

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

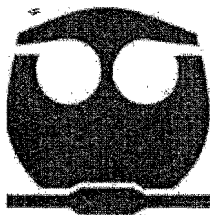
Balance Energético y Ecológico de la Producción de Biodiesel a  
partir de *Jatropha curcas*

Tesis

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

Gerardo Duarte Murillo



México, D.F



EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUÍMICA

2010



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.

## **AGRADECIMIENTOS**

Curiosamente esta sección es la primera que aparece y la última que se escribe, tal vez por lo complicado que se vuelve considerar a todas las personas que de alguna manera u otra colaboraron.

A mis padres:

Por criarme en un hogar lleno de amor, permitirme tomar mis decisiones pero principalmente por hacerme ver mis errores y aprender de ellos.

A mi hermana:

Por ser mi ejemplo académico a seguir, y el apoyo fraternal.

A ella:

Que al convertirse en una persona tan importante en mi vida, me acompañó a lo largo de todo este camino y siempre me apoyó en la toma de decisiones aún cuando estas no fueran sencillas. A ti especialmente con mucho cariño.

Al Dr. Néstor:

Por el tiempo y la paciencia brindada, por ayudarme a darle forma a este proyecto, pero principalmente gracias a su amistad.

Al Dr. Javier:

Por la oportunidad de trabajar con él y la confianza en sacar el proyecto adelante, por su entera disposición.

A mis amigos:

Aquellos que de ser compañeros se convirtieron en amigos entrañables, con quienes compartí alegrías y frustraciones, gracias por el apoyo ustedes son parte importante de este logro.

A mi 1<sup>er</sup> jefe:

Por ser un buen consejero, y por las facilidades brindadas para la culminación de esta tesis.

A mí universidad:

Por ser mi casa a lo largo de esta inolvidable época, por hacerme sentir orgulloso de mi país.

Por último quisiera dejar plasmada una frase, que es el reflejo fiel de nuestro paso por la universidad

*-Dale un pez a un hombre y comerá un día; enséñalo a pescar y comerá siempre-*

	PAG
<b>ÍNDICE</b>	
ÍNDICE DE TABLAS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
INDICE DE ECUACIONES	vi
ABREVIATURAS	viii
<b>RESÚMEN</b>	1
<b>I. CAPÍTULO INTRODUCCIÓN</b>	2
1.1 Objetivos	4
1.2 Hipótesis	4
1.3 Alcance	4
<b>II. CAPÍTULO MARCO TEÓRICO</b>	5
2.1 <i>Jatropha curcas</i>	5
2.2 Aceites vegetales	6
2.2.1 Componentes no glicéridos	6
2.2.2 Ácidos grasos	7
2.3 Extracción de aceites	10
2.4 Biodiesel	12
2.5 Reacción de transesterificación (catálisis homogénea básica)	16
2.6 Panorama internacional en biocombustibles	20
2.7 Panorama nacional en biocombustibles	22
2.8 Balance energético	24
2.9 Balance ecológico (Dióxido de carbono)	27
<b>III. CAPÍTULO METODOLOGÍA</b>	32
3.1 Metodología del balance energético	33
3.1.1 Límites de sistema	34
3.1.2 Actividades del proceso	34
3.1.3 Bases de cálculo	35
3.1.3.1 Fase agrícola	37
3.1.3.1.1 Labranza	38
3.1.3.1.2 Cosecha	39
3.1.3.1.3 Secado	41
3.1.3.1.4 Transporte	44
3.1.3.1.5 Consideraciones hechas	45

3.1.3.2 Fase de extracción	45
3.1.3.2.1 Recepción y almacenamiento	46
3.1.3.2.2 Preparación del grano	47
3.1.3.2.3 Extracción de aceite	48
3.1.3.2.4 Procesamiento del bagazo	49
3.1.3.2.5 Recuperación del aceite	50
3.1.3.2.6 Separación de solvente	51
3.1.3.2.7 Recuperación del solvente	52
3.1.3.2.8 Transporte	52
3.1.3.2.9 Consideraciones hechas durante la fase extracción	53
3.1.3.3 Fase de transesterificación	54
3.1.3.3.1 Separación	55
3.1.3.3.2 Lavado	55
3.1.3.3.3 Factores de consumo	55
3.1.3.2.4 Transporte	57
3.1.3.2.9 Consideraciones hechas durante la fase de transesterificación	57
3.1.4 Suma de magnitudes energéticas (tratamiento de resultados)	58
3.1.5 Identificar y cuantificar el producto final	59
3.1.6 Relación de energías	59
3.2 Metodología del emisiones de CO <sub>2</sub>	60
3.2.1 Fronteras del sistema	61
3.2.2 Captura de CO <sub>2</sub>	62
3.2.2.1 Geometría del tronco	62
3.2.2.2. Masa del tronco	62
3.2.2.3 Carbono presente en el tronco	62
3.2.2.4 Relación molar carbono-dióxido de carbono	63
3.2.2.5 CO <sub>2</sub> atmosférico fijado	63
3.2.3 Dióxido de carbono emitido	63
3.2.3.1 Proceso de producción	63
3.2.4 Combustión	66
3.2.5 Modelo de comparación	66
<b>IV. CAPÍTULO RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>68</b>
4.1 Variables del modelo	68
4.2 Análisis de sensibilidad	70
4.2.1 Por ciento de mezcla de lubricación	71
4.2.2 Rendimiento en peso de la reacción de transesterificación	72
4.2.3 Por ciento en peso de aceite en la semilla	74
4.2.4 Capacidad de producción por hectárea	76
4.3 Análisis generales	77
4.4 Resultados y análisis del mercado mexicano	79
4.4.1 Caso PEMEX I	80
4.4.2 Caso PEMEX II	82
4.4.2.1 Caso PEMEX II a	83

4.4.3 Estado de Chiapas	85
<b>V. CAPÍTULO CONCLUSIONES</b>	91
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	93
<b>ANEXO I</b> EXTRACCIÓN DE ACEITE	96
<b>ANEXO II</b> CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE BODIESEL ADITIVOS MEXICANOS S.A. DE C.V.	100
<b>ANEXO III</b> PRODUCCIÓN DE BODIESEL A PARTIR DE ETANOL	105

<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>		<b>PAG</b>
<b>Tabla 2.1</b>	Ácidos grasos más abundantes.	8
<b>Tabla 2.2</b>	Resumen de perfiles de ácidos grasos.	8
<b>Tabla 2.3</b>	Puntos de fusión de principales ácidos grasos.	9
<b>Tabla 2.4</b>	Porcentaje de aceite extraído por métodos mecánicos.	12
<b>Tabla 2.5</b>	Porcentaje de aceite de <i>Jatropha Curcas</i> extraído por diversos métodos.	12
<b>Tabla 2.6</b>	Condiciones de reacción de transesterificación.	18
<b>Tabla 2.7</b>	Distribución de carbono sobre la Tierra.	27
<b>Tabla 2.8</b>	Flujos de carbono.	29
<b>Tabla 3.1</b>	Factores determinantes en la cantidad de materia prima.	36
<b>Tabla 3.2</b>	Factores de consumo específico (insumos).	38
<b>Tabla 3.3</b>	Factor de consumo por arado.	39
<b>Tabla 3.4</b>	Modelos de cosechadoras.	40
<b>Tabla 3.5</b>	Tabla comparativa de cosechadoras.	40
<b>Tabla 3.6</b>	Demanda energética ideal de secadora tipo torre.	42
<b>Tabla 3.7</b>	Consumo específico en operación de secadora.	42
<b>Tabla 3.8</b>	Factores de consumo específico (recepción y almacenamiento)	46
<b>Tabla 3.9</b>	Factores de consumo específico (acondicionamiento)	47
<b>Tabla 3.10</b>	Consumo específico (extracción)	49
<b>Tabla 3.11</b>	Consumo específico (producción hexano)	49
<b>Tabla 3.12</b>	Consumo específico eléctrico (procesamiento bagazo)	50
<b>Tabla 3.13</b>	Consumo específico vapor (procesamiento bagazo)	50
<b>Tabla 3.14</b>	Consumo específico eléctrico (recuperación aceite)	51



<b>Tabla 3.15</b>	Consumo específico vapor (recuperación aceite)	51
<b>Tabla 3.16</b>	Consumo específico (recuperación solvente)	52
<b>Tabla 3.17</b>	Consumo específico (tratamiento de residuos)	52
<b>Tabla 3.18</b>	Rendimiento de camión (Worker 9-150E)	53
<b>Tabla 3.19</b>	Gastos energéticos RYMSA.	56
<b>Tabla 3.20</b>	Toneladas producidas RYMSA.	56
<b>Tabla 3.21</b>	Consumo específico eléctrico (transesterificación)	56
<b>Tabla 3.22</b>	Factores consumo (materias primas)	56
<b>Tabla 3.23</b>	Aceite transesterificado.	57
<b>Tabla 3.24</b>	Factores de consumo en función de aceite.	58
<b>Tabla 3.25</b>	Poder calorífico biodiesel.	59
<b>Tabla 3.26</b>	Factor emisión CO <sub>2</sub> (diesel)	64
<b>Tabla 3.27</b>	Factor emisión CO <sub>2</sub> (gas natural)	64
<b>Tabla 3.28</b>	Factor emisión CO <sub>2</sub> (combustóleo)	64
<b>Tabla 3.29</b>	Consumos energéticos CFE 2008.	64
<b>Tabla 3.30</b>	Factor emisión CO <sub>2</sub> (combustibles)	65
<b>Tabla 3.31</b>	Factor emisión CO <sub>2</sub> (electricidad)	65
<b>Tabla 3.31</b>	Emisión CO <sub>2</sub> en la producción de diesel.	66
<b>Tabla 4.1</b>	Variables de proceso.	68
<b>Tabla 4.2</b>	Variables de cultivo	68
<b>Tabla 4.3</b>	Resultados materia prima	69
<b>Tabla 4.4</b>	Balance energético	69
<b>Tabla 4.5</b>	Emisión de CO <sub>2</sub>	70
<b>Tabla 4.6</b>	Variables que funcionan como base del análisis	71
<b>Tabla 4.7</b>	Efecto del porcentaje de mezcla	71

<b>Tabla 4.8</b>	Efecto rendimiento de la reacción	73
<b>Tabla 4.9</b>	Efecto porcentaje de aceite	75
<b>Tabla 4.10</b>	Efecto productividad por hectárea	76
<b>Tabla 4.11</b>	Efecto poder calorífico biodiesel	79
<b>Tabla 4.12</b>	Variables de caso PEMEX I	80
<b>Tabla 4.13</b>	Resultados caso PEMEX I	80
<b>Tabla 4.14</b>	Variable caso PEMEX II	82
<b>Tabla 4.15</b>	Resultados caso PEMEX II	82
<b>Tabla 4.16</b>	Variables caso PEMEX II.a	83
<b>Tabla 4.17</b>	Resultados caso PEMEX II.a	83
<b>Tabla 4.18</b>	Resultados evaluación caso Chiapas	86
<b>Tabla 4.19</b>	Comparación con respecto a otros modelos	86
<b>Tabla 4.20</b>	Emisión y ahorro CO <sub>2</sub> evaluación caso actual Chiapas	87
<b>Tabla 4.21</b>	Emisión y ahorro CO <sub>2</sub> evaluación caso 35% aceite Chiapas	87
<b>Tabla A.1</b>	Tabla de extracción de semillas	96
<b>Tabla A.2</b>	Capacidad de equipos	99
<b>Tabla A.3</b>	Condiciones de reacción	99
<b>Tabla A.4</b>	Capacidad de producción AMSA	102
<b>Tabla A.5</b>	Relación molar entre alcoholes	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

	PAG
<b>Figura 2.1</b> Estructura doble enlaces cis-trans.	9
<b>Figura 2.2</b> Reacción de transesterificación.	16
<b>Figura 2.3</b> Mecanismo reacción de transesterificación.	17
<b>Figura 2.4</b> Triglicérido.	19
<b>Figura 2.5</b> Costos de producción de etanol.	21
<b>Figura 2.6</b> Cultivos potenciales.	24
<b>Figura 2.7</b> Ciclo de carbono.	30
<b>Figura 3.1</b> Fronteras del modelo.	34
<b>Figura 3.2</b> Fase agrícola.	37
<b>Figura 3.3</b> Extracción de aceite con solventes.	46
<b>Figura 3.4</b> Proceso de transesterificación tipo batch	55
<b>Figura 3.5</b> Flujo de carbono en árbol.	60
<b>Figura 3.6</b> Destilación de crudo.	67
<b>Figura 4.1</b> Efecto del rendimiento de la reacción	73

<b>Figura 4.2</b> Efecto del porcentaje de aceite	75
<b>Figura 4.3</b> Efecto de la capacidad de cultivo	77
<b>Figura A.1</b> Prensa mecánica Carver®	95
<b>Figura A.2</b> Semilla descascarillada	97
<b>Figura A.3</b> Bagazo obtenido	97
<b>Figura A.4</b> Triglicérido	100
<b>Figura A.5</b> Ester metílico	101
<b>Figura A.6</b> Distribución reactores ASMA	106

ÍNDICE DE ECUACIONES	PAG
<b>Ecuación 2.1</b> Peso molecular triglicérido.	19
<b>Ecuación 2.2</b> Peso molecular ésteres.	19
<b>Ecuación 2.3</b> Reacción de fotosíntesis.	28
<b>Ecuación 2.4</b> Reacción de oxidación.	28
<b>Ecuación 2.5</b> Acumulación de carbono.	29
<b>Ecuación 2.6</b> Resolución ecuación diferencial.	31
<b>Ecuación 3.1</b> Demanda de PEMEX.	35
<b>Ecuación 3.2</b> Biodiesel requerido.	35
<b>Ecuación 3.3</b> Aceites requerido.	35
<b>Ecuación 3.4</b> Semilla requerida.	36
<b>Ecuación 3.5</b> Hectáreas de cultivo.	36
<b>Ecuación 3.6</b> Consumo energético (insumos)	38
<b>Ecuación 3.7</b> Consumo energético (labranza)	39
<b>Ecuación 3.8</b> Factores de consumo específico (cosechadoras)	40
<b>Ecuación 3.9</b> Consumo energético (cosecha)	41
<b>Ecuación 3.10</b> Agua en las semillas.	43
<b>Ecuación 3.11</b> Consumo energético (secado)	43
<b>Ecuación 3.12</b> Correlación consumo eléctrico	43
<b>Ecuación 3.13</b> Consumo energético motor secadora	44
<b>Ecuación 3.14</b> Consumo energético (transporte)	44
<b>Ecuación 3.15</b> Consumo energético (recepción y almacenamiento)	46
<b>Ecuación 3.16</b> Consumo energético (preparación del grano)	48
<b>Ecuación 3.17</b> Consumo energético (extracción aceite)	49

<b>Ecuación 3.18</b> Consumo energético (procesamiento bagazo)	50
<b>Ecuación 3.19</b> Consumo energético (recuperación de aceite)	51
<b>Ecuación 3.20</b> Consumo energético (recuperación solvente)	52
<b>Ecuación 3.21</b> Consumo energético (tratamiento de residuos)	52
<b>Ecuación 3.22</b> Factor de consumo específico (transporte)	53
<b>Ecuación 3.23</b> Consumo energético (transporte)	53
<b>Ecuación 3.24</b> Consumo energético (transesterificación)	57
<b>Ecuación 3.25</b> Energía consumida	58
<b>Ecuación 3.26</b> Energía dada por biodiesel	59
<b>Ecuación 3.27</b> Gasto energético	59
<b>Ecuación 3.28</b> Relación energética	60
<b>Ecuación 3.29</b> Volumen del tronco	62
<b>Ecuación 3.30</b> Masa del tronco	62
<b>Ecuación 3.31</b> Masa de carbono en tronco	62
<b>Ecuación 3.32</b> CO <sub>2</sub> atmosférico fijado	63
<b>Ecuación 3.33</b> Factores de emisión	65
<b>Ecuación A.1</b> Peso molecular triglicérido	100
<b>Ecuación A.2</b> Peso molecular esteres	101
<b>Ecuación A.3</b> Moles de aceite	101
<b>Ecuación A.4</b> Volumen estequiométrico metanol	101
<b>Ecuación A.5</b> Masa de catalizador	102
<b>Ecuación A.6</b> Masa de biodiesel	102
<b>Ecuación A.7</b> Moles de aceite	104
<b>Ecuación A.8</b> Moles de alcohol	104
<b>Ecuación A.9</b> Relación molar alcohol/aceite	104

## ABREVIATURAS

MJ	Mega joule
UBA	Ultra bajo azufre
PEMEX	Petróleos Mexicanos
$\rho$	Densidad
ton	Toneladas
Ha	Hectáreas
HR	Humedad relativa
kcal	Kilo caloría
kwh	Kilowatt hora
$\lambda$	Longitud de onda
CV	Caballos de vapor
ppm	Partes por millón, unidad de concentración
RYMSA	Resinas y Materiales S.A
AMSA	Aditivos Mexicanos S.A
Gto	Guanajuato
d	Diámetro
V	Volumen
B100	Mezcla al 100%
$\eta$	moles

## ***RESÚMEN***

La emisión de gases de efecto invernadero es una de las causas principales del calentamiento global y el cambio climático. Se pretende crear un modelo adecuado, que permita establecer balances energéticos y ecológicos que sea aplicable a diferentes semillas productoras de aceite. El balance energético en los biocombustibles es básicamente la diferencia entre la energía disponible por unidad de combustible que es producida y la energía que fue requerida para su fabricación, tomando en cuenta todas las etapas de producción tales como el cultivo de la materia prima, el transporte de esta a la industria, la industrialización (transesterificación) y el transporte hasta el uso final. Bajo esta definición, a través de un balance energético se determina si el combustible proporciona más energía durante su combustión de la que fue requerida para su elaboración. Mientras que el término de balance ecológico se encuentra acotado hacia la cuantificación de la emisión y fijación del CO<sub>2</sub> durante el proceso de producción. Los procesos biogeoquímicos se refieren al paso de la materia entre la biósfera, atmósfera, océanos y geosfera. En la atmósfera, la mayor parte del carbono está presente como dióxido de carbono, mientras que en la biósfera y geosfera se encuentra como carbono orgánico e inorgánico. El ciclo de carbono consiste en el movimiento del carbono a través de todas estas formas. El uso de biodiesel como combustible apunta hacia la creación de un sistema neutro, es decir, que el CO<sub>2</sub> emitido durante el proceso de producción como durante su quema, sea fijado de manera total o parcial por los cultivos de las semillas utilizadas como materia prima.



