sistema de producción de biocombustibles con plantaciones de *Jatropha curcas*

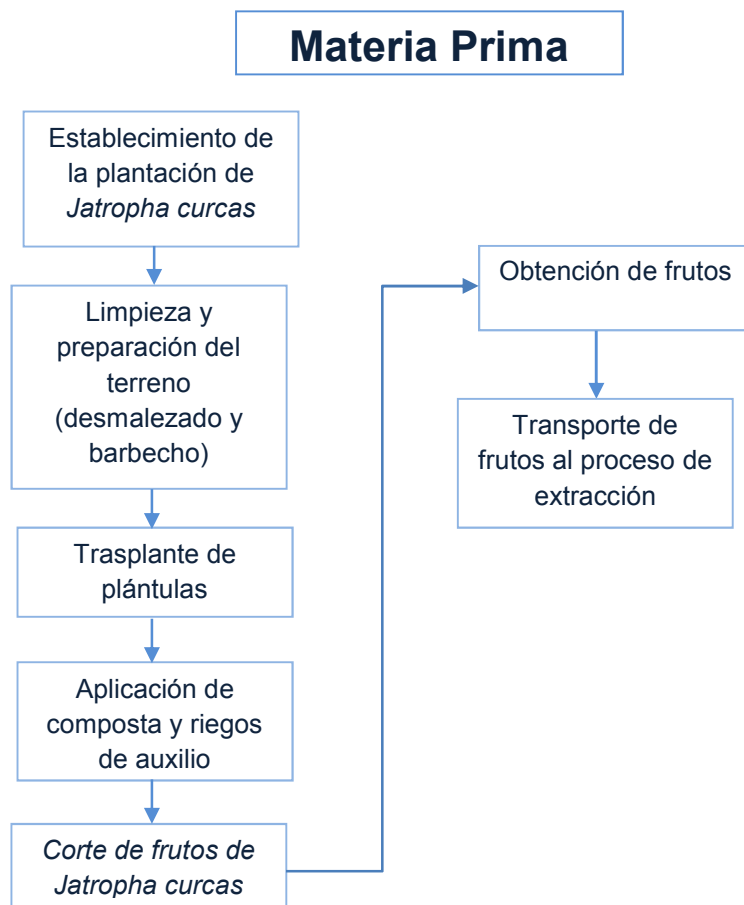
La unidad funcional es proveer biodiésel obtenido de la producción anual de *Jatropha curcas*. El flujo de referencia utilizado es la producción de 1 GJ de energía de biodiésel de *Jatropha curcas*.

### 3.3.3 Análisis del inventario de ciclo de vida

De acuerdo al sistema de producto a analizar, la unidad funcional y el flujo de referencia, en la siguiente sección se describe los procesos unitarios de las etapas consideradas para la obtención de los datos del inventario de ciclo de vida.

#### 3.3.4.1 Etapa 1. Obtención de la materia prima

La etapa de obtención de materia prima se enfoca en el cultivo de *Jatropha curcas* y abarca las fases establecimiento de la plantación, el mantenimiento de la plantación y la recolección de las semillas de *Jatropha curcas*. El diagrama de los procesos de esta etapa se muestra en la Figura 19. Los productos que se obtienen en esta etapa son los frutos de *Jatropha curcas* y la etapa concluye con el transporte de los frutos a la etapa 2.



**Figura 19** Procesos incluido en la etapa de materia prima

En la etapa de materia prima, la información se obtuvo del estudio experimental presentado en el capítulo 2 y se tomaron las siguientes consideraciones: La actividad de preparación de terreno con un tractor modelo 2007 que utiliza diesel.

Todas las actividades del manejo del cultivo, tal como la plantación de las plántulas, el riego rodado y la cosecha de semillas se realizaron de manera manual.

Los datos del transporte entre cada uno de los procesos se consideran las ubicaciones reales de los lugares donde se realizaron las experimentaciones. El transporte de la materia prima al proceso de extracción de aceite es una distancia de 39 km que va del lugar donde se encuentra la plantación de *Jatropha curcas* en el municipio de Miacatlán al municipio de Temixco ambos localizados en el Estado de Morelos.

Para el transporte se considera una camioneta de una tonelada modelo 2007 que consume gasolina.

### 3.3.4.2 Etapa 2. Extracción de aceite

En la etapa 2 ingresan los frutos que se obtienen en la etapa 1. En la Figura 20 se presentan los procesos que incluye esta etapa. Los frutos se someten a un proceso de separación de las biomazas del pericarpio para obtener las semillas, las semillas también se someten a un proceso de separación para obtener el endospermo.

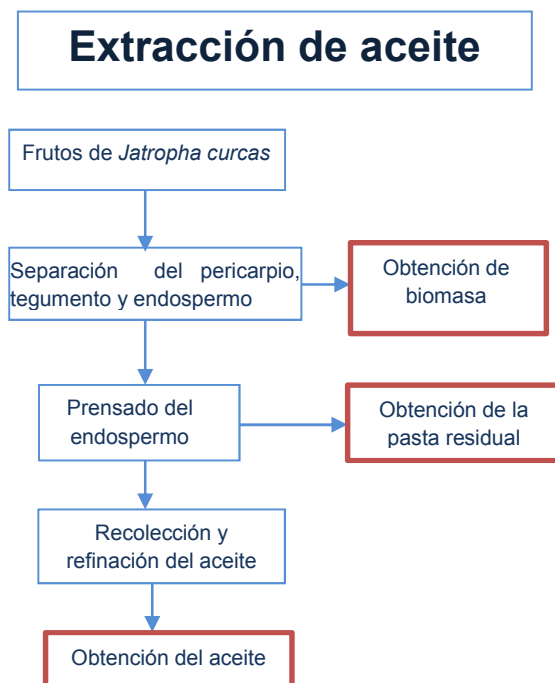


Figura 20 Diagrama de los procesos que abarca la etapa de extracción de aceite

Las biomazas de pericarpio y tegumento se juntan y almacenan para enviarlos a otro sistema producción de biocombustible para la obtención de calor. De acuerdo a los autores de [13], estas biomazas pueden ser utilizadas en la producción de

calor, en este estudio se eligió el uso como biocombustible sólido para uso doméstico como un sustituto de leña debido a que tienen un poder calorífico entre 17.2 MJ/kg para el pericarpio y entre 16.5 MJ/kg a 20 MJ/kg para el tegumento. Así como también la humedad de estas biomásas secadas al aire reportadas en el desarrollo experimental es 14.1%. Estos parámetros se encuentran dentro de los poder calorífico de la leña reportado entre 15.5 MJ/kg a 18.4 MJ/kg y con humedad de 13.1% a 21.8 % [116,117].

El endospermo pasa al proceso de prensado de donde se obtiene el aceite que se recolecta y se refina. Los residuos obtenidos en este proceso es el endospermo extruido que se recolecta y almacena para enviarlos a un sistema de producción de harinas comestibles, de acuerdo a los reportes de [35,64] y los resultados presentados en el capítulo 2, del análisis bromatológico, el endospermo extruido puede ser utilizado con fines alimenticios.

Los equipos considerados en la etapa de extracción de aceite son los siguientes:

- Una craqueadora para separar las semillas de las cáscaras con capacidad de 300 kg/h y potencia eléctrica de 22 KW.
- Una Prensa de extracción de aceite con capacidad de 110 kg/h y potencia eléctrica de 7.5 KW
- Un Filtro para aceite con capacidad de 180 kg/h con potencia eléctrica de 1.5 KW

#### 3.3.4.3 Etapa 3 Etapa de producción de biodiesel

El aceite obtenido de la etapa 2 ingresa a la etapa 3 para realizar la producción de biodiésel a través de reacciones de transesterificación con un catalizador básico y metanol en una relación 1:9 vol/vol.

Los procesos de esta etapa se presentan en la Figura 21, se obtiene el biodiésel como producto final y la glicerina. Ambos productos son recolectados y almacenados. La glicerina se envía a un sistema de producción de cosméticos.

Para la etapa de producción de biodiésel se considera:

- Un Reactor para la producción de biodiésel con capacidad de 175 l/h y potencia eléctrica de 5.4 KW.

El reactor es una tecnología eficiente y no utiliza agua para el proceso de purificación del aceite por tal motivo no se consideran insumos complementarios para este equipo.

# Producción de biodiésel

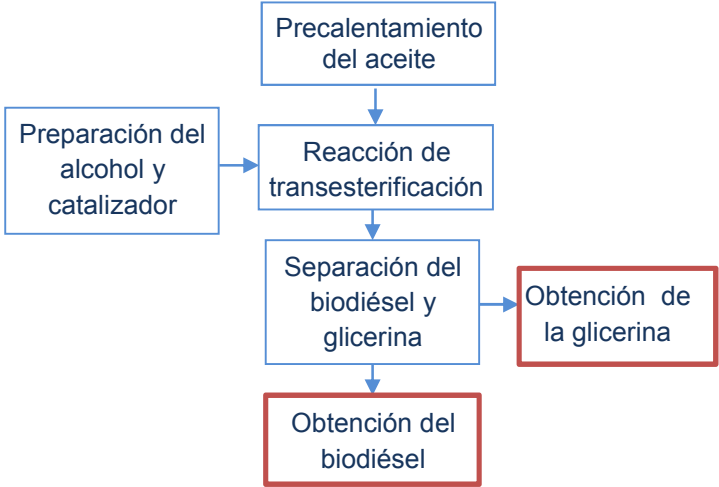


Figura 21 Diagrama de procesos que abarca la etapa de producción de biodiésel

De acuerdo a tales datos en la Tabla 16 se presenta el inventario de ciclo de vida del sistema del producto para una hectárea de cultivo de *Jatropha curcas* E2M en las condiciones de uso de mínimos recursos.

Tabla 16 Inventario de ciclo de vida del sistema de producto considerando una hectárea de cultivo de *Jatropha curcas* mexicano no tóxico

Inventario de ciclo de vida de la producción de biodiesel de 1 ha cultivo del ecotipo E2M de <i>Jatropha curcas</i>								
						Vida útil	20	años
						Extensión de tierra:	1 hectárea	
<b>Obtención de materia prima</b>	Entradas	Cantidad	Unidad					
	Suelo	10000	m <sup>2</sup>					
	Plántulas	1250	Plantas					
	Agua	75000	Litros					
	Diesel de preparación del terreno	37.5	Litros					
	Transporte de frutos (camioneta)	39	km					
				Salidas	cantidad	Unidad		
				frutos	1021	Kg		



Extracción de aceite	Entradas	Cantidad	Unidad	Salidas	Cantidad	Unidad
	Electricidad de craqueo para separar el pericarpio	74.9	kWh	Aceite	191.3	kg
	Electricidad de craqueo para separar el tegumento	51.3	kWh	Biomasa pericarpio	322	kg
	Electricidad de prensa	28.0	kWh	Biomasa tegumento	290	kg
	Electricidad para filtrado	1.6	kWh	Pasta residual endospermo	220.1	kg

Producción de biodiésel	Entradas	Cantidad	Unidad	Salidas	Cantidad	Unidad
	Electricidad del reactor	34.434	kWh	Biodiésel	183.648	kg
	Metanol	42.1	kg	Glicerina	7.652	kg
	Hidróxido de sodio	1.72	kg			

Dicho inventario de ciclo de vida utilizará para evaluar cada uno los indicadores ambientales, económicos, sociales e institucionales dimensionándolos a la unidad funcional y su flujo de referencia y de acuerdo a cada uno de los escenarios de producción a evaluar.

Los inventarios ambientales por escenarios se presentaran en el siguiente capítulo, los inventarios para el análisis de costos y los inventarios de empleos creados se presentan en la sección de anexos.

### 3.4 Hojas metodológicas de los indicadores

En esta sección se presentan las hojas metodológicas que establecen la evaluación específica para cada indicador.

#### 3.4.1 Indicador 1. Emisiones de gases de efecto invernadero

Uno de los motivos para perseguir el uso de la bioenergía es su potencial para reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) en comparación con los combustibles fósiles.

El indicador de Emisiones de GEI informa sobre las emisiones potenciales de GEI hacia la atmosfera a lo largo del ciclo de vida del sistema. Una herramienta importante para estimar las emisiones de los GEI y compararlos con aquellas de las diferentes fuentes de energía es el análisis de ciclo de vida ambiental.

En la Tabla 17 se presenta la hoja metodológica del indicador de emisiones de GEI, la estimación del indicador se realizará conforma a la metodología de análisis de Ciclo de Vida de la norma ISO 14040:2006 y 14044:2006.

El cálculo de este indicador se realizó con el Software SimaPro 3.5 con el método de evaluación ReCiPe H debido a que es un método más actualizado para la evaluación de impactos ambientales y entre las categorías de impacto que evalúa se encuentra las categorías de calentamiento global que informa sobre las emisiones de gases de efecto invernadero.

El calentamiento global es el efecto de calentamiento integrado a lo largo del tiempo que produce hoy una liberación de 1 kg de un gas de efecto invernadero en comparación con el causado por el CO<sub>2</sub>. Se tiene en cuenta los efectos radiactivos de cada gas de efecto invernadero, así como sus diferentes tiempos de permanencia en la atmósfera.

La modelación de estas categorías es de acuerdo a Handbook on LCA reportados en [118,119].

En esta modelación, las cargas ambientales se caracterizan multiplicando la cantidad de emisión o su consumo por un factor de caracterización de la siguiente manera:

$$Impacto_{categoría} = \sum_i m_i \times factor\ caracterización_{categoría,i}$$

$m_i = masa\ de\ la\ emisión$

$i = número\ de\ emisiones$

El software utiliza modelos matemáticos para derivar los factores de caracterización, estos modelos reflejan el mecanismo ambiental de una categoría de impacto. El valor numérico final del indicador resulta ser kg equivalentes de sustancia.

Tabla 17 Hoja metodológica del indicador Emisiones de gases de efecto invernadero

Nombre del indicador	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero
<b>Descripción corta del indicador</b>	Emisión de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida del sistema de producción

<b>Relevancia o pertinencia del indicador</b>	Informa sobre la emisiones de CO <sub>2</sub> eq en la cadena de producción de biodiesel, el CO <sub>2</sub> como principal gas que promueve el cambio climático
<b>Direccionalidad</b>	Bajas emisiones de CO <sub>2</sub> eq se refieren a un sistema con menores impactos negativos a la atmosfera y mayor sustentabilidad
<b>Alcance (qué mide el indicador)</b>	Las emisiones de CO <sub>2</sub> eq generados en el sistema de producción que considera en las fases de obtención de materia prima, extracción de aceite y producción de biodiesel
<b>Limitaciones (qué no mide el indicador)</b>	El indicador no abarca la fase de uso y disposición al final de la vida útil
<b>Fórmula del Indicador</b>	El valor del indicador del resultado del ACV calculando el impacto de <i>Global Warming Potencial</i> del método de análisis de impacto Recipe H
<b>Fuente de Datos</b>	Datos del ecotipo E2M de la plantación experimental, datos de las especificaciones de equipos comerciales, base de datos ecoinvent

### 3.4.2 Indicador 2. Uso de suelo

Aumentar la producción bioenergética podría requerir la extensión agrícola (es decir, aumento en el uso de la tierra) o cambios en los patrones de cultivo. Los datos sobre el uso de la tierra y los cambios en el uso de la tierra son fundamentales para entender muchos de los efectos ambientales, sociales y económicos a causa de la producción y el uso de la bioenergía.

Las mediciones que brinda este indicador informa sobre la evaluación de la demanda de tierras agrícolas para el sector bioenergético, lo cual podría interpretarse como la eficiencia del uso del suelo, es decir la cantidad de bioenergético que puede ser producido a partir de cierta área utilizada.

El presente indicador evalúa la eficiencia del uso del suelo para producir biodiesel utilizando como materia prima *jatropha curcas* de plantaciones establecidas en suelos degradados y abandonados que no son no son utilizados para cultivar alimentos, la hoja metodológica se presenta en la Tabla 18.

La evaluación de este indicador se obtiene de la evaluación en el Software SimaPro 3.5 con el método de evaluación ReCiPe H de la categoría de impacto de uso de suelo.

Tabla 18 Hoja metodológica del indicador Uso de suelo

Nombre del indicador	Uso de suelo
<b>Descripción corta del indicador</b>	Área de suelo utilizada en el sistema de producción de biodiesel
<b>Relevancia o pertinencia del indicador</b>	Informa sobre la eficiencia del uso del suelo utilizado en el sistema de producción
<b>Direccionalidad</b>	Mayor cantidad de energía producida en una unidad de área se refieren a un sistema eficiente y mayor sustentabilidad
<b>Alcance (qué mide el indicador)</b>	El indicador considera únicamente tierras degradadas y abandonadas en las mismas condiciones en que se realizó el desarrollo experimental
<b>Limitaciones (qué no mide el indicador)</b>	Este indicador revela no informa sobre las área disponibles para la producción de bioenergía
<b>Fórmula del Indicador</b>	Uso de suelo = área de suelo utilizada/energía producida
<b>Fuente de Datos</b>	Datos del ecotipo E2M de la plantación experimental, bases de datos ecoinvent

### 3.4.3 Indicador 3. Balance de energía

La relación de energía neta (es decir, el producto de la relación de energía para el insumo de energía total) representa un indicador útil de la eficiencia de la energía relativa de una ruta determinada de producción y uso de bioenergía. Cuanta más energía se consume durante el ciclo de vida de la bioenergía, se dispone de menos energía para satisfacer otras necesidades energéticas.

El uso eficiente de la energía es fundamental para mejorar la seguridad energética y para optimizar el uso de los recursos naturales disponibles. Los insumos de energía del proceso de producción de bioenergía, a veces, provienen de los hidrocarburos; por lo tanto, un alto nivel de relación de energía neta indicará el uso eficiente de estos recursos no renovables. Además, puesto que los requisitos de energía (para la producción y el procesamiento de materias primas) pueden

contribuir significativamente con los costos de producción de bioenergía, este indicador también se relaciona con la eficiencia económica.

Si la cantidad de energía que suministra el biocombustible es mayor que la cantidad de energía requerida para su producción indica que su producción es sostenible desde una perspectiva energética y la relación de energía neta del sistema es mayor a uno. En la Tabla 19 se presenta la hoja metodológica de este indicador.

El cálculo de este indicador se realizó con el Software SimaPro 3.5 con el método de evaluación Impact 2002+ que entre las categorías que evalúa se encuentra la categoría de consumo de energía no renovable.

El consumo de energía no renovables, en términos del total de energía extraída, es calculada usando el poder calorífico superior de los recursos fósiles que son utilizados, como petróleo crudo, gas natural, carbón según sea el caso de acuerdo a los métodos publicados en [120].

El consumo de energía se expresa como GJ del total de energía primaria no renovable/ GJ de energía extraída.

Tabla 19 Hoja metodológica del indicador Balance de Energía

Nombre del indicador	Balance de energía
<b>Descripción corta del indicador</b>	Relación entre la energía suministrada al proceso de producción y la energía entregada por el sistemas de producción
<b>Relevancia o pertinencia del indicador</b>	Informa sobre la energía necesaria para la producción del biocombustible y la energía que aporta el biocombustible
<b>Direccionalidad</b>	Un alto nivel de relación de energía neta indicara el uso eficiente de estos recursos no renovables y mayor sustentabilidad
<b>Alcance (qué mide el indicador)</b>	La energía que se consume durante las etapas consideradas en el sistema de producción
<b>Limitaciones (qué no mide el indicador)</b>	El indicador no abarca la fase de uso y disposición al final de la vida útil
<b>Fórmula del Indicador</b>	El valor del indicador se toma directamente del resultado del ACV calculando el consumo de energía no renovable del método de análisis de impacto-2002

#### 3.4.4 Indicador 4. Costos de Producción

Un uso eficiente de los recursos aumenta su disponibilidad, reduce los impactos ambientales negativos y promueve la sostenibilidad económica. Los costos de la producción de la bioenergía pueden ayudar a determinar si la bioenergía local es viable a nivel económico y competitivo a nivel nacional.

La viabilidad y competitividad económica de la producción de bioenergía, que se demuestran a través de la productividad y los costos, contribuyen a su sostenibilidad general y ofrecen información respecto de la competitividad de bioenergía local y se pueden tomar decisiones sobre el aumento de la producción de bioenergía.

Este indicador evalúa el costo de producción del biodiésel como una referencia comparable en relación a los combustibles fósiles como el diesel para determinar si la bioenergía local es viable a nivel económico.

En la Tabla 20 se presenta la Hoja metodológica para este indicador. El costo de producción se calculó utilizando la técnica del Valor Presente Neto, considerando los costos de producción de la materia prima con los datos de la plantación experimental sobre los materiales utilizados y la mano de obra.

Los datos para la etapa de extracción de aceite y producción de biodiésel se utilizaron los datos de los costos de los equipos descritos en la sección de Análisis de inventario dimensionando el costo de operación y mantenimiento como mano de obra y consumo de energía eléctrica.

Para el cálculo se utilizó la tasa de descuento social que es de 10% [121] y se analizó una vida útil de 20 que es la vida útil de la plantación de *Jatropha curcas*. Todos los costos que analizaron al valor de la moneda mexicana del año 2018, para la información de los costos que son anteriores al año 2018 se calculó su equivalencia al año 2018 utilizando la inflación correspondiente reportada por el Instituto Nacional de Estadísticas y Geografía (INEGI) [122].

Los inventarios de ciclo de vida para este indicador están reportados en el anexo 1.

Tabla 20 Hoja metodológica del indicador costos de producción

Nombre del indicador	Costo de producción
<b>Descripción corta del indicador</b>	Costo de producción de por unidad de energía
<b>Relevancia o pertinencia del indicador</b>	Informa sobre los costos de producción del biodiesel en el sistema de producción
<b>Direccionalidad</b>	El menor costo de producción puede mejorar la viabilidad de la producción del biodiésel y mayor sustentabilidad.
<b>Alcance (qué mide el indicador)</b>	El costo de producción de las etapas de materias primas, extracción de aceite y producción de biodiésel
<b>Limitaciones (qué no mide el indicador)</b>	El indicador no abarca la fase de uso y disposición al final de la vida útil
<b>Fórmula del Indicador</b>	Costo de producción = VPN de costos de inversión + operación y mantenimiento/ GJ de biodiésel
<b>Fuente de Datos</b>	Datos del ecotipo E2M de la plantación experimental, datos de los costos de los equipos y materiales comerciales

### 3.4.5 Indicador 5. Valor agregado

Es indicador mide el valor económico adicional por unidad de energía que se puede obtener del aprovechamiento de los subproductos cuando se les da un valor como materia prima para otros productos.

Para obtener el valor adicional se revisó el precio en el mercado de los productos con los que pueden competir. De acuerdo a los autores [123] el precio de la pasta residual de *Jatropha curcas* es de 4.00 \$/kg para que pueda competir con la pasta de soya. El costo de la glicerina cruda sin ningún tratamiento tiene un costo de 4.00 el \$/kg en el mercado de acuerdo a la información de páginas web [124].

El valor de la biomasa de las cascarras de frutos y semillas se consideró en referencia del precio de la leña que tiene en Cuentepec, un poblado cercano a la plantación experimental, de 2.3 \$/kg reportado en [125]. Este valor se encuentra dentro del intervalo reportado por los autores [126] de un estudio realizado en el

estado de Chiapas en donde el precio de la leña es de 1.3 \$/kg a 5\$/kg, aunque el valor seleccionado es conservador con respecto al precio medio del intervalo mencionado (3.1 \$/kg), es un valor de la región donde se realiza el estudio.

En la tabla 21 se presenta la hoja metodológica de este indicador. El valor agregado se calculó con la cantidad de subproductos que se obtiene por 1GJ y el precio en el mercado de esos subproductos.

Tabla 21 Hoja metodológica del indicador Valor agregado

Nombre del indicador	Valor agregado
<b>Descripción corta del indicador</b>	Valor agregado de subproductos obtenido por unidad de energía
<b>Relevancia o pertinencia del indicador</b>	Informa sobre valor económico adicional por que se tiene por la comercialización de subproductos por cada unidad energía
<b>Direccionalidad</b>	Mayor valor económico adicional es mayor sustentabilidad.
<b>Alcance (qué mide el indicador)</b>	La cantidad de subproductos que se obtienen y el valor en el mercado que tienen
<b>Limitaciones (qué no mide el indicador)</b>	El indicador no informa si existe o no un mercado
<b>Fórmula del Indicador</b>	Valor agregado= kg de suproductos por GJ * \$ precio en el mercado de productos similares
<b>Fuente de Datos</b>	Datos del ecotipo E2M de la plantación experimental, datos de los precios comerciales de los productos similares

### 3.4.6 Indicador 6. Empleos creados

El empleo y los salarios en el sector bioenergético pueden ser conductores importantes para el desarrollo rural y social. La creación de una red de trabajo y la generación de un ingreso en el sector bioenergético puede conducir a un aumento en el estándar de vida en términos de los niveles de consumo por hogar, así como también en términos de cohesión y estabilidad social. Estos también pueden



conducir a una reducción en las tendencias sociales tales como tasa alta de desempleo y despoblación rural [127].

La creación de empleo neto como resultado de la producción desagregada por calificado/no calificado, temporal/indefinido, número total de empleos en el sector de la bioenergía. En la Tabla 22 se presenta la hoja metodológica de este indicador que es medido en número por empleos por TJ de biodiésel.

Los empleos creados para la etapa de materia prima se utilizaron los datos de la plantación experimental, los datos para las etapas de extracción de aceite y producción de biodiesel se tomaron del dimensionamiento del indicador costos de producción tomando los empleos necesarios para el dimensionamiento de una planta de producción de biodiesel, estos datos se presentan en el anexo 2.

Tabla 22 Hoja metodológica del indicador empleos creados

<b>Nombre del indicador</b>	<b>Empleos creados</b>
<b>Descripción corta del indicador</b>	Creación de empleo neto del sistema de producción
<b>Relevancia o pertinencia del indicador</b>	Informa sobre número de personas que pueden ser contratadas en el sistema de producción considerando empleos calificados, no calificados y temporales
<b>Direccionalidad</b>	Si el sistema genera más empleos es mayor sustentabilidad
<b>Alcance (qué mide el indicador)</b>	La cantidad de personas que pueden ser contratadas en el sistema de producción
<b>Limitaciones (qué no mide el indicador)</b>	El indicador no informa sobre los salarios sean conforme a las leyes establecidas
<b>Fórmula del Indicador</b>	Empleos= núm de empleos/TJ de biodiésel
<b>Fuente de Datos</b>	Datos del ecotipo E2M de la plantación experimental, datos de portales de empleos

### 3.5 Índice de sustentabilidad y Normalización de indicadores

La metodología utilizada para evaluar la sustentabilidad de cada uno de los escenarios propuestos es la reportada por [128] sobre el índice de sustentabilidad ambiental de proyectos de energía (IESEP, por sus siglas en inglés).

Esta metodología consiste en que después del análisis cuantitativo de los indicadores se realiza una comparación entre los escenarios.

Para llevar a cabo la comparación se debe realizar la normalización de los indicadores seleccionados, para esto se establece la relación entre un valor de referencia del indicador nombrado  $li_{ref}$  y los valores diferentes del indicador  $li_k$  que tomará sobre el escenario futuro  $k$  del proyecto en su vida útil.

El valor de referencia es definido como el valor máximo o mínimo que el indicador  $li_k$  toma en la fase inicial del proyecto. La razón de usar un valor máximo o mínimo durante la normalización de un indicador depende de su naturaleza y evolución durante la vida útil del proyecto energético.

Cuando el valor de referencia del indicador  $li_{ref}$  toma un máximo, entonces se utiliza la expresión:

$$\hat{i}_k < \frac{li_k}{li_{ref}|_{t_0}} \leq 1$$

De forma contraria, cuando el valor de referencia del indicador  $li_{ref}$  toma un mínimo se utiliza la expresión:

$$\hat{i}_k < \frac{li_{ref}|_{t_0}}{li_k} \leq 1$$

En Donde:

$li_k$  = el Valor para el indicador  $i$  en el escenario  $k$ ,

$li_{ref}$  = el Valor de referencia en el indicador  $i$

$i$  = Indicador, subíndice 1,2,...,M = número de indicadores

$k$  = escenario, subíndice 1,2,...,M = número de escenarios.  $k=1$  se refiere al escenario base y  $k>1$  se refiere al o los escenarios alternativos.

Finalmente, se desarrolla un índice agregado del Índice de sustentabilidad ambiental para proyectos energéticos (IESEP).

El objetivo de este índice es proveer información en una base cuantitativa respecto al efecto total que puede ser atribuido a la evolución de todos los indicadores de la sustentabilidad analizados. Un segundo objetivo es para facilitar la comparación de la línea base y el escenario alternativo con el fin de encontrar el efecto total que las opciones de mejoras podrían tener en el proyecto original.