## *I. CAPÍTULO INTRODUCCIÓN*

Desde hace décadas se ha iniciado un periodo de búsqueda de fuentes alternas de energía, producto de las cada día más estrictas normas ambientales pero principalmente de la inminente disminución de reservas comprobadas de combustibles fósiles. A la fecha, las opciones son muchas y muy variadas, desde casos comprobados como los bioenergéticos brasileños pasando por casos de estudio de obtención de biodiesel a partir de grasas o aceites, hasta los proyectos más ambiciosos donde utilizan cultivos microbianos como fuente generadora. Actualmente no se cuenta con estudios integrales que avalen su viabilidad y sustentabilidad. En dichos estudios deben incluirse análisis técnicos y de proceso, estudios de mercado, análisis de ciclo de vida (**LCA**), entre otros. Dentro del LCA se incluyen los balances energéticos y de emisión neta de CO<sub>2</sub>.

Atendiendo a la necesidad de evaluar el impacto que tendría la producción y uso de biocombustibles, la Organización de Estándares Internacionales, ISO por sus siglas en inglés, ha creado una metodología de ciclo de vida, ISO-14040-43, donde se contempla el impacto ambiental que tiene el producto y todos los factores asociados al balance energético tales como materias primas, producción, consumo y deshechos. El balance energético busca que el impacto ambiental de la producción de biodiesel disminuya o sea nulo, pues permite cuantificar las emisiones asociadas a la energía fósil utilizada. El impacto ambiental es un proceso de análisis sobre los efectos que tendrá una acción humana o un proyecto previsto sobre el medio ambiente, con la finalidad de evitarlos, disminuirlos o remediarlos.

La asignación de presupuesto a proyectos innovadores depende de una evaluación integral, este trabajo busca aportar una parte de dicha evaluación, no se pretende desarrollar un ciclo de vida completo, sino enfocar los esfuerzos al desarrollo de un modelo de balance energético y de emisiones de dióxido de carbono que arroje como resultado relaciones que puedan ser utilizadas como indicadores ambientales y técnico-económicos sobre la viabilidad del proceso; siguiendo en la medida de lo posible la metodología de los estándares internacionales, ya que la falta de información y factores de consumo han

conducido al uso de suposiciones en este trabajo. Uno de los mayores problemas que presenta este método es la unificación de criterios para asignar una cantidad de energía a cada factor de producción. La falta de datos que existen al respecto en México obliga a llevar a realizar estimaciones basadas en los datos obtenidos en otros países cuyas circunstancias tecnológicas difieren de las nuestras.

Con el fin de subsanar algunas de estas deficiencias, se decidió obtener información de manera experimental con el fin de utilizar como fuente de primera mano o comparar con lo reportado en la literatura.

El costo de producción actual de biodiesel es mucho más elevado que el diesel convencional, tomando en cuenta el subsidio que recibe, situando en una clara desventaja al biodiesel cuyo precio de comercialización estaría por encima de los \$14.00 por litro. México ha dado un paso adelante con la Ley de Promoción y Desarrollo de Bioenergéticos publicada en febrero 2008 donde se busca crear, en un futuro, incentivos que estarán enfocados para el desarrollo de la infraestructura requerida para la producción de cultivos; agricultores y productores locales; personas físicas y morales que contribuyan al desarrollo y la modernización de la tecnología necesaria para la producción de bioenergéticos.

Por esta razón es conveniente realizar estudios de factibilidad, para crear bases firmes sobre las cuales dirigir las inversiones, con el fin de conocer si la energía invertida en el proceso de producción es menor que la entregada por el combustible.

Lograr descongelar los presupuestos, implica la activación del campo mexicano así como la creación de una nueva industria energética. El beneficio social se verá reflejado en la activación económica de pequeñas comunidades que no tenían el potencial de ser tierras agrícolas por las limitaciones del suelo, pero las condiciones de cosecha de *Jatropha Curcas* les brinda una oportunidad, así como la creación de fuentes de empleo directos en la naciente industria de los biocombustibles. Actualmente México y en general todo el continente salvo Brasil y EE UU, presenta un grave retraso en investigación y uso de fuentes de energía alterna con respecto a Europa. La puesta en marcha de estos proyectos promete la mitigación de los grandes problemas socio-económicos que aquejan a México con un plus en la mejoría de la calidad ambiental, todo

se combina para mejorar la calidad de vida de los mexicanos que se establece como una de las garantías individuales consagradas en la Constitución.

### **1.1 Objetivos.**

- Crear un modelo adecuado, que permita establecer balances energéticos y ecológicos que sea aplicable a diferentes semillas productoras de aceite.
- Determinar las variables más importantes que definan el proceso de producción de biodiesel.
- Aportar los análisis de factibilidad y viabilidad que la industria bioenergética mexicana requiere.

### **1.2 Hipótesis**

Al llevar a cabo la evaluación del consumo energético de cada una de las etapas de producción de biodiesel a partir de aceite *de Jatropha curcas*, se identificará a la etapa de producción agrícola como aquella con la mayor demanda energética y por lo tanto sobre la cual se deben dirigir las mejoras tecnológicas.

### **1.3 Alcance**

No se pretende desarrollar un análisis de ciclo de vida formal y completo, sino enfocar los esfuerzos al desarrollo de un modelo de balance energético y de emisiones de dióxido de carbono que arroje como resultado relaciones que puedan ser utilizadas como indicadores ambientales y técnico-económicos sobre la viabilidad del proceso.

## II. CAPÍTULO MARCO TEÓRICO

Este capítulo consta de una revisión bibliográfica sobre temas que fundamentan la metodología desarrollada. Se comienza la revisión con las características de los aceites, que es la materia prima que se considera como la más importante y determinante en el proceso de producción de biodiesel.

Se hace una breve descripción de la semilla y sus principales características, aunque dentro de la metodología se cuenta con datos más específicos, que permitieron el desarrollo del modelo de evaluación.

Se documentan características de aceites diferentes al de *Jatropha curcas*, con el fin de situarlo en un panorama de comparación con respecto de otros aceites que no son considerados en la producción de biodiesel debido a su uso alimentario.

La cantidad de aceite en la semilla resulta ser un aspecto crítico en el proceso de producción, por lo tanto, se hace una revisión sobre los distintos mecanismos de extracción.

Se realiza una introducción global sobre los biocombustibles dando un enfoque especial hacia los aceites vegetales y finalmente hacia la producción de biodiesel por transesterificación vía catálisis homogénea básica.

Se analiza el panorama internacional y nacional en cuestión de biocombustibles, con la finalidad de encontrar campos de oportunidad analizando las fortalezas y las debilidades de los países productores de biocombustibles.

Por último, se sientan las bases sobre las cuales fue construido el modelo del balance energético así como el de emisión de CO<sub>2</sub>.

### **2.1 *Jatropha curcas***

La *Jatropha curcas* es de la familia de las Euphorbiaceae, crece en clima tropical bajo una temperatura promedio de 20°C, pudiendo llegar a soportar heladas de moderada intensidad. Crece en altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 1200 m, bajo una precipitación pluvial desde 300 hasta 1800 mm anuales.

La aparición de flores en la planta *Jatropha curcas* puede presentarse desde antes de su primer año de nacida, la producción de semillas se estabiliza a partir del 4°

ó 5° año. La etapa de floración está altamente relacionada con el periodo de lluvias. Se presenta una segunda floración si las condiciones lo permiten dentro de los siguientes 90 días, pero después de esta segunda floración, la planta no florea hasta el año siguiente. El crecimiento de la semilla toma entre 60 y 120 días desde la floración hasta su madurez. La cosecha se realiza en dos o tres ocasiones durante al año, debido a que no todos los frutos maduran al mismo tiempo.

Las semillas de *Jatropha curcas* es una especie tóxica debido a la presencia de ésteres de forbol y cursina, sin embargo contiene hasta 60% de ácidos grasos con patrones similares a los aceites comestibles.

El bagazo obtenido después de la extracción de aceite, tiene un contenido nutricional comparable con pastas similares utilizadas como forraje ganadero, sin embargo, el aceite, la semilla o la pasta resultante de la extracción del aceite de *Jatropha curcas* no puede ser utilizada en la nutrición animal o humana sino hasta que se lleve a cabo un proceso de extracción de las sustancias tóxicas.

Las plagas y enfermedades en la planta *Jatropha* en estado silvestre, no son gran problema debido a su carácter tóxico, sin embargo, la ataca el insecto *Podagrica spp* y al hongo *Cercospera spp*.

## **2.2 Aceites Vegetales**

Químicamente los aceites vegetales son triacilgliceroles o triglicéridos, es decir triésteres de glicerol con tres ácidos carboxílicos de cadena larga. En general, los tres ácidos grasos de una molécula particular de triacilgliceroles son distintos, es probable que el aceite de una fuente dada sea una mezcla compleja de muchos triacilgliceroles diferentes, (Mc Murry, 1997).

### **2.2.1 Componentes no glicéridos**

Los componentes no glicéridos son componentes menores en lo referente a su concentración con respecto a los triglicéridos.

- Vitamina E: mezcla de fenoles liposolubles caracterizados por cabeza aromática y cadena lateral de 16 carbonos, saturada tocoferoles e insaturada tocotrienoles.
- Carotenoides: hidrocarburos liposolubles insaturados, están presentes más de 75 carotenoides diferentes que aportan el color de los aceites.
- Vitamina A y D.
- Esteroles.
- Alcoholes derivados metilesteroles y triterpenos.

**(Formo, Jungermann, Norris, & Sonntag, 1979)**

### 2.2.2 Ácidos grasos.

Cada aceite presenta un perfil característico de ácidos grasos. Los ácidos grasos más abundantes presentan cadenas lineales con un número par de átomos. Existe un amplio espectro de longitudes de cadena, que varían entre 4 y 30 carbonos. Los más frecuentes son los ácidos grasos de 18 carbonos. En la naturaleza existen 40 ácidos grasos distintos. El ácido palmítico de 16 carbonos y el ácido esteárico de 18 carbonos son los ácidos saturados más abundantes, mientras que los insaturados más comunes son los de 18 carbonos como el oleico y linoleico. La abreviatura taquigráfica para nombrar a los ácidos grasos está en función del número de carbonos y dobles enlaces, así 18:0 es conocido como ácido esteárico que es diferente al 18:1, que es el ácido oleico, por la presencia del doble enlace. En la siguiente tabla 2.1 se resume el nombre y representación taquigráfica de los ácidos grasos más comunes.

**Tabla 2.1 Ácidos grasos más abundantes. (FAO-OMS, 1993)**

Nombre Común	Nombre sistemático	Nomenclatura
CÁPRICO	Decanoico	10:0
LÁURICO	Dodecanoico	12:0
MIRÍSTICO	Tetradecanoico	14:0
PALMÍTICO	Hexadecanoico	16:0
ESTEÁRICO	Octadecanoico	18:0
ARAQUÍDICO	Eicosanoico	20:0
BEHÉNICO	Docosanoico	22:0
LIGNOCÉRICO	Tetracosanoico	24:0
PALMITOLEICO	9-hexadecenoico	16:1
OLEICO	9-octadecenoico	18:1
GADOLEICO	11-eicosaenoico	20:1
CETOLEICO	11-docasaenoico	22:1
ERÚCICO	13-docasaenoico	22:1
NERVÓNICO	15-tetracosanoico	24:1
LINOLEICO	9,12-octadecadienoico	18:2
$\alpha$ -LINOLÉNICO	9,12,15-octadecatrienoico	18:3
$\gamma$ -LINOLÉNICO	6,9,12-octadecatrienoico	18:3

**Tabla 2.2 Resumen de perfiles de ácidos grasos**

%COMPOSICIÓN	C 14:0	C 16:0	C 16:1	C 18:0	C 18:1	C 18:2	C 18:3	C 20:0	C 20:1	C 22:1
<b>Jatropha</b>	0.4	10	0.3	4	41	44	-	-	-	-
<b>Girasol</b>	-	6.1	-	4	22.5	62.5	0.6	0.4	0.5	-
<b>Mostaza</b>	-	3.7	-	1	8.9	20.5	14.7	-	8.1	39
<b>Ajonjolí</b>	-	8.9	-	4.6	40.9	44.2	0.6	0.1	-	-

En la tabla 2.2 se presentan los perfiles de ácidos grasos donde resalta que el aceite de mostaza es el que más se aleja del resto del grupo por su alto contenido de C>20, principalmente de erúcico, y bajo contenido de los insaturados más comunes como oleico y linoleico, así como una fracción considerable de linolénico. El aceite de girasol también se aleja un poco del grupo por su alto contenido de linoleico por encima del 50 %.

Tabla 2.3. Puntos de fusión de principales ácidos grasos.

Nombre	P.FUSIÓN[°C]
<b>Saturados</b>	
LÁURICO 12:0	44
MIRÍSTICO 14:0	58
PALMÍTICO 16:0	63
ESTERÁRICO 18:0	70
ARAQUÍDICO	75
<b>Insaturados</b>	
PALMITOLEICO 16:1	32
OLEICO 18:1	4
LINOLEICO 18:2	5
α -LINOLÉNICO 18:3	-5
ARAQUIDÓNICO 20:4	-50

Los ácidos grasos insaturados, por lo general, tienen puntos de fusión menores que los ácidos saturados y esta tendencia se mantiene para todos los triacilgliceroles. Los dobles enlaces de los ácidos están en configuración z (cis). Cuantos más dobles enlaces carbono-carbono tenga el ácido carboxílico, más difícil será que las moléculas cristalicen y por lo tanto, menor será el punto de fusión. Un doble enlace puede cambiar la configuración de cis a trans, isomerización geométrica, o bien puede desplazarse a otra posición de la cadena de carbonos, isomerización posicional. El perfil de un ácido graso en trans es similar al de un ácido graso saturado. Como resultado, los ácidos grasos en trans presentan puntos de fusión más elevados que sus isómeros en cis. El isómero en trans puede considerarse como un intermediario entre el ácido graso original en cis y un ácido graso completamente saturado, **(FAO-OMS, 1993)**. La figura 2.1 ejemplifica las configuraciones espaciales antes mencionadas.

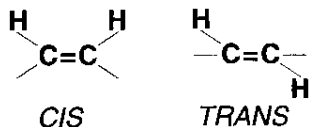


Figura 2.1. Estructura del doble enlace (FAO-OMS, 1993)



### **2.3 Extracción de aceites**

La extracción de aceites vegetales se lleva a cabo principalmente a partir de operaciones simples como presión mecánica, centrifugación y extracción por solventes, o a través de la combinación de ellas. Nuevas investigaciones apuntan hacia el uso de procesos enzimáticos de extracción a partir de semillas o pulpas.

La operación de extracción, que puede parecer sencilla, no lo es, ya que para la obtención de un aceite de calidad hay que cuidar muchos detalles. El aceite presente en las semillas, en cantidades que oscilan entre el 15 y el 35 % en peso, se aloja en las células del mesocarpio, encerrado en su mayor parte en las vacuolas, y disperso, en menor medida, en el tejido coloidal del citoplasma. Una condición indispensable para extraer el aceite por procedimientos mecánicos es "liberarlo" de los tejidos, de modo que las minúsculas gotas se reúnan en gotas más grandes hasta formar las llamadas "bolsas", capaces de separarse en una fase líquida continua, **(Espinola, 1996)**.

A continuación se mencionará brevemente los principios de las operaciones utilizadas para el proceso de extracción de los aceites:

- Por presión mecánica: Es el procedimiento más antiguo y utilizado para obtener el aceite, se utilizan equipos denominados prensas hidráulicas que a su vez tienen diferentes presentaciones como el tornillo o expeler, tiene como ventaja que el proceso puede ser operado en continuo. Mientras que la prensa hidráulica opera por lotes. Dentro de este método pueden presentarse variaciones como precalentar las semillas buscando romper la cadena proteica del mesocarpio, mientras que otra variación poco utilizada es el humedecimiento de la semilla promoviendo la germinación y favoreciendo la ruptura de las proteínas.
- Por centrifugación: Este consiste en una centrifugadora con una cuba de gran diámetro, con capacidad para 100 kilos, que gira hasta 3,000 revoluciones por minuto. Por efecto de la velocidad, y mediante la adición de agua, el aceite se separa. La separación de la fase sólida de la líquida

por centrifugación se realiza mediante la adición de agua tibia. El proceso se lleva a cabo en continuo, **(Espinola, 1996)**.