La agregación de los indicadores se realiza utilizando la ecuación:

$$IESEP_k = \sum_{i=1}^N w_{ik} \hat{I}_{ik}$$

En donde  $IESEP_k$  es el valor del Índice de sustentabilidad ambiental para proyectos energéticos

El termino  $w$  es la ponderación dada a cada indicador  $i$  de cada escenario  $k$ , el termino  $\hat{I}$  es el valor normalizado de cada indicador  $i$  de cada escenario  $k$ .

La ponderación tiene una relevancia importante en los resultados finales del índice y permite la comparación cuantitativa de la seriedad de los impactos en cada indicador, por lo que no se pueden aplicar ponderaciones arbitrarias. Los factores de ponderación  $w$  deben cumplir con la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^N w_i = 1$$

Una vez desarrollado el indicador de sustentabilidad IESEP, la línea base sirve como un punto de comparación entre los escenarios alternativos. Entre más cerca a la unidad sea el IESEP son mejores los proyectos energéticos, en términos de la sustentabilidad y viceversa, entre más cercano el valor del IESEP al cero, los proyectos serán peores.

En esta evaluación se dará una ponderación igual a los indicadores ambientales, económicos y sociales para la obtención del índice de sustentabilidad. Para el indicador institucional dado que es un análisis sobre la situación de la existencia de regulaciones y normatividad no se le puede asignar un valor, por lo que este indicador no estará integrado al Índice de Sustentabilidad.

### 3.6 CONCLUSIONES

El sistema de producto para el análisis de sustentabilidad con el enfoque de ciclo de vida considera tres etapas de producción que las etapas críticas en donde se observan las mayores emisiones y se dónde se pueden tomar medidas de mejora, estas etapas son: la obtención de la materia prima, la extracción de aceite y la producción de biodiésel.

Los tres escenarios del sistema de producción se propusieron para conocer cómo cambia el desempeño del sistema de producción cuando se realiza el aprovechamiento de los subproductos y cuando se busca mejorar la productividad de la plantación y si las mejoras que se consideran en cada uno de los escenarios tienen efectos positivos esperados.

Con los datos de la plantación experimental y datos de literatura con los que se dimensionó el sistema de producción se seleccionaron seis indicadores de sustentabilidad con su respectiva hoja metodológica, estos indicadores son:

- 3 indicadores ambientales: emisiones de gases de efecto invernadero, uso de suelo y balance de energía
- 2 indicadores económicos: costo de producción y valor agregado
- 1 indicador social: creación de empleos

De estos indicadores 3 se tomaron de los marcos internacionales de indicadores para la bioenergía y tres indicadores se adecuaron de acuerdo a los datos existentes del sistema de producción.

La metodología para evaluar los indicadores y obtener el índice de sustentabilidad está reportada en la literatura para evaluar sistemas energéticos por lo cual es apropiada para evaluar los indicadores de este estudio.

## **Capítulo 4. Análisis de los indicadores y resultados de la evaluación de sustentabilidad**

En este capítulo se presenta el desarrollo de la obtención de los indicadores de cada uno de los escenarios de producción propuestos. Los resultados se presentan por escenario de producción y por los indicadores de cada pilar se la sustentabilidad, comenzando por los ambientales, seguido por los indicadores económicos, los indicadores sociales y una reflexión sobre el indicador institucional.

Finalmente se presenta el desarrollo de la obtención del índice de sustentabilidad, la normalización de los indicadores y la comparación de resultados entre escenarios de producción.

Los objetivos particulares del capítulo son los siguientes:

- (1) Presentar los inventarios de ciclo de vida de los sistemas de producto específico de cada escenario de producción
- (2) Conocer los resultados de cada indicador para cada escenario de producción
- (3) Comparar el índice de sustentabilidad de cada escenario de producción para conocer la opción con mayor sustentabilidad
- (4) Conocer el estado de las regulaciones y normatividad para la producción de biodiésel y el aprovechamiento de subproductos en el marco legal mexicano.

## 4.1 Inventarios de Ciclo de Vida para cada escenario de producción

Los datos utilizados para crear cada uno de los escenarios son los reportados en inventario de ciclo de vida de capítulo anterior sobre una hectárea del cultivo de *Jatropha curcas* no tóxico, tanto la producción de cada uno de los productos como los insumo y materiales requeridos.

Estos datos se resumen la Tabla 23, junto con los poderes caloríficos reportados en el anexo 3 se dimensionó el sistema del producto de cada escenario de acuerdo al flujo de referencia de la producción de 1 GJ biodiésel.

Tabla 23 Productividad de 1 hectárea de *Jatropha curcas* no tóxico de ecotipo E2M

Potencial de producción	Unidad kg/ha
Frutos	1021
Semillas	700
Biomasa pericarpio	322
Biomasa tegumento	290
Aceite	191.3
Pasta residual de endospermo	220.1
Biodiesel	183.64

Los datos de la producción de biodiesel se obtuvieron de la experimentación en laboratorio reportadas en [104], en donde se realizaron pruebas a nivel laboratorio utilizando 10 muestras de aceite de 30 g de aceite con un hidróxido de sodio como catalizador y metanol en una relación 1:9 vol/vol.

Se obtuvo una eficiencia de transformación de aceite a biodiésel que se utiliza en el estudio es de 96% estos los resultados se verificaron resultados de reportados en [129].

Para satisfacer la unidad funcional de producir 1 GJ de energía se requieren 24.61 kg de biodiésel de acuerdo a el poder calorífico utilizado. Posteriormente se procedió a estimar la cantidad de aceite y semillas, número de plantas área de cultivo para cada escenario así como estimar la generación de cada tipo de residuo.

Finalmente, se procedió a elaborar los inventarios de entradas y salidas presentados en la sección de descripción cualitativa y cuantitativa de los procesos unitarios.

#### 4.1.1 Escenario MR

##### Etapa 1. Obtención de materia prima

En este escenario se necesitan 169 plantas de *Jatropha curcas* para satisfacer el flujo de referencia producir 1 GJ de energía, se utiliza una asignación es del 100% para los frutos obtenidos. En la Tabla 24 se reporta el inventario de entradas y salidas.

Se considera la aplicación de riego de auxilio únicamente los tres meses siguientes a la plantación de las plántulas. En total se utilizaron 60 litros de agua por planta durante todo el primer año. Para los siguientes años no se utilizó riego, solamente el agua pluvial que es de 1026 mm en promedio de precipitación anual.

La recolección de los frutos se realiza de manera manual y se transportan en camioneta a una distancia de 39 km para pasar a la siguiente etapa 2.

**Tabla 24 Inventario de entradas y salidas de la etapa de obtención de materia prima del escenario MR**

Entradas etapa 1	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos
Suelo	1351.9	m <sup>2</sup>	Occupation, permanent crop	Desarrollo experimental
Agua de riego	506.94	Litros	Water, river, MX	Desarrollo experimental
agua de lluvia	1380019.5	Litros	Water, rain	Desarrollo experimental
Diesel para tractor	0.215	kg	Diesel {RoW}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3-allocation, cut-off by classification unit
Transporte de frutos (en camioneta)	5.304	tkm	Transport, light commercial truck, powered/tkm/RNA gasoline	USLCI
Salidas etapa 1	cantidad	Unidad	asignación	Base de datos
frutos	136.9	kg	100%	Desarrollo experimental

##### Etapa 2. Extracción de aceite

Los procesos para extraer el aceite se describieron en la sección de análisis del inventario de ciclo de vida, el inventario para escenario convencional se presenta en la Tabla 25. En esa tabla se reporta la energía eléctrica que utilizan los equipos para separar las biomásas, extraer el aceite y filtrar el aceite para enviarlo a la etapas 3. En este escenario el aceite es el único producto aprovechable por lo que la asignación es de 100% para el aceite. Los residuos de biomásas de

pericarpio y tegumento así como el endospermo extruido son residuos que se desechan en un tiradero a cielo abierto.

Tabla 25 Inventario de entrada y salidas de la etapa de extracción de aceite del escenario MR

Entradas etapa 2	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos
Electricidad de craqueo para separar el pericarpio	10	kWh	Electricity, low voltage {MX}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3-allocation, cut-off by classification unit
Electricidad de craqueo para separar el tegumento	6.9	kWh	Electricity, low voltage {MX}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3-allocation, cut-off by classification unit
Electricidad de prensa	3.8	kWh	Electricity, low voltage {MX}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3-allocation, cut-off by classification unit
Electricidad para filtrado	0.2	kWh	Electricity, low voltage {MX}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3-allocation, cut-off by classification unit
Salidas etapa 2 productos/coprodutos	Cantidad	Unidad	Asignación por masa	Base de datos
Aceite	25.64	kg	100%	-
Salidas residuos y emisiones para tratamiento	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos
Biomasa del pericarpio, tegumento y endospermo extruido	111.52	kg	Shavings, softwood, loose, measured as dry mass {GLO}  market for   Conseq, U	Ecoinvent 3-consequential-unit

### Etapa 3. Producción de biodiésel

La producción de biodiesel se llevan a cabo mediante reacciones de transesterificación, el inventario de entradas y salidas de esta etapa se presenta en la Tabla 26, este inventario es el que se utiliza para los tres escenarios analizados.

Dado que en esta etapa se obtiene biodiesel y glicerina como productos se utiliza la asignación de 96% para biodiésel y del 4% para glicerina.



**Tabla 26 Inventario de entradas y salidas de la etapa de producción de biodiesel**

Entradas etapa 3	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos
Electricidad del reactor	4.6	kWh	Electricity, low voltage {MX}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3- allocation, cut-off by classification unit
Metanol	5.64	kg	Methanol, at plant/RNA	USLCI
Hidróxido de sodio	0.231	kg	Sodium hydroxide, production mix, at plant/RNA	USLCI
Salidas etapa 3	Cantidad	Unidad	asignación por masa	Base de datos
Biodiesel	24.61	kg	96%	Desarrollo experimental
Glicerina	1.03	kg	4%	Desarrollo experimental

#### 4.1.2 Escenario MRAS

##### Etapa 1. Obtención de materia prima

En este escenario las condiciones de la etapa de obtención de materia prima no cambian con respecto al escenario MR, por tal motivo se utiliza el mismo inventario de entrada y salidas de la Tabla 24.

##### Etapa 2. Extracción de aceite

Esta etapa se considera el aprovechamiento de las biomásas de residuo de la extracción de aceite para ser utilizadas en otros sistemas de producción, por tal motivo en este escenario se considera que los productos obtenidos son aceite, el endospermo extruido así como la suma de la biomasa de pericarpio y tegumento.

El inventario de entradas y salidas se presenta en la Tabla 27 en donde la asignación es de 19% para el aceite, 60% para biomásas de pericarpio y tegumento y 21% para el endospermo extruido.

##### Etapa 3. Producción de biodiesel

El inventario de esta etapa no cambian con respecto al escenario MR, por tal motivo se utiliza el mismo inventario de entrada y salidas de la Tabla 26.

**Tabla 27 Inventario de entradas y salidas de la etapa de extracción de aceite del escenario MRAS**

Entradas etapa 2	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos
Electricidad de crakeo para separar el pericarpio	10	kWh	Electricity, low voltage {MX}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3- allocation, cut-off by classification unit
Electricidad de crakeo para separar el tegumento	6.9	kWh	Electricity, low voltage {MX}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3- allocation, cut-off by classification unit

<b>Electricidad de prensa</b>	3.8	kWh	Electricity, low voltage {MX}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent allocation, cut-off by classification unit	3-
<b>Electricidad para filtrado</b>	0.2	kWh	Electricity, low voltage {MX}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent allocation, cut-off by classification unit	3-
<b>Salidas etapa 2 productos/coprodutos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Asiganción por masa</b>	<b>Base de datos</b>	
<b>Aceite</b>	25.64	kg	19%	Desarrollo experimental	
<b>Biomasa del pericarpio y tegumento</b>	82.3	kg	60%	Desarrollo experimental	
<b>Pasta residual de endospermo extruido</b>	29.49	kg	21%	Desarrollo experimental	

#### 4.1.3 Escenario BRAS

En este escenario cambian las condiciones de la etapa de obtención de materia prima para mejorar la producción de semillas de las plantas, se considera la aplicación de biofertilizantes y el uso de riego en la época seca durante todo el año, todos los años de la vida útil de la plantación.

Para el escenario BRAS, las condiciones de mejora del manejo del cultivo se utilizaron datos reportados en [108,130], en donde bajo características ambientales similares a las condiciones de cultivo del escenario MR y con el uso de biofertilizantes y riego se reportaron producciones de semillas de 942 kg/ha.

Para obtener las producciones de biomasa y endospermo se utilizaron los porcentajes obtenidos experimentalmente, en la Tabla 28 se presentan las productividades para este escenario.

Se considera la utilización de riego de tipo rodado por lo que no se requiere de equipo adicional como bombas de agua o aspersores únicamente de mano de obra, la cantidad de agua que se aplica es de 72 L por planta en todo el año.

El biofertilizante que se aplica es estiércol de ganado a una razón de 5 kg por planta por año. El biofertilizante se obtiene de las granjas ganaderas cercanas a la plantación y la aplicación se realiza de manera manual.

Tabla 28 Productividad de 1 hectárea de *Jatropha curcas* con la utilización de biofertilizantes y riego

Potencial de producción	Unidad kg/ha
Frutos	1375
Semillas	942
Biomasa pericarpio	433
Biomasa tegumento	391
Aceite	257.6
Pasta residual de endospermo	296
Biodiesel	247.2

En la Tabla 29 se presenta el inventario de entradas y salidas, en este escenario la producción de frutos y el número de plantas requeridas reduce a 124.4 plantas de *Jatropha curcas* para satisfacer el flujo de referencia.

Los productos obtenidos son los frutos de *Jatropha curcas* que tienen la asignación de 100%.

Tabla 29 Inventario de entradas y salidas en la etapa de materia prima del escenario mejorado

Entradas	Cantidad	Unidad	Flujo	Base de datos
Suelo	995.5	m2	Occupation, permanent crop	-
Agua de riego	8959.08	Litros	Water, river, MX	-
agua de lluvia	1016206.4	Litros	Water, rain	-
Biofertilizantes	622.15	kg	Manure,solid,cattle{GLO} market for Cut-off	Ecoinvent 3-consequential-unit
Diesel para preparación del terreno	0.108	kg	Diesel {RoW}  market for   Cut-off, U	Ecoinvent 3- allocation, cut-off by classification unit
Transporte de frutos (camioneta)	5.304	tkm	Transport, light commercial truck, powered/tkm/RNA gasoline	USLCI
Salidas	Cantidad	Unidad	Asignación por masa	Base de datos
frutos	136.9	kg	100%	-

Etapa 2. Extracción de aceite y Etapa 3. Producción de biodiesel

La etapas 2 es similares a la etapas 2 del escenario alternativo en donde se obtienen como productos: aceite, la pasta residual del endospermo extruido y la biomasa de pericarpio y tegumento por tal motivo se utiliza el mismo inventario presentado en la Tabla 27 del escenario MRAS.

De igual manera, el inventario de la etapa 3 no cambian con respecto a la etapa 3 del escenario convencional, por tal motivo se utiliza el mismo inventario de entrada y salidas de la Tabla 26.

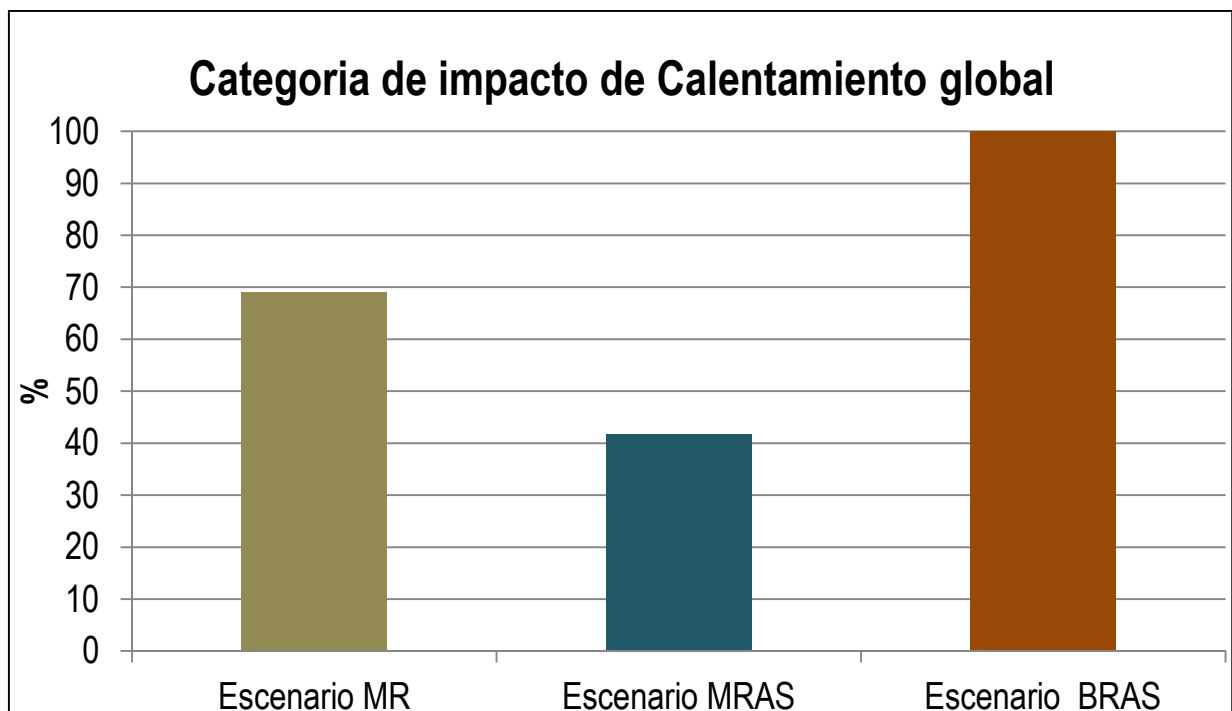
## 4.2 Evaluación de los Indicadores de sustentabilidad

### 4.2.1 Indicadores ambientales

#### 4.2.1.1 Indicador 1. Emisiones de gases de efecto invernadero

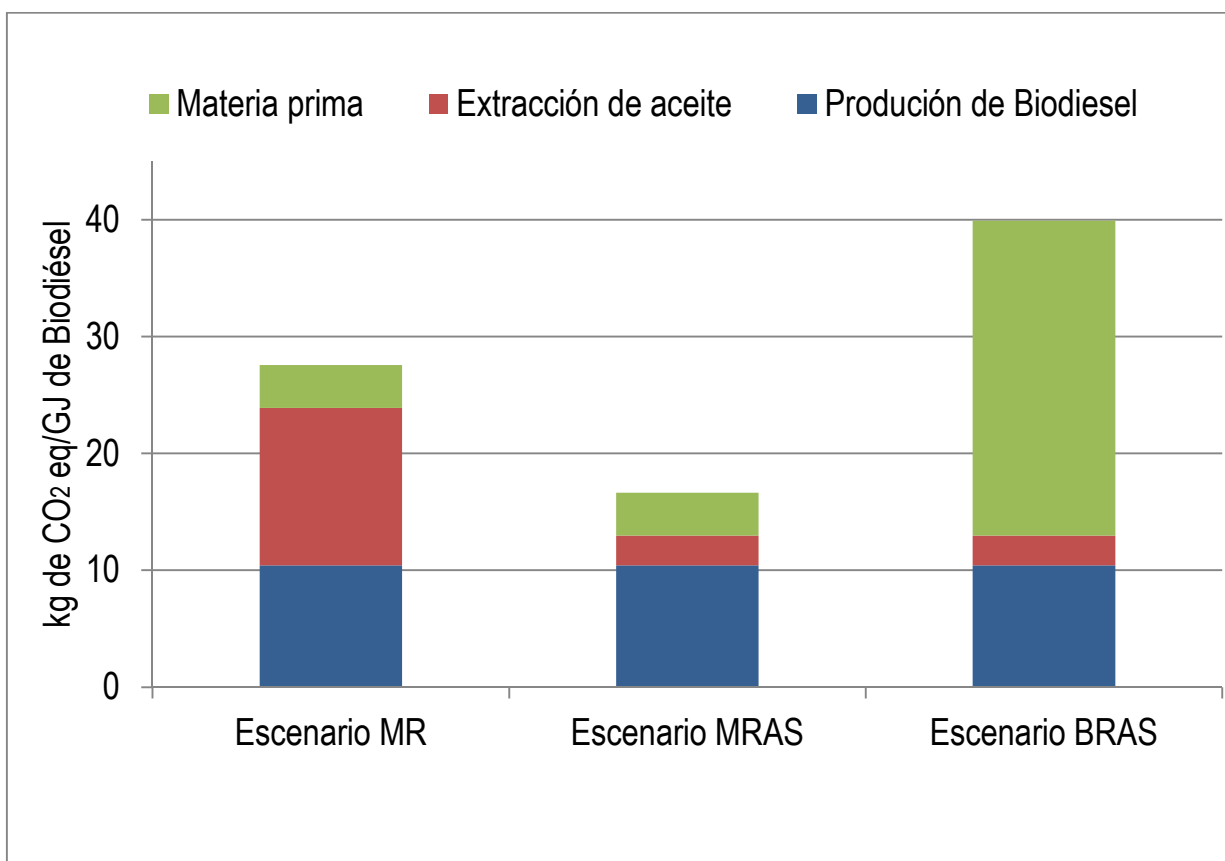
El cálculo de este indicador se realizó con el Software SimaPro 3.5 con el método de evaluación ReCiPe H, cabe mencionar que los resultados aquí presentados son expresiones relativas y no predicen si se sobrepasan los límites máximos permisibles, los márgenes de seguridad, ni los riesgos.

La comparación entre los tres escenarios en los impactos potenciales de la categoría de calentamiento global se presenta en la Gráfica 9. De los tres escenarios analizados, el escenario MRAS tiene el potencial de emisión más bajo, es 27 % más bajo que el escenario MR mientras que el escenario BRAS tiene un potencial 31% más alto que el escenario MR y por tanto muestra el mayor potencial de emisiones de gases de efecto invernadero.



Gráfica 9 Comparación entre escenarios de las emisiones potenciales en la categoría de calentamiento global

Las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de energía de biodiésel (kg CO<sub>2</sub> eq) en cada uno de los escenarios, así como, la contribución de los procesos que conforman el sistema de producción se presenta en la Gráfica 10.



**Gráfica 10 Emisiones potenciales de GEI de los escenarios de producción**

Las emisiones potenciales de gases de efecto invernadero del escenario MR es 27.56 kg CO<sub>2</sub> eq/ GJ de biodiésel, en el escenario MRAS las emisiones potenciales reducen a 16.65 kg CO<sub>2</sub> eq/ GJ de biodiésel y el escenario BRAS aumenta a 39.94 kg CO<sub>2</sub> eq/ GJ de biodiésel.

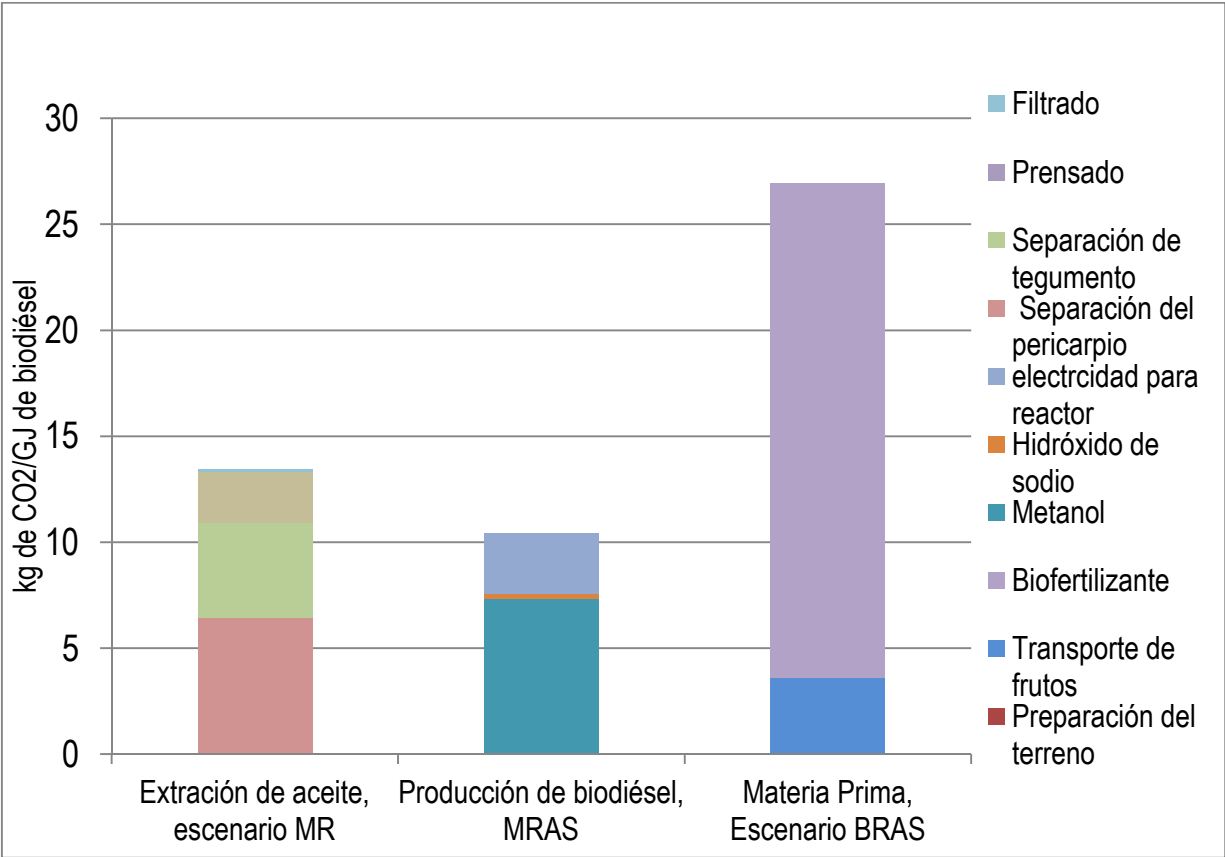
Los resultados obtenidos para estos sistemas de producción muestran una reducción importante comparados con los estudios reportados por los autores [15,131], de 28 a 50 kg de CO<sub>2</sub> eq / GJ de biodiésel que se realizan en sistemas intensivos para la producción de la materia prima.

En el escenario MR la etapa que aporta las mayores emisiones es la extracción de aceite con 13.47 CO<sub>2</sub> eq/ GJ de biodiésel.

En el escenario MRAS, el aprovechamiento de la pasta residual y las biomásas como producto de valor para otros procesos disminuyen las emisiones potenciales de manera importante a 2.56 CO<sub>2</sub> eq/ GJ de biodiésel. De esta forma, la etapa de producción de biodiésel es el que aporta las mayores emisiones potenciales de 10.42 CO<sub>2</sub> eq/ GJ de biodiésel, que es mismo potencial para todos los escenarios.

En el escenario BRAS, el uso de biofertilizantes y riego para mejorar la producción de frutos y aumentar la producción de semillas y biomásas provoca el aumento de las emisiones potenciales en la etapa de obtención de materia prima a 26.95 CO<sub>2</sub> eq/ GJ de biodiésel.

En la Gráfica 11 se presentan la contribución de las etapas que tienen las mayores emisiones en cada uno de los escenarios de producción.



**Gráfica 11 Etapas y procesos con el mayor potencial de emisión de gases de efecto invernadero en cada escenario de producción**

De acuerdo con la Gráfica 11, en la Tabla 30 se resumen las etapas, procesos y entradas con mayor contribución en cada uno de los escenarios.

En el escenario MR donde la etapa de extracción de aceite es la que tienen la mayor contribución de emisiones potenciales, es debido al consumo de energía

eléctrica para la separación de las cascavas de los frutos de *Jatropha curcas* que emite en su mayor parte dióxido de carbono fósil, estas emisiones son emisiones por el uso los combustibles de la generación de energía eléctrica del sistema energético nacional.

**Tabla 30 Etapas, procesos y entradas con las mayores contribuciones en cada uno de los escenarios analizados**

Emisiones de gases de efecto invernadero					
Escenario	unidad	Total	Etapa principal que más contribuye al resultado total	Proceso que más contribuye a la etapa principal	Entrada/salida que más contribuye al proceso principal
Escenario MR	kg CO2 eq	27.56	Extracción de Aceite	Consumo de electricidad de separación de pericarpio (gas natural)	Dióxido de carbono fósil
			13.47	6.45	5.91
	%	100	48.9	47.8	92
Escenario MRAS	kg CO2 eq	16.65	Producción de biodiesel	Metanol	Dióxido de carbono fósil
			10.424	7.32	5.42
	%	100	62.61	70.29	74
Escenario BRAS	kg CO2 eq	39.93	Materia prima	Biofertilizante	Monóxido de di nitrógeno
			26.95	23.33	12
	%	100	67.49	86.58	52

En el escenario MRAS, en la etapa de producción de biodiésel es el metanol el que tiene la mayor contribución y en el mayor porcentaje es el dióxido de carbono fósil debido a que su producción se realiza con combustibles fósiles.

En el escenario BRAS, el biofertilizante que es estiércol de ganado tiene emisiones de Monóxido de dinitrógeno principalmente. Aunque el uso de este biofertilizante aumenta la producción de frutos también aumenta de manera importante las emisiones de gases de efecto invernadero.

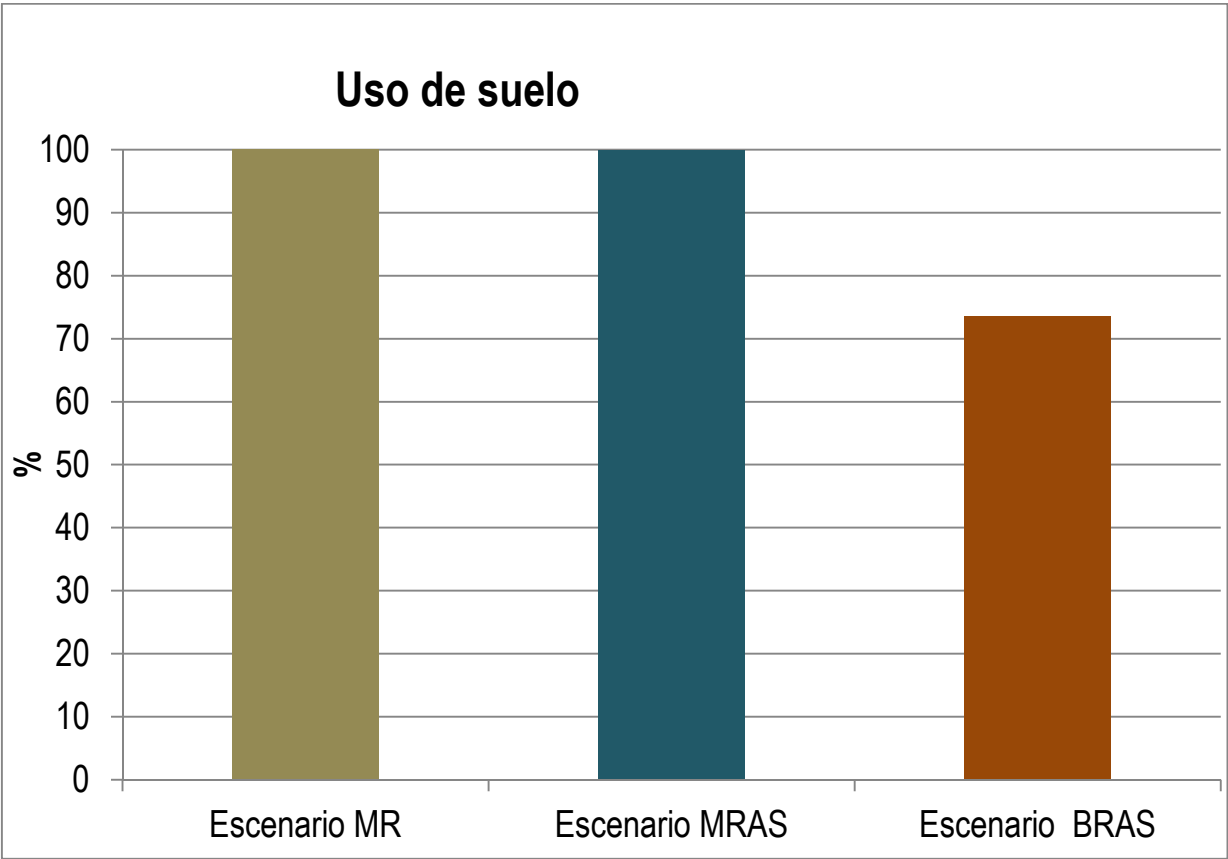
#### 4.2.1.2 Indicador 2. Uso de suelo

El ecotipo de *Jatropha curcas* considerado como materia prima en el sistema de producción de biodiesel pueden ser establecidos en suelos del estado de Morelos han sido abandonados y no son utilizados para cultivar alimentos de acuerdo a los resultados del capítulo 2.

La utilización de este tipo de suelos elimina la competencia sobre la demanda de tierras para la producción de alimentos la producción de *Jatropha curcas*, sin embargo es importante evaluar el uso del suelo en términos de la eficiencia del área, es decir, la cantidad de biodiésel que puede ser producido a partir de cierta área utilizada.

El indicador de uso de suelo presenta el área utilizada de la etapa de materia prima debido a que la evaluación que se realizó de este indicador en el Software SimaPro 3.5 con el método de evaluación ReCiPe H para el uso de suelo de las etapas de extracción de aceite y producción de biodiesel juntas tienen 1% de la contribución total del uso de suelo por lo que no tienen una participación sustancial.

La comparación entre los tres escenarios en el uso de suelo se presentan Gráfica 12. De los tres escenarios analizados, el escenario BRAS tiene el potencial de utilización más bajo 26% más bajo que el escenario MR y MRAS.

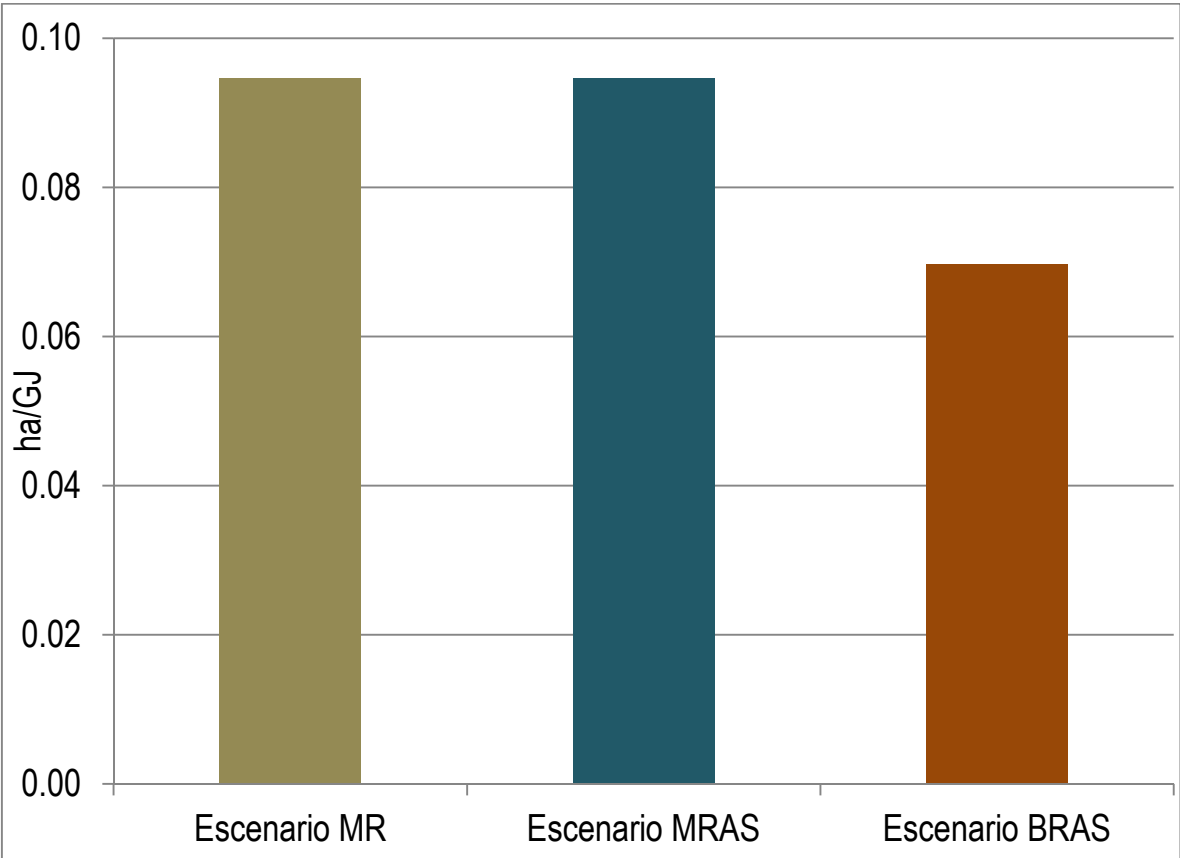


Gráfica 12 Comparación de uso de suelo entre escenarios

El uso de suelo por unidad de energía de biodiésel producido (ha/GJ) en cada uno de los escenarios se presenta en la gráfica 13. Las condiciones de cultivo de los



escenarios MR y MRAS es con mínimos recursos. En estas condiciones, la producción de frutos es de 1021 kg/ha y 183.6 kg de biodiesel/ha, por lo que el rendimiento del uso de suelo es de 0.0946 ha/GJ de biodiésel.



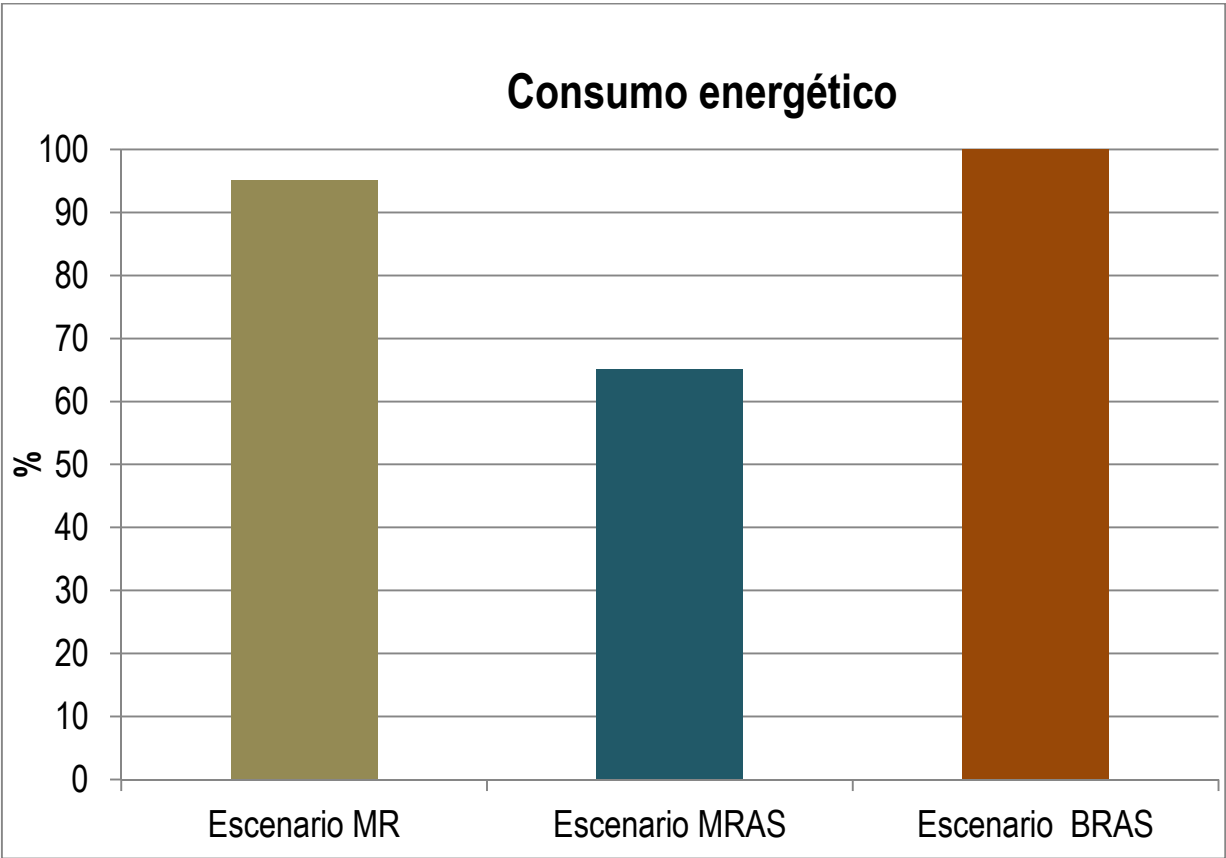
Gráfica 13 Indicador de uso de suelo por escenario

En el escenario BRAS, el uso de biofertilizantes y riego, como se describe en la descripción del escenario BRAS de este capítulo, aumenta la producción de frutos de *Jatropha curcas* por hectárea a 1375 kg/ha y 247.2 kg de biodiésel/ha. De esta manera el rendimiento del uso de suelo es de 0.0697 ha/GJ de biodiésel.

El uso de biofertilizantes y agua disminuye el uso de suelo por cada GJ de biodiesel de energía producido, esto puede representar una ventaja para producir más energía en las áreas disponibles para este tipo de cultivos en el que no exista una competencia por el suelo.

4.2.1.3 Indicador 3. Balance energético

La comparación entre los tres escenarios en el consumo de energía se presenta en la Gráfica 14. De los tres escenarios analizados, el escenario MRAS tiene el consumo más bajo, es 30 % más bajo que el escenario MR mientras que el escenario BRAS tiene ligeramente un consumo de energía más alto que el escenario MR, es 5% mayor el escenario BRAS.



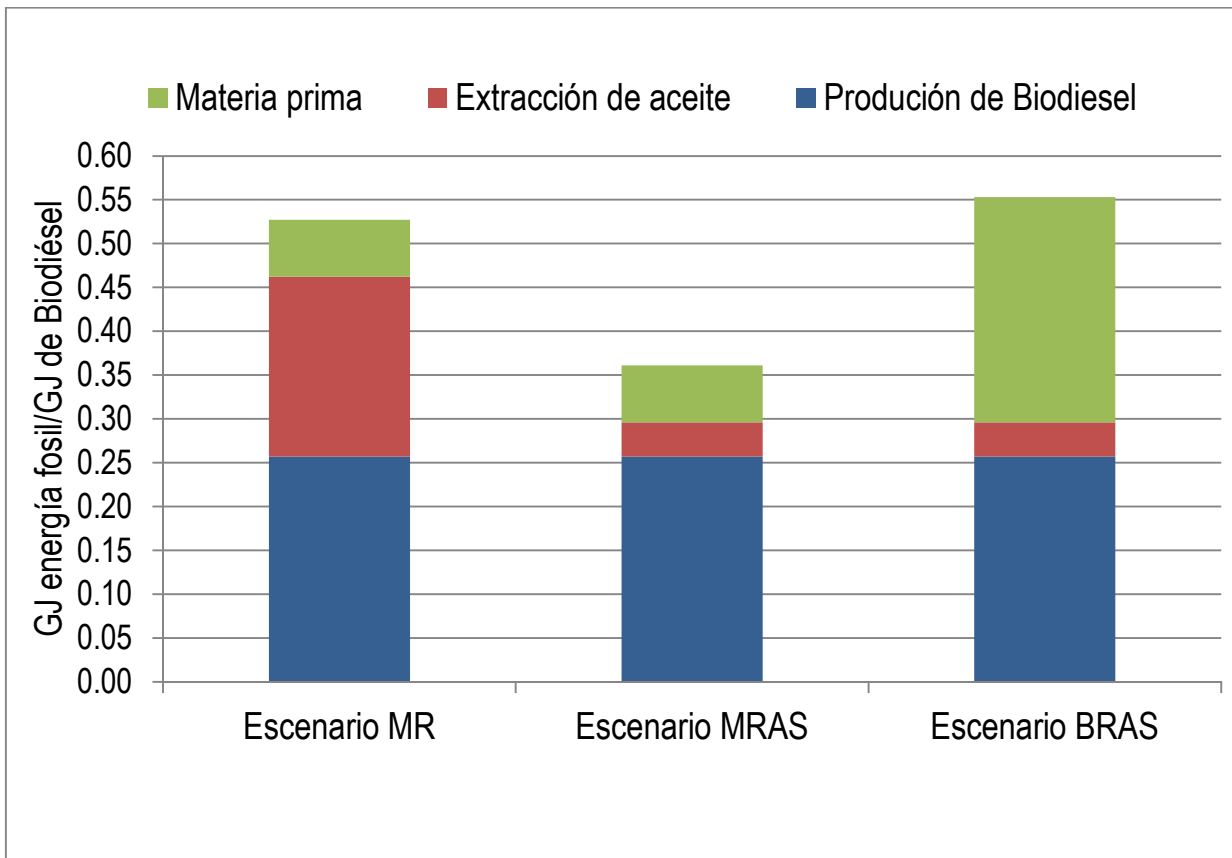
**Gráfica 14** Comparación entre escenarios en el consumo de energía del sistema de producción

El balance de energía primaria se expresa como la relación de la energía primaria fósil de entrada con respecto a la energía renovable de salida, esta relación de energía para cada uno de los escenarios, así como, las etapas con mayores los consumos energéticos se presentan en la Gráfica 15.

El balance energético de los escenarios MR y BRAS son parecidos, de 0.527 GJ de energía fósil /GJ de biodiésel y 0.553 GJ de energía fósil /GJ de biodiésel, respectivamente En el escenario BRAS el balance energético es de 0.361 GJ de energía fósil /GJ de biodiésel.

Estos consumo energético por unidad de energía de biodiésel también son menores a los reportados por los autores de [15,132] que reportan entre 0.6 GJ de energía fósil/ GJ de biodiésel a 0.9 GJ de energía fósil/ GJ de biodiésel.

En los tres escenarios, la etapa de producción de biodiesel es la de mayor consumo energético. En la etapa de extracción de aceite se observa que el aprovechamiento de la pasta residual y las biomásas como producto de valor para otros procesos reducen el consumo energético, por lo que en los escenarios MRAS y BRAS mantienen el mismo consumo.



**Gráfica 15** Balance de energía de los escenarios analizados y consumo de energía de las etapas del sistema de producción

En el escenario BRAS se observa que el uso de biofertilizantes y agua se refleja también en el aumento del consumo energético de la etapa de materia prima.

De acuerdo con el autor [27], el balance de energía que también se puede expresar como la relación neta de energía de la siguiente manera:

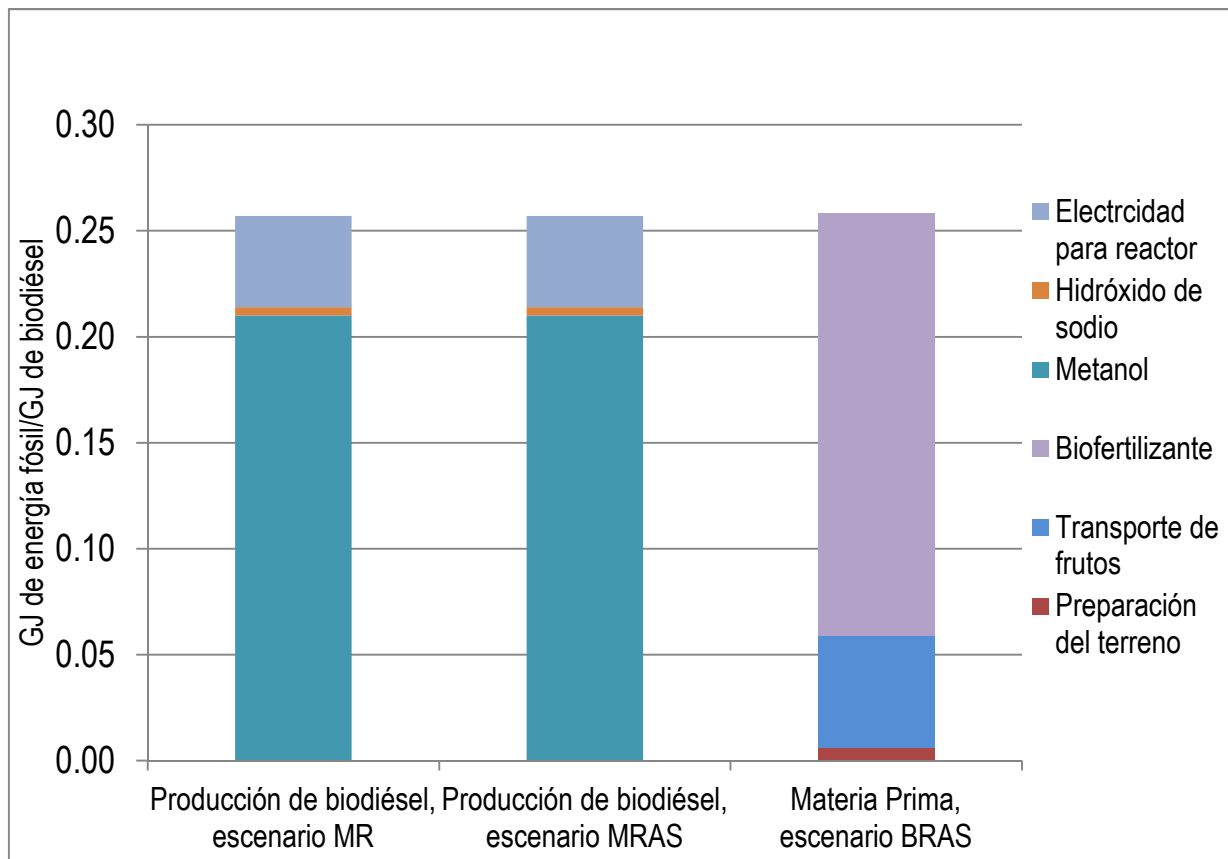
$$\text{Relación de energía neta} = \text{Total Energía de salida} / \text{Total Energía de entrada}$$

Esta relación también es llamada índice de renovabilidad o índice de eficiencia del proceso y se busca que siempre sea mayor a 1, este valor significa que se obtiene más energía del biodiésel que la energía fósil que se consume en su producción.

Si la relación es igual a 1 significa que no hay ninguna ventaja energética en la producción de biodiésel. Si la relación es menor a 1 significa que la producción de biodiésel consume más energía que la que genera.

La relación de energía neta en los tres escenarios es mayor a 1, de la misma manera que el consumo de energía, la relación neta de energía es similar entre los escenarios MR y BRAS de 1.89 y 1.80, respectivamente; mientras que el escenario MRAS tiene la relación de energía neta mayor, con valor de 2.77.

En la Gráfica 16 se presenta las etapas y los procesos que con mayor consumo de energía en cada uno de los escenarios de producción.



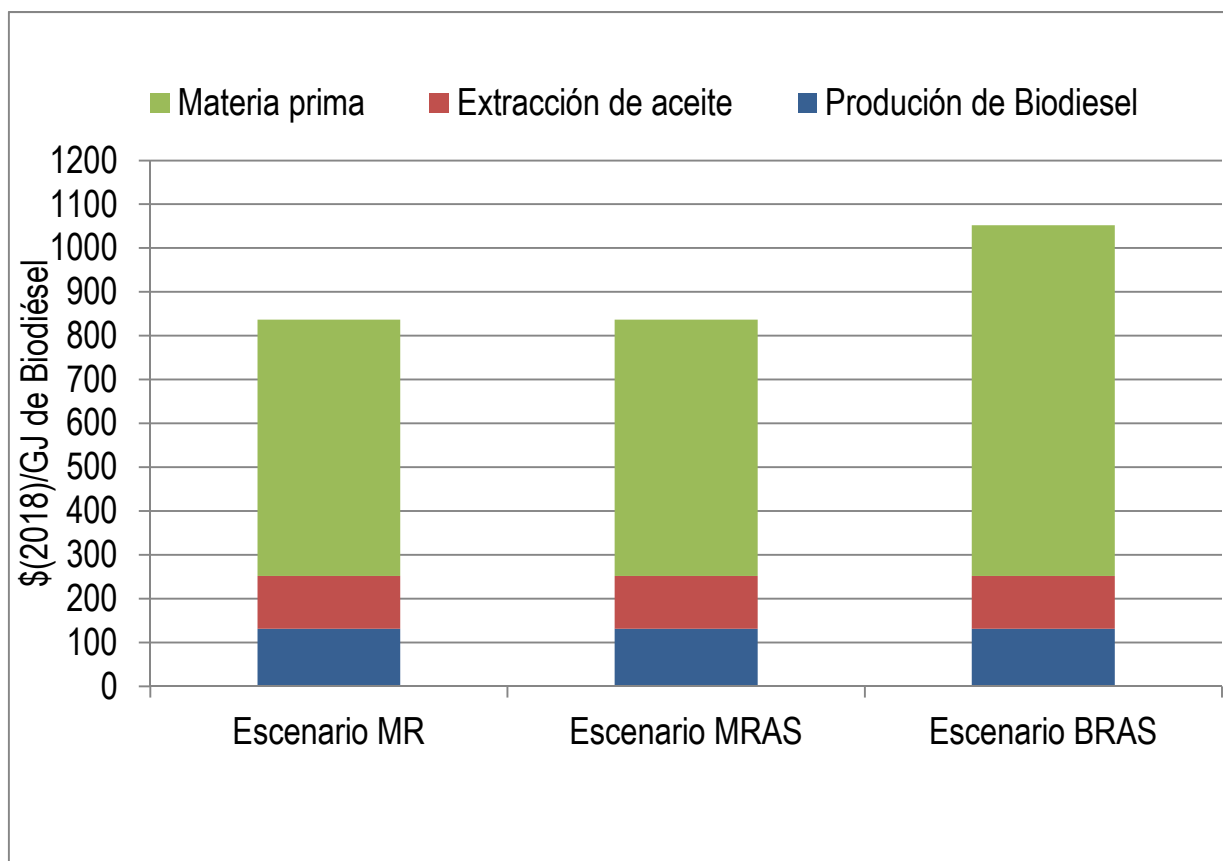
**Gráfica 16** Etapas y procesos con mayor consumo energético en cada uno de los escenarios de producción

En el escenario MR y en el escenario MRAS, la etapa de producción de biodiesel es la de mayor consumo energético que en su mayor parte es por el uso de metanol mientras que en el escenario BRAS, el mayor consumo de energético es la etapa de materia prima por el uso de biofertilizantes.

## 4.2.2 Indicadores económicos

### 4.2.2.1 Indicador 4. Costos de producción

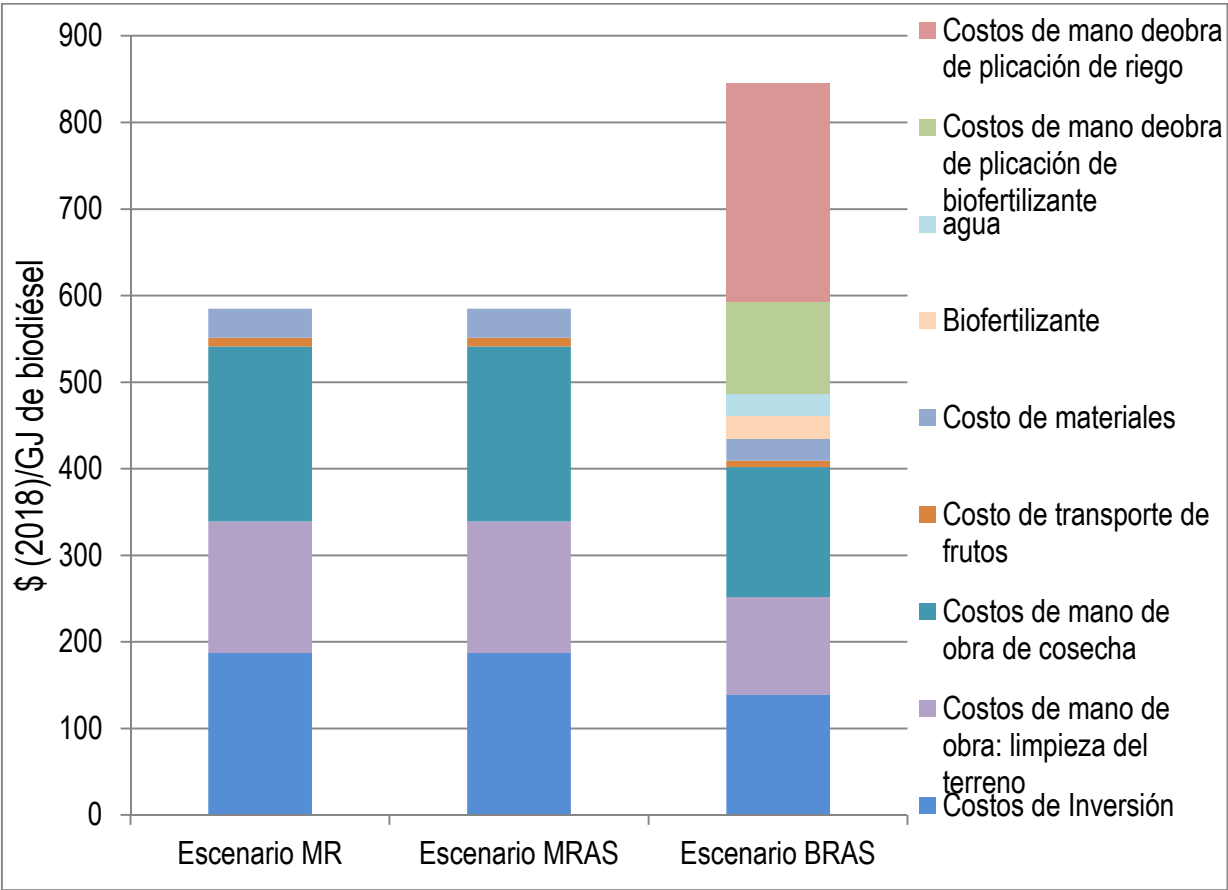
Los costos de producción en cada uno de los escenarios se presentan en la Gráfica 17. Los costos de producción para los escenarios MR y MRAS son similares de 836.89 \$/GJ de biodiésel debido a que en ambos escenarios se tiene las mismas condiciones de producción mientras que los costos de producción son mayores para el escenario BRAS de \$1,096.84 \$/GJ de biodiésel.