- Por extracción con disolventes: Este funciona bajo el principio de destilación por arrastre donde se separan los componentes insolubles en agua y aquellos ligeramente volátiles, permitiendo la separación adecuada de sustancias con elevado punto de ebullición como los aceites. El método comúnmente utilizado es la extracción continua. Este proceso se lleva a cabo en un equipo soxhlet en el cual, el disolvente se evapora en el matraz y sus vapores ascienden hasta la cámara de extracción, donde se encuentra el material a extraer, en el momento que se llena la cámara del disolvente, éste cae por diferencia de gravedad al matraz de destilación. El proceso se repite por un tiempo definido, obteniéndose al final una solución saturada del aceite esencial. El exceso del disolvente se elimina por destilación, **(Ávila Zarraga, 2001)**.

La industria mexicana está ampliamente familiarizada con la extracción a partir de solventes orgánicos como el hexano. Para el desarrollo de este trabajo se contó con una prensa hidráulica marca “Carver” que opera a una presión máxima de 24,000 psig, con la cual se llevaron a cabo las extracciones. La finalidad del proceso de extracción es la obtención de la materia prima para la producción de biodiesel, pero además, arroja un parámetro importante de caracterización: el porcentaje en peso de aceite contenido en la semilla, dato primordial para el balance energético y ecológico del producto.

**Tabla 2.4. Porciento de aceite extraído por métodos mecánicos**

Aceite de Jatropha	
Tipo de Prensa	% Aceite
	68 <sup>1</sup>
<b>Tornillo</b>	80 <sup>2</sup>
	79 <sup>3</sup>
<b>Neumática</b>	62.5 <sup>4</sup>
	62.5 <sup>5</sup>

**Tabla 2.5. Porciento de aceite de Jatropha Curcas extraído por diversos métodos. (Achten, 2008)**

Método	t[h]	% rendimiento
n-hexano (Soxhlet)	24	98%
Aceite-Agua (AOE)	2	38%
AOE enzimática	2	70%
3 fases	2	89%

Con ayuda de las tablas 2.1 y 2.2 es posible hacer una comparación entre ambos principios de extracción, poniendo de manifiesto que la extracción a través de solventes tiene una mayor eficiencia lo cual se traduce en menor merma y costo.

### **2.4 Biodiesel**

Antes de entrar en detalles sobre las características del biodiesel es conveniente revisar las diferentes alternativas que existen en el ámbito de los biocombustibles. Los biocombustibles son aquellos combustibles producidos a partir de biomasa y por esta razón son considerados como renovables. Existen en los tres principales estados de la materia: como sólidos (residuos vegetales, fracción biodegradable

<sup>1</sup> (Rabé, 2005)

<sup>2</sup> (Tewari, 2007)

<sup>3</sup> (Beerens, 2007)

<sup>4</sup> (Forson, 2004)

<sup>5</sup> (Tewari, 2007)

de RSU, residuos sólidos urbanos.), como líquidos (bioetanol, aceites vegetales y/o biodiesel) y como gas (biogás, hidrógeno). Existe un subgrupo conocido como biocarburantes, de naturales líquida, que se caracteriza por su posible aplicación en los motores de ignición-combustión.

Los combustibles renovables son producidos con el objetivo principal de disminuir los gases de efecto invernadero, mejorar la combustión de fuentes convencionales, asegurar y mantener las reservas de combustibles fósiles, así como crear tierras y fuentes de trabajo agrícolas en comunidades donde las condiciones climáticas impiden el crecimiento de otro tipo de cultivos, por esta razón es preciso tener en cuenta las características de los mercados agrícolas junto con las de la industria de los biocarburantes.

Los aceites vegetales se perfilan como un sustituto potencial de los combustibles fósiles, al momento, los aceites vegetales no se consideran como un producto competitivo con respecto al petróleo, sin embargo, con el alza en los precios del petróleo y la incertidumbre en sus reservas, han renovado el interés en las fuentes alternas, específicamente en los biocarburantes.

Las principales formas de utilización de los biocombustibles son: la combustión para producir calor aplicable a la calefacción urbana, a procesos industriales o a la generación de electricidad, y a la carburación en motores térmicos, tanto de explosión como de combustión interna.

Los aceites vegetales puros, tiene la capacidad de servir como combustibles, pero presentan graves desventajas como: una alta viscosidad, baja volatilidad, así como la reactividad de las cadenas insaturadas. Los problemas aparecen cuando el motor ha sido utilizado por un periodo de tiempo prolongado, aparecen residuos de la carbonización que bloquean los inyectores, degradación del aceite lubricante, pero el mayor problema en el uso de aceite vegetal puro es el alto nivel de viscosidad que conduce al desgaste. Existen diferentes técnicas que atacan al problema; dilución, micro emulsión, pirólisis y transesterificación.

La dilución del aceite vegetal consiste en la adición de metanol puro a una mezcla de 25% aceite y 75% diesel, hasta en un 4%, mejorando el rendimiento del motor.

Microemulsiones con líquidos inmiscibles como metanol, etanol y tensoactivos que pueden ser anfifílicos iónicos o no iónicos. Los alcoholes como propanol, etanol y metanol son utilizados para disminuir la viscosidad mientras que los tensoactivos tienden a aumentar el número de cetanos. Sus propiedades parecerían las adecuadas, pero su uso prolongado trae problemas a los inyectores, deposición de carbón y una combustión poco eficiente.

La pirólisis consiste en la degradación del aceite vegetal por efecto de calentamiento en ausencia de oxígeno que resulta en una disminución de la viscosidad y un aumento en el número de cetanos, incluyendo la producción de alcanos y alquenos principalmente, aproximadamente un 60% con relación a la alimentación, además de alcadienos, ácidos carboxílicos, aromáticos y menores cantidades de producto gaseoso. Dependiendo de las condiciones de operación, el proceso de pirólisis puede estar dividido en tres; convencional, rápida y flash.

También existe un proceso de obtención de biocombustibles líquidos por craqueo catalítico, la reformación de la corriente de aceite vegetal se da en un reactor empacado con un catalizador comercial de níquel similar al utilizado en la reformación de naftas, generando hidrógeno, metano y óxidos de carbono.

Este proceso requiere de una correcta catálisis. Las desventajas radican en los costos del equipo y en la separación de la mezcla.

La transesterificación de los ácidos grasos se puede llevar a cabo por diferentes rutas como: catálisis homogénea ácida o básica; catálisis heterogénea ácida, básica o enzimática y transesterificación mediante fluidos súper críticos como el metanol. El proceso de transesterificación catalítico alcalino ha captado la atención por sus altos niveles de conversión y rapidez de reacción.

La transesterificación con metanol súper crítico se realiza en una auto clave bajo presiones de hasta 100 MPa y temperaturas de 850 K. El aceite y el metanol son cargados en la auto clave y se someten a las condiciones anteriores, los vapores producidos son condensados y recolectados.

Se ha encontrado que enzimas como la lipasa (*Candida*, *penicillium* y *pseudomonas*) puede catalizar el proceso si se inmoviliza en un soporte adecuado. La enzima puede ser reutilizada sin la necesidad de separarla a una

temperatura de proceso baja. Los dos problemas más grandes a los cuales se enfrenta el proceso catalizado por lipasa inmovilizada son: la baja actividad de la lipasa y la desactivación que sufre por acción de los alcoholes.

La transesterificación de aceites vegetales usando catalizadores heterogéneos se ha estudiado y desarrollado con el objetivo de facilitar y simplificar el proceso de separación del catalizador, alcanzándose una mayor pureza de los productos. Los principales catalizadores heterogéneos ácidos con los que se cuenta son Zeolitas, Resinas Sulfónicas,  $\text{SO}_4/\text{ZrO}_2$ ,  $\text{WO}_3/\text{ZrO}_2$ , mientras que entre los básicos se encuentran  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}/\text{NaOH}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

No obstante, este tipo de catálisis presenta mayores tiempos de reacción y condiciones de temperatura y presión mucho más altas que las requeridas en una catálisis homogénea.

El uso de una catálisis homogénea, ya sea básica o ácida, requiere varios procesos de separación del catalizador, ya que éste es soluble en el medio de reacción y como resultado se presenta la formación de una sola fase. Los catalizadores ácidos homogéneos pueden ser  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  y  $\text{R-SO}_3$ . Mientras que los catalizadores básicos homogéneos son  $\text{KOH}$  y  $\text{NaOH}$ . El único problema de estos catalizadores es que deben ser anhidros para evitar que se produzcan reacciones secundarias como la saponificación que reduce el rendimiento.

De manera general, al biodiesel se le conoce como ésteres provenientes de alcoholes de bajo peso molecular y ácidos grasos, donde los ácidos grasos son provenientes de aceite vegetal o grasa animal, mientras que la ASTM<sup>6</sup> define al biodiesel como ésteres mono alquílicos de ácidos grasos, producido a partir de aceites o grasas renovables, utilizados en motores de ignición compresión.

El biodiesel tiene unas propiedades físicas similares al diesel convencional (densidad equivalente y viscosidad ligeramente por encima), sin embargo, presenta un menor poder calorífico (alrededor de un 10%) y un comportamiento inferior a bajas temperaturas con tendencia a solidificarse en condiciones extremas de frío, lo que obliga a que deba ser mezclado con aditivos específicos.

---

<sup>6</sup> American Society for Testing and Material Standard

Uno de los principales beneficios del biodiesel es su bajo contenido de azufre, además, debido a la presencia de oxígeno en su composición química, su combustión es más completa, reduciendo la emisión de partículas, monóxido de carbono e hidrocarburos no quemados, entre otros contaminantes.

En cuanto a su aplicación en los motores de combustión interna, el biodiesel puede ser mezclado con diesel tradicional o incluso sustituirlo totalmente. Para que los biocombustibles de origen agrícola sean una alternativa energética real, se necesita que estos productos, no sólo presenten características equivalentes a los de procedencia fósil, sino también, que a lo largo de los procesos de obtención se consigan balances energéticos, ecológicos y económicos positivos, permitiendo que el producto llegue al mercado a un precio competitivo y similar al de los productos derivados del petróleo.

Por otro lado, durante el proceso de producción se obtienen subproductos de alto valor agregado, como es el caso de la glicerina, la cual, posterior a su purificación puede ser utilizada, en múltiples usos, en la industria farmacéutica y cosmética, donde cuenta con una gran demanda.

### **2.5 Reacción de transesterificación (catálisis homogénea básica)**

La hidrólisis de un aceite con hidróxido de sodio acuoso produce glicerol y tres ésteres metílicos, la reacción general está ejemplificada en la figura 2.2.

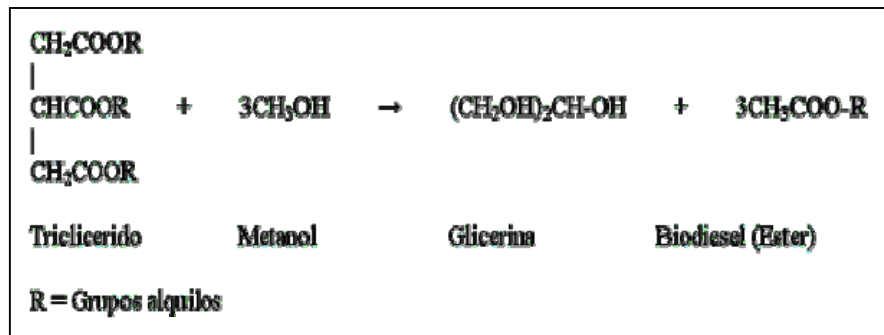


Figura 2.2. Reacción Transesterificación (Mc Murry, 1997)

La transesterificación es reversible, por lo que se requiere agregar un exceso de alcohol para desplazar el equilibrio y obtener el producto deseado.

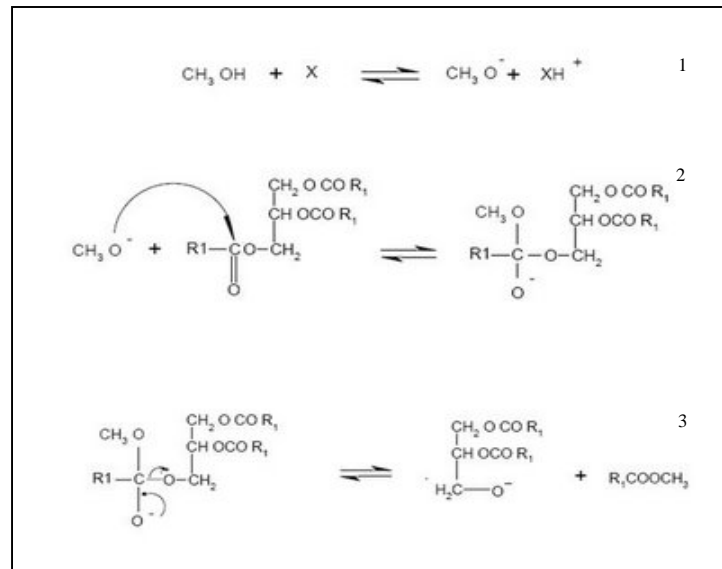


Figura 2.3. Mecanismo de Reacción Transesterificación

En la figura 2.3 se encuentra representado el mecanismo de reacción que sigue la transesterificación y a continuación se describe.

En la catálisis básica (1), la sosa o potasa reacciona con el alcohol formando un grupo alcoxy quien realmente reacciona con el aceite para formar el biodiesel. (2) El alcoxy formado en (1) ataca al doble enlace del grupo carbonilo del triglicérido. (3) Se forma la molécula del éster metílico. Los paso subsecuentes son la regeneración del catalizador con la formación de un diglicérido y propagación de los pasos (1, 2 y 3).

Por lo tanto, la reacción de producción de biodiesel es una secuencia de tres reacciones reversibles y consecutivas. Cada etapa produce una molécula de éster de ácido graso. Cuando las reacciones no se llevan a cabo por completo existe una mezcla de tri y digliceridos que aún tienen asociados la molécula de glicerol que no ha sido liberada, conocido como glicerol ligado, este último se suma al glicerol libre dando lugar al glicerol total. Parámetro clave en la caracterización y calidad del biodiesel.

La elección del alcohol empleado en el mecanismo de transesterificación depende de aspectos económicos, técnicos y ambientales. El mercado ofrece una variedad de alcoholes como metanol, etanol, isopropanol y butanol, siendo el metanol y etanol los más utilizados.



El metanol aventaja en el aspecto técnico y económico debido a que es necesario utilizar una menor cantidad en referencia a la relación estequiométrica y de exceso que es necesario agregar. Por otra parte, la literatura reporta mayor eficiencia de conversión a ésteres, menor temperatura de reacción, menor tiempo de reacción, así como una mejor separación de fases, **(Manzanares, 2007)**.

Mientras que el etanol aventaja en los aspectos ecológicos, dada que su producción puede ser a partir de fuentes renovables. Ambos alcoholes son de bajo peso molecular, lo que los convierte en higroscópicos, siendo la humedad del alcohol un factor determinante en la forma de reaccionar y el rendimiento de la reacción.

Este trabajo tiene como unos de sus objetivos la evaluación de la factibilidad energética que brinda la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales, resulta de suma importancia identificar los reactivos que serán utilizados.

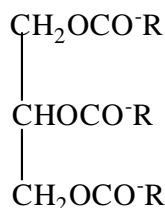
La reacción utilizada es homogénea en medio básico, empleando hidróxido de sodio como catalizador y metanol como reactivo. La materia prima, así como el método a partir del cual son producidos, es un tema que será abordado directamente durante el balance energético.

Las condiciones de óptimas de reacción y separación del producto fueron determinadas en un trabajo previo, **(Torres, 2009)** siendo las condiciones utilizadas para la transesterificación de los diferentes aceites las que se registran en la tabla 7.

**Tabla 2.6. Tabla condiciones reacción de transesterificación**

Condiciones reacción y separación	
$T_{\text{reacción}} [^{\circ}\text{C}]$	45
$t_{\text{reacción}} [\text{h}]$	2
% Exceso volumen MEOH	80
% peso $\text{NaOH}$	1
$t_{\text{reposo-separación}} [\text{h}]$	2
% volumen $\text{H}_2\text{O}$ Lavado	50

La relación estequiométrica de la reacción es 3:1, es decir, por cada mol de triglicérido que se alimenta se obtienen 3 moles de metilésteres. Mediante la composición de ácidos grasos presentes en el aceite se ha obtenido el peso molecular promedio del ácido graso, tomando como base este valor es posible obtener el peso molecular del triglicérido y del metiléster mediante un sencillo análisis de la estructura de cada molécula. Con el peso molecular del aceite y la relación estequiométrica es posible calcular la cantidad de reactivo necesario para la reacción

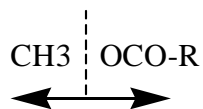


**Figura 2.4. Triglicérido**

El radical glicerilo tiene un peso molecular de 41 y a este se le suman 3 veces el valor promedio de la masa molar del ácido graso descontando un hidrógeno de enlace, ver figura 2.4, obteniéndose el peso molecular del triglicérido. La ecuación 2.1 permite obtener el peso molecular de un triglicérido a partir del peso molecular del ácido graso.

$$P.M_{Triglicerido} = (3(P.M_{AcidoGraso} - 1)) + 41_{Radical\ Glicerilo}$$

**Ecuación 2.1. Relación P.M triglicérido**



**Figura 2.5. Ester Metílico**

Por otra parte el peso molecular de los ésteres se obtiene a partir de los pesos moleculares del ácido graso, -R ver figura 2.5, al que se le descuenta un hidrógeno de enlace. Al cual se le suma el peso molecular del alcohol menos el grupo OH que pasa a formar parte del glicerol. Todo esto se le suma 44, que es el peso molecular del grupo ester. La ecuación 2.2 resume este complejo análisis.

$$P.M_{Ester} = (P.M_{AcidoGraso} - 1) + (P.M_{Alcohol} - 17_{OH}) + 44$$

**Ecuación 2.2. Relación P.M ésteres**

## **2.6 Panorama internacional en biocombustibles**

En la actualidad, la Unión Europea (UE) produce 35 millones de m<sup>3</sup> de biocombustibles, bioetanol y biodiesel. Estas cifras están muy alejadas de los objetivos planteados por la UE<sup>7</sup> que estaban fijados en el 2% del consumo de los combustibles totales, el objetivo para el 2010 es alcanzar una penetración al mercado del 5.75%. El sector de transporte de la UE representa más del 30% del total del consumo de energía, que depende en un 98% de combustibles fósiles; es el incremento en este sector, la principal cause por la cual la UE no cumple con los objetivos y compromisos del protocolo de Kioto.