**Gráfica 17** Comparación de los costos de producción por escenario y por etapa de proceso de producción.

De esta forma, el costo de producción de un litro de biodiésel es de \$29.93 para los escenarios MR y MRAS mientras que para el escenario BRAS este costo aumenta a 39.22 \$/L. En todos los escenarios el precio de producción es mayor comparado con el precio promedio de venta del diesel de año 2018 que fue de \$19.30 [133], mientras que para los escenarios MR y MRAS este costo de producción es 55% mayor al precio de venta del diesel, en el caso del escenario BRAS el costo de producción es 103% mayor.

En los tres escenarios se observa que el mayor costo se presenta en la etapa de materia prima, en la Grafica 19 se presentan los costos de la etapa de materia prima en cada uno de los escenarios



**Gráfica 18 Costos de producción de la etapa de materia prima en cada uno de los escenarios**

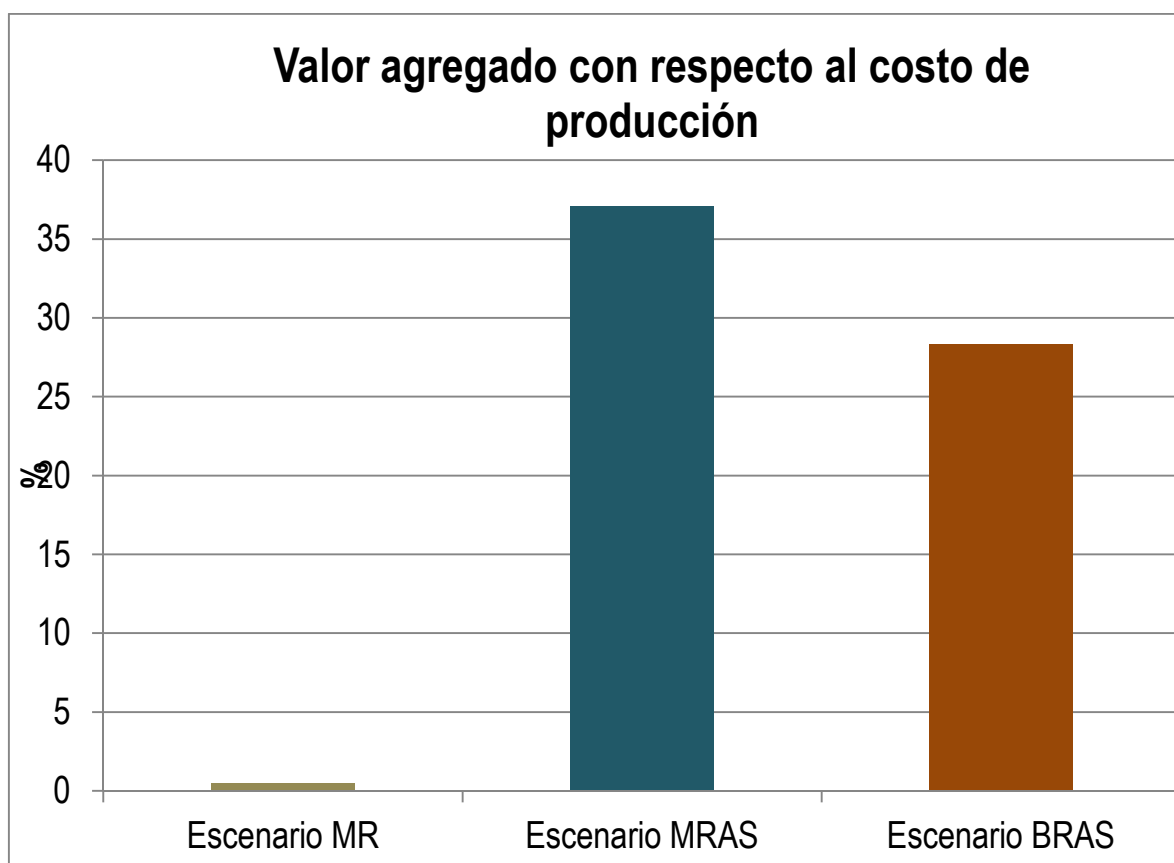
En los escenarios MR y MRAS los costos de inversión y los costos de operación y mano de obra son los mismos debido a que se utilizan las mismas condiciones de producción de la materia prima, así como también en las etapas de extracción de aceite y producción de biodiesel.

En el escenario BRAS en la etapa de materia prima se incrementa el costo de producción aunque los costos de inversión, de mano de obra para limpieza del terreno, la cosecha de frutos así como, los costos de materiales disminuyen con respecto a los escenarios MR y MRAS, los costos de mano de obra para realizar tanto la aplicación del biofertilizante como del riego aumentan este costo, principalmente en donde la mano de obra para el riego es el que aumenta considerablemente. Aunque es este escenario aumenta la producción de semillas, este aumento no compensa el costo de mano de obra que se requieren.

#### 4.2.2.2 Indicador 5. Valor agregado

Los subproductos aprovechables del sistema de producción son las biomásas de las cascarras del fruto y la semilla, el endospermo extruído de la extracción de aceite y la glicerina resultante del proceso transesterificación para la producción de aceite como se describió en la sección 4.1 inventario de ciclo de vida.

Considerando las cantidades de cada uno de los subproductos que se obtienen en cada uno de los escenarios, en la Gráfica 19 se presenta el valor agregado que se puede obtener de acuerdo al costo de producción de 1 GJ de biodiésel.

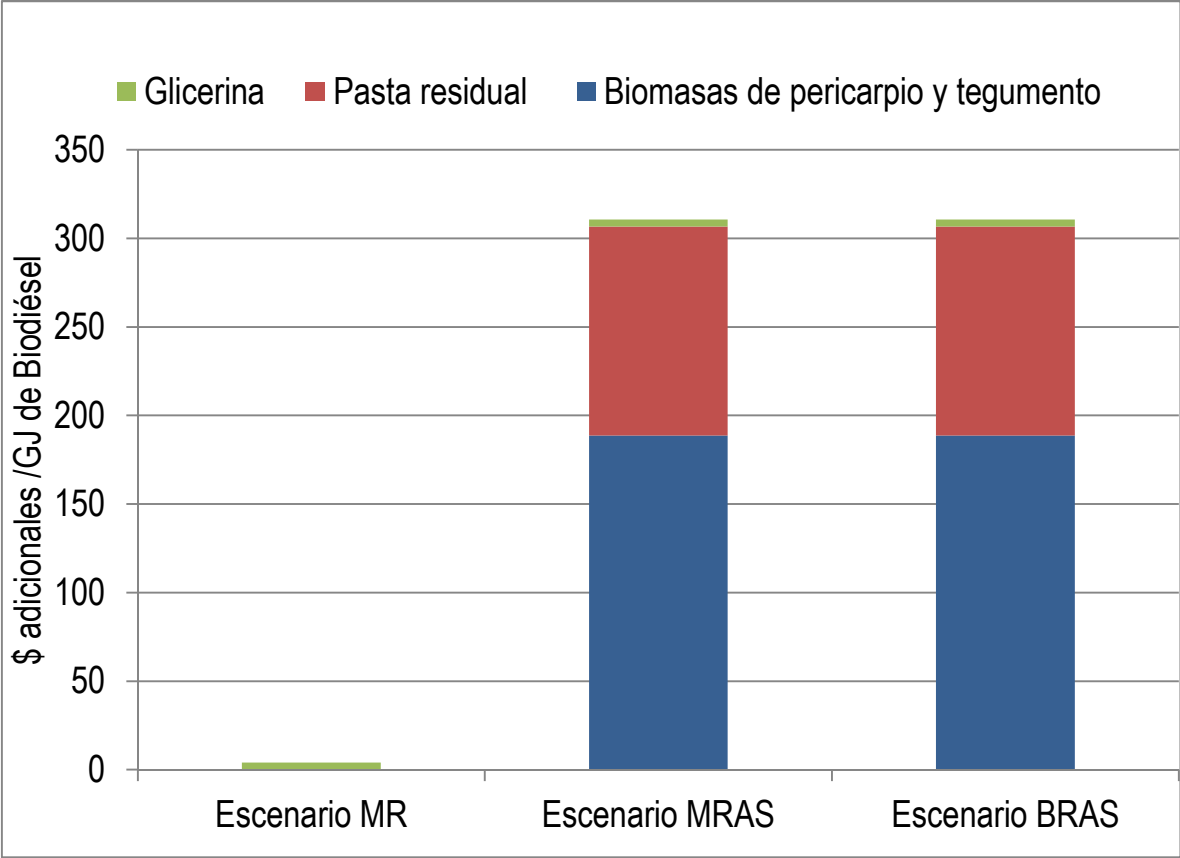


**Gráfica 19** Porcentaje de valor agregado del aprovechamiento de subproductos en cada uno de los escenarios

En el primer escenario el porcentaje del valor agregado es de 0.5% debido a que el único subproducto aprovechado es la glicerina cruda que por sus condiciones tiene bajo valor en el mercado ya que se requieren de otros procesos para llevarla a un grado de purificación adecuado para ser utilizada en otros procesos.

El aprovechamiento de la biomasa y pasta residual que son importantes para los escenarios MRAS y BRAS, el porcentaje de valor agregado aumenta a 37.1% y

28.3%, respectivamente. Sin embargo esta diferencia en porcentaje se debe a que el costo de producción de 1 GJ de biodiésel es más alto para el escenario BRAS ya que en términos monetarios son iguales. En la Gráfica 20 se presenta el valor monetario adicional de cada escenario.



**Gráfica 20 Valor económico adicional por el aprovechamiento de subproductos**

En el escenario MR por el aprovechamiento de la glicerina únicamente se obtiene adicionalmente 4.08 por \$/GJ, mientras que en los escenarios MRAS y BRAS se obtiene 310.72 adicional \$/GJ

Si las ganancias por el aprovechamiento de los ecotipos se tomaran para equilibrar el costo de producción del biodiesel y pueda ser competitivo con el diesel, que de acuerdo con los precios del diesel del año 2018 fue de 538 \$/GJ, en el escenario MRAS no habría ninguna ganancia, mientras que en escenario BRAS se necesitaría un subsidio del 22.5 % al costo de producción. De esta manera, para que se vea reflejada ganancia, aunque sea mínima, el subsidio debería de al menos el 30% al precio de producción de biodiésel.

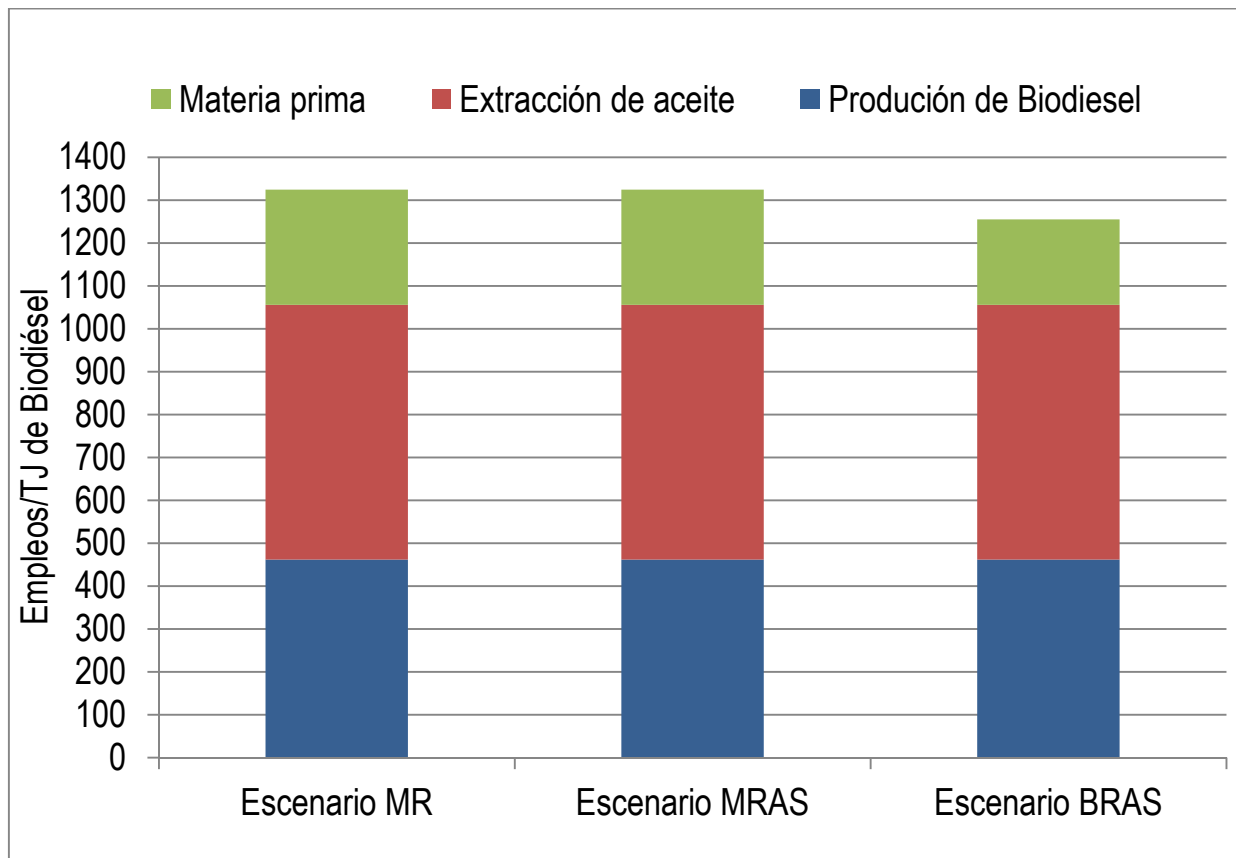


### 4.2.3 Indicadores sociales

#### 4.2.3.1 Indicador 6. Empleos creados

Los empleos creados en cada uno de los escenarios se refieren a los empleos directos considerados en cada una de las etapas del sistema de producción, en esta se consideraron empleos calificado y no calificados, así como temporales e indefinidos. En la Gráfica 21 se presentan los resultados de este indicador.

Los escenarios MR y MRAS al tener las mismas condiciones en las etapas de producción tienen una creación de empleos igual de 1324 empleos/ TJ de biodiésel mientras que el escenario BRAS la cantidad de empleos disminuye a 1255 empleos/ TJ de biodiésel.



**Gráfica 21 Empleos creados por unidad de energía en cada uno de los escenarios**

Los tres escenarios tienen la misma cantidad de empleos en las etapas de extracción de aceite con 599 empleos/ TJ de biodiésel y producción de biodiesel con 462 empleos/ TJ de biodiésel, en donde la etapa de extracción de aceite es la

que tiene mayor creación de empleos de debido a que es donde se utilizan más equipos y procesos. En estas etapas se consideraron empleos indefinidos con una mayoría de empleos calificados.

También se observa que para el escenario MR y MRAS en donde existe un aprovechamiento de subproductos, esta actividad no requiere de empleados extra, pues son actividades que el mismo número de empleados puede realizar

La diferencia de creación de empleos se presenta en la etapa de materia prima, en el escenario BRAS disminuye con respecto al convencional y alternativo debido a que se necesita de menor área de suelo para producir la misma cantidad de energía.

En esta etapa los empleos son temporales debido a que las actividades en la plantación de *Jatropha curcas* no se realizan todos los días del año, únicamente en temporalidades muy marcadas por ejemplo la cosecha de frutos.

En el escenario BRAS, las actividades de aplicación de biofertilizantes y agua no aumentan el número de empleos pero si aumenta en el número de días de trabajo anual de los trabajadores pasando de 43 días de trabajo por hectárea del escenario MR y MRAS a 60 días de trabajo por hectárea en el escenario BRAS.

### 4.3 Índice de sustentabilidad

Los resultados de los seis indicadores de sustentabilidad se resumen en la Tabla 31.

Tabla 31 Resultados de los indicadores de sustentabilidad

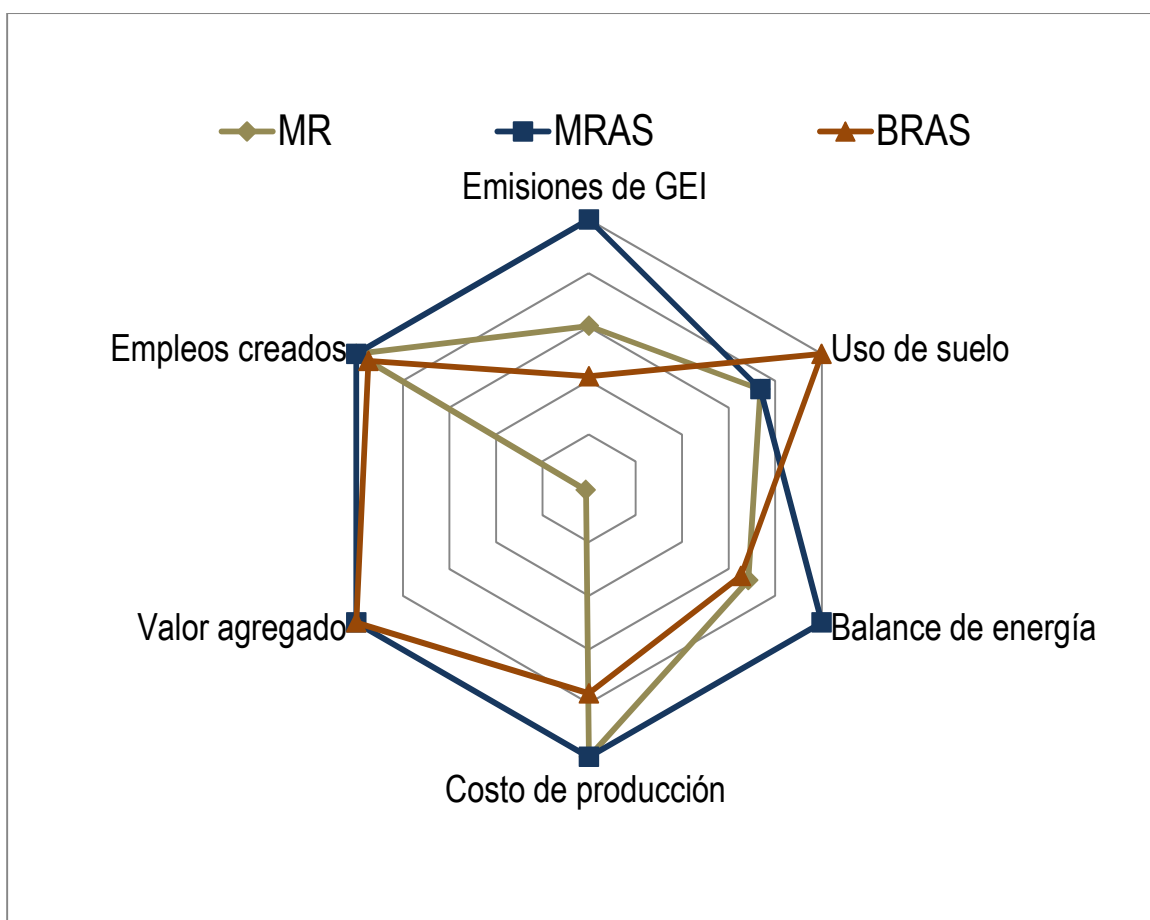
Escenarios	Emisiones de GEI	Uso de suelo	Balance de energía	Costo de producción	Valor agregado	Empleos creados
	kg de CO <sub>2</sub>	ha/GJ	GJ fósil/GJ biodiésel	\$/GJ de biodiésel	\$ adicionales/GJde biodiésel	Empleos /TJ
MR	27.56	0.0946	0.527	837	4.08	1324
MRAS	16.65	0.0946	0.361	837	310.72	1324
BRAS	39.93	0.0697	0.553	1096	310.72	1255

Los valores normalizados de los indicadores y el valor de ponderación se presentan en la Tabla 32. En la ponderación se asignó un valor un valor igual para todo lo indicadores.

Tabla 32 Valores normalizados de los indicadores y valor de ponderación

Escenarios	Valores normalizados						Valor de ponderación de cada indicador
	Emisiones de GEI	Uso de suelo	Balace de energía	Costo de producción	Valor agregado	Empleos creados	
MR	0.60	0.74	0.69	1	0.01	1	0.167
MRAS	1	0.74	1.0	1	1.00	1	
BRAS	0.42	1.0	0.65	0.8	1.00	0.95	

De acuerdo a la Tabla 32, la aportación de cada indicador a la sustentabilidad se observa en la Gráfica 22. En esta gráfica la forma exterior de gráfico es donde se encuentra la mayor sustentabilidad de acuerdo a los indicadores analizados.

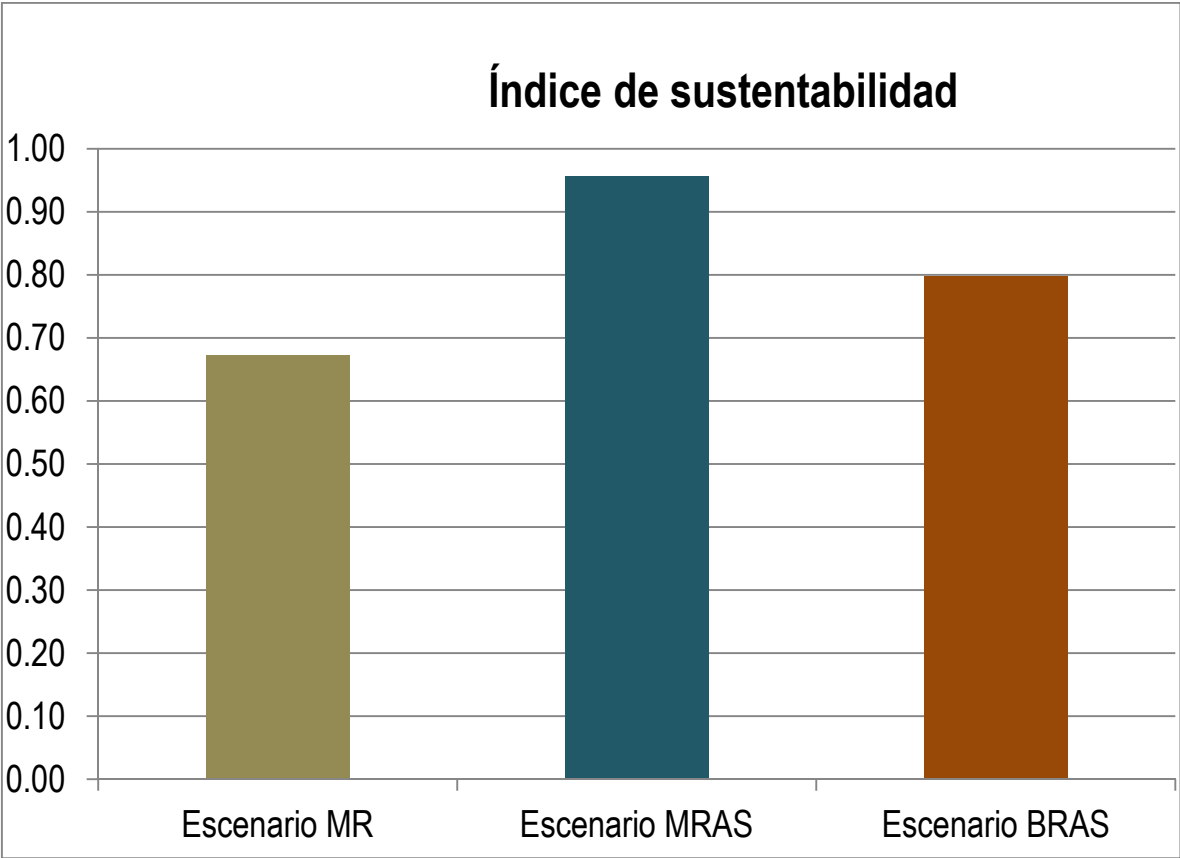


Gráfica 22 Resultados de los indicadores de sustentabilidad en el sistema de producción

El escenario MRAS presenta la mayor puntuación de los valores normalizados en 5 indicadores mientras que el escenario BRAS a pesar de que se propuso con la

idea de mejorar la sustentabilidad este refleja que las acciones propuestas no son las mejores ya que si bien si mejora la sustentabilidad en el indicador de uso de suelo, este tiene repercusión en las emisiones de GEI, el balance de energía y el costo de producción y no mejora con respecto al escenario MRAS.

En consecuencia de los valores normalizados y el valor de ponderación en donde todos los indicadores tienen la misma importancia el Índice de sustentabilidad se presenta en la Gráfica 23.



El escenario MRAS es el sistema de producción con el índice de sustentabilidad con valor de 0.956, mientras que el escenario BRAS presentó un índice de 0.797.

Se observa que el escenario MR es el de menor sustentabilidad por lo que el sistema de producción se aproveche de la biomasa con fines energéticos y los residuos de la extracción de aceite con fines energéticos es más sustentable que la forma convencional de las plantaciones de *Jatropha curcas* en donde solamente se enfocan a la producción de aceite y se realizan variedades tóxicas.

#### **4.4 Análisis de la dimensión Institucional**

El marco institucional ha sido esencial para el desarrollo de la producción, comercialización y uso de los biocombustibles en los países productores y consumidores de bioenergía.

En México, el interés para desarrollar biocombustibles impulsó a la creación de la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos en el año 2008 con el objetivo de promover la producción de insumos para bioenergéticos, desarrollar la producción comercialización y uso eficiente de los bioenergéticos, así como, reducir las emisiones de contaminantes a la atmosfera y gases de efecto invernadero [134].

Actualmente existe un instrumento regulatorio y uno normativos para la producción de biodiesel. El primero es el Reglamento de la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos publicada en el año 2009, a través de este se establecieron las bases para reglamentar las actividades de producción y comercialización de insumos por parte de la SAGARPA y por parte de la SENER, la producción, el almacenamiento, el transporte y la distribución por ductos, así como la comercialización de los bioenergéticos

En las medidas de protección al medio ambiente y los criterios de conservación al medio ambiente y los procesos que permitan la sustentabilidad le corresponde a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) mediante Normas Oficiales Mexicanas en materia de prevención y gestión de residuos y aprovechamiento sustentable de suelos y recursos naturales renovables [135].

El segundo es la NMX-AA-174-SCFI-2015 publicada en el año 2015 cuyo objetivo es establecer los requisitos y los criterios para obtener la certificación de sustentabilidad ambiental en la producción de bioenergéticos líquidos de origen vegetal [135].

Aunque ambos instrumentos son esfuerzos importantes para impulsar el uso de los biocombustibles estos no son suficientes, los apoyos económicos e incentivos para los cultivos de materias primas no han materializado en objetivos producciones de biodiesel en volúmenes importantes debido a las bajas productividades de las materias primas ya que muchos de la inversiones y las decisiones políticas se tomaron sin ningún apoyo científico o tecnológico.

Por otro lado, no se han establecido mandatos sobre objetivos de producción de biodiésel o de obligaciones de mezclado, ni existen normas específicas para

asegurar la calidad del biodiesel, su comercialización y para el mezclado con diesel.

Adicionalmente, en los aspectos de sustentabilidad ambiental aunque se cuenta con la norma NMX-AA-174-SCFI-2015 esta es de cumplimiento voluntario y no obligatorio por lo que tampoco se puede asegurar que los procesos que se realicen en la cadena de producción de biodiésel realmente sean sustentables.

Para el aprovechamiento de los subproductos, las regulaciones y normatividad sucede un efecto similar. Para el aprovechamiento de las biomásas como energético de uso doméstico si bien la Ley General para la Prevención y Gestión integral de los Residuos [136] clasifica a los residuos generados por las actividades agrícolas y forestales como sujetos a fomentar la valorización de estos para desarrollar un mercados de subproductos y el aprovechamiento de las biomásas de *Jatropha curcas* puede ser considerada con la NOM-012-SEMARNAT-1996 que establece los procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de leña para uso doméstico [137], no existe la normatividad que regule la calidad de los bioenergéticos provenientes de la biomasa forestal.

Por su parte, para el aprovechamiento de la pasta residual de *Jatropha curcas* para su uso como de harinas para la producción de alimentos aunque su regulación puede ser considerada con la NOM-247-SSA1-2008 sobre las disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales sobre alimentos a base semillas comestibles y harinas [137] o con las disposiciones de las normas del CODEX para productos proteínicos de soya [137], se deberían crear una normatividad específica para *Jatropha curcas* para asegurar que la pasta residual no contiene esteres de forbol. Estos es por la característica específica de que *Jatropha curcas* es comestible siempre y cuando sea libre esteres de forbol que son los compuestos que la hacen tóxica al consumo humano y de animales, de lo contrario sería un riesgo comercializarla sin tener la certeza de que es una variedad comestible.

La falta de las regulaciones y normatividades mencionadas son una limitante para lograr que el sistema de producción pueda desarrollarse de manera exitosa y por tanto que la sustentabilidad institucional sea completamente positiva. Es importante que se continúe avanzando en el marco institucional para desarrollar la cadena de producción de biodiésel utilizando *Jatropha curcas* sobre todo en la etapa de materia prima que la etapa más crítica del sistema, los apoyos y subsidios que actualmente existen para el aprovechamiento de recursos forestales de la Comisión nacional Forestal (CONAFOR)[138] o el programa Sembrando

Vida de la Secretaría de Bienestar [139] podrían ser una clave para detonar este tipo de plantaciones en suelos marginales en zonas rurales.

#### 4.5 Conclusiones

Los Indicadores de sustentabilidad evaluados en cada uno de los escenarios mostraron que el sistema de producción del escenario MR tiene una sustentabilidad muy baja por lo que en todos los indicadores presento un valor normalizado bajo.

El mejor índice de sustentabilidad corresponde al escenario MRAS y con esto se puede concluir que el sistema de producción de biocombustibles utilizando como materia prima las plantaciones de *Jatropha curcas* con el ecotipo no tóxico E2M en un escenario de mínimos recursos tiene una sustentabilidad positiva.

El escenario BRAS que fue pensado para mejorar la sustentabilidad, este tiene el mejor valor normalizado en el indicador de uso de suelo, por lo que al aumentar la productividad si se disminuye el uso del suelo sin embargo el uso de insumos para aumentar tal productividad también aumenta las emisiones de gases de GEI, la energía fósil utilizada y aumenta los costos de producción que estos no son cubiertos por el aumento de productividad. Sin embargo en ambos escenarios MRAS y BRAS, tienen una sustentabilidad mayor que el sistema de producción del escenario MR.

Estos resultados demuestran que el sistema de producción de biodiesel con ecotipos mexicanos de *Jatropha curcas* no tóxica es sustentable siempre y cuando se aprovechen los subproductos a diferencia del sistema de producción donde las plantaciones de *Jatropha curcas* solamente se enfocan a la producción de aceite y se establecen con variedades tóxicas.

El aprovechamiento de los subproductos en el sistema de producción de biodiesel con *Jatropha curcas* no tóxico como materia prima presenta un buen desempeño ambiental y social aunque el aspecto económico se necesita de subsidios para poder competir con los precios del diesel, de acuerdo a los indicadores económicos este subsidio debería de ser al menos del 30%.

Estos resultados también indican que si se busca el aumento en la productividad de *Jatropha curcas*, el ecotipo E2M es un buen candidato para realizar programas de mejoramiento pero se deben considerar otras alternativas de biofertilizantes más efectivos y evaluar la sustentabilidad de las plantaciones de *Jatropha curcas* con esos programas de mejoramiento para asegurar que la sustentabilidad sea positiva.

## Conclusiones

De acuerdo a los resultados de la evaluación experimental se concluyó que el ecotipo E2M, el cual es endémico del Estado de Morelos y no tóxico de acuerdo a nuestros resultados, tiene las mejores características en términos de crecimiento, rendimiento de semillas, contenido energético, propiedades físicas y químicas del aceite, para ser utilizado como materia prima para la producción de biodiesel. Su propiedad de ser no tóxica la posibilita también para aprovechar las propiedades de la pasta residual como alimento. Finalmente, este ecotipo abre la posibilidad de usar la *Jatropha curcas* para mejorar las propiedades químicas del suelo marginal, como se demostró en esta tesis.

El análisis de la sustentabilidad del ecotipo E2M que se simuló aprovechando datos de campo en nuestra plantación en condiciones de mínimos recursos de *Jatropha curcas*, con un enfoque de ciclo de vida considerando las etapas de obtención de la materia prima, extracción de aceite y producción de biodiésel, revela que de los tres escenarios, MR, MRAS y BRAS, evaluados tomando como unidad funcional 1GJ de biodiésel en los indicadores de emisiones de gases de efecto invernadero, uso de suelo, balance energético, costo de producción, valor agregado y empleos creados, el escenario MRAS tiene el mejor índice de sustentabilidad. Esto significa que la mayor sustentabilidad de la plantación para producir biodiesel, se realiza cuando se logra el aprovechamiento de los subproductos, tales como la biomasa de las cascavas del fruto y la semilla para su uso como biocombustible sólido, la pasta residual de la extracción de aceite para su uso para la elaboración de productos alimenticios y la glicerina obtenida del proceso de transesterificación.

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación se demuestra que el sistema de producción de biodiesel con ecotipos mexicanos de *Jatropha curcas* no tóxica es sustentable empleando suelos marginales en zonas rurales, siempre y cuando se aprovechen los subproductos mencionados ya que muestran tener un buen desempeño ambiental y social, sin embargo, su viabilidad económica dependería de un programa de subsidios equivalente a 30% de su costo de producción GJ, lo cual se justificaría para zonas rurales y suelos marginales del país.

Para investigaciones futuras, estos resultados también indican que si se busca el aumento en la productividad de *Jatropha curcas*, el ecotipo E2M es un buen candidato para realizar programas de mejoramiento de semilla y desarrollo de paquetes tecnológicos adecuados para el uso de suelos marginales y que alienten el uso de biofertilizantes más eficientes y el trabajo local manual, mejorando de esta manera su viabilidad económica por GJ.



## Bibliografia

- [1] Institute W. Biofuels for transport: Global potential and implications for energy and agriculture. 2012. doi:10.4324/9781849770590.
- [2] Hales D. REN21 Renewables 2018 global status report. 2018.
- [3] Ravindranath NH, Sita Lakshmi C, Manuvie R, Balachandra P. Biofuel production and implications for land use, food production and environment in India. *Energy Policy* 2011;39:5737–45. doi:10.1016/j.enpol.2010.07.044.
- [4] Timilsina GR, Beghin JC, Mensbrugge D Van Der, Mevel S. The Impacts of Biofuel Targets on Land-Use Change and Food Supply A Global CGE Assessment. *Knowl Creat Diffus Util* 2010;71. doi:10.1596/1813-9450-5513.
- [5] Ssegane H, Negri MC, Quinn J, Urgun-Demirtas M. Multifunctional landscapes: Site characterization and field-scale design to incorporate biomass production into an agricultural system. *Biomass and Bioenergy* 2015;80:179–90. doi:10.1016/j.biombioe.2015.04.012.
- [6] Achten WMJ, Verchot L, Franken YJ, Mathijs E, Singh VP, Aerts R, et al. *Jatropha* bio-diesel production and use. *Biomass and Bioenergy* 2008;32:1063–84. doi:10.1016/j.biombioe.2008.03.003.
- [7] Fini A, Bellasio C, Pollastri S, Tattini M, Ferrini F. Water relations, growth, and leaf gas exchange as affected by water stress in *Jatropha curcas*. *J Arid Environ* 2013;89:21–9. doi:10.1016/j.jaridenv.2012.10.009.
- [8] Ong HC, Mahlia TMI, Masjuki HH, Norhasyima RS. Comparison of palm oil, *Jatropha curcas* and *Calophyllum inophyllum* for biodiesel: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:3501–15. doi:10.1016/j.rser.2011.05.005.
- [9] Wani SP, Chander G, Sahrawat KL, Srinivasa Rao C, Raghvendra G, Susanna P, et al. Carbon sequestration and land rehabilitation through *Jatropha curcas* (L.) plantation in degraded lands. *Agric Ecosyst Environ* 2012;161:112–20. doi:10.1016/j.agee.2012.07.028.
- [10] Reubens B, Achten WMJ, Maes WH, Danjon F, Aerts R, Poesen J, et al. More than biofuel? *Jatropha curcas* root system symmetry and potential for soil erosion control. *J Arid Environ* 2011;75:201–5. doi:10.1016/j.jaridenv.2010.09.011.
- [11] Mantri VA, Parmar DR, Rao PN, Ghosh A. Observations on ecosystem services in *Jatropha curcas* plantations established in degraded lands in India. *Int J Environ Stud* 2014;71:209–14. doi:10.1080/00207233.2014.903125.
- [12] Lim BY, Shamsudin R, Baharudin BTHT, Yunus R. A review of processing

and machinery for *Jatropha curcas* L. fruits and seeds in biodiesel production: Harvesting, shelling, pretreatment and storage. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;52:991–1002. doi:10.1016/j.rser.2015.07.077.

- [13] Navarro-Pineda FS, Baz-Rodríguez SA, Handler R, Sacramento-Rivero JC. Advances on the processing of *Jatropha curcas* towards a whole-crop biorefinery. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;54:247–69. doi:10.1016/j.rser.2015.10.009.
- [14] Wang Z, Calderon MM, Lu Y. Lifecycle assessment of the economic, environmental and energy performance of *Jatropha curcas* L. biodiesel in China. *Biomass and Bioenergy* 2011;35:2893–902. doi:10.1016/j.biombioe.2011.03.031.
- [15] Rivero JCS, Eastmond-Spencer A, García JB, Navarro-Pineda FS. A three-dimensional sustainability evaluation of *jatropha* plantations in Yucatan, Mexico. *Sustain* 2016;8:1–18. doi:10.3390/su8121316.
- [16] Singh K, Singh B, Verma SK, Patra DD. *Jatropha curcas*: A ten year story from hope to despair. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;35:356–60. doi:10.1016/j.rser.2014.04.033.
- [17] Borman GD, Von Maltitz GP, Tiwari S, Scholes MC. Modelling the economic returns to labour for *Jatropha* cultivation in southern Africa and India at different local fuel prices. *Biomass and Bioenergy* 2013;59:70–83. doi:10.1016/j.biombioe.2012.06.020.
- [18] Dawa A, Klemola T, Saloniemi I, Niemelä P, Vuorisalo T. Energy for Sustainable Development Factors affecting genetic and seed yield variability of *Jatropha curcas* ( L .) across the globe : A review. *Energy Sustain Dev* 2017;42:170–82. doi:10.1016/j.esd.2017.09.002.
- [19] Achten WMJ, Almeida J, Fobelets V, Bolle E, Mathijs E, Singh VP, et al. Life cycle assessment of *Jatropha* biodiesel as transportation fuel in rural India. *Appl Energy* 2010;87:3652–60. doi:10.1016/j.apenergy.2010.07.003.
- [20] Gmünder SM, Zah R, Bhattacharjee S, Classen M, Mukherjee P, Widmer R. Life cycle assessment of village electrification based on straight *jatropha* oil in Chhattisgarh, India. *Biomass and Bioenergy* 2010;34:347–55. doi:10.1016/j.biombioe.2009.11.006.
- [21] Pandey KK, Pragma N, Sahoo PK. Life cycle assessment of small-scale high-input *Jatropha* biodiesel production in India. *Appl Energy* 2011;88:4831–9. doi:10.1016/j.apenergy.2011.06.026.
- [22] Kumar S, Singh J, Nanoti SM, Garg MO. A comprehensive life cycle assessment (LCA) of *Jatropha* biodiesel production in India. *Bioresour Technol* 2012;110:723–9. doi:10.1016/j.biortech.2012.01.142.
- [23] Prueksakorn K, Gheewala SH, Malakul P, Bonnet S. Energy analysis of

- Jatropha plantation systems for biodiesel production in Thailand. *Energy Sustain Dev* 2010;14:1–5. doi:10.1016/j.esd.2009.12.002.
- [24] Liang S, Xu M, Zhang T. Life cycle assessment of biodiesel production in China. *Bioresour Technol* 2013;129:72–7. doi:10.1016/j.biortech.2012.11.037.
- [25] Almeida J, Achten WMJ, Duarte MP, Mendes BM, Muys BM. Benchmarking the environmental performance of the jatropha biodiesel system through a generic life cycle assessment. *Environ Sci Technol* 2011;45:5447–53. doi:10.1021/es200257m.
- [26] Geraldine Castanheira É, Grisoli R, Freire F, Pecora V, Coelho ST. Environmental sustainability of biodiesel in Brazil. *Energy Policy* 2014;65:680–91. doi:10.1016/j.enpol.2013.09.062.
- [27] Zenón E, Islas J, Pérez G, Ramírez J. *Jatropha en Morelos un ejercicio de sustentabilidad* Capítulo: Hacia el uso sustentable de jatropha curcas. 1a ed. Cuernavaca, Morelos: 2016.
- [28] Martínez-Díaz Y, González-Rodríguez A, Delgado-Lamas G, Espinosa-García FJ. Geographic structure of chemical variation in wild populations of the fuel crop *Jatropha curcas* L. in Mexico. *Ind Crops Prod* 2015;74:63–8. doi:10.1016/j.indcrop.2015.04.049.
- [29] Senger E, Martin M, Dongmeza E, Montes JM. Genetic variation and genotype by environment interaction in *Jatropha curcas* L. germplasm evaluated in different environments of Cameroon. *Biomass and Bioenergy* 2016;91:12–8. doi:10.1016/j.biombioe.2016.04.017.
- [30] Kumar N, Singh AS, Kumari S, Reddy MP. Biotechnological approaches for the genetic improvement of *Jatropha curcas* L.: A biodiesel plant. *Ind Crops Prod* 2015;76:817–28. doi:10.1016/j.indcrop.2015.07.028.
- [31] Laviola BG, Rodrigues EV, Teodoro PE, Peixoto L de A, Bhering LL. Biometric and biotechnology strategies in *Jatropha* genetic breeding for biodiesel production. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;76:894–904. doi:10.1016/j.rser.2017.03.116.
- [32] Pecina-Quintero V, Anaya-López JL, Zamarripa-Colmenero A, Núñez-Colín CA, Montes-García N, Solís-Bonilla JL, et al. Genetic structure of *Jatropha curcas* L. in Mexico and probable centre of origin. *Biomass and Bioenergy* 2014;60:147–55. doi:10.1016/j.biombioe.2013.11.005.
- [33] Martínez-Herrera J, Siddhuraju P, Francis G, Dávila-Ortíz G, Becker K. Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Food Chem* 2006;96:80–9. doi:10.1016/j.foodchem.2005.01.059.

- [34] Martínez-Herrera J, Martíne Ayala A, Makkar H, Francis G, Becker K. Agroclimatic conditions, chemical and nutritional characterization of different provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Eur J Sci Res* 2010;39:396–407.
- [35] Makkar HPS, Becker K, Schmook B. Edible provenances of *Jatropha curcas* from Quintana Roo state of Mexico and effect of roasting on antinutrient and toxic factors in seeds. *Plant Foods Hum Nutr* 1998;52:31–6. doi:10.1023/A:1008054010079.
- [36] Manurung R, Wever D a Z, Wildschut J, Venderbosch RH, Hidayat H, van Dam JEG, et al. Valorisation of *Jatropha curcas* L. plant parts: Nut shell conversion to fast pyrolysis oil. *Food Bioprod Process* 2009;87:187–96. doi:10.1016/j.fbp.2009.06.007.
- [37] Wever DAZ, Heeres HJ, Broekhuis AA. Characterization of Physic nut (*Jatropha curcas* L.) shells. *Biomass and Bioenergy* 2012;37:177–87. doi:10.1016/j.biombioe.2011.12.014.
- [38] Naik D V., Kumar R, Tripathi D, Singh R, Kanaujia PK. Co-pyrolysis of *Jatropha curcas* seed cake and bituminous coal: Product pattern analysis. *J Anal Appl Pyrolysis* 2016;121:360–8. doi:10.1016/j.jaap.2016.08.017.
- [39] Jabłoński SJ, Kułczyński M, Sikora I, Łukaszewicz M. The influence of different pretreatment methods on biogas production from *Jatropha curcas* oil cake. *J Environ Manage* 2017;203:714–9. doi:10.1016/j.jenvman.2016.06.001.
- [40] BP. 67 th edition Contents is one of the most widely respected. 2018.
- [41] International Energy Agency (IEA). *Renewables Information* 2018. 2018. doi:10.1787/renew-2015-en.
- [42] Lamers P, Hamelinck C, Junginger M, Faaij A. International bioenergy trade - A review of past developments in the liquid biofuel market. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:2655–76. doi:10.1016/j.rser.2011.01.022.
- [43] Beltrán LR, Alexandri RR, Herrera JR, Ojeda OG. *Balance Nacional de Energía*. 2018.
- [44] Kloepffer W. Life Cycle Sustainability Assessment of Products. *Int J LCA* 2008;13:89–95. doi:10.1065/lca2008.02.376.
- [45] Spangenberg JH, Pfahl S, Deller K. Towards indicators for institutional sustainability: Lessons from an analysis of Agenda 21. *Ecol Indic* 2002;2:61–77. doi:10.1016/S1470-160X(02)00050-X.
- [46] Roundtable on Sustainable Biomaterials. *Indicators of Compliance for the RSB Principles and Criteria*. vol. 1. 2011.

- [47] GBEP. The Global Bioenergy Partnership Sustainability Indicators for Bioenergy. 2011.
- [48] Acosta-Michlik L, Lucht W, Bondeau A, Beringer T. Integrated assessment of sustainability trade-offs and pathways for global bioenergy production: Framing a novel hybrid approach. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:2791–809. doi:10.1016/j.rser.2011.02.011.
- [49] Dehgan B, Webster G. Morphology and Infrageneric Relationships of the Genus *Jatropha* (Euphorbiaceae). 1970.
- [50] Fresnedo-Ramírez J, Orozco-Ramírez Q. Diversity and distribution of genus *Jatropha* in Mexico. *Genet Resour Crop Evol* 2013;60:1087–104. doi:10.1007/s10722-012-9906-7.
- [51] Heller J. Physic nut. *Jatropha curcas* L. 1996.
- [52] Mahmudul HM, Hagos FY, Mamat R, Adam AA, Ishak WFW, Alenezi R. Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines – A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;72:497–509. doi:10.1016/j.rser.2017.01.001.
- [53] Gui MM, Lee KT, Bhatia S. Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. *Energy* 2008;33:1646–53. doi:10.1016/j.energy.2008.06.002.
- [54] Ma F, Hanna MA. Biodiesel production: A review. *Bioresour Technol* 1999;70:1–15. doi:10.1016/S0960-8524(99)00025-5.
- [55] Lim S, Hoong SS, Teong LK, Bhatia S. Supercritical fluid reactive extraction of *Jatropha curcas* L. seeds with methanol: A novel biodiesel production method. *Bioresour Technol* 2010;101:7169–72. doi:10.1016/j.biortech.2010.03.134.
- [56] Nisar J, Razaq R, Farooq M, Iqbal M, Khan RA, Sayed M, et al. Enhanced biodiesel production from *Jatropha* oil using calcined waste animal bones as catalyst. *Renew Energy* 2017;101:111–9. doi:10.1016/j.renene.2016.08.048.
- [57] Teo SH, Rashid U, Taufiq-Yap YH. Biodiesel production from crude *Jatropha Curcas* oil using calcium based mixed oxide catalysts. *Fuel* 2014;136:244–52. doi:10.1016/j.fuel.2014.07.062.
- [58] Kuo TC, Shaw JF, Lee GC. Conversion of crude *Jatropha curcas* seed oil into biodiesel using liquid recombinant *Candida rugosa* lipase isozymes. *Bioresour Technol* 2015;192:54–9. doi:10.1016/j.biortech.2015.05.008.
- [59] Walmsley DC, Bailis R, Klein A-M. A Global Synthesis of *Jatropha* Cultivation: Insights into Land Use Change and Management Practices. *Environ Sci Technol* 2016;acs.est.6b01274. doi:10.1021/acs.est.6b01274.

- [60] Kaushik N, Bhardwaj D. Screening of *Jatropha curcas* germplasm for oil content and fatty acid composition. *Biomass Bioenergy* 2013;58:210–8.
- [61] Thapa S, Indrawan N, Bhoi PR. Environmental Technology & Innovation An overview on fuel properties and prospects of *Jatropha* biodiesel as fuel for engines. *Environ Technol Innov* 2018;9:210–9. doi:10.1016/j.eti.2017.12.003.
- [62] Pedro I, Andrade DS, Vinícius M, Diego A. Biomass and Bioenergy Fatty acid composition of *Jatropha curcas* seeds under different agronomical conditions by means of <sup>1</sup>H HR-MAS NMR 2017;101:30–4. doi:10.1016/j.biombioe.2016.12.006.
- [63] Rodrigues J, Canet A, Rivera I, Osorio NM, Sandoval G, Valero F, et al. Biodiesel production from crude *Jatropha* oil catalyzed by non-commercial immobilized heterologous *Rhizopus oryzae* and *Carica papaya* lipases. *Bioresour Technol* 2015;213:88–95. doi:10.1016/j.biortech.2016.03.011.
- [64] Sánchez-Arreola E, Martín-Torres G, Lozada-Ramírez JD, Hernández LR, Bandala-González ER, Bach H. Biodiesel production and de-oiled seed cake nutritional values of a mexican edible *jatropha curcas*. *Renew Energy* 2015;76:143–7. doi:10.1016/j.renene.2014.11.017.
- [65] Torres-Rodríguez DA, Romero-Ibarra IC, Ibarra IA, Pfeiffer H. Biodiesel production from soybean and *Jatropha* oils using cesium impregnated sodium zirconate as a heterogeneous base catalyst. *Renew Energy* 2016;93:323–31. doi:10.1016/j.renene.2016.02.061.
- [66] Helwani Z, Aziz N, Kim J, Othman MR. Improving the yield of *Jatropha curcas* s FAME through sol e gel derived meso-porous hydrotalcites. *Renew Energy* 2016;86:68–74. doi:10.1016/j.renene.2015.07.094.
- [67] Coutinho DJG, Barbosa MO, de Souza RJC, da Silva AS, da Silva SI, de Oliveira AFM. Biodiesel potential of the seed oils from some Brazilian native Euphorbiaceae species. *Renew Energy* 2016;91:275–81. doi:10.1016/j.renene.2016.01.064.
- [68] Kamel DA, Farag HA, Amin NK, Zatout AA, Ali RM. Smart utilization of *jatropha* (*Jatropha curcas* Linnaeus) seeds for biodiesel production: Optimization and mechanism. *Ind Crops Prod* 2018;111:407–13. doi:10.1016/j.indcrop.2017.10.029.
- [69] Naresh B, Reddy MS, Vijayalakshmi P, Reddy V, Devi P. Physico-chemical screening of accessions of *Jatropha curcas* for biodiesel production. *Biomass and Bioenergy* 2012;40:155–61. doi:10.1016/j.biombioe.2012.02.012.
- [70] Saetae D, Suntornsuk W. Toxic compound, anti-nutritional factors and functional properties of protein isolated from detoxified *Jatropha curcas* seed cake. *Int J Mol Sci* 2011;12:66–77. doi:10.3390/ijms12010066.

- [71] Goel G, Makkar HPS, Francis G, Becker K. Phorbol Esters: Structure, Biological Activity, and Toxicity in Animals. *Int J Toxicol* 2007;26:279–88. doi:10.1080/10915810701464641.
- [72] Aregheore EM, Makkar HPS, Becker K. Assessment of Lectin Activity in a Toxic and a Non-toxic Variety of *Jatropha curcas* using Latex Agglutination and Haemagglutination Methods and Inactivation of Lectin by Heat Treatments 1998;349.
- [73] Shahinuzzaman M, Yaakob Z, Moniruzzaman M. Medicinal and cosmetics soap production from *Jatropha* oil. *J Cosmet Dermatol* 2016;15:185–93. doi:10.1111/jocd.12209.
- [74] He W, King AJ, Khan MA, Cuevas JA, Ramaramanana D, Graham IA. Analysis of seed phorbol-ester and curcumin content together with genetic diversity in multiple provenances of *Jatropha curcas* L. from Madagascar and Mexico. *Plant Physiol Biochem* 2011;49:1183–90. doi:10.1016/j.plaphy.2011.07.006.
- [75] Devappa RK, Makkar HPS, Becker K. Shelf-life of isolated phorbol esters from *Jatropha curcas* oil. *Ind Crops Prod* 2013;49:454–61. doi:10.1016/j.indcrop.2013.05.026.
- [76] Makkar HPS, Becker K. *Jatropha curcas*, a promising crop for the generation of biodiesel and value-added coproducts. *Eur J Lipid Sci Technol* 2009;111:773–87. doi:10.1002/ejlt.200800244.
- [77] León-Villanueva A, Huerta-Ocampo JA, Barrera-Pacheco A, Medina-Godoy S, Barba de la Rosa AP. Proteomic analysis of non-toxic *Jatropha curcas* byproduct cake: Fractionation and identification of the major components. *Ind Crops Prod* 2018;111:694–704. doi:10.1016/j.indcrop.2017.11.046.
- [78] Makkar HPS. State-of-the-art on detoxification of *Jatropha curcas* products aimed for use as animal and fish feed: A review. *Anim Feed Sci Technol* 2016;222:87–99. doi:10.1016/j.anifeedsci.2016.09.013.
- [79] Kumar V, Makkar HPS, Amselgruber W, Becker K. Physiological, haematological and histopathological responses in common carp (*Cyprinus carpio* L.) fingerlings fed with differently detoxified *Jatropha curcas* kernel meal. *Food Chem Toxicol* 2010;48:2063–72. doi:10.1016/j.fct.2010.05.007.
- [80] Nakao M, Hasegawa G, Yasuhara T, Ishihara Y. Degradation of *Jatropha curcas* phorbol esters derived from *Jatropha* oil cake and their tumor-promoting activity. *Ecotoxicol Environ Saf* 2015;114:357–64. doi:10.1016/j.ecoenv.2014.07.009.
- [81] Xiao J, Zhang H. Comparative evaluation of *Jatropha curcas* L. seed meals obtained by different methods of defatting on toxic, antinutritional and nutritive factors. *J Food Sci Technol* 2014;51:1126–32. doi:10.1007/s13197-

011-0608-5.

- [82] Xiao J, Zhang H, Niu L, Wang X, Lu X. Evaluation of detoxification methods on toxic and antinutritional composition and nutritional quality of proteins in *Jatropha curcas* meal. *J Agric Food Chem* 2011;59:4040–4. doi:10.1021/jf200104b.
- [83] Oliveira PB, Lima PMT, Campeche A, Mendonça S, Laviola BG, McManus C, et al. Growth and carcass characteristics of Santa Inês lambs fed diet supplemented with physic nut meal free of phorbol ester. *Small Rumin Res* 2013;114:20–5. doi:10.1016/j.smallrumres.2013.05.007.
- [84] Steinbrück J, Tavakkol S, Francis G, Bockhorn H. *Jatropha* – Potential of biomass steam processing to convert crop residues to bio-coal and thus triple the marketable energy output per unit plantation area. *Ind Crops Prod* 2019;136:59–65. doi:10.1016/j.indcrop.2019.04.065.
- [85] Sathishkumar P, Arulkumar M, Palvannan T. Utilization of agro-industrial waste *Jatropha curcas* pods as an activated carbon for the adsorption of reactive dye Remazol Brilliant Blue R (RBBR). *J Clean Prod* 2012;22:67–75. doi:10.1016/j.jclepro.2011.09.017.
- [86] Rampadarath S, Puchooa D, Jeewon R. *Jatropha curcas* L: Phytochemical, antimicrobial and larvicidal properties. *Asian Pac J Trop Biomed* 2016;6:858–65. doi:10.1016/j.apjtb.2016.01.019.
- [87] Pandey VC, Singh K, Singh JS, Kumar A, Singh B, Singh RP. *Jatropha curcas*: A potential biofuel plant for sustainable environmental development. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:2870–83. doi:10.1016/j.rser.2012.02.004.
- [88] Singh YP, Mishra VK, Sharma DK, Singh G, Arora S, Dixit H, et al. Harnessing productivity potential and rehabilitation of degraded sodic lands through *Jatropha* based intercropping systems. *Agric Ecosyst Environ* 2016;233:121–9. doi:10.1016/j.agee.2016.08.034.
- [89] Marrugo-Negrete J, Durango-Hernández J, Pinedo-Hernández J, Olivero-Verbel J, Díez S. Phytoremediation of mercury-contaminated soils by *Jatropha curcas*. *Chemosphere* 2015;127:58–63. doi:10.1016/j.chemosphere.2014.12.073.
- [90] Álvarez-Mateos P, Alés-Álvarez FJ, García-Martín JF. Phytoremediation of highly contaminated mining soils by *Jatropha curcas* L. and production of catalytic carbons from the generated biomass. *J Environ Manage* 2019;231:886–95. doi:10.1016/j.jenvman.2018.10.052.
- [91] Agamuthu P, Abioye OP, Aziz AA. Phytoremediation of soil contaminated with used lubricating oil using *Jatropha curcas*. *J Hazard Mater* 2010;179:891–4. doi:10.1016/j.jhazmat.2010.03.088.