La UE cuenta con un potencial en la producción de biocombustibles líquidos, en el año 2005 tuvo una producción de 2 millones de toneladas anuales. Se estima que entre 4 y 13% del total del terreno dedicado a la agricultura será necesario cultivar para cubrir el nivel de sustitución de combustibles fósiles empleados en el transporte. Se estima que para el año 2030, un cuarto de los combustibles empleados en el transporte provendrán de biocombustibles.

Alemania se destaca como el principal productor de biodiesel en Europa con 1,035,000 toneladas métricas por año, mientras que España se ubica como el productor número uno de bioetanol, principalmente por la producción etil-ter-butiléter.

Ante la tendencia a la alza en los precios del petróleo se espera un explosivo crecimiento de la demanda mundial de etanol, pues presenta una mayor penetración industrial con respecto al biodiesel, con lo cual podría situar a Brasil, principal productor, en una situación muy ventajosa. De mantenerse la tendencia actual para el año 2020, Brasil podría exportar hasta 160 mil millones de litros. A la fecha Brasil produce 17 mil millones de litros, los cálculos estiman que sería necesario destinar 11 millones de hectáreas adicionales a las 6 millones de hectáreas que actualmente dedica al cultivo de la caña para cubrir las expectativas, para las dimensiones geográficas de ese país parecería no tener efecto, 3.5% de su territorio.

---

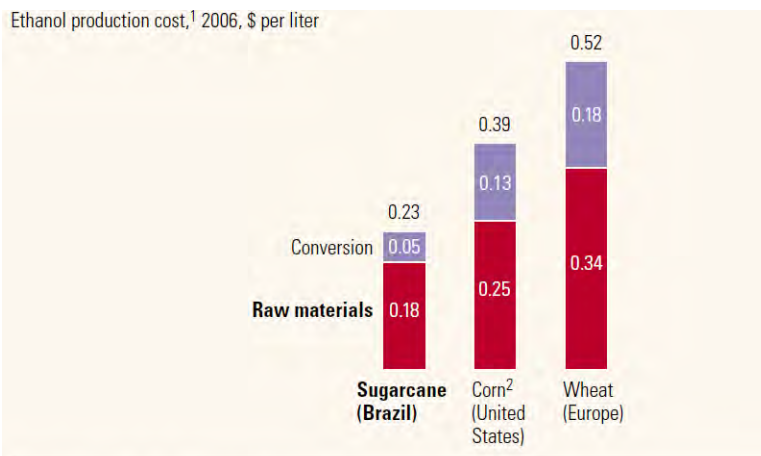
<sup>7</sup> Unión Europea

Sin embargo, es necesario analizar el desarrollo de la sección industrial y la infraestructura del transporte en la cadena del etanol. Actualmente, Brasil tiene la capacidad de almacenar y transportar 4 mil millones de litros anuales. Las expectativas de crecimiento quedarían cubiertas construyendo dos mil kilómetros de ductos y vías férreas, con una inversión aproximada de dos mil millones de dólares.

Los expertos ubican a la sección de industrialización como la fase crítica, pues los 350 molinos procesan 460 millones de toneladas anuales de caña, aunque solo la mitad se destina a la producción de etanol, los analistas indican que por cada mil millones de litros, en el aumento de la producción, se necesitan cinco nuevos molinos con un costo de 120 millones de dólares cada uno. La inversión total estaría cerca de noventa mil millones de dólares.

Según estimaciones de venta, el costo por litro del etanol brasileño en Europa Occidental, incluyendo los gastos de producción y aduanales, se fijaría alrededor de los 0.73 dólares, contra el precio actual por litro de combustible de 1.63 dólares. Ver figura 2.6

La diferencia de costos radica principalmente en el hecho que cada hectárea de caña de azúcar produce aproximadamente 6,000 litros de etanol, mientras que una hectárea de maíz produce 3,500 litros de etanol. En China podría ser posible producir etanol a partir de los popotes del arroz a un precio de 0.16 dólares.



<sup>1</sup>Excluding any subsidies; assumes current technology.

<sup>2</sup>Figures do not sum to total, because of rounding.

Source: Expert interviews; National Renewable Energy Laboratory (NREL); SRI; McKinsey analysis

**Figura 2.5 Costos de producción de etanol**

### **2.7 Panorama nacional en biocombustibles**

El mercado mexicano actual demanda al biodiesel como un aditivo más allá que como un sustituto, PEMEX está comprometido en disminuir el azufre del diesel de 300 ppm a 15 ppm, en dicho proceso la mezcla pierde lubricidad y presenta problemas en el transporte a través de las líneas, el biodiesel cumple la funciones de lubricante.

“...Se está analizando la conveniencia del uso de etanol para el mezclado en gasolinas. En este sentido, se han generado diferentes propuestas de programas de consumo. Se verifican la infraestructura y los recursos económicos necesarios para poder implementarlos y se está analizando el precio máximo que podría pagar Pemex por este producto. En su momento, se tendrán que evaluar los proveedores del producto para verificar la garantía del abasto, calidad, reducción neta de gases de efecto invernadero, así como el consumo neto de agua y posibles cambios de uso del suelo. Adicionalmente, se tiene un proyecto de investigación para el desarrollo futuro de etanol de segunda generación. Los programas posibles de implementación en el corto y mediano plazos son los siguientes:

- Uso de biodiesel como aditivo para mantener la lubricidad en la elaboración del Diesel Ultra Bajo Azufre (UBA).
- Uso de etanol como agente oxidante en la zona metropolitana de Guadalajara, Monterrey y Valle de México.

...”, **(PEMEX, 2008)**.

México presenta un rezago significativo en materia de energías alternativas con respecto a Brasil, la Unión Europea y los Estados Unidos, en este orden de importancia, las tecnologías para la producción de biocombustibles existen, desafortunadamente en México no se le ha otorgado la prioridad e importancia necesaria.

Tal es el nivel de rezago, que hasta el año 2009, la puesta en marcha de la producción de biodiesel está dada por la necesidad de utilizarlo tan solo como un lubricante para el nuevo producto PEMEX DIESEL UBA, que PEMEX produce como obligación derivada del compromiso adquirido con la comunidad

internacional a través del protocolo de Kioto y no tanto como una opción real de sustitución progresiva de combustibles fósiles.

Sin embargo, esta situación marca un precedente, se inicia una etapa donde PEMEX requiere al biodiesel como un insumo para uno de sus productos, lo que lleva a la apertura de un nuevo mercado. El mercado nacional de biocombustibles no existe, ya que no existía una demanda del producto ofertado, pero hoy surge una demanda real y con alto potencial de crecimiento.

El biodiesel es necesario como lubricante del nuevo PEMEX diesel UBA que tendrá como máximo 15 ppm cumpliendo con la Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005. La introducción de dicho diesel inició en octubre del 2006 en la ciudad fronteriza de Ciudad Juárez, Chihuahua. Haciéndose extensivo para el resto del país a partir de enero de 2007. Petróleos Mexicanos anuncia que al cierre del mes de julio de 2009, la refinería "Ing. Antonio M. Amor" dio cumplimiento al compromiso contraído con el Gobierno Federal al conseguir producir el primer lote de combustible Pemex Diesel de Ultra Bajo Azufre (UBA) con un volumen de 60 mil barriles, el cual será destinado a abastecer la ciudad de Guadalajara, Jalisco.

“...Es importante señalar que a partir de la primera semana de julio, la unidad inició su caracterización para ajustar las condiciones de operación a los nuevos requerimientos y especificaciones del Diesel, por lo que además de vigilar el azufre en el producto, la nueva especificación implica el tener que agregar un aditivo para cumplir con los parámetros de lubricidad y conductividad, razón por la cual se requirió habilitar el tanque FB201B para recibir Biodiesel, que se utiliza como aditivo.”, **(PEMEX, 2009)**.

El consumo nacional de Pemex Diesel está por encima de los 348 mil barriles diarios, aceptando que no se cuentan con la infraestructura para abastecer la zona fronteriza que corresponde al 15% del total de la demanda, por lo que esta deber ser cubierta por Diesel importado.

Los 60 mil barriles producidos de PEMEX DIESEL UBA solamente cubren el 17% de la demanda nacional.

La superficie mexicana ocupa una extensión cercana a los 2 millones de km<sup>2</sup>, que corresponden a 200 millones de hectáreas, de las cuales 108 millones tendrían potencial de producción, pero debido a las condiciones geográficas y climáticas la extensión de terreno cultivable se limita a 23 millones, el 11.7% de las hectáreas totales, actualmente 15 millones se encuentran sembradas.

Para el año 2012 se planea dedicar 300 mil hectáreas para el cultivo de bioenergéticos. La figura 2.7 muestra la distribución actual de los llamados cultivos energéticos.



Figura 2.6 Cultivos potenciales

### 2.8 Balance energético

La energía se refiere a la capacidad que poseen los cuerpos para efectuar cualquier tipo de trabajo, por lo que todo cuerpo que pasa de un estado a otro produce fenómenos físicos que se refieren a manifestaciones o formas de alguna transformación de la energía. Existen diversos tipos de energía que son definidas según su naturaleza como mecánica, electromagnética, térmica, química, metabólica, etc. A su vez, dependiendo de la fuente de obtención son catalogadas como renovables y no renovables. Entendiendo como renovable toda aquella forma de energía que tiene como materias primas recursos que pueden ser utilizados de manera continua e ilimitada debido a su capacidad regenerativa. Mientras que la explotación de recursos que producen formas de energía no

renovables conducen a desequilibrios debido a la incapacidad tanto humana como por parte de la naturaleza de regenerar los recursos utilizados.

El balance energético en los biocombustibles es básicamente la diferencia entre la energía disponible por unidad de combustible que es producida y la energía que fue requerida para su fabricación, tomando en cuenta todas las etapas de producción tales como el cultivo de la materia prima, el transporte de esta a la industria, la industrialización (transesterificación) y el transporte hasta el uso final.

Bajo esta definición, a través de un balance energético se determina si el combustible proporciona más energía durante su combustión de la que fue requerida para su elaboración.

Los tipos de energía a considerar como entradas en un balance energético son:

- Energía primaria total: Es toda la energía contenida en las materias primas que son extraídas del medio ambiente. Refiriéndose a la cantidad de energía que sería producida por la combustión total de la materia prima.
- Energía de materia prima: Es la energía contenida en la materia prima que termina en el producto final.
- Energía de proceso: Es la energía extraída del medio ambiente que no contribuye al contenido energético del producto, pero es necesaria para la conversión del producto, como el gas, la electricidad, entre otras.
- Energía fósil: Es la energía fósil utilizado en el proceso de fabricación.
- Energía final del combustible: Es la energía contenida en el producto que puede ser convertida en trabajo.

Las magnitudes que permiten relacionar las cantidades de energía asociadas son:

- Relación energética (RE-R1): Definida como la energía que proporciona el bien conseguido con respecto a la energía fósil requerida para su obtención. Es una magnitud adimensional y se utiliza principalmente cuando un bien se destina a la generación de energía.
- Ganancia neta de energía (GNE): Es una variante de la relación energética pero definida como la diferencia entre la energía proporcionada por un bien y la requerida para su obtención.



- Productividad Energética (PE): Es la relación entre la cantidad producida de un bien medida en unidades de masa o volumen y la energía requerida para su obtención.

Existen diferentes análisis del ciclo de vida donde se incluyen balances energéticos que han sido desarrollados en Europa por el Comité Termo-Técnico italiano y en Estados Unidos por el Departamento de Energía en colaboración con el Departamento de Agricultura, esta última ha obtenido relaciones de energía ingresada contra energía obtenida entre 3.2 y 3.4. **(Janulis.P, 2004)**.

La relación energética para los metilésteres provenientes de aceite de canola en la República de Lituania arroja un rango entre 2.41 y 5.23. Brasil reporta valores para biodiesel a partir de aceite de castor entre 2 y 2.9, mientras que el aceite de palma entrega relaciones entre 3.8 y 5.7. **(Yañez, 2009)**.

La diferencia entre los modelos desarrollados radica en la cantidad de variables que son consideradas como parte del proceso, provocando una gran disparidad e incapacidad de comparación de los resultados.

Los principios y el marco sobre el análisis del ciclo de vida se encuentra en la norma ISO-14040, mientras que los requerimientos de las distintas fases del ciclo de vida se encuentran en las normas ISO-14041-14043. Donde se sugiere involucrar 4 etapas, (S&T Consultants Inc., 2009): Definición del objetivo y alcance.

1. Análisis del inventario.
2. Evaluación del impacto.
3. Interpretación.

De manera específica, sobre el balance de energía se sugiere, **(Yañez, 2009)**:

1. Definición de los límites del sistema.
2. Entradas y tipo de energía considerado.
3. Suposiciones hechas.

### **2.9 Balance ecológico (Dióxido de carbono)**

El carbono tiene un papel importante en las reacciones de oxidación-reducción de las formas de vida. Por un lado se cuenta con los organismos fotosintéticos que utilizan el CO<sub>2</sub> atmosférico para convertirlo en carbono orgánico reducido, de alto potencial energético. Mientras que por el otro lado están los organismos heterótrofos, que buscan utilizar esta energía almacenada mediante la oxidación de los compuestos orgánicos reducidos, consumiendo oxígeno y liberando CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Este es simplemente uno de los muchos procesos asociados al ciclo del carbono.

Para comprender el ciclo de carbono, primero se deben entender las diversas formas y los lugares en los que se encuentran los cuerpos receptores, segundo como se mueven los flujos de intercambio de carbono, y tercero los factores que controlan o influyen en los flujos.

Existen diversas formas en las que el carbono puede estar interviniendo en el ciclo: 1) Inorgánico sólido, como componente de rocas y minerales, principalmente carbonatos y bicarbonatos; 2) Orgánico, presente como biomasa; y 3) Como gas, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO.

Una proporción menor, pero considerable, del carbono global se encuentra en la atmósfera como CO<sub>2</sub>, aproximadamente un 0.035%, 350 ppm, del aire se compone de dióxido de carbono. Mientras que otras porciones se encuentran presentes en forma mineral, particularmente carbonatos de calcio y magnesio. Una fracción diferente de carbono es fijada como petróleo o gas natural. La tabla 2.4 menciona los puntos de reserva de carbono en la tierra.

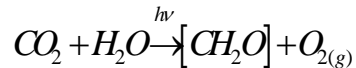
**Tabla 2.7 Distribución del carbono**

Reserva de Carbono	Cantidad	Unidad
Atmósfera	730	10 <sup>15</sup> g C
Rocas	65,000,000	10 <sup>15</sup> g C
Océano	39,000	10 <sup>15</sup> g C
Suelo	1,580	10 <sup>15</sup> g C
Vegetación	610	10 <sup>15</sup> g C

Los procesos biogeoquímicos se refieren al paso de la materia entre la biósfera, atmósfera, océanos y geosfera. En la atmósfera, la mayor parte del carbono está presente como dióxido de carbono, mientras que en la biósfera y geosfera se encuentra como carbono orgánico e inorgánico. El ciclo de carbono consiste en el movimiento del carbono a través de todas estas formas.

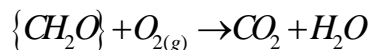
El punto de intercambio de carbono más conocido es aquel que efectúa la atmósfera con la vegetación, donde el CO<sub>2</sub> es absorbido de la atmósfera durante la fotosíntesis y devuelto durante la respiración. El otro punto importante de intercambio es el que mantiene el océano con la atmósfera, la absorción del CO<sub>2</sub> permite la fotosíntesis de la flora marina.

La fotosíntesis es la reacción fotoquímica mediante la cual, las plantas de tipo superior, algas y bacterias fotosintéticas utilizan energía solar para fijar carbono inorgánico dando lugar a un carbono orgánico de alta energía. Ver ecuación 2.3



**Ecuación 2.3. Reacción de fotosíntesis.**

La respiración se refiere a la oxidación de la materia orgánica en presencia de oxígeno molecular. Ver ecuación 2.4



**Ecuación 2.4. Reacción de oxidación.**

La formación de metano es una desviación del ciclo, llevado a cabo por arqueobacterias metanogénicas principalmente.