- [92] Wani SP, Chander G, Sahrawat KL, Srinivasa Rao C, Raghvendra G, Susanna P, et al. Carbon sequestration and land rehabilitation through *Jatropha curcas* (L.) plantation in degraded lands. *Agric Ecosyst Environ* 2012;161:112–20. doi:10.1016/j.agee.2012.07.028.
- [93] Baumert S, Khamzina A, Vlek PLG. Soil Organic Carbon Sequestration in *Jatropha curcas* Systems in Burkina Faso. *L Degrad Dev* 2016;27:1813–9. doi:10.1002/ldr.2310.
- [94] Singh K, Singh B, Verma SK, Patra DD. *Jatropha curcas*: A ten year story from hope to despair. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;35:356–60. doi:10.1016/j.rser.2014.04.033.
- [95] Kaewcharoensombat U, Prommetta K, Srinophakun T. Life cycle assessment of biodiesel production from *jatropha*. *J Taiwan Inst Chem Eng* 2010;In Press,. doi:10.1016/j.jtice.2010.09.008.
- [96] Achten W. Sustainability evaluation of biodiesel from *Jatropha curcas* L . A life cycle oriented study. *Doctoraatsproefschrift* 2010;921:176.
- [97] Achten WMJ, Almeida J, Fobelets V, Bolle E, Mathijs E, Singh VP, et al. Life cycle assessment of *Jatropha* biodiesel as transportation fuel in rural India. *Appl Energy* 2010. doi:10.1016/j.apenergy.2010.07.003.
- [98] Ndong R, Montrejaud-Vignoles M, Saint Girons O, Gabrielle B, Pirot R, Domergue M, et al. Life cycle assessment of biofuels from *Jatropha curcas* in West Africa: a field study. *GCB Bioenergy* 2009;1:197–210. doi:10.1111/j.1757-1707.2009.01014.x.
- [99] Prueksakorn K, Gheewala SH. Energy and Greenhouse Gas Implications of Biodiesel Production from *Jatropha curcas* L . *Renew Energy* 2006;53:3–8.
- [100] Behera SK, Srivastava P, Tripathi R, Singh JP, Singh N. Evaluation of plant performance of *Jatropha curcas* L. under different agro-practices for optimizing biomass - A case study. *Biomass and Bioenergy* 2010;34:30–41. doi:10.1016/j.biombioe.2009.09.008.
- [101] Prueksakorn K, Gheewala SH. Full chain energy analysis of biodiesel from *jatropha curcas* L in Thailand. *Environ Sci Technol* 2008;42:3388–93. doi:10.1021/es7022237.
- [102] Wang Z, Calderon MM, Lu Y. Lifecycle assessment of the economic, environmental and energy performance of *Jatropha curcas* L. biodiesel in China. *Biomass and Bioenergy* 2011;35:2893–902. doi:10.1016/j.biombioe.2011.03.031.
- [103] Francis G, Edinger R, Becker K. A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: Need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations. *Nat Resour Forum* 2005;29:12–24. doi:10.1111/j.1477-8947.2005.00109.x.

- [104] Pérez G. Producción y uso sustentable de *Jatropha curcas* para producir biodiesel. 2015.
- [105] Haas W, Sterk H, Mittelbach M. Novel 12-deoxy-16-hydroxyphorbol diesters isolated from the seed oil of *Jatropha curcas*. *J Nat Prod* 2002;65:1434–40. doi:10.1021/np020060d.
- [106] Islas Samperio JM, Manzini Poli FL, Martínez Romero E, Pérez Orozco MDJ, Toleo García II. Base de datos de Parámetros Biofísicos de 15 ecotipos de *Jatropha curcas* de la plantación experimental de Miacatlan, Morelos. Registro Público del Derecho de Autor. Número de registro 03-2013-020113160600-01 2013.
- [107] Verma SP, Cruz-Huicochea R, Díaz-González L. Univariate data analysis system: deciphering mean compositions of island and continental arc magmas, and influence of underlying crust. *Int Geol Rev* 2013;55:1922–40. doi:10.1080/00206814.2013.810363.
- [108] Singh B, Singh K, Rejeshwar Rao G, Chikara J, Kumar D, Mishra DK, et al. Agro-technology of *Jatropha curcas* for diverse environmental conditions in India. *Biomass and Bioenergy* 2013;48:191–202. doi:10.1016/j.biombioe.2012.11.025.
- [109] Dharma S, Masjuki HH, Ong HC, Sebayang AH, Silitonga AS, Kusumo F, et al. Optimization of biodiesel production process for mixed *Jatropha curcas*-*Ceiba pentandra* biodiesel using response surface methodology. *Energy Convers Manag* 2016;115:178–90. doi:10.1016/j.enconman.2016.02.034.
- [110] Jain S, Sharma MP. Kinetics of acid base catalyzed transesterification of *Jatropha curcas* oil. *Bioresour Technol* 2010;101:7701–6. doi:10.1016/j.biortech.2010.05.034.
- [111] Martínez-Herrera J, Siddhuraju P, Francis G, Dávila-Ortiz G, Becker K. Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Food Chem* 2006;96:80–9. doi:10.1016/j.foodchem.2005.01.059.
- [112] Makkar HPS, Becker K, Sporer F, Wink M. Studies on Nutritive Potential and Toxic Constituents of Different Provenances of *Jatropha curcas*. *J Agric Food Chem* 1997;45:3152–7. doi:10.1021/jf970036j.
- [113] Marrufo-Estrada DM, Segura-Campos MR, Chel-Guerrero LA, Betancur-Ancona DA. Defatted *Jatropha curcas* flour and protein isolate as materials for protein hydrolysates with biological activity. *Food Chem* 2013;138:77–83. doi:10.1016/j.foodchem.2012.09.033.
- [114] IAEA. Energy indicators for sustainable development: Guidelines and Methodologies. vol. 32. 2005. doi:10.1016/j.energy.2006.08.006.

- [115] Valdivia S, Ugaya CML, Hildenbrand J, Traverso M, Mazijn B, Sonnemann G. A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment - Our contribution to Rio+20. *Int J Life Cycle Assess* 2013;18:1673–85.
- [116] Pierobon F, Zanetti M, Grigolato S, Sgarbossa A, Anfodillo T, Cavalli R. Life cycle environmental impact of firewood production - A case study in Italy. *Appl Energy* 2015;150:185–95. doi:10.1016/j.apenergy.2015.04.033.
- [117] Marquez-Reynoso MI, Ramírez-Marcial N, Cortina-Villar S, Ochoa-Gaona S. Purpose, preferences and fuel value index of trees used for firewood in El Ocote Biosphere Reserve, Chiapas, Mexico. *Biomass and Bioenergy* 2017;100:1–9. doi:10.1016/j.biombioe.2017.03.006.
- [118] Goedkoop M, Huijbregts M. *ReCiPe 2008 Characterisation* 2013:4–20.
- [119] Hollander A. *Colophon* 2016.
- [120] Humbert S, Schryver A De, Bengoa X, Margni M, Jolliet O. *IMPACT 2002 + : User Guide* 2012;21:42.
- [121] Secretaría de Hacienda y Crédito Público. [http://www.hacienda.gob.mx/EGRESOS/ppi/Sistemas\\_inversion/oficio\\_tasa\\_social\\_de\\_descuento.pdf](http://www.hacienda.gob.mx/EGRESOS/ppi/Sistemas_inversion/oficio_tasa_social_de_descuento.pdf) n.d.  
[http://www.hacienda.gob.mx/EGRESOS/ppi/Sistemas\\_inversion/oficio\\_tasa\\_social\\_de\\_descuento.pdf](http://www.hacienda.gob.mx/EGRESOS/ppi/Sistemas_inversion/oficio_tasa_social_de_descuento.pdf) (accessed July 28, 2019).
- [122] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Calculadora de inflación* n.d. <https://www.inegi.org.mx/app/indicesdeprecios/CalculadoraInflacion.aspx> (accessed September 20, 2019).
- [123] Consejo para el Desarrollo de Sinaloa. *Compendio de paquetes tecnológicos para el establecimiento de la cadena agroindustrial de Jatropha curcas en el noroeste de México*. 2015.
- [124] Mercado Libre. *Precios de glicerina cruda* n.d. [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-666235830-glicerina-cruda-\\_JM?quantity=1#position=1&type=item&tracking\\_id=6c1febdb-070a-4b2d-a048-ddfb4636a247](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-666235830-glicerina-cruda-_JM?quantity=1#position=1&type=item&tracking_id=6c1febdb-070a-4b2d-a048-ddfb4636a247) (accessed February 15, 2019).
- [125] Vazquez Perales R. *La producción sustentable de energía mediante una plantación energética: el caso Cuentepec*. 2009.
- [126] Troncoso K, Segurado P, Aguilar M, Soares da Silva A. Adoption of LPG for cooking in two rural communities of Chiapas, Mexico. *Energy Policy* 2019;133. doi:10.1016/j.enpol.2019.110925.
- [127] Madlener R, Myles H. *Modelling socio-economic aspects of bioenergy systems: a survey prepared for IEA Bioenergy Task 29*. IEA Bioenergy Task 29 Work Bright 2000.

- [128] Manzini F, Islas J, Macías P. Model for evaluating the environmental sustainability of energy projects. *Technol Forecast Soc Change* 2011;78:931–44. doi:10.1016/j.techfore.2011.01.012.
- [129] Ahmed W, Nazar MF, Ali SD, Rana UA, Khan SUD. Detailed investigation of optimized alkali catalyzed transesterification of Jatropha oil for biodiesel production. *J Energy Chem* 2015;24:331–6. doi:10.1016/S2095-4956(15)60319-9.
- [130] Phiwngam A, Anusontpornperm S, Thanachit S, Wisawapipat W. Effects of soil moisture conservation practice, irrigation and fertilization on *Jatropha curcas*. *Agric Nat Resour* 2016;50:454–9. doi:10.1016/j.anres.2016.10.006.
- [131] Fuentes A, García C, Hennecke A, Masera O. Life cycle assessment of *Jatropha curcas* biodiesel production: a case study in Mexico. *Clean Technol Environ Policy* 2018;20:1721–33. doi:10.1007/s10098-018-1558-7.
- [132] Baumert S, Khamzina A, Vlek PLG. Greenhouse gas and energy balance of *Jatropha* biofuel production systems of Burkina Faso. *Energy Sustain Dev* 2018;42:14–23. doi:10.1016/j.esd.2017.09.007.
- [133] CANACAR. Precio del diésel 2018 n.d. <https://canacar.com.mx/temp/precio-del-diesel-2018/> (accessed November 27, 2019).
- [134] Diario Oficial de la Federación. Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos. 2008.
- [135] Secretaría de Economía. NMX-AA-174-SCFI-2015. 2015.
- [136] Diario Oficial de la Federación. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. 2003.
- [137] Diario Oficial de la Federación. NOM-012-SEMARNAT-1996 que establece los procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de leña para su uso doméstico. 1996.
- [138] Comisión Nacional Forestal. Apoyos CONAFOR n.d. <https://www.gob.mx/conafor/acciones-y-programas/apoyos-conafor> (accessed November 27, 2019).
- [139] Secretaría del Bienestar. Programa Sembrando Vida n.d. <https://www.gob.mx/bienestar/acciones-y-programas/programa-sembrando-vida> (accessed November 27, 2019).
- [140] ANYANG BEST COMPLETE MACHINERY ENGINEERING CO. L. Precios de equipos de extracción de aceite n.d. [www.oilmillplant.com](http://www.oilmillplant.com) (accessed June 13, 2018).
- [141] Alibaba. Precios filtro de aceite n.d. <https://spanish.alibaba.com/product->

detail/low-price-multi-functional-jatropha-niger-seed-oil-filter-machine-60726518648.html (accessed June 18, 2018).

- [142] Comisión Federal de Electricidad. Tarifas eléctricas n.d. <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/GranDemandaMTO.aspx> (accessed August 3, 2019).
- [143] Distribuidor nacional. Precios de equipos de almacenamiento n.d. [https://distribuidornacional.com/Categoria/Rotoplas-Tolvas?gclid=EAlaIQobChMIIsfuQj9zs5QIVNSCtBh3x7QxMEAAYAAEgIMGvD\\_BwE](https://distribuidornacional.com/Categoria/Rotoplas-Tolvas?gclid=EAlaIQobChMIIsfuQj9zs5QIVNSCtBh3x7QxMEAAYAAEgIMGvD_BwE) (accessed August 24, 2019).
- [144] Solben. Precios de planta de biodiesel n.d. <http://www.solben.org.mx/> (accessed June 27, 2019).
- [145] Mercado Libre. Precios de metanol n.d. [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-706097873-metanol-9997-de-pureza-precio-por-litro-\\_JM?quantity=1#position=1&type=item&tracking\\_id=0227bd55-6a7c-4081-b5e0-a0be3b64c846](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-706097873-metanol-9997-de-pureza-precio-por-litro-_JM?quantity=1#position=1&type=item&tracking_id=0227bd55-6a7c-4081-b5e0-a0be3b64c846) (accessed February 15, 2019).
- [146] Mercado Libre. Precios de hidroxido de sodio n.d. [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-716684947-hidroxido-de-sodio-sosa-en-escamas-saco-25-kg-\\_JM?matt\\_tool=18293428&matt\\_word&gclid=EAlaIQobChMIImK-AguWm5QIVi8VkCh2g4QGTEAYAYABEgI2R\\_D\\_BwE&quantity=1](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-716684947-hidroxido-de-sodio-sosa-en-escamas-saco-25-kg-_JM?matt_tool=18293428&matt_word&gclid=EAlaIQobChMIImK-AguWm5QIVi8VkCh2g4QGTEAYAYABEgI2R_D_BwE&quantity=1) (accessed February 15, 2019).
- [147] Observatorio Laboral. Estadísticas de carreras profesionales por área n.d. <http://www.observatoriolaboral.gob.mx/static/estudios-publicaciones/Ingenierias.html> (accessed July 26, 2019).
- [148] Neuvoo. Salarios de técnico operador n.d. [http://neuvoo.com.mx/salario/?job=Operador Técnico](http://neuvoo.com.mx/salario/?job=Operador%20Tecnico) (accessed September 26, 2019).
- [149] Indeed. Salarios de ayudante general 2019. <https://www.indeed.com.mx/salaries/ayudante-de-producción-Salaries> (accessed September 26, 2019).
- [150] Observatorio Laboral. Estadísticas de carreras profesionales administrativos n.d. <http://www.observatoriolaboral.gob.mx/static/estudios-publicaciones/Administrativo.html> (accessed July 26, 2019).
- [151] Eshton B, Katima JHY, Kituyi E. Greenhouse gas emissions and energy balances of jatropha biodiesel as an alternative fuel in Tanzania. *Biomass and Bioenergy* 2013;58:95–103. doi:10.1016/j.biombioe.2013.08.020.

## Anexos

### Anexo 1

Inventarios de ciclo de vida para el análisis económico

Tabla A 1 Inventario de ciclo de vida de costos del sistema de producción

Costos de la etapa de materia prima para 1 ha en el escenario MR y MRAS		
Descripción	Costo anual (2018)	Fuente
Costo de inversión considera costo de plántulas, limpieza del terreno y siembra de plántulas	\$25,107.33	Datos de la plantación experimental
Costos de operación y mantenimiento considera mano de obra para limpieza de terreno, cosecha de frutos y transporte año 1 y 2	\$2,400.00	Datos de la plantación experimental
Costos de operación y mantenimiento considera mano de obra para limpieza de terreno, cosecha de frutos y transporte a partir de año 3	\$6,600.00	Datos de la plantación experimental
Costo de herramientas y materiales	\$7,000.00	Datos de la plantación experimental

Costos de la etapa de materia prima para escenario BRAS		
Descripción	Costo anual (2018)	Fuente
Costo de inversión considera costo de plántulas, limpieza del terreno y siembra de plántulas	\$25,107.33	Plantación experimental
Costos de operación y mantenimiento considera mano de obra para limpieza de terreno, cosecha de frutos, aplicación de biofertilizante y riego en año 1 y 2	\$10,200.00	Plantación experimental
Costos de operación y mantenimiento considera mano de obra para limpieza de terreno, cosecha de frutos, aplicación de biofertilizante y riego a partir de año 3	\$14,400.00	Plantación experimental
Costo de herramientas y materiales	\$7,000.00	Plantación experimental

Costos de la etapa extracción de aceite		
Descripción	Costo anual (\$ 2018)	Fuente
Costo de inversión considera los costos de maquinaria y equipos	\$698,069.71	[140,141]
Costos de operación y mantenimiento considera mano de obra y costos de electricidad	\$1,838,928.01	[142]
Costo de materiales de almacenamiento de aceite	\$5,069.71	[143]

<b>Costos de la etapa extracción de aceite para el escenario MRAS Y BRAS</b>		
Descripción	Costo anual (\$ 2018)	Fuente
<b>Costo de inversión considera los costos de los equipos</b>	\$698,069.71	[140,141]
<b>Costos de operación y mantenimiento considera mano de obra y costos de electricidad</b>	\$1,838,928.01	[142]
<b>Costo de materiales de almacenamiento de aceite, pasta residual y biomasa</b>	\$13,315.29	[143]

<b>Costos de la etapa producción de biodiesel para todos los escenarios</b>		
Descripción	Costo anual (\$ 2018)	Fuente
<b>Costo de inversión considera los costos de los equipos</b>	\$483,069.71	[144]
<b>Costos de operación y mantenimiento considera mano de obra y costos de electricidad</b>	\$1,207,857.44	[142]
<b>Costos de insumos, metanol e hidróxido de sodio</b>	\$583,277.76	[145,146]
<b>Costos de materiales de almacenamiento de biodiésel y glicerina</b>	\$6,069.71	[143]

## Anexo 2

Inventario de ciclo de vida de empleos para el análisis social

Tabla A 2 Inventario de ciclo de vida de social del sistema de producción

Empleos en la etapa de materia prima				
Actividad	Unidades	Cantidad	Días al año	Fuente
Mano de obra preparación	Jornales/ha	2	17	Plantación experimental
Mano de obra siembra	Jornales/ha	2	6	Plantación experimental
Mano de obra riego escenarios MR y MRAS	Jornales/ha	3	4	Plantación experimental
Limpieza anual del terreno	Jornales/ha	2	6	Plantación experimental
Corte de frutos	Jornales/ha	2	20	Plantación experimental
Mano obra aplicación de riego escenarios BRAS	Jornales/ha	2	5	Plantación experimental
Mano de obra aplicación de biofertilizante escenarios BRAS	Jornales/ha	2	12	Plantación experimental

Empleos en la etapa de extracción de aceite			
Actividad	Perfil	Cantidad	Fuente
Supervisor de planta	Ing. Industrial	2	[147]
Operador de máquinas	Técnico operador	4	[148]
Ayudante general	Ayudante general	4	[149]
Mantenimiento de máquinas	Ing. Mecánico	1	[147]
Administración de la planta	Contador	1	[150]
Ventas	Lic. Mercadotecnia	1	[150]

Empleos en la etapa de producción de biodiésel			
Actividad	Perfil	Cantidad	Fuente
Supervisor de planta	Ing. Industrial	2	[147]
Operador de máquinas	Técnico operador	2	[148]
Ayudante general	Ayudante general	2	[149]
Mantenimiento de máquinas	Ing. Mecánico	1	[147]
Administración de la planta	Contador	1	[150]
Ventas	Lic. Mercadotecnia	1	[150]



### Anexo 3

#### Poder calorífico del biodiésel, aceite y biomasa

Tabla A 3 Poder calorífico de los productos obtenidos en el sistema de producción

Producto	Poder calorífico MJ/kg	Fuente
Biomasa pericarpio	10-17.2	[15,22,132]
Biomasa tegumento	16.5-20	[15,22,151]
Aceite	39.45	Datos propios
Pasta residual de endospermo	28.7	[15,22,132]
Biodiesel	40.64	[132,151]

## Anexo 4

### Artículos publicados



Article

# The Sustainable Cultivation of Mexican Nontoxic *Jatropha Curcas* to Produce Biodiesel and Food in Marginal Rural Lands

Guadalupe Pérez <sup>1</sup>, Jorge Islas <sup>2,\*</sup>, Mima Guevara <sup>2</sup> and Raúl Suárez <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Posgrado en Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Energías Renovables, Privada Xochicalco S/N, Col. Centro, Temixco, Morelos 62580, México; gupem@ier.unam.mx

<sup>2</sup> Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N, Col. Centro, Temixco, Morelos 62580, México; mygg@ier.unam.mx (M.G.); rsp@ier.unam.mx (R.S.)

\* Correspondence: jis@ier.unam.mx; Tel: +52-777-362-0090 (ext. 29719)

Received: 17 September 2019; Accepted: 12 October 2019; Published: 20 October 2019



**Abstract:** The objective of this study is to identify Mexican nontoxic ecotypes of *Jatropha curcas* with potential for a sustainable agriculture practice to produce biodiesel and food products through a methodology and criteria of sustainability. In a rural region of Morelos state in central México, nine Mexican ecotypes of *Jatropha curcas* were evaluated in an experimental plantation with minimal water resources and fertilization. The experimental trial was assessed in terms of (1) toxicity, (2) growth and survival of the plants, (3) yield of seed, (4) residual biomass production, (5) oil characteristics for biodiesel production, (6) nutrimental properties of the seeds, and (7) changes in the chemical properties of the soil. Finally, two outstanding nontoxic ecotypes were identified as the most suitable for the establishment of *Jatropha curcas* crops to produce biodiesel and, at the same time, for food products using the de-oiled endosperm cake, for energy production from the residual biomass and for improvement of soil properties in marginal lands of rural regions of Morelos state.

**Keywords:** *Jatropha curcas*; energy crops; nontoxic ecotypes; morphological growth; oil yield; nutrimental properties; soil improvement

## 1. Introduction

The use of *Jatropha curcas* as a raw material to produce biodiesel has been extensively studied in the last decade [1,2]. The reason why *Jatropha* plants have attracted attention as energy crop is because it is a fast-growing, easy-to-spread, drought-resistant shrub that grows in arid lands [3,4]. These characteristics are beneficial because they avoid competition for land and/or resources for food crops [5], can rehabilitate degraded lands by fixing carbon and improving physical-chemical properties in the soil [6], prevention of erosion [7], as well as providing diverse ecosystem services [8].

However, successful production of *Jatropha curcas* crops has been limited due to low seed production, making commercial plantations unfeasible [9–11]. This is despite that most of the production systems show a positive balance of emissions and energy [12,13].

In order to obtain an added value of the *Jatropha curcas* crops, in addition to the production of biodiesel, the use of the biomass of the plant for energy production purposes has been explored, where the de-oiled seed cake, that is, the pericarp (fruit husks), the tegument (seed husk), and endosperm (core of the seeds) are used for combustion, pyrolysis, gasification and biogas processes [14–17].

On the other hand, the endosperm can be used for food purposes, providing additional value to *Jatropha curcas* crops. Some studies [18–20] reported that the chemical composition of the endosperm has high levels of crude protein content (40–60%) and essential amino acids; in this way, the alimentary use in humans and/or animals may be appropriate.

It should be noted that these food benefits have been limited since the plantations of *Jatropha curcas* have been based on seed varieties with high levels of phorbol esters. These varieties are called “toxic” because phorbol esters are found in concentration ranges of 0.35–2.34 mg g<sup>-1</sup> of oil [21] and 0.60–5.15 mg g<sup>-1</sup> of seed weight [22,23]. Indeed, several studies have demonstrated that phorbol esters are toxic organic compounds due to their strong activity promoting different illness in humans or animals. Although the presence of another substances also influence in the negative nutritional features of the *Jatropha curcas* cakes, the authors consider that phorbol esters are the main toxic compounds [24–26].

For this reason, the toxic seed varieties cannot be used for human and animal consumption; unless the seeds are subjected to a detoxification treatment to remove or inactivate phorbol esters. However, these treatments are currently under development and their scaling, in some cases, is difficult to control [27,28] and fail to reduce the levels of phorbol esters in the seed to acceptable levels for consumption [29,30]. In addition, it has been reported that even at very low concentration levels of phorbol esters in the seed, from 0.4–0.09 mg g<sup>-1</sup>, negative effects in animals have been detected [27].

Mexico is considered the center of origin of *Jatropha curcas* according to Pecina-Qintero et al. [31]. Mexican seed varieties have been classified as “nontoxic” because they do not contain phorbol esters or they are present at a very low concentration (i.e., not detectable at <0.02 mg g<sup>-1</sup> of seed) [21,22,32]. These varieties are located in the states of Veracruz, Hidalgo, Puebla, Yucatán and Quintana Roo where domestication took place by the Mayan and Olmec pre-Hispanic cultures [31]. In some provinces of Quintana Roo and Veracruz the seeds are used in the preparation of traditional dishes [32].

Likewise, the existence of nontoxic varieties has been reported in the state of Morelos in Cuautla and Yautepec municipalities [23,33]. However, these varieties are also distributed in other areas of the state that have not been studied.

Nontoxic *Jatropha curcas* can be consumed by humans and/or animals [18,34], in this way, nontoxic varieties would allow the possibility to obtain food products from de-oiled endosperm in addition to obtaining the oil to produce biodiesel, as well as, to obtain energy from residual biomass and benefits from others sustainable properties of the *Jatropha curcas* crop, such as, soil rehabilitation and the use of marginal lands that not compete with food production. It is important to point out that nontoxic varieties have not been used in commercial plantations nor have been the object of breeding programs, these varieties are only found in natural populations.

Currently, the yield of seed and oil are mainly the most important characteristics that are taken into account to develop strategies to improve *Jatropha curcas* [35–37]. Nevertheless, as discussed in this article, the selection of nontoxic varieties of *Jatropha curcas* could be another important aspect for the formulation of improvement programs and the development of production technology packages, so that *Jatropha curcas* crops can be more comprehensive and sustainable.

According to this vision, the main objective of this study is to identify Mexican nontoxic ecotypes of *Jatropha curcas* with the best potential to establish crops in marginal lands to produce biodiesel and food products in a more integral and sustainable way.

Nine *Jatropha curcas* ecotypes were evaluated in an experimental plantation in marginal soils and a scenario of minimum resources to know the development of these plants in lands that are no used for growing food. These ecotypes were analyzed to determine the phorbol ester content in their seeds in order to determine their toxicity and thus be able to select nontoxic ecotypes (see Nontoxicity Test section).

The aspects evaluated in the selected nontoxic ecotypes were the following: (1) morphological growth and survival plants, (2) yield of seed production, (3) yield of residual biomass and (4) oil content. The physicochemical properties of the oil of those ecotypes that showed better growth characteristics and a higher yield in seed and oil were analyzed to determine if its quality was suitable for the biodiesel production.

Moreover, these ecotypes were subjected to a bromatological analysis of the endosperm of the seed to know if the nutritional value was suitable for food purposes. Finally, changes in the soil were

analyzed in order to know if there was an improvement of the soil chemical properties where the selected ecotypes were grown.

## 2. Materials and Methods

### 2.1. Study Site and Plant Material

An experimental *Jatropha curcas* plantation was established in Miacatlan, a rural municipality from Morelos state, Mexico (latitude 18° 47' 43.3" N, longitude 99° 21' 0.40" W) at 1000 m a.s.l., as shown in the map in Figure 1.



Figure 1. Location of the *Jatropha curcas* experimental plot in Morelos, Mexico.

The climate of the site is hot-humid with rainy season in summer. For a period of nine years (2009–2018), an average temperature of 23.7 °C was recorded, reaching the maximum temperature of 36.2 °C in May and minimum temperature of 13.1 °C in January. The annual average rainfall was 1020.8 mm, with the highest value between the months of June–October with 908.9 mm and the regime with the highest amount of evaporation in the March–May period, as shown in Figure 2.

The plantation was developed on a marginal land that was previously used for agricultural activities. The soil properties, prior to the planting of the ecotypes, showed a medium level of organic matter and low levels of nutrients availability with slightly alkaline clay soil texture with pH = 7.6.

In the experimental plot, 569 plants of nine *Jatropha curcas* ecotypes distributed in nine microparcels were planted, having at least 60 plants for each ecotype.

The field methodology involved a selection of seeds from the Mexican states of Michoacán, Morelos and Oaxaca to obtain germplasm of *Jatropha curcas* by generative propagation, direct seeding.

Seed germination was carried out under controlled laboratory conditions and the obtained seedlings remained in the nursery for three months. Subsequently, transplanting of the seedlings was made at the experimental plot in pits of 0.4 m × 0.4 m × 0.4 m and spacing of 2 m × 2.8 m, keeping the spacing between plant to plant constant, resulting in a crop density of 1250 plants per hectare.

Each ecotype was identified with an alphanumeric ID code for recognizing the location at the experimental plot—E1M, E2M, E3M, E4M, E5M, E6O, E7O, E8O and E9C—.

The cultivation system established was of minimum resources with low intensity of management. Fertilizers were used only once during the transplant process by adding a compost mix to each pit. The irrigation of the plantation was carried out through natural rain. The auxiliary irrigation was used only for three months, after having performed the transplant, pouring 20 L of water per plant every fortnight. For the control of pests and diseases, no insecticides or fungicides were used.

Under the described conditions, the selection of ecotypes was carried out following the methodology in Figure 3.

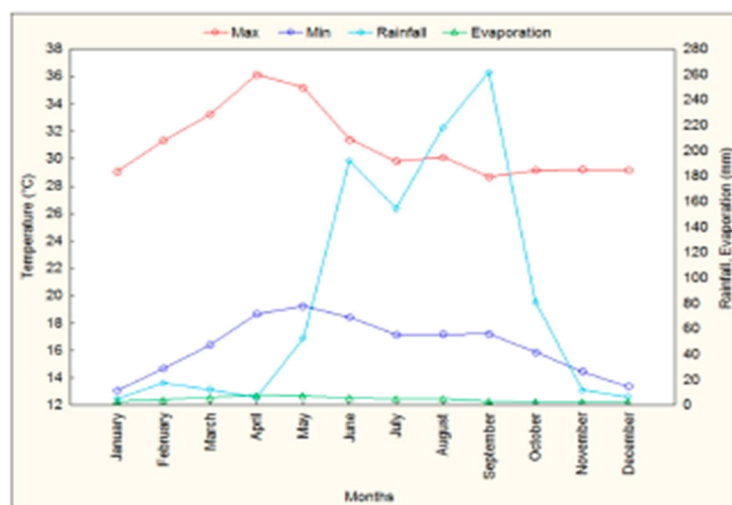


Figure 2. Monthly averages of climatic parameters at the experimental plot for period of study (2009–2018).

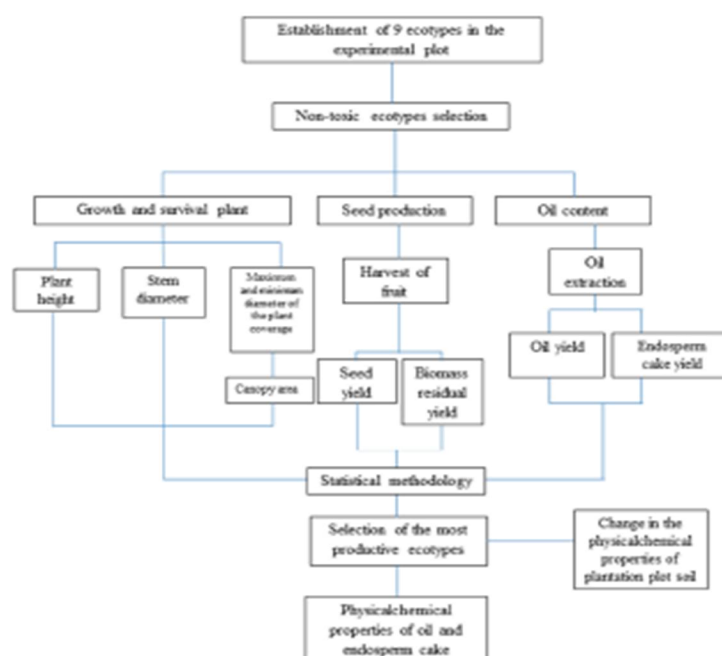


Figure 3. Methodology evaluation of nine ecotypes of *Jatropha curcas* in the experimental plot.

## 2.2. Nontoxicity Test

The identification of toxic and nontoxic ecotypes was accomplished by estimating the concentration of phorbol esters in the oil.

HPLC analysis was carried out—LC/MS instrument 1100, Agilent—based on the modified method of Haas et al. [38]. For each ecotype of *Jatropha curcas*, 1.5 g of oil was weighted on an electronic balance and diluted with 5 mL of ether. Samples were treated with a solid phase extraction device. The silica column was activated and conditioned with ether. The samples were poured and washed with 5 mL of ether and 3.5 mL of acetone, to eliminate the column interferences or contaminants. The final step was the phorbol esters elution performed with 5 mL of methanol and 5 mL of ethanol. Methanol and ethanol were evaporated and the sample was diluted with 2 mL of acetonitrile for HPLC analysis. The quantitative analysis was performed following the same method, but with the addition of 40  $\mu\text{L}$  of phorbol 12-myristate 13-acetate (SIGMA) of known concentration— $0.005 \text{ mg } \mu\text{L}^{-1}$  as the reference standard.

The samples were collected from the reverse phase column Agilent Eclipse XDB C18 ( $5 \mu\text{m} \times 4.6 \text{ mm}$ ). The separation conditions were: flow rate of  $1 \text{ mL } \text{min}^{-1}$ , mobile phase 75/25 acetonitrile–water, and isocratic mode.

The ecotypes in which the presence of phorbol esters was not detected were selected to evaluate their performance according to the data obtained from the experimental plantation.

## 2.3. Growth and Plants Survival

Once the plantation was established, the growth parameters of the *Jatropha curcas* ecotype were permanently monitored. The measurements of basic biophysical parameters included the plant height or vertical distance from the ground level to the highest green plant, the stem base diameter (the cross-section of the stem at the apex height), and the maximum and minimum diameter of the plant coverage. With these parameters, the canopy area was calculated assuming an ellipsoidal shape as the best approximation to the shape of the plants.

Measurements were collected at the experimental plantation on an annual basis starting in July 2009 through July 2013 and the last measurement was carried out in July 2018, when the plants were nine years old. All data were recorded systematically in a database [39] for its subsequent processing.

Finally, the plant account was registered and the plant survival rate under the site environmental conditions was calculated using the number of plants surviving at the end of July for the years of 2009, 2011, 2012, 2013 and 2018.

## 2.4. Seed, Biomass and Oil Production

The yield in seed production of the nontoxic ecotypes was analyzed in the 8th and 9th years of age of the plants.

The fruits in mature state were collected individually of each plant in the months of August and September for the years 2017 and 2018. The weight of the fruits collected was registered to estimate the yield of fruit production.

Afterwards, the fruits were dried outdoors and cleaned manually by separating the pericarp and the seeds at a humidity of 14.1% for the pericarp and 8.1% in the seeds. The percentage of composition of the seeds and the pericarp with respect to the weight of the fruit was calculated to estimate the yield per hectare of seed and biomass of the pericarp.

Finally, ten samples of 100 g of seed were prepared by ecotype. The tegument and the endosperm were manually separated from the seed. The composition percentage of the endosperm and tegument with respect to the weight of the seeds was calculated to estimate first the yield of endosperm later the tegument biomass per hectare. In this way, the yields of the pericarp and tegument biomass were added to obtain the total yield of residual biomass per hectare.

In addition to the above, the oils were extracted directly from endosperm by means of a mechanical cold pressing process, using a hydraulic press specially designed for this study. The oil was extracted from the endosperm samples at a humidity of 6.1%, separated from the solid particles of the oil and subsequently filtered. The yield of oil content was calculated as:

$$\% \text{ of oil} = \frac{\text{Weight of oil extracted (g)}}{\text{Weight of the seed sample (g)}} \times 100 \quad (1)$$

The oil obtained was collected and stored in the laboratory for further analysis. With the percentage of oil extraction and the seed production potential, the potential for oil production per hectare was estimated.

The endosperm cake—the extruded endosperm resulting from oil extraction—was weighed to calculate the endosperm cake yield in the following way:

$$\% \text{ of endosperm cake} = \frac{\text{Weight of the extruded endosperm (g)}}{\text{Weight of the seed sample (g)}} \times 100. \quad (2)$$

In the same way as oil, the endosperm cake production potential per hectare was estimated.

## 2.5. Statistical Analysis

The data was analyzed using a statistical approach. Some statistical tests were applied in order to find patterns, identify similarities or differences among the nontoxic *Jatropha curcas* ecotypes selected for this study. The methodology involved (i) a comprehensive review of all data collected in the field to avoid data entry mistake; (ii) plotting of histograms to see whether data were normally distributed; (iii) analysis of outliers for identifying discordant outliers, and (iv) application of ANOVA and Tukey HSD (Honestly-significant-difference) significance tests to compare core trend parameters against the set of normal data. The tests for outliers and the significance tests were all applied at 95% confidence level and a 0.05 significance level.

## 2.6. Endosperm and Oil Characterization

The nontoxic ecotypes with the best results in growth, survival and yield of seed and oil were selected to analyze the physical–chemical properties of oil and endosperm.

Regarding the oil, the physical properties analyzed were: (a) the density of the oil (at 15 °C), determined with an Anton Paar DMA 500 densimeter; (b) the viscosity (at 40 °C), determined with a Brookfield AMETEK MINIVIS II viscometer; and (c) the calorific value obtained by means of a 6400 Automatic Isoperibol Calorimeter from Parr Instruments Company. The composition of fatty acids was the only chemical property analyzed; this was determined by means of gas chromatography using the AOAC (Association of Official Agricultural Chemists) methodology (2005) for preparation of the fatty acid methyl esters (969.33) and their separation, by gas chromatography (963.22).

As for the endosperm, this was subjected to a bromatological analysis to determine the content of proteins, crude fiber, available carbohydrates, total reducing sugars, ash and energy content, using the methodology of national standards NMX-NORMEX (Mexican Standard of Mexican Society of Standardization and Certification) and NOM (Mexican Official Standards), under the specific AOAC regulations for cereal-seeds-oleaginous.

## 2.7. Soil Analysis

To monitor changes in soil physical–chemical properties, two measurements of soil fertility of the experimental plot were carried out: (1) prior to the planting of the *Jatropha curcas* seedling (year 2008); and (2) at nine years of the plants (year 2018).

The soil analysis was performed according to the official Mexican standard NOM-021-SEMARNAT-2000. Soil samples were collected in the cultivation area; each soil sample was

obtained from five random points of the cultivation area at 0.3 m depth. The proportional part of organic matter was determined by the Walkley and Black methodology. Inorganic nitrogen was determined by steam drag using the Kjeldahl method; the phosphorus concentration was established by the Olsen method and the potassium concentration was determined by flame emission spectrophotometry.

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Growth and Survival of Non-Toxic Ecotypes

Table 1 shows the names and provenance of the ecotypes, as well as the results of the phorbol ester concentration determination. In the ecotypes E1M, E2M, E3M, E4M and E5M, the presence of phorbol esters was not detected. For this reason, these varieties of *Jatropha curcas* are identified as nontoxic.

**Table 1.** Codes, origin of *Jatropha curcas* ecotypes provenances and level of phorbol ester in seed oil.

Ecotypes	Origin States	Phorbol Ester Content <sup>1</sup> (mg mL <sup>-1</sup> )
E1M	Morelos	Not-detected
E2M	Morelos	Not-detected
E3M	Morelos	Not-detected
E4M	Morelos	Not-detected
E5M	Morelos	Not-detected
E6O	Oaxaca	1.5
E7O	Oaxaca	0.9
E8O	Oaxaca	1.3
E9C	Michoacán	0.6

<sup>1</sup> Phorbol ester concentration in oil was assessed according method of Haas et al. 2002.

These results agree with previous reports of seeds of genotypes of *Jatropha curcas* from the southeastern part of the country where phorbol esters are not detected and seeds are consumed by people [22,23].

On the contrary, the remaining ecotypes: E6O, E7O, E8O and E9C are identified as toxic since they presented a concentration of phorbol esters at levels of 0.6–1.6 mg g<sup>-1</sup> of oil, typical value of *Jatropha curcas* genotypes toxicities reported by the authors of [21].

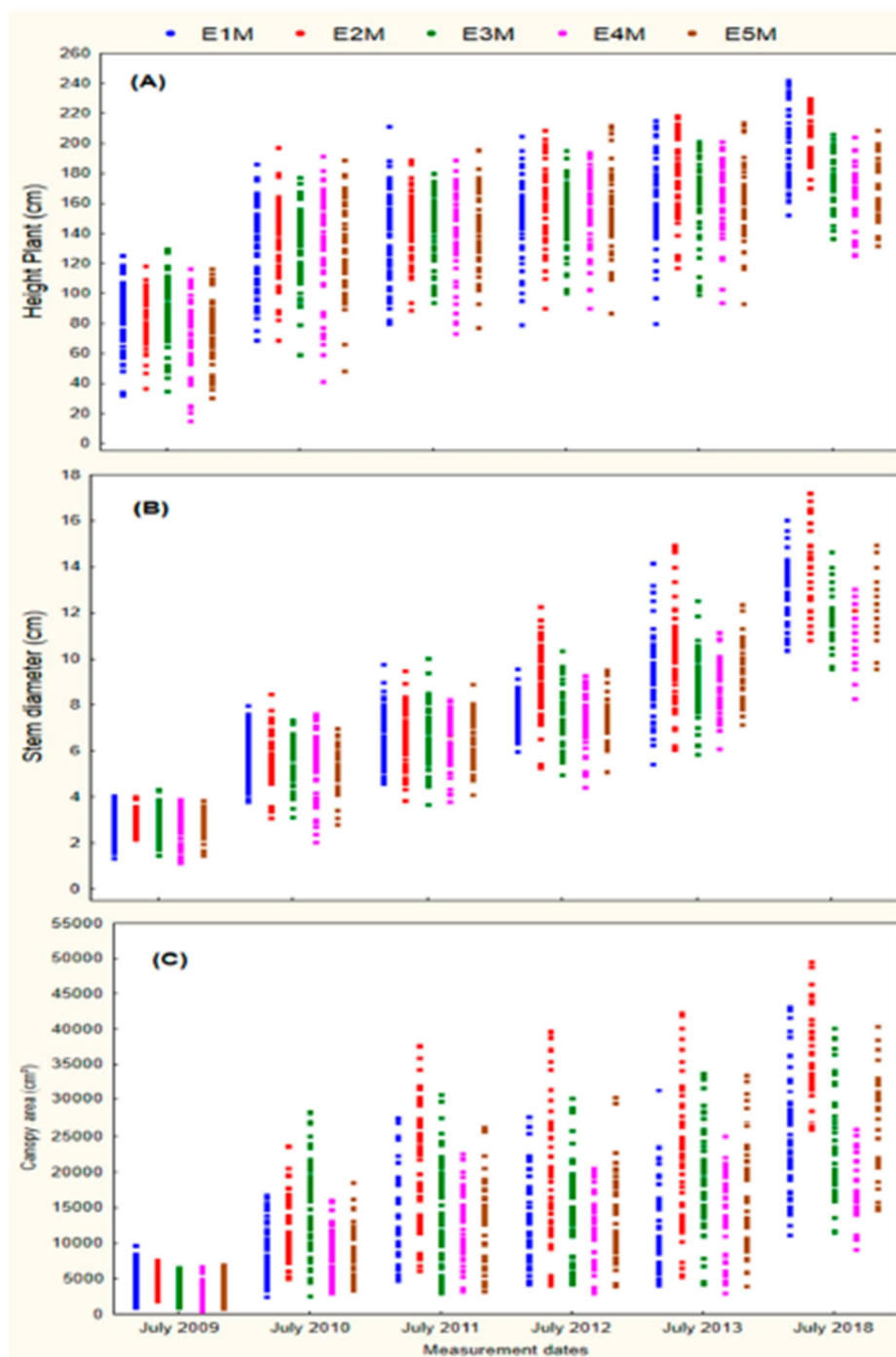
Consequently, these nontoxic ecotypes of *Jatropha curcas* in addition to obtain the oil, the residual endosperm cake from the extraction of the oil could be a second valuable product that can generate additional economic benefits.

The measurements of biophysical parameters of nontoxic ecotypes E1M, E2M, E3M, E4M and E5M, are presented in Figure 4. All ecotypes showed a similar growth trend throughout the study. The plants of the E1M and E2M ecotypes showed good growth during their first months of life in the experimental plot and continued with this tendency at the end of the study, reaching the plants with the highest growth.

Table S1 displays the measurement of average growth and standard deviation in plant height, stem diameter and canopy area of the nontoxic ecotypes. Likewise, significant statistical differences are present according to the ANOVA test ( $p \leq 0.05$ ): (A) the highest growth; (AB) high growth; (B) average growth; (BC) low growth; and (C) the lowest growth.

According to Figure 4 and Table S1, an increase in the height dimensions of the plant is observed during the measurements made in July of the years 2009 and 2010 while the increase was lower in subsequent measurements made in the years 2011, 2012, 2013 and 2018.





**Figure 4.** Measurements of biophysical parameters for plant growth in the study site along nine years (2009–2018). (A) Height of plant, (B) stem diameter, (C) canopy area.

In the first measurements made in July 2009, all ecotypes showed significant differences in plant height, the E2M ecotype recorded the highest growth while the E4M and E5M ecotype showed the lowest growth. Subsequently, in the measures recorded in July 2010, 2011 and 2012, all the ecotypes

maintained similar plant growth without significant differences between them. In the measurements made in July 2013, the E2M again obtained the highest growth showing significant differences with respect to the remaining ecotypes. In the last measurements made in July 2018, the E1M plants presented an increase in plant height ending at a similar height to the E2M plants. At the end of the study, the E1M and E2M ecotypes showed the greatest growth in plant height.

With respect to stem diameter growth, the dimensions showed a constant increase throughout the monitoring period. The measurements from July 2009–July 2011 showed similar growths in all the ecotypes without presenting significant differences. From the measurements made in July 2012 until 2018 there were significant differences between the ecotypes, the E2M plants were those with the highest average growth followed by the E1M plants.

The differences in the average growth of the ecotypes were more evident in the parameter of canopy area, since throughout the study there were significant differences in all the ecotypes. In the same way as in the parameters of plant height and stem diameter, the dimensions of plant coverage showed marked increases from the measurements of July 2010–July 2018. Throughout the study, E2M also showed the highest growth in this parameter.

At the end of the monitored period, the average value of all the data obtained in plant height was  $162.5 \pm 16.9$ – $203.5 \pm 28.9$  cm, stem diameter  $11.0 \pm 1.2$ – $14.3 \pm 2.3$  cm and canopy area at  $18,804.7 \pm 5526.6$ – $39,072.9 \pm 10,521.0$  cm<sup>2</sup>.

In summary, the plant height growth by ecotype in ascending order was: E4M > E5M > E3M > E2M > E1M; for stem diameter is: E4M > E3M > E5M > E1M > E2M; and for the canopy area is: E4M > E3M > E5M > E1M > E2M. As can be seen, the E1M ecotype presented the highest growth in plant height and the E2M presented the highest growth in stem diameter and canopy area.

Regarding the survival of the plants, Figure 5 shows the survival tendency of the ecotypes.

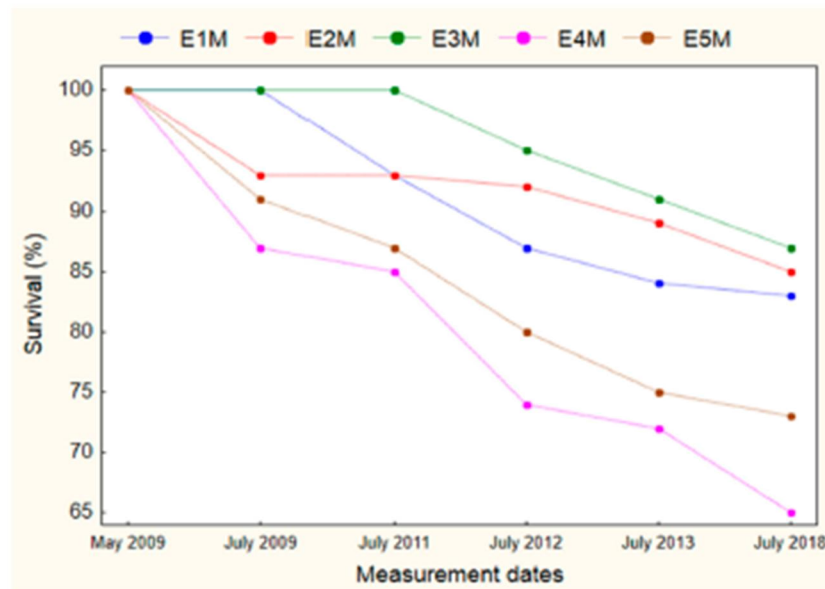


Figure 5. Plant survival rate by ecotype in the studied site.

All the ecotypes maintained 100% survival of plants in the first months after the plants were planted until the first measurements made in May 2009, indicating a good adaptation to the conditions of the experimental plantation. However, in the second measurement carried out in July 2009, at four months of age of the plants in the experimental site, the loss of plants was almost 10% for the E2M and E5M ecotypes and 13% for the E4M ecotype.

In the measurements made in July 2012, at the third year of age of the plants, the greatest loss of plant occurred due to the presence of the borer pest (*Diatraea saccharalis*), mainly affecting the E4M and E5M ecotypes.

Finally, among the measurements made in July 2013 and 2018, the loss of plants was minimal for the E1M, E2M and E5M ecotypes, while the E3M and E4M ecotypes showed a higher percentage of plant loss. However, in the last monitoring year, July 2018, the E3M ecotype showed the highest survival percentage with 87% followed by the E2M and E1M ecotypes with 85% and 83%, respectively, while the E4M and E5M ecotypes presented the lowest percentage of 65% and 73%, respectively.

### 3.2. Yield in the Production of Seeds, Biomass and Oil Content

Table 2 presents the production of seeds and biomass; two harvests of *Jatropha curcas* fruits were analyzed to estimate seed production. The first harvest of ripe fruit was made at 8 years of age of the plants, in the months of August and September in the year 2017. The highest fruit production was presented in the ecotypes E1M and E2M, for this reason the second harvest of fruit of the year 2018 was made only in these ecotypes.

The production of ripe fruits was varied. According to the ANOVA and Tukey test ( $p \leq 0.05$ ), two groups with significant differences were shown. In the first group, the E2M and E1M ecotypes with the highest fruit production per plant were identified, the E2M ecotype with a yield of 0.81-kg plant and the E1M ecotype with 0.75-kg plant (see Table 2, column 2, letter A). In the second group, the ecotypes with the lowest productions were shown, E5M with 0.37-kg plant, E3M with 0.24-kg plant and E4M with 0.10-kg plant (see Table 2, column 2, letter B).

Consequently, the E2M and E1M ecotypes showed the highest fruit production per hectare with a potential of 1021 kg ha<sup>-1</sup> for the E2M ecotype 946 kg ha<sup>-1</sup> for the E1M ecotype considering the cultivation density of 1250 plants per hectare as is shown in Table 2, column 2.

It is important to mention that the amount of seeds contained in the fruit of *Jatropha curcas* varies between 3 and 4 units. The weight of the seeds represented between 64.1% and 70.3%, while the weight of the pericarp (fruit husk) represented between 29.7% and 35.9%, of the total weight of the fruits (see Table 2, columns 3 and 4).

In this way, the yield of seeds per plant in the ecotypes with the highest fruit production was 0.56 kg for the E2M ecotype and 0.49 kg for the E1M ecotype with a seed yield per hectare of 700 kg and 618 kg, respectively. The E5M, E3M and E4M ecotype presented the lowest yield of seeds per plant with yield of 0.25 kg, 0.17 kg and 0.06 kg, as well as the production potential per hectare of 318 kg, 213 kg and 74 kg, respectively (see Table 2 column 5).

Under a production scenario without irrigation and without the application of fertilizer and in conditions of precipitation and temperature similar to those presented in this study, the authors of [40] reported an elite variety of *Jatropha curcas* native to India that recorded yields of between 858.3 kg ha<sup>-1</sup> and 922 kg ha<sup>-1</sup>, in the city of Bhavnagar, and between 69.4 kg ha<sup>-1</sup> and 58.6 kg ha<sup>-1</sup>, in the city of Hyderabad, both plantations with a spacing of 2.5 m × 2.5 m.

The seed production per plant of the ecotypes identified as the most productive, E2M and E1M, is higher than the production reported Naresh et al. [41] in the city of Hyderabad, where its four best varieties produced between 0.24-kg plant and 0.39-kg plant.

So, if the nontoxic property is taken into account in terms of the seed yields of E1M and E2M ecotypes, these are attractive to promote programs of crop improvement in order to increase their seed production to produce biodiesel and benefit of the nontoxicity of these ecotypes to have the possibility to produce food products.

**Table 2.** Seed yield and biomass of nontoxic *Jatropha curcas* ecotypes. Same letters mean there are not significant differences according to ANOVA and Tukey test ( $p \leq 0.05$ ).

Ecotypes	Fruit Yield		Seed wt <sup>2</sup> (% of Fruit)	Pericarp wt <sup>2</sup> (% of Fruit)	Seed Yield		Pericarp Yield	Endosperm Yield		Tegument Yield	Total Residual Biomass <sup>3</sup> kg ha <sup>-1</sup>				
	kg/Plant	kg ha <sup>-1</sup>			kg/Plant	kg ha <sup>-1</sup>		Endosperm wt (% of Seed)	kg ha <sup>-1</sup>			Endosperm wt (% of Seed)	kg ha <sup>-1</sup>		
E1M	0.75 <sup>1</sup>	± 0.26 A	65.3	34.7	± 4.9	0.49	618	329	60.5	± 0.5 A	376	39.2	± 0.6 B	243	571
E2M	0.81 <sup>1</sup>	± 0.39 A	68.5	31.5	± 2.9	0.56	700	322	58.8	± 1.0 AB	411	41.5	± 0.9 AB	290	612
E3M	0.24	± 0.06 B	70.3	29.7	± 1.2	0.17	213	90	55.5	± 4.3 B	118	44.5	± 4.3 A	95	185
E4M	0.10	± 0.01 B	64.1	35.9	± 3.7	0.06	74	43	58.3	± 2.7 AB	43	41.9	± 2.7 AB	31	74
E5M	0.27	± 0.08 B	69.4	30.6	± 0.7	0.25	318	140	58.3	± 1.1 AB	185	41.9	± 1.2 AB	133	274

wt = weight. <sup>1</sup> Fruit production average harvested in 2017 and 2018. <sup>2</sup> % of weight fruit on a dry basis. <sup>3</sup> Sum of pericarp and tegument yield.

Regarding other features of the *Jatropha curcas* production, the endosperm represents 55.8–60.5% of the weight of the seed, as is shown in Table 2, column 7. According to the ANOVA and Tukey tests ( $p \leq 0.05$ ), there are significant differences between the ecotypes with higher and lower percentage of endosperm. The weight percentage of the endosperm is higher in the E1M with 60.5% of the weight of the seed than for the E2M with 58.8% of the weight of the seed and its potential for endosperm production per hectare is 411 kg ha<sup>-1</sup> for E2M and 376 kg ha<sup>-1</sup> for the E1M.

The pericarp and tegument are biomass that covers the seed and the endosperm, respectively; they are not considered a relevant product. However, the weight of both biomasses represents 60% of the weight of fruit production so this percentage suggests that it is important to consider this biomass as another valuable product of *Jatropha curcas* crops. According to the authors of [2], the pericarp and tegument biomass could be appropriate supply for pyrolysis and gasification to generate heat and/or power.

In the most productive ecotypes, E2M and E1M, they present a pericarp and tegument biomass yield of 612 kg ha<sup>-1</sup> and 570 kg ha<sup>-1</sup> respectively (see Table 2, column 9).

The Table 3 shows the oil yields obtained by mechanical extraction and the average oil content was 44.8–52.2% with respect to the weight of the endosperm of the seed and from 26.1–31.5% with respect to the total weight of the seed (weight of tegument and endosperm).

**Table 3.** Oil content and endosperm cake yield of nontoxic *Jatropha curcas* ecotypes. Same letters mean there are not significant differences according to the ANOVA and Tukey tests ( $p \leq 0.05$ ).

Ecotypes	% Oil in Endosperm		Oil Yield <sup>1</sup>			Endosperm Cake Yield					
	% Oil in Endosperm	% Oil in Seed	% Oil in Seed	kg ha <sup>-1</sup>		% Endosperm with Oil Removed	kg ha <sup>-1</sup>		kg ha <sup>-1</sup>		
E1M	52.2	31.5	+ -	2.5	A	196	47.8	+ -	2.5	B	180
E2M	46.5	27.3	+ -	1.5	B	191	53.5	+ -	1.5	A	220
E3M	51.6	28.6	+ -	3.8	AB	61	48.4	+ -	3.8	B	57
E4M	50.4	29.4	+ -	1.7	AB	22	49.6	+ -	1.7	A	21
E5M	44.8	26.1	+ -	1.1	B	83	55.2	+ -	1.1	A	102

<sup>1</sup> % of weight endosperm with tegument on dry basis.

According to the ANOVA and Tukey tests ( $p \leq 0.05$ ), there were significant differences between the ecotypes with higher and lower percentage of oil extraction. The E1M presented the highest percentage of oil extraction with 52.2% with respect to the weight of the endosperm and 31.5% with respect to the weight of the seed, while E2M presented a low yield of 46.5% with respect to the weight of the endosperm and 27.3% with respect to the weight of the seed, as is shown in Table 3, column 2.

This way, the oil extraction yields obtained in these ecotypes are in the range of the percentages reported for different varieties of *Jatropha curcas*; from 45–70% by weight of oil with respect to the weight of the endosperm and 20–50% as a function of the seed weight [2]. In the same way as in the oil extraction yield, the E1M ecotype has the highest oil yield of 196 kg ha<sup>-1</sup> followed by the E2M ecotype with 191 kg ha<sup>-1</sup>.