Otra vía de intercambio se da mediante los microorganismos, los cuales se encuentran fuertemente relacionados con el ciclo del carbono, interviniendo en reacciones bioquímicas. Las algas son los principales organismo fijadores de carbono en el agua. El carbono que es fijado por los microorganismos es transformado mediante procesos biogeoquímicos en petróleo, querógeno, lignito o carbón mineral. Los microorganismos degradan el carbón orgánico de la biomasa regresándolo a la atmósfera.

A estos flujos de carbono se les ha sumando un término relativamente nuevo tomando en cuenta la escala de tiempo geológica, las emisiones por efecto en la

quema de combustibles fósiles. La tabla 2.5 identifica a los flujos de carbono como emisiones o fijaciones.

**Tabla 2.8 Flujos de carbono.**

Flujos de Carbono <small>ciclo corto</small>	Cantidad	Unidad
Océanos <b>Fijación</b>	90	10 <sup>15</sup> g C/año
Fotosíntesis <b>Fijación</b>	120	10 <sup>15</sup> g C/año
Cambio Uso suelo <b>Fijación</b>	1.9	10 <sup>15</sup> g C/año
Respiración <b>Liberación</b>	119	10 <sup>15</sup> g C/año
Océanos <b>Liberación</b>	88	10 <sup>15</sup> g C/año
Combustibles fósiles <b>Liberación</b>	6.3	10 <sup>15</sup> g C/año
Cambio Uso suelo <b>Liberación</b>	1.7	10 <sup>15</sup> g C/año

Utilizando los principios biogeoquímicos se plantea un balance de materia con base en los flujos anteriores, esto genera el balance diferencial mostrado en la ecuación 2.5.

$$\frac{dC_{\text{carbono}}}{dt} = \sum \text{Carbono}_{\text{Emitido}} - \sum \text{Carbono}_{\text{Fijado}} = 3.1$$

**Ecuación 2.5. Acumulación de carbono.**

El ciclo del carbono es complejo, y un cambio en alguno de los procesos tiene impactos significantes sobre el resto de los procesos. El ciclo del carbono debe ser un sistema cerrado, esto significa que parte del exceso de CO<sub>2</sub> atmosférico, proveniente de la quema de combustibles fósiles, deber ser fijado por algún receptor, el cuerpo receptor aun no ha sido localizado, por lo que, las investigaciones apuntan al aumento en los niveles del CO<sub>2</sub> atmosférico.

El dióxido de carbono tiene un papel determinante, al igual que el vapor de agua, en la reabsorción de rayos infrarrojos que son emitidos por la tierra, manteniendo la temperatura de la superficie terrestre en un promedio de 15°C, de no ser así, los rayos abandonarían la tierra y la temperatura de su superficie estaría cercana a los -18°C. La escala de absorción para el dióxido de carbono se encuentra entre los 12 μm y 16.3 μm. El aumento en los niveles de dióxido de carbono atmosférico

provoca una menor emisión de radiaciones, y con ello de calor, provocando un aumento en la temperatura de la tierra, fenómeno conocido como efecto invernadero.

El mayor factor de contribución al aumento del dióxido de carbono atmosférico es el consumo de combustibles fósiles, también existen otras rutas de emisión provenientes de la desintegración de la biomasa. El cambio de uso de suelo, mediante la tala de bosques para cultivos, es un factor importante sobre la cantidad de dióxido de carbono atmosférico, ya que los bosques y selvas son los principales receptores de dióxido de carbono atmosférico.

El uso de biodiesel como combustible apunta hacia la creación de un sistema neutro, es decir, que el CO<sub>2</sub> emitido durante el proceso de producción como durante su quema, sea fijado de manera total o parcial por los cultivos de las semillas utilizadas como materia prima.

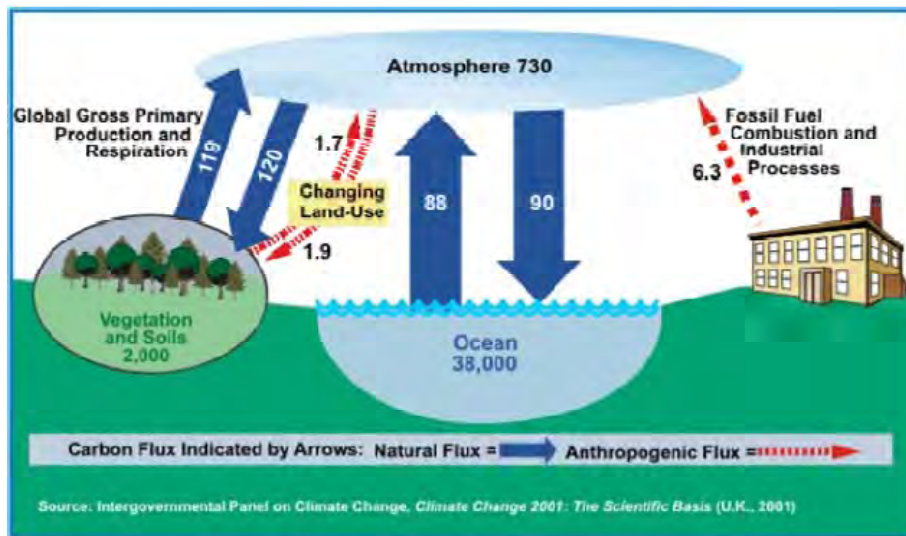


Figura 2.7 Ciclo de carbono.

La figura 2.8 ilustra las reservas de carbono, mientras que las flechas indican los flujos de carbono, ya sean emitidos o absorbidos. Los flujos de interés para este estudio son los del tipo fotosintético, respiración vegetal y emisión de combustibles fósiles.

Si bien, a lo largo de la vida de la tierra, han existido épocas con una mayor concentración de dióxido de carbono, el problema principal radica en que la relación con la que la concentración está cambiando es la más alta o rápida de la

historia, y se desconoce la respuesta que las formas de vida puedan tener a estos cambios tan rápidos en la concentración. De la ecuación diferencial de acumulación se puede crear una simple ecuación que modele el aumento del CO<sub>2</sub> atmosférico a lo largo del tiempo, como se observa en la ecuación 2.6.

$$\frac{dC}{dt} = 3.1$$
$$dC = 3.1dt$$
$$C(t) = 3.1t + z$$

**Ecuación 2.6. Resolución ecuación diferencial.**

Esta ecuación del tipo lineal arroja cálculos sobre la cantidad de dióxido de carbono atmosférico en los próximos años. Se llega a esta ecuación bajo varias suposiciones, una de ellas es proponer que los flujos se mantienen constantes a lo largo del tiempo. Donde además, la aproximación de los flujos se considera partiendo de un sistema no balanceado, es decir, existe un receptor faltante, existe un punto fijador de carbono que no se ha ubicado o la evaluación de los flujos no se ha llevado de manera correcta. Sobre estas aproximaciones se debe trabajar en busca de un balance de dióxido de carbono durante la producción de biodiesel.

### III. CAPÍTULO METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan las bases teóricas e información recabada que sirven como sustento para dar estructura al desarrollo de los sistemas que modelan el balance energético así como la emisión neta de CO<sub>2</sub> durante el proceso de obtención de biodiesel a partir de *Jatropha curcas*.

El modelo desarrollado sigue en cierta medida los lineamientos señalados por la comunidad internacional para la elaboración de estudios de impacto ambiental, que se evalúan dentro de los análisis del ciclo de vida, las principales bases se tomaron a partir de lo publicado por la Asociación de Estándares Internacionales, ISO y la Federación Internacional de Institutos para Estudios Avanzados, IFIAS.

Se identifican las variables de proceso que permiten proyectar la capacidad de producción, funcionando como base de cálculo. Por otra parte se asignan factores de consumo energético y de emisiones de CO<sub>2</sub> sobre cada una de las actividades asociadas a las etapas de producción, denominadas unidades de producción.

El modelo consiste en relacionar los factores de consumo con la cantidad de materia prima y producto, permitiendo así cuantificar la energía fósil utilizada así como los kilogramos de dióxido de carbono emitidos en cada unidad de producción.

Según lo planteado por la norma ISO 14040, un estudio de balance energético y de emisiones de dióxido de carbono debe definir:

1. Objetivo: Establecer un modelo adecuado, que permite establecer balances energéticos y ecológicos del proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de *Jatropha curcas* que a su vez sea aplicable a otras semillas.
2. Alcance: Aportar los análisis de factibilidad y viabilidad que la industria bioenergética mexicana requiere, para crear bases firmes sobre las cuales dirigir las inversiones.
3. Función: Producción de biocombustible a partir de la reacción de transesterificación del aceite de *Jatropha curcas*

4. Unidad Funcional: MJ cedidos por el biodiesel durante la combustión entre MJ de energía fósil ingresada al sistema de producción del biodiesel.
5. Unidad Referencia: por Kg de biodiesel producido
6. Unidades de Producción:
  - I. Agrícola
  - II. Extracción
  - III. Transesterificación

### **3.1 Metodología del balance energético**

La metodología es una compilación de diversas fuentes, anteriormente mencionadas, en la cual se pretende simplificar al máximo la forma de evaluar la eficiencia energética de un proceso, a continuación se presentan los puntos a considerar:

1. Establecer los límites del proceso objeto de análisis.
2. Identificar las actividades involucradas en el proceso.
3. Determinar las variables del proceso que definen el volumen de producción y base de cálculo.
4. Asignar la energía específica a cada actividad del proceso y los factores de consumo sobre el volumen de producción.
5. Multiplicar la energía específica por las cantidades de materia prima, productos intermedios o producto final procesado en cada unidad de producción.
6. Sumar las magnitudes energéticas de las diferentes actividades relacionadas con la misma etapa de producción, permitiendo así agrupar la cantidad de energía requerida en cada unidad de producción.
7. Identificar y cuantificar el producto final. Establecer criterios para asignar el consumo asociado al producto principal, es decir, el poder calorífico.
8. Relacionar la energía contenida en un producto con la energía requerida para su producción.



Este balance energético únicamente considera el gasto producido por las fuentes fósiles de energía durante el proceso de producción, y lo compara con la energía final del producto manifestado como poder calorífico.

### 3.1.1 Límites de Sistema

En la figura 3.1 se ejemplifica de manera esquemática las fronteras que presenta el sistema en estudio.

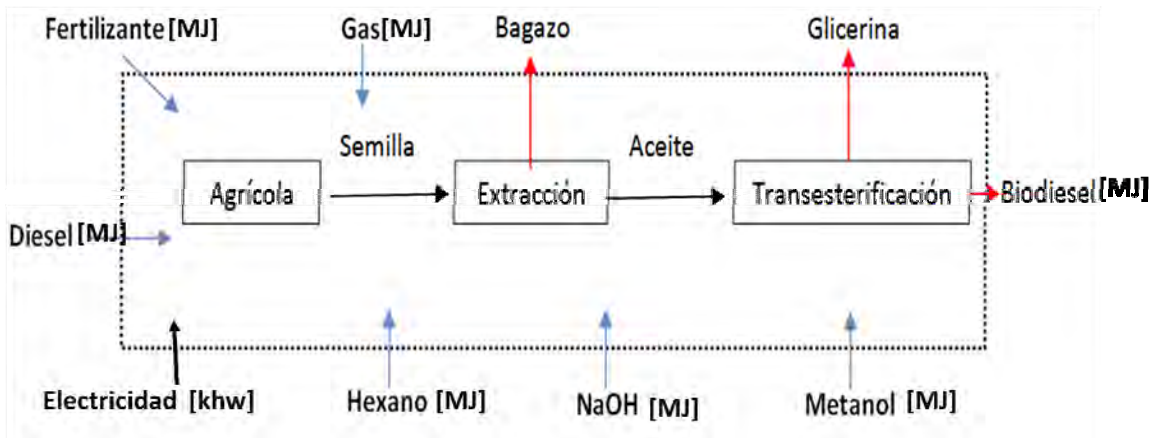


Figura 3.1. Fronteras del modelo.

### 3.1.2 Actividades del proceso

El proceso de producción se divide en tres grandes etapas, (1) agrícola, (2) extracción y (3) transesterificación, que a su vez presentan subdivisiones.

Unidades de producción:

- (1) Agrícola: Incluye la energía requerida para la producción de fertilizantes, siembra, labrado y cosecha de la tierra, así como el proceso de secado del grano o semilla, además la contribución al gasto energético proveniente de las tareas de transporte requerido entre estas actividades.
- (2) Extracción: Comprenden los gastos energético de cada una de las operaciones que son necesarias para extraer el aceite del grano.

(3) Industrial: Comprende la energía requerida para la transesterificación así como la energía utilizada para la elaboración de los reactivos y el traslado del producto terminado hasta el punto de venta.

### 3.1.3 Base de cálculo

$$Diesel_{UBA} \left[ \frac{bl}{día} \right] \left( 158.987 \left[ \frac{L}{bl} \right] \right) = Diesel_{UBA} \left[ \frac{L}{día} \right]$$

**Ecuación 3.1. Demanda de PEMEX.**

La base en la capacidad de producción está dada por la demanda nacional de diesel reportada por PEMEX. Ver ecuación 3.1

La cantidad de biodiesel que debe ser agregado como aditivo al diesel convencional para conferir propiedades de lubricidad es del 0.05% en volumen como mínimo hasta el 5.0%, por lo que la producción diaria de biodiesel está dada por la ecuación 3.2.

$$Biodiesel \left[ \frac{L}{día} \right] = Diesel_{UBA} \left[ \frac{L}{día} \right] * \%_{LUBRICACIÓN}$$

**Ecuación 3.2. Biodiesel requerido.**

Con base en la cantidad de biodiesel que debe ser producido se hace el cálculo sobre la cantidad de aceite que es necesario transesterificar tomando en cuenta el factor de rendimiento en peso de la reacción, como se calcula en la ecuación 3.3.

$$Aceite \left[ \frac{ton}{año} \right] = \frac{\left( Biodiesel \left[ \frac{L}{día} \right] \right) * (\rho_{Biodiesel})}{\left( \%_w \frac{Masa_{Biodiesel}}{Masa_{Aceite}} \right)}$$

**Ecuación 3.3. Aceite requerido.**

*\*Se utilizaron los factores de conversión necesarios para expresar la cantidad de aceite necesario en ton/año*

La cantidad de semilla necesaria para cubrir la producción se obtiene como se indica en la ecuación 3.4, a partir del aceite requerido y del porciento en peso del aceite contenido en la semilla.

$$Semilla \left[ \frac{ton}{año} \right] = \frac{\left( Aceite \left[ \frac{ton}{año} \right] \right)}{\left( \%_w \frac{Masa_{Aceite}}{Masa_{semilla}} \right)}$$

**Ecuación 3.4. Semilla requerida.**

Por último, como parte de los datos iniciales conocer la cantidad de hectáreas que es necesario cultivar, a partir del rendimiento por semilla que presenta una hectárea. Ver ecuación 3.5

$$ha_{Cultivo} = \frac{\left( Semilla \left[ \frac{ton}{año} \right] \right)}{\left( Rendimiento \left[ \frac{ton}{ha\ año} \right] \right)}$$

**Ecuación 3.5. Hectáreas de cultivo.**

Se identifican a las siguientes variables como aquellas que definen la capacidad de producción de biodiesel.

**Tabla 3.1. Factores determinantes en la cantidad de materia prima.**

a. % de lubricación
b. Demanda PEMEX DIESEL UBA [Barril/día]
c. Rendimiento en peso TRANSESTERIFICACION
d. Rendimiento cultivo [ton/ha/año]
e. % W Aceite

Los factores a y b dependen de las necesidades del mercado, mientras que c es una variable que depende directamente de la eficiencia y tecnología empleada en el proceso de obtención del biodiesel. Por último, d y e son variables de cultivo.

Un punto importante a considerar es la densidad de población del cultivo, expresado como el número de plantas por hectárea.

En el anexo I, se lleva a cabo un análisis sobre el porcentaje de aceite en la semilla utilizada.

A continuación se presenta el desarrollo del punto 4 de la metodología planteada, relacionado con la asignación de factores de consumo específico por tarea realizada en cada una de las fases involucradas en el proceso de producción de biodiesel.

### 3.1.3.1 Fase Agrícola

Se realiza un análisis sobre la cantidad de energía fósil asociada a los factores de producción de las semillas oleaginosas, representados en la figura 3.2.



**Figura 3.2. Fase agrícola.**

Dentro de los insumos se incluyen a los fertilizantes y las semillas necesarios para el cultivo. Los fertilizantes minerales son los factores de producción de mayor demanda energética tanto en su fabricación como en su preparación. La producción de amoníaco, a partir del nitrógeno del aire, y de ácido nítrico, exige grandes cantidades de gases licuados del petróleo para reaccionar con el aire a elevadas temperaturas y producir el calor necesario para llevar a cabo tales reacciones.

**Tabla 3.2. Factores de Consumo Específico (Insumos).**

Insumos	Cantidad (López, 2008)	Energía [MJ/unidad] (Donato, Huerga, & Hilbert, 2008)
Semillas [kg/ha]	70	16.62
Estiércol [Kg/planta]	0.5	0
UREA [Kg/planta]	0.025	70
FAENA [L/ha]	2	418
Fungicida [L/ha]	0.5	283.3

*Se utiliza la densidad de población como factor de conversión, para obtener el número de plantas, para los casos necesarios*

Siguiendo el punto cinco de la metodología propuesta, se multiplica el factor de consumo específico, por la cantidad requerida como lo indica la ecuación. Los datos anteriores son propios del cultivo de *Jatropha curcas*, ya que la cantidad de fertilizante a utilizar puede variar de un cultivo a otro.

$$Energía_{Consumida} [MJ] = \sum_{i=1}^n F_{Energía\ i} \left( (Cantidad_{Insumo\ i}) (Unidad) \right)$$

**Ecuación 3.6 Consumo energético insumos.**

### 3.1.3.1.1 Labranza

El trabajo de labranza se define como la modificación del estado estructural del suelo mediante fuerzas mecánicas, esta actividad tiene como objetivo crear un entorno favorable para la germinación y desarrollo de la especie cultivada. Por otra parte, el trabajo de labranza también permite desalojar especies vegetales no deseadas que pueden convertirse en factores de competencia de agua y nutrientes. En los sistemas de labrado convencional la mayor parte del consumo energético está referido a la labor del arado y por esta razón solo se consideró a esta actividad como la única involucrada en el proceso de labranza. La tabla 3.3 indica el consumo típico durante la etapa de labranza durante el cultivo de la semilla.

**Tabla 3.3 Factor de consumo por arado.**

**Consumo específico Arado [L/ha cm]**

0.8

$$Energía_{Consumida} [MJ] = \left( 0.8_{F_{Energía}} \left[ \frac{L_{Diesel}}{ha\ cm} \right] \right) * (Pr\ ofundida_{Arado} [cm]) * (ha_{Cultivadas}) * \left( PC_{Diesel} \left[ \frac{MJ}{L} \right] \right)$$

**Ecuación 3.7 Consumo energético labranza**

*30 cm es la profundidad utilizada para la plantación de en semillas oleaginosas, (López, 2008)*

**3.1.3.1.2 Cosecha**

La cosecha se refiere al periodo de tiempo donde se recoge la semilla completamente crecida y fortalecida, es importante realizar la recolección a tiempo, de lo contrario se corre el riesgo de tener pérdidas por ataques de pájaros y otros animales. En México se utiliza la cosecha directa, se recomienda cuando el 90% de las plantas ha alcanzado la madurez total y la humedad del grano se encuentra alrededor del 20%. Las pérdidas por cosecha algunas veces superan el 5% en peso de la productividad por hectárea. La *Jatropha curcas* presenta maduraciones dispares, situando a la cosecha como un punto clave a mejorar buscando la completa industrialización del proceso.

Al igual que en el proceso de labranza, donde el arado representaba el único gasto energético importante, para la fase de cosecha, la recolección de las semillas representa más del 80% del requerimiento energético total.

La cosechadora es una máquina que hace las labores de recolección de los productos agrícolas. Para la recolección de semillas oleaginosas se puede emplear maquinaria convencional, como la utilizada en plantíos de cereales, haciendo los ajustes necesarios en el mecanismo de corte, trilla y limpieza.

Tanto el consumo de diesel como la capacidad de la cosechadora dependen de la marca y el modelo, en la tabla 3.4 se presentan dos modelos de cosechadoras existentes en el mercado:

**Tabla 3.4 Cosechadoras.**

<b>Cosechadoras Lexion® 480</b>		
Capacidad	66.51	[ton/h]
Consumo diesel	1.35	[L/ton]
<b>Cosechadora Jonh Deere® 4420</b>		
Capacidad	10.63	[ton/hora]
Consumo diesel	5.242	[L/ton]

Con base en los datos anteriores es posible obtener factores de consumo específico, como se indica en la ecuación 3.8.

$$Consumo_{Diesel} \left[ \frac{L}{h} \right] = \left( Cap. \left[ \frac{ton}{h} \right] \right) * \left( Consumo_{Diesel} \left[ \frac{L}{ton} \right] \right)$$

$$Cap_{Trabajo} \left[ \frac{ha}{h} \right] = \frac{Cap \left[ \frac{ton}{h} \right]}{Rendimiento \left[ \frac{ton}{ha} \right]}$$

**Ecuación 3.8. Factores de consumo específico.**

Lo anterior permite realizar una comparación con los datos utilizados en Argentina, donde utilizan un factor unitario de 60 L/h en el consumo de diesel y una capacidad de trabajo promedio de 6 Ha/h en cultivos de semillas oleaginosas.

**Tabla 3.5 Tabla comparativa de cosechadoras.**

<b>Fuente</b>	<b>Cap. Trabajo[ha/h]</b>	<b>Consumo[L/h]</b>	<b>Consumo ha[L/ha]</b>
Balance Argentino (Donato, Huerga, & Hilbert, 2008)	6	60	10
Cosechadora Jonh Deere® 4420	4.72	55.72	11.79
Cosechadoras Lexion® 480	29.56	89.79	3.04

La tabla 3.5 muestra claramente que el modelo Lexion® es un modelo de alto rendimiento y tecnología, que toma mucha ventaja sobre los modelos existentes en los campos mexicanos. Por otra parte, se valida que el dato proveniente de la República Argentina es una buena aproximación.

La forma de obtener el consumo de energía fósil durante la cosecha de la semilla se muestra en la ecuación 3.9.

$$Energía_{Consumida} [MJ] = \left( Consumo \left[ \frac{L_{Diesel}}{ha} \right] \right) * (ha_{cosechada} [ha]) * \left( PC_{Diesel} \left[ \frac{MJ}{L} \right] \right)$$

**Ecuación 3.9 Consumo energético cosecha.**

### 3.1.3.1.3 Secado

La operación de secado consiste en el ajuste de humedad y temperatura, permitiendo que la semilla sea almacenada y transportada hasta el centro de extracción. Las semillas son seres vivos, que respiran y utilizan el oxígeno del aire, producen bióxido de carbono, agua y energía que se traduce en calor. Esto permite que se puedan almacenar en volúmenes considerables y durante largos períodos sin mayores consecuencias de deterioro, siempre que las condiciones ambientales sean favorables a su conservación. Uno de los factores más importantes es la humedad, existen dos tipos de humedad asociadas a la semilla una es la humedad de equilibrio y otra la humedad relativa (HR) del aire.

Las semillas son higroscópicas y absorben o liberan humedad, dependiendo del ambiente donde se les coloque y su contenido de humedad final se estabiliza cuando estas se exponen a un ambiente específico por un período de tiempo determinado, lo cual se conoce como humedad de equilibrio. Si el contenido de humedad de la semilla es alto, mayor que el de la humedad de equilibrio para un ambiente dado, la semilla liberará humedad al ambiente; si por el contrario es menor, entonces absorberá humedad del aire. Está demostrado que cuando la HR del aire supera 75%, el contenido de humedad de las semillas se incrementa rápidamente; en cambio en climas secos donde la HR no sobrepasa ese límite, sus cambios afectan poco el contenido de humedad de las semillas.

Para este trabajo se consideró una secadora convencional tipo torre que puede operar con diesel o gas. Una secadora correctamente construida, utilizada y mantenida, tiene un consumo energético de poco más 1000 Kcal por cada kg de



agua evaporada. En la tabla 3.6 se muestran las fuentes generadoras de este consumo energético.

**Tabla 3.6 Demanda energética ideal de secadora tipo torre.**

Demanda energética	Energía[Kcal]
Calor necesario para la evaporación de 1 kg de agua	600
Pérdida por el calor sensible que se va en el aire usado	300-320
Perdidas de Calor por conducción, radiación y convección hacia el exterior	30
Pérdida por el calor transportado por el grano	80
<b>Total</b>	<b>1 010-1 030</b>

El valor de 600 Kcal/kg de agua no puede ser disminuido de ninguna forma, pues es el calor mínimo que se requiere para evaporar el agua. Las otras pérdidas pueden ser rebajadas por medio de mejoramientos en las secadoras o utilizando algunos sistemas de secado más eficiente. Casi el 50% del calor producido por el combustible se puede perder. Las calorías necesarias para el secado las suministra el combustible.

Las pérdidas de energía o de calor de una secadora son variadas, las más importantes son las que se producen por el calor sensible que se va con el aire usado. Aun cuando el aire usado salga saturado, siempre una pérdida de calor se origina por el calor sensible que conduce. Las condiciones más favorables para el secado se presentan cuanto mayor sea la diferencia entre la temperatura del aire de secado que entra en contacto con los granos y la del aire usado. En la tabla 3.7 se muestra el rango de consumo energético.

**Tabla 3.7 Consumo específico en operación.**

<b>Consumo Especifico[Kcal/Kg<sub>agua</sub>]</b>
1030-1200.00

Para la determinación del consumo de energía durante la operación del secado es importante definir la capacidad en toneladas secas que tiene el equipo. Esto se hace mediante el uso de la siguiente ecuación, 3.10.

$$Agua_{Ingresada} \left[ \frac{kg}{h} \right] = \left[ \left( \frac{100 - Y_{entrada}}{100 - Y_{salida}} \right) * Cap_{seca} \left[ \frac{kg}{h} \right] \right] - Cap_{seca} \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

**Ecuación 3.10 Agua que ingresa**

Con el dato de agua es posible conocer la cantidad de Kcal necesarias para remover dicha cantidad de agua, al dividirlo entre el poder calorífico del diesel, se obtiene un factor del gasto volumétrico del combustible, L/h, este factor se multiplica por la cantidad de semilla a procesar y se obtiene el consumo energético para esta actividad, la revisión del cálculo se encuentra en el ecuación 3.11.

$$Energía_{Consumida} [Kcal] = \left( \frac{\left( Agua_{Ingresada} \left[ \frac{kg}{h} \right] \right) * \left( Consumo_{Especifico} \frac{kcal}{kg_{agua}} \right)}{\left( PC_{Diesel} \left[ \frac{kcal}{L} \right] \right)} \right) * \left( \frac{Semilla \left[ \frac{ton}{año} \right]}{\left( Agua_{Ingresada} \left[ \frac{kg}{h} \right] + Cap_{seca} \left[ \frac{kg}{h} \right] \right)} \right)$$

**Ecuación 3.11 Consumo energético durante secado**

*Se utiliza el factor de conversión de 238.84 Kcal por MJ*

El consumo de energía eléctrica por el accionar de la máquina tiene poco impacto en la demanda global energética del secado, corresponde aproximadamente al 1%. De acuerdo a los datos de fabricantes, la potencia total absorbida por las máquinas se puede calcular en caballos de vapor con la ecuación 3.12

$$CV = 1.5 * Cap_{Seco} \quad \text{sec adora Caballete}$$

$$CV = 2.0 * Cap_{Seco} \quad \text{sec adora Torre}$$

$$1CV = 0.736 [kwh]$$

**Ecuación 3.12. Correlación consumo eléctrico.**

Con el dato de CV, es posible obtener el gasto eléctrico y mediante el uso de factores de conversión es posible conocer la energía consumida, asumiendo que la fuente de la energía eléctrica es de tipo fósil.

$$Energía_{consumida} = (kwh_{consumido}) \left( \frac{3.6[MJ]}{1[kwh]} \right)$$

**Ecuación 3.13 Consumo energético de motor.**

#### 3.1.3.1.4 Transporte

Para evaluar el consumo de energía durante el transporte de la semilla hasta el lugar de la extracción, se toma como base un consumo específico de diesel de 2 L/ton, dicho consumo también fue utilizado por U.S Department of Agriculture and U.S Department of Energy como dato en la evaluación energética del biodiesel a partir de aceite de soya. Este factor aplica en una distancia no mayor de 56 km entre el centro agrícola y la planta de extracción. El dato se muestra a continuación.

$$Energía_{consumida} = 2 \left[ \frac{L}{ton} \right] (ton_{cos\ echadas})$$

**Ecuación 3.14 Consumo energético.**

*En el total de toneladas transportadas desde el centro agrícola hasta la planta de extracción se contempla un factor no mayor del 1% en peso de basura y masa vegetal transportada.*

#### 3.1.3.1.5 Consideraciones hechas durante la fase agrícola

- Se supone un cultivo de riego por temporal, por esta razón no se incluyen los gastos energéticos derivados del sistema hidráulico para el riego.
- La cantidad de insumos requeridos por cultivo cambiará en función de la demanda de cada tipo de semilla por cultivar.
- Las etapas de labranza solo considera al arado de la tierra como la única actividad de alta demanda energética.
- La cosecha de la semilla tiene como único elemento de gasto energético a la máquina cosechadora y su asociado tractor de acarreo.

- El secado de la semilla se realiza en un equipo de torre bajo un consumo de específico, Kcal/kg<sub>agua</sub>, superior al ideal. El secador puede operar con diesel o gas natural. El consumo energético total para esta etapa estará definido principalmente por la cantidad de agua que será necesario remover.

### 3.1.3.2 Fase de extracción (Sheeban, 1998)

La extracción por solvente es un proceso para extraer el aceite de la semilla oleaginosa con un solvente de bajo punto de ebullición. Debido al alto porcentaje de recuperación de aceite y solvente, este tipo de extracción se ha convertido en el método más utilizado en la industria.

La extracción por solvente es un proceso de difusión de un solvente en las células que contienen aceite en la materia prima, dando por resultado una solución de aceite en solvente, conocido como miscela.

Los disolventes más empleados en Estados Unidos para la extracción de aceites y grasas son las fracciones ligeras parafínicas del petróleo. Una clasificación ASTM de fracciones industriales según su punto de ebullición según en cuatro tipos de naftas es la siguiente: tipo pentano 30 a 35 °C, tipo hexano 63.3 a 69 °C, tipo heptano 87 a 97 °C y tipo octano de 100 a 140 °C. El bajo punto de ebullición del hexano, así como la alta solubilidad del aceite son las características que han convertido al hexano como el disolvente más común para realizar la extracción.

La figura 3.3 muestra las operaciones mínimas necesarias para llevar a cabo la extracción de aceites, se omitió el desgomado y la refinación del aceite que son operaciones básicas en los aceites comerciales de consumo humano. También se omitió la planta tratadora de agua asociada a la planta de extracción.

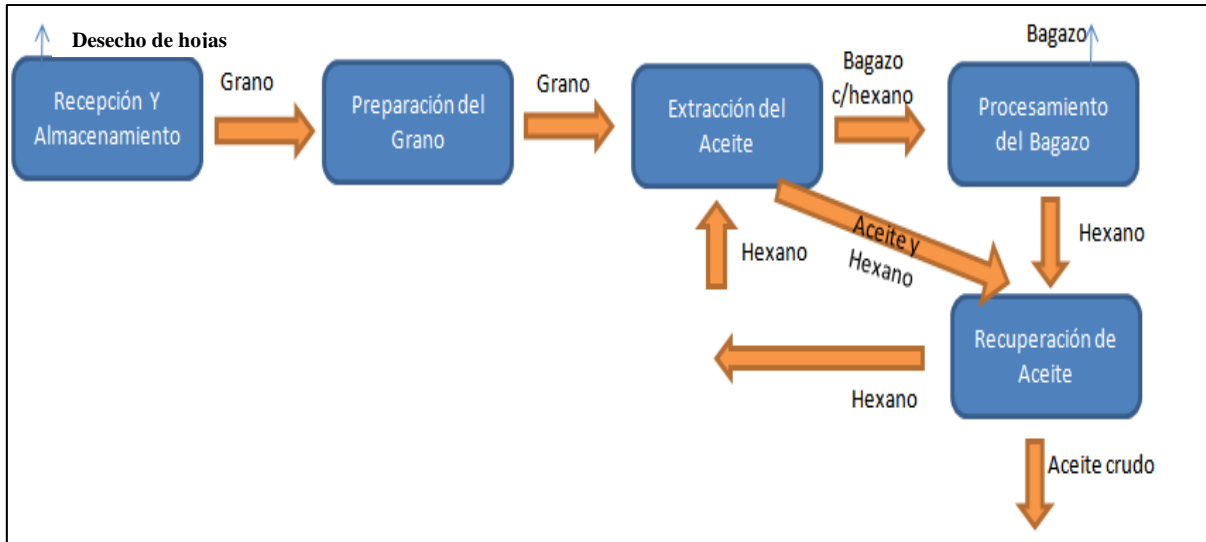


Figura 3.3 Extracción de aceite con solventes

### 3.1.3.2.1 Recepción y Almacenamiento

Durante la recepción y almacenamiento del grano se elimina la mayor cantidad de basura y material vegetal que puede venir acompañando a la semilla. Esta resulta ser una operación sencilla de cribado donde se desecha todo aquel cuerpo diferente a la semilla. La tabla 3.8 resume los factores de consumo energético durante la operación de cribado.

Tabla 3.8 Factor consumo específico (Recepción y Almacenamiento).

Actividad	Equipo	Energía consumida	Consumo normalizado [Kwh/ton]
Desembarque	Bandas Transportadoras	Eléctrica	5.84

La ecuación 3.15 muestra la operación mediante la cual se obtiene el gasto energético, se relaciona el factor de consumo y la cantidad recibida, además se cuenta con el factor de conversión en unidad eléctrica y energética.

$$Energía_{consumida} [MJ] = (kwh_{consumido}) \left( Semilla_{recibida} \left[ \frac{ton}{año} \right] \right) \left( \frac{3.6 [MJ]}{1 [kwh]} \right)$$

Ecuación 3.15 Consumo recepción y almacenamiento.