On the other hand, the residual endosperm cake—the extruded endosperm resulting from the oil extraction—is higher for the E2M ecotype, with 53.5% of the endosperm weight with an endosperm cake yield of 220 kg ha<sup>-1</sup>; and in the E1M ecotype the endosperm cake represent 47.8% of the weight of the endosperm and a potential of 180 kg ha<sup>-1</sup> (see Table 3, column 3). The endosperm cake percentage is similar to the reported by Naresh et al. [41], which is between 49–58%.

As can be seen, the endosperm cake percentage of these ecotypes is a high amount of waste that could be used to produce food products especially in nontoxic *Jatropha curcas* varieties.

Finally, since the E1M and E2M ecotypes showed the best growth result of biophysical parameters, productivity and seed yield, an analysis of the physicochemical properties of the oil and endosperm of these ecotypes was carried out to determine if they are a suitable raw material to produce biodiesel in the case of oil, and the possible use for food in the case of the endosperm.

### 3.3. Oil Physicochemical Properties

The physicochemical features of the fatty acids from E1M and E2M ecotypes are presented in Table 4. For the two ecotypes, the density and the specific gravity of the oil, at 15 °C, the value is 0.91 g cm<sup>-3</sup>. Indeed, the oil should have a low density for the biodiesel production. In case of the oil obtained from E1M and E2M, the density is slightly higher considering the result of 0.90 g cm<sup>-3</sup> as reported by Coutinho et al. and Helwani et al. [42,43]. However, our results are similar to those reported by Kamel et al. [44].

**Table 4.** Physical properties, fatty acids composition of the oil and chemical composition of endosperm of nontoxic ecotypes E1M and E2M.

Physicochemical Property			E1M	E2M	
Oil	Density at 15 °C (g cm <sup>-3</sup> )		0.919	0.918	
	Specific gravity at 15 °C		0.919	0.919	
	Viscosity at 40 °C (cSt)		31.88	31.66	
	Calorific value (MJ kg <sup>-1</sup> )		39.45	39.47	
	% fatty acid content	Myristic	C14:0	0.217	0.226
		Palmitic	C16:0	10.216	11.215
		Palmitoleic	C16:1	0.415	0.582
		Stearic	C18:0	8.951	7.497
		Oleic	C18:1	42.174	40.169
		Linoleic	C18:2	36.763	39.359
		Linolenic	C18:3	0.318	0.243
		Others		1.362	0.711
	Total saturated		19.725	19.474	
Total unsaturated		80.127	80.352		
Endosperm	Crude protein <sup>1</sup> (%)		21.7	26.0	
	lipid <sup>2</sup> (%)		60.9	63.3	
	ash <sup>3</sup> (%)		3.0	2.9	
	Crude fiber <sup>4</sup> (%)		10.7	4	
	Dietary fiber <sup>2</sup> (%)		36.3	34.2	
	Gross energy <sup>5</sup> (MJ kg <sup>-1</sup> )		27.3	28.7	

<sup>1</sup> Assessed according NMX-F-608-NORMEX-2011; <sup>2</sup> NOM-086-SSA1-1994; <sup>3</sup> NMX-F-607-NORMEX-2013;

<sup>4</sup> NMX-F-613-NORMEX-2003; <sup>5</sup> NOM-051-SCFI/SSA1-2010.

Certainly, the viscosity of the oil of the ecotypes E1M and E2M at 40 °C is similar in both samples, 31.88 cst and 31.66 cst, respectively. These results indicate that the oil from these ecotypes has good quality considering the recommendation of 34–42.88 cst by the authors [41,42,44], due to a low oil viscosity is preferable to obtain suitable properties in the biodiesel for its use in engines.

The oil of both ecotypes also shows values of calorific power desirable to produce biodiesel. The calorific power of both ecotypes of 39.4 MJ kg<sup>-1</sup>, is higher than the values reported in [45,46] of 37.1 MJ kg<sup>-1</sup> and 38.5 MJ kg<sup>-1</sup>.

The composition of the oil is similar among the ecotypes, presenting a high proportion of unsaturated fatty acid, 80.1% and 80.3%, respectively. Oleic acid is the most predominant with 42.1% and 40.1% followed by linoleic acid with 36.7% and 39.3%, respectively.

The composition of saturated fatty acids is 19.7% and 19.4% with a higher proportion of palmitic acid 10.2% and 11.2%, followed by stearic acid 8.9% and 7.4%, respectively. These results are in accordance with the scientific literature where oleic, linoleic, palmitic and stearic

fatty acids are the most abundant in *Jatropha curcas* oil, with oleic acid the highest proportion [47,48]. This composition is also presented in other varieties studied in Mexico by Martínez-Herrera et al. and Sánchez-Arreola et al. [20,33].

Indeed, it is expected that the high content of monounsaturated fatty acids provides quality to biodiesel; according to author of [48] these compounds allows improving the number of cetane in biodiesel and can offer a strong effect on oxidation stability and the shelf life of oil and biodiesel.

### 3.4. Endosperm Chemical Properties

The chemical composition of the endosperm is presented in Table 4; the crude protein content is higher in the E2M ecotype with 26.0% of crude protein while for the ecotype E1M the crude protein content was 21.7%.

The crude protein composition of the E2M ecotype is within the range of 23.7–27.2%, reported for varieties from different parts of the world [49], as well as, that reported for Mexican varieties, from 23.2–31.9% [23,32,50].

Although the crude protein content of the E2M and E1M ecotypes is lower than that reported for the Morelos state varieties; 32.1% for the municipality of Yautepéc and 29.7% for the municipality of Cuautla [23,33], it is comparable with the crude protein content of other food such as rapeseed (19%), karanja (22%), sesame (25.2%), squash (26.5%), sunflower (23%) and peanut (26%).

Regarding total fats the percentage for the ecotypes E2M is 63.3% and for the ecotype E1M it is 60.9%; these percentages are higher than those of other varieties in different parts of the world that are between 42.9–59.0% [49] and in relation to the Mexican varieties that are in the range of 51.1–64.5% [23,32,33]. The content of total fats is also higher than the values reported in the varieties of the municipalities of Yautepéc (55.3%) and Cuautla (58.7%), in the state of Morelos.

The crude fiber content is higher in E1M with 10.7% and 4% for E2M. The crude fiber content of the E1M is higher than other varieties of the world of 3.8–6.1% [49] and in relation to the Mexican varieties that have percentages of 2.8–5.3% [23,33].

The fiber content of E2M is similar to that reported in the Cuautla, Morelos variety with a value of 4% and higher than the value reported in Yautepéc, Morelos variety of 3.1%.

The ecotypes had a high content of dietary fiber; of 34% for the E2M ecotype and 36.2% for the E1M ecotype. These contents have not been reported in other studies.

The ash content was similar for both ecotypes; 2.9% for E2M ecotype and 2.8% for E1M ecotype. These values are below than reported range for varieties from different parts of the world ranging from 3.4–5.0% [49] and from Mexican varieties from 3.6–5.8% [23,32,33].

The gross energy content in the endosperm is greater in the E2M ecotype ( $28.7 \text{ MJ kg}^{-1}$ ) than in the E1M ecotype ( $27.3 \text{ MJ kg}^{-1}$ ). The energy content provided by these ecotypes is slightly lower than those reported for varieties from different parts of the world that are between  $28.9\text{--}31.2 \text{ MJ kg}^{-1}$  [49], although they are among the values reported in Mexican varieties from  $26.5\text{--}31.6 \text{ MJ kg}^{-1}$  [23,33].

In summary, the levels of crude protein, crude fiber, lipids and energy suggest that the endosperm of the seeds of the E1M and E2M ecotypes have adequate characteristics to be a good source of protein for human or animal consumption. In this way, the extruded endosperm from oil extraction can be a product with a significant economic value.

### 3.5. Changes in the Chemical Properties of the Soil

A poor soil in organic matter cannot support a healthy growth of any plant life. For this reason, increasing the organic matter in the soil composition certainly improves the quality and the availability of plant nutrients. Otherwise, the presence of organic matter in the soil is an important factor for a higher and better productivity of *Jatropha curcas*.

The changes in the physicochemical properties of the soil of the experimental plot are reported in Table 5. In all the monitored years, the percentage of clay was dominant in the texture of the soil,

followed by silt and, in a lower percentage, sand. Being a clay soil, this was beneficial for *Jatropha curcas* plants, because clay soil can retain water and nutrients.

**Table 5.** Soil properties of the experimental plot, before planted the seedling (2008) and nine years after plantation (2018).

Physical and Chemical Properties		2008	2018
Texture	Sand (%)	25	18
	Silt (%)	23	25
	Clay (%)	52	57
	pH	7.6	7.9
	EC (dS/m)	0.5	0.4
	OM (%)	2.8	3.5
	N av (mg/kg)	6.0	9.1
	P av (mg/kg)	7.0	10.7
	K av (mg/kg)	216.0	364.0

EC: Electrical conductivity, OM: Organic matter content, N av: available Nitrogen, P av: available Phosphorus, K av: available Potassium.

In relation to the pH of the soil, initially, the pH was 7.6 and at the end of the study it was 7.9 in such a way that, according to the reference values of NOM-021-SEMARNAT-2000, the pH of the soil maintained slightly alkaline values throughout the study period.

In the same way, the electrical conductivity (CE) maintained values of low salinity; starting at 0.5 ds m<sup>-1</sup> and ending at 0.4 ds m<sup>-1</sup>, so that the decrease of C.E was not substantial.

In the composition of organic matter (OM) an increase was observed in the monitored years. In the first measurement of the year 2008 the value of OM was 2.8%, increasing by 20% for the last year of study, to finish with 3.5% of OM. The increase in the content of organic matter is influenced by plant residues of the leaves of the *Jatropha curcas* plants that fell to the ground during the dormancy period as well as the grass and grass residues that grew in the experimental plot.

The OM composition of the experimental plot soil was maintained in medium range of %OM, from 1.6–3.5%, according to the reference values of NOM-021-SEMARNAT-2000. However, the percentage of MO at the end of the study was placed at the limit value to move to the high %OM classification, 3.6–6.0%.

The macronutrients showed increases throughout the study, nitrogen (N) and potassium (K) showed a considerable increase between the first and second measurement, going from 6.0 mg kg<sup>-1</sup> to 9.1 mg kg<sup>-1</sup> of N and 216 mg kg<sup>-1</sup> to 364 mg kg<sup>-1</sup> of K. According to the reference value of NOM-021-SEMARNAT-2000, the concentration of N remained at the very low level. However, the final concentration is higher than in the first measurement.

The changes in K concentration were from medium to high level between the first and the second measurement. In the case of phosphorus (P), it presented an increase of 7.0 mg kg<sup>-1</sup> to 10.7 mg kg<sup>-1</sup> but remained at medium level to the reference values.

The aforementioned increases in the content of organic matter and nutrients may be related to the interaction of *Jatropha curcas* plant with fauna, such as insects, pollinators, rodents and birds, flora and various organisms that came to be established along the years in which the plantation has been maintained. In this way, these results coincide with the study carried out by the authors of [8] that identified that *Jatropha* plantations provide eco-systemic services that support the soil nutrient cycle.

The results obtained suggest that the cultivation of the E1M and E2M ecotypes of *Jatropha curcas* can maintain and increase the organic matter of the soil as well as favor the reserve of nutritious elements promoting soil improvement. All these results are relevant in terms of rehabilitation of rural marginal soils as is the case of our experimental plantation in Morelos.

The features of nontoxic *Jatropha curcas* could be used as an additional benefit to the use of oil, endosperm cake and residual biomass.



#### 4. Conclusions

According to the results of this study, two nontoxic ecotypes of *Jatropha curcas* (E1M and E2M) were identified as the best sustainable raw materials with the highest potential for the production of biodiesel in the Mexican Morelos state. The secondary products from the seed residues, after oil extraction, increase the value of the crops: the production of energy from residual biomass (pericarp and tegument) is an added value; the production of food products from the endosperm cake; and the improvement of the chemical properties of the soil during the cultivation process in marginal soils that have been abandoned in Morelos state.

Future studies of concerning life cycle assessment are required to establish the environmental impact of *Jatropha curcas* farming, oil extraction processes, and biomass residue usages. Additionally, the whole production process should be evaluated for developing a comprehensive technological and economic package of sustainable feasibility for the cultivation of the selected ecotypes.

**Supplementary Materials:** The following are available online at <http://www.mdpi.com/2071-1050/11/20/5823/s1>, Table S1: Growth evaluation of nontoxic ecotypes of *Jatropha curcas* by means of biophysical parameters at different plant ages in plantation.

**Author Contributions:** Conceptualization, J.I.; Data curation, G.P. and M.G.; Formal analysis, G.P., J.I. and M.G.; Investigation, G.P. and J.I.; Methodology, G.P. and J.I.; Supervision, J.I., M.G. and R.S.; Validation, M.G. and R.S.; Writing—original draft, G.P.; Writing—review & editing, G.P., J.I., M.G. and R.S.

**Funding:** This research was funded by the Project Program for Technological Research and Innovation of the National Autonomous University of Mexico through the projects PAPIIT-IT110911, PAPIIT-IT101214 and PAPIIT IN102216, and the Mexican National Council of Science and Technology (CONACYT) for granting scholarship CVU No. 490087 for the first author.

**Acknowledgments:** The authors would like to thanks to María de Jesús Pérez Orozco and Jorge Ramírez Guerrero, (IER-UNAM), for the technical support in building database and to Rogelio Morán Elvira for the technical support in oil analysis. A special acknowledgment to Ivonne Toledo García from Center for Genomic Sciences-UNAM for supporting us to propagate the germplasm, and to M. Javier Cruz Gómez and Fernando de Jesús Rosas Ramírez from the Faculty of Chemistry-UNAM for the use of HPLC facilities.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

#### References

1. Lim, B.Y.; Shamsudin, R.; Baharudin, B.T.; Yunus, R. A Review of Processing and Machinery for *Jatropha curcas* L. Fruits and Seeds in Biodiesel Production: Harvesting, Shelling, Pretreatment and Storage. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *52*, 991–1002. [CrossRef]
2. Navarro-Pineda, F.S.; Baz-Rodríguez, S.A.; Handler, R.; Sacramento-Rivero, J.C. Advances on the Processing of *Jatropha curcas* towards a Whole-Crop Biorefinery. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *54*, 247–269. [CrossRef]
3. Achten, W.M.; Verchot, L.; Franken, Y.J.; Mathijs, E.; Singh, V.P.; Aerts, R.; Muys, B. *Jatropha* Bio-Diesel Production and Use. *Biomass Bioenergy* **2008**, *32*, 1063–1084. [CrossRef]
4. Fini, A.; Bellasio, C.; Pollastri, S.; Tattini, M.; Ferrini, F. Water Relations, Growth, and Leaf Gas Exchange as Affected by Water Stress in *Jatropha curcas*. *J. Arid Environ.* **2013**, *89*, 21–29. [CrossRef]
5. Ong, H.C.; Mahlia, T.M.; Masjuki, H.H.; Norhasyima, R.S. Comparison of Palm Oil, *Jatropha curcas* and *Calophyllum inophyllum* for Biodiesel: A Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2011**, *15*, 3501–3515. [CrossRef]
6. Wani, S.P.; Chander, G.; Sahrawat, K.L.; Srinivasa, R.C.; Raghvendra, G.; Susanna, P.; Pavani, M. Carbon Sequestration and Land Rehabilitation through *Jatropha curcas* (L.) Plantation in Degraded Lands. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2012**, *161*, 112–120. [CrossRef]
7. Reubens, B.; Achten, W.M.; Maes, W.H.; Danjon, E.; Aerts, R.; Poesen, J.; Muys, B. More than Biofuel? *Jatropha Curcas* Root System Symmetry and Potential for Soil Erosion Control. *J. Arid Environ.* **2011**, *75*, 201–205. [CrossRef]
8. Mantri, V.A.; Parmar, D.R.; Rao, P.N.; Ghosh, A. Observations on Ecosystem Services in *Jatropha curcas* Plantations Established in Degraded Lands in India. *Int. J. Environ. Stud.* **2014**, *71*, 209–214. [CrossRef]
9. Borman, G.D.; Von Maltitz, G.P.; Tiwari, S.; Scholes, M.C. Modelling the Economic Returns to Labour for *Jatropha* Cultivation in Southern Africa and India at Different Local Fuel Prices. *Biomass Bioenergy* **2013**, *59*, 70–83. [CrossRef]

10. Dawa, A.; Klemola, T.; Saloniemi, I.; Niemelä, P.; Vuorisalo, T. Energy for Sustainable Development Factors Affecting Genetic and Seed Yield Variability of *Jatropha curcas* (L.) across the Globe: A Review. *Energy Sustain. Dev.* **2017**, *42*, 170–182. [CrossRef]
11. Singh, K.; Singh, B.; Verma, S.K.; Patra, D.D. *Jatropha curcas*: A Ten Year Story from Hope to Despair. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, *35*, 356–360. [CrossRef]
12. Rivero, J.C.; Eastmond-Spencer, A.; García, J.B.; Navarro-Pineda, F.S. A Three-Dimensional Sustainability Evaluation of *Jatropha* Plantations in Yucatan, Mexico. *Sustainability* **2016**, *8*, 1316. [CrossRef]
13. Wang, Z.; Calderon, M.M.; Lu, Y. Lifecycle Assessment of the Economic, Environmental and Energy Performance of *Jatropha curcas* L. Biodiesel in China. *Biomass Bioenergy* **2011**, *35*, 2893–2902. [CrossRef]
14. Jabłoński, S.J.; Kułczyński, M.; Sikora, I.; Łukaszewicz, M. The Influence of Different Pretreatment Methods on Biogas Production from *Jatropha curcas* Oil Cake. *J. Environ. Manag.* **2017**, *203*, 714–719. [CrossRef] [PubMed]
15. Manurung, R.; Wever, D.Z.; Wildschut, J.; Venderbosch, R.H.; Hidayat, H.; van Dam, J.E.; Leijenhof, E.J.; Broekhuis, A.A.; Heeres, H.J. Valorisation of *Jatropha curcas* L. Plant Parts: Nut Shell Conversion to Fast Pyrolysis Oil. *Food Bioprod. Process.* **2009**, *87*, 187–196. [CrossRef]
16. Naik, D.V.; Kumar, R.; Tripathi, D.; Singh, R.; Kanaujia, P.K. Co-Pyrolysis of *Jatropha Curcas* Seed Cake and Bituminous Coal: Product Pattern Analysis. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* **2016**, *121*, 360–368. [CrossRef]
17. Wever, D.A.; Heeres, H.J.; Broekhuis, A.A. Characterization of Physic Nut (*Jatropha curcas* L.) Shells. *Biomass Bioenergy* **2012**, *37*, 177–187. [CrossRef]
18. León-Villanueva, A.; Huerta-Ocampo, J.A.; Barrera-Pacheco, A.; Medina-Godoy, S.; Barba de la Rosa, A.P. Proteomic Analysis of Non-Toxic *Jatropha curcas* Byproduct Cake: Fractionation and Identification of the Major Components. *Ind. Crops Prod.* **2018**, *111*, 694–704. [CrossRef]
19. Makkar, H.P.; Becker, K. *Jatropha Curcas*, a Promising Crop for the Generation of Biodiesel and Value-Added Coproducts. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* **2009**, *111*, 773–787. [CrossRef]
20. Sánchez-Arreola, E.; Martín-Torres, G.; Lozada-Ramírez, J.D.; Hernández, L.R.; Bandala-González, E.R.; Bach, H. Biodiesel Production and de-Oiled Seed Cake Nutritional Values of a Mexican Edible *Jatropha Curcas*. *Renew. Energy* **2015**, *76*, 143–147. [CrossRef]
21. Martínez-Díaz, Y.; González-Rodríguez, A.; Delgado-Lamas, G.; Espinosa-García, F.J. Geographic Structure of Chemical Variation in Wild Populations of the Fuel Crop *Jatropha curcas* L. in Mexico. *Ind. Crops Prod.* **2015**, *74*, 63–68. [CrossRef]
22. He, W.; King, A.J.; Khan, M.A.; Cuevas, J.A.; Ramiaramanana, D.; Graham, I.A. Analysis of Seed Phorbol-Ester and Curcin Content Together with Genetic Diversity in Multiple Provenances of *Jatropha curcas* L. from Madagascar and Mexico. *Plant Physiol. Biochem.* **2011**, *49*, 1183–1190. [CrossRef] [PubMed]
23. Martínez-Herrera, J.; Martínez Ayala, A.; Makkar, H.; Francis, G.; Becker, K. Agroclimatic Conditions, Chemical and Nutritional Characterization of Different Provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Eur. J. Sci. Res.* **2010**, *39*, 396–407.
24. Aregheore, E.M.; Makkar, H.P.; Becker, K. Assessment of Lectin Activity in a Toxic and a Non-Toxic Variety of *Jatropha curcas* Using Latex Agglutination and Haemagglutination Methods and Inactivation of Lectin by Heat Treatments. *J. Sci. Food Agric.* **1998**, *77*, 349–352. [CrossRef]
25. Goel, G.; Makkar, H.P.; Francis, G.; Becker, K. Phorbol Esters: Structure, Biological Activity, and Toxicity in Animals. *Int. J. Toxicol.* **2007**, *26*, 279–288. [CrossRef]
26. Saetae, D.; Suntornsuk, W. Toxic Compound, Anti-Nutritional Factors and Functional Properties of Protein Isolated from Detoxified *Jatropha curcas* Seed Cake. *Int. J. Mol. Sci.* **2011**, *12*, 66–77. [CrossRef]
27. Kumar, V.; Makkar, H.P.; Amselgruber, W.; Becker, K. Physiological, Haematological and Histopathological Responses in Common Carp (*Cyprinus carpio* L.) Fingerlings Fed with Differently Detoxified *Jatropha curcas* Kernel Meal. *Food Chem. Toxicol.* **2010**, *48*, 2063–2072. [CrossRef]
28. Makkar, H.P. State-of-the-Art on Detoxification of *Jatropha curcas* Products Aimed for Use as Animal and Fish Feed: A Review. *Anim. Feed Sci. Technol.* **2016**, *222*, 87–99. [CrossRef]
29. Xiao, J.; Zhang, H. Comparative Evaluation of *Jatropha curcas* L. Seed Meals Obtained by Different Methods of Defatting on Toxic, Antinutritional and Nutritive Factors. *J. Food Sci. Technol.* **2014**, *51*, 1126–1132. [CrossRef]

30. Xiao, J.; Zhang, H.; Niu, L.; Wang, X.; Lu, X. Evaluation of Detoxification Methods on Toxic and Antinutritional Composition and Nutritional Quality of Proteins in *Jatropha curcas* Meal. *J. Agric. Food Chem.* **2011**, *59*, 4040–4044. [CrossRef]
31. Pecina-Quintero, V.; Anaya-López, J.L.; Zamarrípa-Colmenero, A.; Núñez-Colín, C.A.; Montes-García, N.; Solís-Bonilla, J.L.; Jiménez-Becerril, M.E. Genetic Structure of *Jatropha curcas* L. in Mexico and Probable Centre of Origin. *Biomass Bioenergy* **2014**, *60*, 147–155. [CrossRef]
32. Makkar, H.P.; Becker, K.; Schmook, B. Edible Provenances of *Jatropha curcas* from Quintana Roo State of Mexico and Effect of Roasting on Antinutrient and Toxic Factors in Seeds. *Plant Foods Hum. Nutr.* **1998**, *52*, 31–36. [CrossRef] [PubMed]
33. Martínez-Herrera, J.; Siddhuraju, P.; Francis, G.; Dávila-Ortiz, G.; Becker, K. Chemical Composition, Toxic/antimetabolic Constituents, and Effects of Different Treatments on Their Levels, in Four Provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Food Chem.* **2006**, *96*, 80–89. [CrossRef]
34. Oliveira, P.B.; Lima, P.M.; Campeche, A.; Mendonça, S.; Laviola, B.G.; McManus, C.; Louvandini, H. Growth and Carcass Characteristics of Santa Inês Lambs Fed Diet Supplemented with Physic Nut Meal Free of Phorbol Ester. *Small Rumin. Res.* **2013**, *114*, 20–25. [CrossRef]
35. Kumar, N.; Singh, A.S.; Kumari, S.; Reddy, M.P. Biotechnological Approaches for the Genetic Improvement of *Jatropha curcas* L.: A Biodiesel Plant. *Ind. Crops Prod.* **2015**, *76*, 817–828. [CrossRef]
36. Laviola, B.G.; Rodrigues, E.V.; Teodoro, P.E.; Peixoto, L.A.; Bhering, L.L. Biometric and Biotechnology Strategies in *Jatropha* Genetic Breeding for Biodiesel Production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *76*, 894–904. [CrossRef]
37. Senger, E.; Martin, M.; Dongmeza, E.; Montes, J.M. Genetic Variation and Genotype by Environment Interaction in *Jatropha curcas* L. Germplasm Evaluated in Different Environments of Cameroon. *Biomass Bioenergy* **2016**, *91*, 12–18. [CrossRef]
38. Haas, W.; Sterk, H.; Mittelbach, M. Novel 12-Deoxy-16-Hydroxyphorbol Diesters Isolated from the Seed Oil of *Jatropha curcas*. *J. Nat. Prod.* **2002**, *65*, 1434–1440. [CrossRef]
39. Islas, J.M.; Manzini, F.L.; Martínez, E.; Pérez, M.J.; Toledo, L.I. *Base de Datos de Parámetros Biofísicos de 15 Ecotipos de Jatropha Curcas de la Plantación Experimental de Miaacallán, Mordos*; Número de Registro de la Base de Datos: 03-2013-020113160600-01; Registro Público Del Derecho de Autor: Puebla, México, 2013.
40. Singh, B.; Singh, K.; Rejeshwar Rao, G.; Chikara, J.; Kumar, D.; Mishra, D.K.; Saikia, S.P.; Pathre, U.V.; Raghuvanshi, N.; Rahi, T.S.; et al. Agro-Technology of *Jatropha curcas* for Diverse Environmental Conditions in India. *Biomass Bioenergy* **2013**, *48*, 191–202. [CrossRef]
41. Naresh, B.; Reddy, M.S.; Vijayalakshmi, P.; Reddy, V.; Devi, P. Physico-Chemical Screening of Accessions of *Jatropha curcas* for Biodiesel Production. *Biomass Bioenergy* **2012**, *40*, 155–161. [CrossRef]
42. Coutinho, D.J.; Barbosa, M.O.; de Souza, R.J.; da Silva, A.S.; da Silva, S.L.; de Oliveira, A.F. Biodiesel Potential of the Seed Oils from Some Brazilian Native Euphorbiaceae Species. *Renew. Energy* **2016**, *91*, 275–281. [CrossRef]
43. Helwani, Z.; Aziz, N.; Kim, J.; Othman, M.R. Improving the Yield of *Jatropha Curcas*'s FAME through Sol-Gel Derived Meso-Porous Hydrotalcites. *Renew. Energy* **2016**, *86*, 68–74. [CrossRef]
44. Kamel, D.A.; Farag, H.A.; Amin, N.K.; Zatout, A.A.; Ali, R.M. Smart Utilization of *Jatropha (Jatropha curcas* Linnaeus) Seeds for Biodiesel Production: Optimization and Mechanism. *Ind. Crops Prod.* **2018**, *111*, 407–413. [CrossRef]
45. Dharma, S.; Masjuki, H.H.; Ong, H.C.; Sebayang, A.H.; Silitonga, A.S.; Kusumo, F.; Mahlia, T.M. Optimization of Biodiesel Production Process for Mixed *Jatropha curcas*-*Ceiba Pentandra* Biodiesel Using Response Surface Methodology. *Energy Convers. Manag.* **2016**, *115*, 178–190. [CrossRef]
46. Jain, S.; Sharma, M.P. Kinetics of Acid Base Catalyzed Transesterification of *Jatropha curcas* Oil. *Bioresour. Technol.* **2010**, *101*, 7701–7706. [CrossRef]
47. Kaushik, N.; Bhardwaj, D. Screening of *Jatropha curcas* Germplasm for Oil Content and Fatty Acid Composition. *Biomass Bioenergy* **2013**, *58*, 210–218. [CrossRef]
48. Pedro, I.; Andrade, D.S.; Vinicius, M.; Diego, A. Fatty Acid Composition of *Jatropha curcas* Seeds under Different Agronomical Conditions by Means of <sup>1</sup>H HR-MAS NMR. *Biomass Bioenergy* **2017**, *101*, 30–34. [CrossRef]

49. Makkar, H.P.; Becker, K.; Sporer, E.; Wink, M. Studies on Nutritive Potential and Toxic Constituents of Different Provenances of *Jatropha curcas*. *J. Agric. Food Chem.* **1997**, *45*, 3152–3157. [CrossRef]
50. Marrufo-Estrada, D.M.; Segura-Campos, M.R.; Chel-Guerrero, L.A.; Betancur-Ancona, D.A. Defatted *Jatropha curcas* Flour and Protein Isolate as Materials for Protein Hydrolysates with Biological Activity. *Food Chem.* **2013**, *138*, 77–83. [CrossRef]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).