### 3.1.3.2.2 Preparación del grano

La preparación del grano consiste en una serie de acciones mecánicas sobre las semillas, tales como el quebrado, el descascarado y la molienda del grano para posteriormente realizar la formación de hojuelas. Cuanto más pequeño es el tamaño del material, mejor es la penetración del solvente en las células que contienen aceite. En el quebrado del grano los “cracking rollers” parten a la semilla en seis u ocho partes, el descarado del grano tiene como fin separar la fracción de la semilla que contiene el aceite. Previo a la formación de las hojuelas es importante acondicionar el grano ajustando su temperatura y humedad haciéndolo más plástico y flexible. Una corriente de vapor y aire, permite elevar la temperatura de la semilla hasta los 74 °C con una humedad del 9%. El grosor de las hojuelas se encuentra 0.3 y 0.4 mm, permitiendo la mayor extracción de aceite. La tabla 3.9 muestra los factores de consumo involucrados en el acondicionamiento de la semilla.

**Tabla 3.9. Factor consumo específico (Acondicionamiento).**

<b>Actividad</b>	<b>Equipo</b>	<b>Energía consumida</b>	<b>Consumo normalizado[Kwh/ton]</b>
Quebrado	"Cracking roller"	Eléctrica	4.14
Descascarado	Tamiz	Eléctrica	2.36
Acondicionamiento	Tanque	Eléctrica	1.13
Acondicionamiento	Tanque	Vapor	41432[Kcal/ton]
Laminado	Flaking roller mills	Eléctrica	13.96

La ecuación 3.16 muestra la forma general mediante la cual se obtiene el gasto energético, se relaciona el factor de consumo y la cantidad recibida, además se cuenta con el factor de conversión en unidad eléctrica y energética, para cada una de las actividades relacionadas, el gasto total es la suma de cada actividad.

$$Energía_{consumida} [MJ] = \sum (kwh_{consumido}) \left( Semilla_{acondiccionada} \left[ \frac{ton}{año} \right] \right) \left( \frac{3.6 [MJ]}{1 [kwh]} \right)$$

**Ecuación 3.16 Energía consumida en la preparación del grano.**

### 3.1.3.2.3 Extracción de aceite.

Durante la extracción de aceite, el extractor es la pieza clave de este proceso, existen diferentes tipos de extractores, el más utilizado es el extractor de celdas rotativo. Para efectos de este trabajo se supuso la utilización del extractor tipo cesta que cae dentro del tipo de extractores rotativos. El extractor tipo cesta es el extractor continuo más antiguo, tiene el aspecto de un elevador de cajones, contrariamente a otro tipos de extractores continuos, las semillas trituradas no se sumergen en el disolvente, sino que la extracción se realiza por percolación, en una serie de canastas con fondo perforado. Las canastas están sostenidas sobre una cadena sin fin. La harina se transporta por medio de un tornillo de Arquímedes a una tolva de carga. Las hojuelas y el hexano se vacían en canastas, en un movimiento rotatorio la miscela, hexano-aceite, cae al fondo del extractor donde se recogen y se reciclan en contracorriente por medio de una serie de bombas. Cada canasta es enjuagada por una mezcla menos concentrada de solvente- aceite. La miscela es enviada a un ciclón líquido de hexano puro donde es lavada. Mediante este método se obtiene una miscela mucho más limpia y libre de partículas finas, ya que durante el proceso las partículas no sufren trastornos mecánicos, además las canastas descendentes forman una serie de capas filtrantes.

La relación en la adición de hexano es de 1.2 kg hexano por cada kg de semilla, el proceso permite la recuperación del solvente, por lo tanto, la relación real de reposición de hexano es de 0.024. El mayor gasto energético en esta parte del proceso es de tipo eléctrico para la operación del equipo y las bombas, especificado en la tabla 3.10.

**Tabla 3.10 Consumo específico extracción.**

Actividad	Equipo	Consumo normalizado [Kwh/ton <sub>Semilla</sub> ]
Extracción Aceite	-Extractor Contra	3.6
	- Corriente	
	-Pre calentador Solvente	
	-Bombas	

Además, debe ser considerada la cantidad de energía fósil que debe ser invertida para la producción del hexano, el valor se muestra en la tabla 3.11

**Tabla 3.11 Consumo específico producción de hexano.**

Energía Producción Hexano [MJ/kg Aceite]	0.048883
------------------------------------------	----------

La ecuación 3.17 permite calcular la energía consumida durante la extracción del aceite, donde se considera el gasto del equipo de proceso mas el gasto en la obtención del hexano de reposición.

$$Energía_{Consumida} [Kcal] = \left( \left( Consumo_{Especifico} \left[ \frac{kwh}{ton_{Semilla}} \right] \right) (Semilla [ton]) \left( 238.25 \left[ \frac{kcal}{kwh} \right] \right) \right)_{Proceso} + \left( \left( Consumo_{Especifico} \left[ \frac{kcal}{kg_{Aceite}} \right] \right) (Aceite [kg]) \right)_{Hexano}$$

**Ecuación 3.17 Consumo energético de la extracción de aceite.**

*Se utiliza el factor de conversión de 238.84 Kcal por MJ*

### 3.1.3.2.4 Procesamiento del bagazo

Las hojuelas extraídas contienen un alto porcentaje en peso de hexano que debe ser recuperado, esta pasta es descargada y transportada al evaporador, que se encarga de remover el hexano por acción de una corriente de vapor abierta, en el segundo paso se tuestan las hojuelas al hacerles pasar una corriente de vapor de alta presión, asegurándose además la completa evaporación del hexano y la inactivación de ciertas enzimas. Por último, el bagazo es enfriado y almacenado. Esta parte del proceso corresponde a la de mayor demanda energética, especialmente en la evaporación del solvente. Los factores de consumo se muestran en la tabla 3.12 para el caso eléctrico y 3.13 para el caso del vapor.



**Tabla 3.12. Consumo específico eléctrico para el procesamiento del bagazo.**

Actividad	Equipo	Energía consumida	Consumo normalizado[Kwh/ton <sub>Semilla</sub> ]
Extracción Hexano	“Desolventizer toaster”	Eléctrica	4.14
Secado Bagazo	“Meal dryer”	Eléctrica	0.64
Enfriado Bagazo	“Meal coler”	Eléctrica	2.54

**Tabla 3.13 Consumo específico de vapor para el procesamiento del bagazo.**

Actividad	Equipo	Energía consumida	Consumo normalizado[Kcal/ton <sub>Semilla</sub> ]
Extracción Hexano	“Desolventizer toaster”	Vapor	100824
Secado Bagazo	“Meal dryer”	Vapor	20454

La ecuación 3.18 muestra el cálculo hecho para la obtención del consumo energético de esta actividad, donde se toman en cuenta tanto el consumo eléctrico y de vapor de los equipos. Mediante la simple relación del factor de consumo específico y la cantidad de semilla procesada, donde además se involucra al factor de conversión.

$$Energía_{Consumida} [Kcal] = \left( \left( \sum Consumo_{Especifico} \left[ \frac{kwh}{ton} \right] \right) (Semilla [ton]) \left( 238.45 \left[ \frac{kcal}{kwh} \right] \right) \right)_{Electricidad} + \left( \left( \sum Consumo_{Especifico} \left[ \frac{kcal}{ton} \right] \right) (Semilla [ton]) \right)_{Vapor}$$

**Ecuación 3.18 Consumo energético en el procesamiento del bagazo.**

*Se utiliza el factor de conversión de 238.84 Kcal por MJ*

### 3.1.3.2.5 Recuperación de aceite

Se utilizan dos o tres evaporadores que concentran el aceite contenido en la miscela, todo el vapor proveniente del proceso de evaporación del hexano en el bagazo es utilizado para dar la energía necesaria en el primer evaporador. Mientras que el vapor que da calor al segundo evaporador y del agotador final de aceite, es el mismo vapor que brinda la energía en proceso de extracción. Los gastos energéticos se muestran en la tabla 3.14 y 3.15 a través de los factores de consumo específico.

**Tabla 3.14 Consumo específico de electricidad para la recuperación del aceite.**

Actividad	Equipo	Energía consumida	Consumo normalizado[Kwh/ton Semilla]
Evaporación	1 <sup>er</sup> evaporador	Eléctrica	0.15
Evaporación	2 <sup>do</sup> evaporador	Eléctrica	0.15
Evaporación	Agotador	Eléctrica	0.08

**Tabla 3.15 Consumo específico de vapor para la recuperación de aceite.**

Actividad	Equipo	Energía consumida	Consumo normalizado[Kcal/ton <sub>Semilla</sub> ]
Evaporación	1 <sup>er</sup> evaporador	Vapor	9978
Evaporación	2 <sup>do</sup> evaporador	Vapor	10836
Evaporación	3 <sup>er</sup> evaporador	Vapor	20814

$$Energía_{Consumida} [Kcal] = \left( \left( \sum Consumo_{Especifico} \left[ \frac{kwh}{ton} \right] \right) (Semilla [ton]) \left( 238.45 \left[ \frac{kcal}{kwh} \right] \right) \right)_{Electricidad} + \left( \left( \sum Consumo_{Especifico} \left[ \frac{kcal}{ton} \right] \right) (Semilla [ton]) \right)_{Vapor}$$

**Ecuación 3.19 Consumo energético para la recuperación de aceite.**

*Se utiliza el factor de conversión de 238.84 Kcal por MJ*

La ecuación 3.19 muestra el procedimiento de cálculo donde se cuantifican ambas fuentes de energía, electricidad y vapor.

El aceite recuperado es enviado a un tanque de almacenamiento a una temperatura adecuada que lo prevenga de las reacciones de degradación. Por otra parte, se recupera el hexano que vuelve a comenzar el ciclo de extracción.

### 3.1.3.2.6 Separación de solvente

Uno de los objetivos principales dentro de la planta de extracción es mantener la relación de reposición del solvente en el mínimo nivel posible, lo cual depende de la eficiencia en su sistema de recuperación de solvente. Todos los condensados son enviados a un tanque de separación, la fase hexano alimenta a un tanque de almacenamiento que también es alimentado con el hexano de reposición, el hexano es removido de la fase superior y bombeado a la extracción de aceite. La tabla 3.16 muestra el único equipo que representa un gasto energético en esta operación.

**Tabla 3.16 Consumo específico para la recuperación del solvente.**

Actividad	Equipo	Energía consumida	Consumo normalizado[Kwh/ton <sub>Semilla</sub> ]
Separación	Tanque	Eléctrica	0.52

Ecuación 3.20 muestra el cálculo del consumo energético.

$$Energía_{Consumida} [Kcal] = \left( \left( \sum Consumo_{Especifico} \left[ \frac{kwh}{ton} \right] \right) (Semilla [ton]) \left( 238.45 \left[ \frac{kcal}{kwh} \right] \right) \right)_{Electricidad}$$

**Ecuación 3.20 Consumo de energético para la recuperación de solvente.**

*Se utiliza el factor de conversión de 238.84 Kcal por MJ*

### 3.1.3.2.7 Recuperación de solvente

El objetivo principal de esta operación es recuperar la mayor cantidad de hexano mediante una corriente de vapor que permite evaporar el hexano y enviarlo al condensador de la sección de recuperación de solvente, el equipo que efectúa dicha operación tiene un gasto reportado para vapor y electricidad, véase tabla 3.17. El consumo energético se obtiene de acuerdo a la ecuación 3.21.

**Tabla 3.17 Consumo específico del tratamiento de residuos.**

Actividad	Equipo	Energía consumida	Consumo normalizado
Remoción	Evaporador	Eléctrica	0.57[Kwh/ton <sub>Semilla</sub> ]
Remoción	Evaporador	Vapor	8798[kcal/ton <sub>Semilla</sub> ]

$$Energía_{Consumida} [Kcal] = \left( \left( \sum Consumo_{Especifico} \left[ \frac{kwh}{ton} \right] \right) (Semilla [ton]) \left( 238.45 \left[ \frac{kcal}{kwh} \right] \right) \right)_{Electricidad} + \left( \left( \sum Consumo_{Especifico} \left[ \frac{kcal}{ton} \right] \right) (Semilla [ton]) \right)_{Vapor}$$

**Ecuación 3.21 Consumo energético del tratamiento de residuos.**

*Se utiliza el factor de conversión de 238.84 Kcal por MJ*

### 3.1.3.2.8 Transporte

El análisis del gasto energético, por cuestiones del transporte del producto, es tan importante como cualquiera de las otras etapas. En muchas ocasiones, la mala

ubicación de las instalaciones afecta de manera significativa el balance energético global.

El factor de consumo específico fue obtenido a partir de los rendimientos reportados en la nueva línea de camiones Workers 9-150E de la constructora Volkswagen.

**Tabla 3.18 Rendimiento del camión.**

9-150 E Worker	
Rendimiento[km/L]	6
Capacidad Carga[ton]	8.8

Uno de los parámetros más importante a establecer en esta etapa es la distancia que se debe cubrir para transportar el producto y con base en ella, realizar el cálculo en el gasto de combustible y con ello su gasto energético, véase ecuaciones 3.22 y 3.23.

$$Consumo_{Especifico} \left[ \frac{MJ}{ton} \right] = \frac{(Distancia [km]) \left( Rendimiento \left[ \frac{km}{L} \right] \right) \left( PC_{Diesel} \left[ \frac{MJ}{L} \right] \right)}{Capacidad_{CARGA} [ton]}$$

**Ecuación 3.22 Consumo específico para el transporte.**

$$Energía Consumida_{Transporte} [MJ] = \left( Consumo_{Especifico} \left[ \frac{MJ}{ton} \right] \right) (Aceite [ton])$$

**Ecuación 3.23 Consumo energético del transporte.**

### 3.1.3.2.9 Consideraciones hechas durante la fase de extracción

- La planta de extracción no contempla las operaciones de desgomado. Se considera al desgomado como una operación de refinación del aceite, que consiste en remover la materia insaponificable mediante un proceso de hidratación y precipitación.
- La fuente generadora del vapor son calderas de bajo consumo, que utilizan gas natural.
- Se considera la producción del hexano dentro de los gasto energéticos:

Energía Producción Hexano [MJ/kg Aceite] (Sheeban, 1998)	0.048883
----------------------------------------------------------	----------

Se propone que toda la energía fósil requerida proviene de diesel.

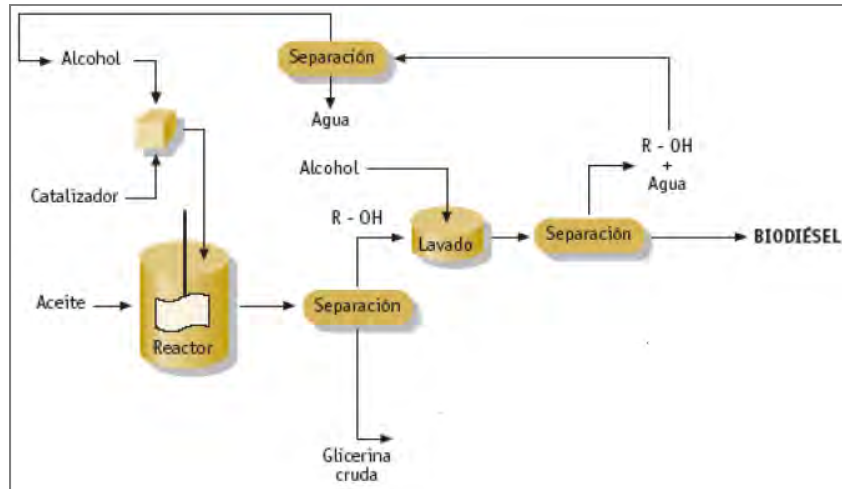
### 3.1.3.3 Fase de transesterificación

El punto clave del balance energético en la etapa de transformación es el rendimiento en peso que tiene la reacción, rendimientos por debajo del 80% afectan de manera significativa el balance energético global.

Con la finalidad de aproximar lo más cercano posible el modelo a la situación en México, se utilizaron los datos en los gastos de producción de RYMSA S.A de C.V, empresa fundada en 1977 por empresarios mexicanos, que principalmente fabrica plastificantes poliméricos y epoxidados, así como polioles. El plastificante epoxidado es de soya, supresor de la viscosidad que consiste en ésteres metílicos de ácidos grasos insaturados que son epoxidados en sus dobles enlaces. El proceso de producción de este bioplastificante es mediante la reacción de transesterificación, similar a la de biodiesel, con la formación de glicerina como subproducto.

El proceso de transformación se puede dividir de manera general en tres secciones; reacción, lavado y purificación del producto. En algunas ocasiones si el contenido de ácidos grasos libre está por encima del 0.5% en peso es necesario llevar a cabo una reacción previa a la de transesterificación, la esterificación es la reacción entre un alcohol y un ácido, en presencia de ácido sulfúrico como catalizador mediante la cual se obtienen un éster y agua. Con la finalidad de reducir la cantidad de ácidos grasos libres que pueden conducir la reacción hacia productos indeseables como jabón.

El proceso de producción en RYMSA es de tipo Batch, similar al que se muestra en la figura 3.4.



**Figura 3.4 Proceso de transesterificación tipo Batch, (García & García, 2009).**

Las condiciones de reacción industriales difieren de las experimentales especialmente por el mecanismo de control que se tienen a nivel industrial. La reacción se lleva a cabo entre 60 y 70 °C a presión atmosférica o incluso a condiciones de vacío.

### 3.1.3.3.1 Separación

Tras la reacción, se lleva a cabo una separación de las fases, metilésteres (superior) y glicerina (inferior). Dentro del mismo reactor se realiza el corte de la fase inferior que en su mayoría contiene glicerina, alcohol, agua y residuos de catalizador.

### 3.1.3.3.2 Lavado

La fase oleica que contiene a los metilésteres es bombeada a una serie de torres de lavado con agua por absorción a contra corriente.

### 3.1.3.3.3 Factores de consumo

Las siguientes tablas muestran los gastos energéticos reportados por RYMSA a través de sus facturas y lecturas de consumo.

**Tabla 3.19 Gastos de energéticos de RYMSA.**

<b>Gas [GJ/mes]</b>	<b>Electricidad [Kwh/mes]</b>
4087	161095

**Tabla 3.20 Producción de RYMSA**

<b>Producto [ton/mes]</b>
1226

**Tabla 3.21 Consumo específico de la transesterificación.**

<b>Tipo Energía</b>	<b>Consumo normalizado</b>
Eléctrica	277.80 [MJ/ton Biodiesel]
Gas Natural	39.42 [MJ/ton Biodiesel]

Es importante considerar los gastos energéticos derivados de los procesos de producción de las materias primas como metanol y el catalizador. Ver tabla 3.22.

**Tabla 3.22 Factores de consumo de materia prima, (Sheeban, 1998).**

<b>Materia Prima</b>	<b>Consumo normalizado</b>
Metanol	2.90 [MJ/kg Biodiesel]
NaOH	0.763 [MJ/kg Biodiesel]

Los factores de consumo específico obtenidos, no pueden ser correctamente evaluados ya que están en función del biodiesel producido, y para este modelo, la cantidad de producto es una constante que se encuentra en función de la demanda de PEMEX. Es necesario expresarla en función de la masa de aceite o semilla que ingresa. Considerando que RYMSA opera con un rendimiento del 97% es posible aproximar la cantidad de aceite que entra al proceso para producir las 1226 toneladas mensuales, que presentan 14712 toneladas anuales. En la tabla 3.23 se observa la cantidad de aceite equivalente al volumen de producción anual de biodiesel, mientras que la tabla 3.24 muestra los factores de consumo en función del aceite.

**Tabla 2.23 Aceite transesterificado**

Aceite[ton/año]
15,153.36

**Tabla 3.23 Factores de consumo en función de aceite**

Tipo Energía	Consumo normalizado
Eléctrica	269.71 [MJ/ton <sub>Aceite</sub> ]
Gas Natural	38.27 [MJ/ton <sub>Aceite</sub> ]

La evaluación del consumo energético considera el gasto asociado al proceso de producción así como el gasto referido a la síntesis de las materias primas. Ver ecuación 3.24

$$Energía_{Consumida} [Kcal] = \left( \left( \sum Consumo_{Especifico} \left[ \frac{MJ}{ton_{Biodiesel}} \right] \right) (Biodiesel[ton]) \right)_{Proceso} + \left( \left( \sum Consumo_{Especifico} \left[ \frac{kcal}{kg_{Aceite}} \right] \right) * (Aceite[kg]) * \left( \frac{1}{238.845} \left[ \frac{MJ}{kcal} \right] \right) \right)_{NaOH+MeOH}$$

**Ecuación 3.24 Consumo Energético Transesterificación**

*Se utiliza el factor de conversión de 238.84 Kcal por MJ*

**3.1.3.3.4 Transporte**

Se considera el transporte desde la planta de producción de biodiesel hasta la refinería de Salamanca Gto., bajo el mismo factor de consumo utilizado para el transporte del aceite, lugar donde será añadido como aditivo al PEMEX DIESEL UBA.

**3.1.3.3.5 Consideraciones hechas en la fase de transesterificación**

- El aceite utilizado como materia prima contiene menos del 0.5 % en peso de ácidos grasos libres y por lo tanto no se considerará necesario llevar a cabo la reacción de esterificación.
- Se supone que todas las toneladas de producto obtenidas por RYMSA son mediante el proceso de transesterificación.



- Se considera la producción del metanol e hidróxido de sodio dentro de los gasto energéticos
- Se considera el transporte desde la planta de producción de biodiesel hasta la refinería de Salamanca Gto. lugar donde será añadido como aditivo al PEMEX DIESEL UBA.

### 3.1.4 Suma de magnitudes energéticas (tratamiento de resultados)

Una vez que se conoce el consumo energético por cada una de las unidades de producción involucradas en el proceso, es posible sumarlas, por facilidad en el manejo de los números se recomienda mantener en todo momento la clasificación por etapas con el objetivo de llevar un control sobre las energías que ya han sido consideradas y aquellas por considerar.

El punto más importante en el desarrollo de la metodología fue la recopilación de datos y tratamiento de ellos, para encontrar los factores de consumo energético que determinan la cantidad de energía utilizada en cada uno de los procesos. A continuación se ejemplifica como fue determinado el consumo energético por actividad.

Algunos factores de consumo recabados, no se encuentran directamente en unidades energéticas, por lo que fue necesario llevar a cabo un tratamiento de unidades que permita cuantificar la energía involucrada en el proceso.

En el paso anterior de la metodología se obtuvo el consumo energético por actividad, el siguiente punto es sumar cada uno de los consumo para obtener un total de energía consumida durante el proceso de fabricación de biodiesel. Como se muestra en la ecuación 3.25.

$$Energía_{Consumida} \text{ Proceso} = \sum_{n=1}^3 Energía_{Consumida} n$$

**Ecuación 3.25 Energía consumida**

La energía total consumida, ecuación 3.25, en el proceso de manufactura, es la suma de la energía gastada en cada uno de las etapas de producción.

### 3.1.5 Identificar y cuantificar el producto final

**Tabla 3.25 Poder Calorífico Biodiesel**

Biodiesel	
Poder Calorífico [MJ/kg]	30-38.5

Se cuantifica la cantidad de energía cedida por el biodiesel como combustible mediante su poder calorífico, ver tabla 3.25, se obtiene la energía total al multiplicarlo por la cantidad en masa de biocombustible producido en el proceso. Como lo indica la ecuación 3.26

$$Energía_{Biodiesel} [MJ] = P.C_{Biodiesel} \left[ \frac{MJ}{Kg} \right] Biodiesel_{Producido} [Kg]$$

**Ecuación 3.26 Energía dada por biodiesel**

### 3.1.6 Relación de energías

$$Gasto_{Energético} \left[ \frac{MJ}{kg_{Biodiesel}} \right] = \frac{\sum_{i=1}^n Energía Consumida [MJ]}{kg_{Biodiesel}}$$

**Ecuación 3.27 Gasto energético**

La relación entre la cantidad producida de un bien medida en unidades de masa o volumen y la energía requerida para su obtención, esta es la definición de gasto energético, ver ecuación 3.27.

Otra magnitud que permite relacionar las energías involucradas en el proceso es la relación energética, donde se considera el poder calorífico del biodiesel. Siendo esta relación la que define si el proceso es energéticamente favorable o desfavorable. Ver ecuación 3.28

$$RE = \frac{\text{Productividad}_{Energética} \left[ \frac{MJ}{kg_{Biodiesel}} \right]}{PC_{Biodiesel} \left[ \frac{MJ}{kg_{Biodiesel}} \right]}$$

Ecuación 3.28 Relación Energética

### 3.2 Metodología de emisión de CO<sub>2</sub>

La captura de carbono atmosférico, CO<sub>2</sub> principalmente, por parte de un plantío ocurre de forma importante durante la etapa de crecimiento de los árboles, cuando los árboles alcanzan su desarrollo total, la cantidad de CO<sub>2</sub> fijado es mínimo solo fijan lo necesario para mantenerse vivos y respirar. La figura 3.5 muestra el diagrama simplificado de los flujos y puntos de almacenamiento de carbono en un árbol.

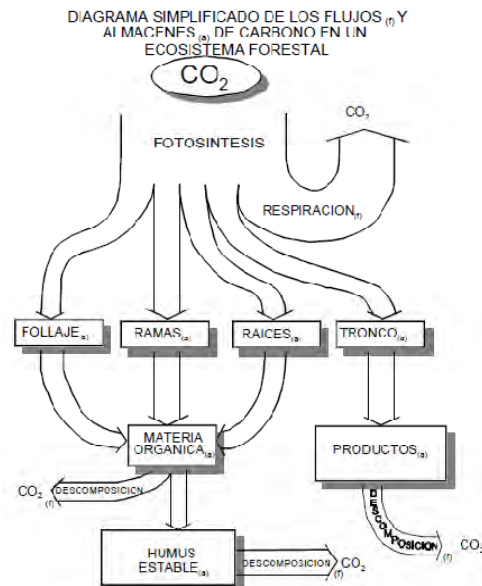


Figura 3.5 Flujo de carbono en un árbol.

Como ya se mencionó la fotosíntesis permite la formación de compuesto de carbono orgánico a partir de CO<sub>2</sub> atmosférico y otros elementos presentes en la tierra y el aire. Los compuestos de carbono orgánico conforman una parte de la madera del tronco y los tallos del árbol. Es por esto que se asegura que la captura

se da principalmente durante el crecimiento del árbol, conocido como captura neta, ya que una parte del dióxido de carbono que es absorbida, es regresado a la atmósfera mediante la respiración de las células vegetales y la descomposición de la materia orgánica en los suelos relacionada con el árbol. De manera general, una vez que el árbol ha alcanzado su madurez, la cantidad de CO<sub>2</sub> que fija es equivalente a la cantidad que emite.

Para calcular el potencial de fijación de un bosque o plantío es necesario conocer el periodo de tiempo en el cual alcanza su madurez, y con base a esto proyectar la cantidad de total de dióxido de carbono fijado en una extensión de terreno determinada.

### **3.2.1 Fronteras del Sistema**

Se utilizan las mismas fronteras de estudio que para el caso del balance energético. Una vez que se tienen identificadas cada una de las actividades involucradas en el proceso de producción, así como la cantidad de energía consumida, toda la energía cuantificada es proveniente de fuentes fósiles, por lo que es posible asignarle un valor de CO<sub>2</sub> emitido.

En función de la cantidad de hectáreas cultivadas es posible realizar una aproximación sobre el potencial de fijación de carbono que tendrá el cultivo.

La cantidad de toneladas de CO<sub>2</sub> no emitidas por la utilización de biodiesel, está referida a la cantidad de CO<sub>2</sub> generado por la extracción, refinación y consumo de diesel convencional.

No se consideró ningún tipo de diferencia entre dióxido de carbono de origen fósil o de origen vegetal en las emisiones provenientes de la combustión del biodiesel, bajo el argumento de que la longitud de onda que es absorbida por la molécula de CO<sub>2</sub> no depende del origen que haya tenido esta, y su contribución al efecto invernadero es similar.

### 3.2.2 Captura de CO<sub>2</sub>

#### 3.2.2.1 Geometría del tronco

El primer punto a considerar son las dimensiones del árbol, es decir altura y diámetro del tronco, pues se considera el volumen como la base de cálculo, considerando una figura cilíndrica en el tronco del árbol, ver ecuación 3.29. Bajo pleno conocimiento de la aproximación geométrica hecha. Ya que el carbono que se considera como fijado es únicamente el que forma parte del tronco del árbol.

$$V_{Tronco} = H_{Árbol} * \pi \left( \frac{d_{Tronco}}{2} \right)^2$$

**Ecuación 3.29 Volumen del tronco.**

#### 3.2.2.2 Masa del tronco

Existen reportadas densidad de madera para diferentes especies de árboles, por lo que este factor de conversión es importante para obtener la masa del tronco, ver ecuación 3.30. **(Didier Bert, 2006)**

$$Masa_{Tronco} = V_{Tronco} (\rho_{Madera})$$

**Ecuación 3.30 Masa del tronco.**

Con esta simple operación es posible conocer la cantidad de biomasa aproximada presente en el tronco de un árbol, considerando que ya ha alcanzado su madurez total.

#### 3.2.2.3 Carbono presente en tronco

El siguiente paso es saber cuánto de esa biomasa corresponde a carbono, según la literatura, el porcentaje de carbono contenido varía entre el 40 y 50%, **(Didier Bert, 2006)**.

$$Masa_{C/Tronco} = Masa_{Tronco} (\%w_{C/Tronco})$$

**Ecuación 3.31 Masa de carbono en el tronco.**

Con la ecuación 3.28 se conoce la cantidad de carbono presente en el tronco de un árbol que ha alcanzado por completo su madurez.

#### 3.2.2.4 Relación molar carbono-dióxido de carbono

Utilizando la relación molar entre dióxido de carbono y carbono, se conoce cuanto CO<sub>2</sub> atmosférico fue fijado para formar dicha masa en el tronco. Ver ecuación 3.29.

$$Masa_{CO_2 \text{ Fijado}} = Masa_{C/Tronco} \quad (3.66)$$

**Ecuación 3.32 CO<sub>2</sub> atmosférico fijado.**

#### 3.2.2.5 CO<sub>2</sub> atmosférico fijado

Se obtiene un factor unitario de fijación. Si ahora se consideran cuantos árboles se cultivan por hectárea y cuantas hectáreas son necesarias para cubrir la demanda, se obtiene la cantidad total dióxido de carbono fijado. Es posible anualizar la cantidad que se fija si se toma en cuenta la vida útil del plantío, que oscila entre los 35 y 45 años.

### 3.2.3 Dióxido de carbono emitido

#### 3.2.3.1 Proceso de Producción

El balance de energía permitió cuantificar la cantidad de energía fósil que es requerida durante el proceso de producción del biodiesel, para obtener la cantidad de dióxido de carbono emitido solo es necesario asignar los factores de emisión a los diferentes combustibles empleados. Los cuales se muestran en las tablas 2.26, 2.27 y 2.28.

**Tabla 3.24. Factor de emisión CO<sub>2</sub> del diesel.<sup>1</sup>**

Factor Emisión Diesel	
22.2	[lbCO <sub>2</sub> /gal <sub>diesel</sub> ]
10.0788	[kgCO <sub>2</sub> /gal <sub>diesel</sub> ]
2.6625	[kgCO <sub>2</sub> /L <sub>diesel</sub> ]

**Tabla 3.25 Factor de emisión CO<sub>2</sub> del gas natural-carbón<sup>2</sup>.**

Factor Emisión Gas Natural	
0.12059	[lbCO <sub>2</sub> /ft <sup>3</sup> <sub>Gas Natural</sub> ]
0.05475	[KgCO <sub>2</sub> /ft <sup>3</sup> <sub>Gas Natural</sub> ]
1.93345	[KgCO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> <sub>Gas Natural</sub> ]
Factor Emisión Carbón	
1.47881	[kgCO <sub>2</sub> /kg <sub>Carbón</sub> ]

**Tabla 3.28 Factor de emisión CO<sub>2</sub><sup>3</sup> combustóleo**

Factor Emisión Combustóleo
2.9838 [kgCO <sub>2</sub> /L <sub>Combustóleo</sub> ]

El factor correspondiente al uso de electricidad se obtuvo a partir de los datos publicados por la Comisión Federal de Electricidad para el año 2008. Ver tabla 3.29

**Tabla 3.26 Consumos energéticos<sup>4</sup>.**

	Combustóleo	Gas	Carbón	Diesel	Total
<b>Energía[Kwh]</b>	4.29E+10	3.34E+10	3.48E+09	1.24E+09	8.10E+10
<b>Consumo</b>	1.06E+07[m <sup>3</sup> ]	1.11E+10[m <sup>3</sup> ]	1.08E+07[ton]	270000[m <sup>3</sup> ]	-
<b>Energía/Consumo</b>	4.04E+03[Kwh/m <sup>3</sup> ]	3.02E+00[Kwh/m <sup>3</sup> ]	3.21E+02[Kwh/ton]	4.59E+03[Kwh/m <sup>3</sup> ]	-

<sup>1</sup> <http://www.epa.gov/oms/climate/420f05001.htm>

<sup>2</sup> <http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/coefficients.html>

<sup>3</sup> <http://www.mfe.govt.nz/publications/climate/guidance-greenhouse-gas-reporting-2008-09/html/page5.html>

<sup>4</sup> [http://www.cfe.gob.mx/informe2008/capitulo3\\_1.html#312](http://www.cfe.gob.mx/informe2008/capitulo3_1.html#312)

$$\frac{F_{Combustible}}{R_{E/C}} = \left[ \frac{kg CO_2}{kwh} \right]$$

**Ecuación 3.33 Factor de emisión**

El cociente entre el factor de emisión y la relación energía-consumo, permite obtener un coeficiente de emisión de CO<sub>2</sub> en función de kwh. Ver ecuación 3.30.

**Tabla 3.30 Factor de emisión CO<sub>2</sub> por combustible.**

	<b>Combustóleo</b>	<b>Gas</b>	<b>Carbón</b>	<b>Diesel</b>
<b>[kgCO<sub>2</sub>/Kwh]</b>	0.74	0.64	4.61	0.58

Este factor se ponderó con respecto al porcentaje de utilización de cada combustible para la generación de electricidad. El resultado se observa en la tabla 3.30. La generación hidroeléctrica representa el 22.6% de la generación total, mientras que la geotérmica, eoloeleétrica y nucleoeleétrica suman el 5% del total.

**Tabla 3.31 Factor emisión CO<sub>2</sub> de electricidad.**

	<b>Combustóleo</b>	<b>Gas</b>	<b>Carbón</b>	<b>Diesel</b>
<b>[kgCO<sub>2</sub>/Kwh]</b>	0.74	0.64	4.61	0.58
<b>% Uso</b>	52.90%	41.28%	4.29%	1.53%
<b>[kgCO<sub>2</sub>/Kwh]<sub>Electricidad</sub></b>	<b>0.8619</b>			

Para obtener la cantidad de dióxido de carbono emitido solo es necesario multiplicar el factor de consumo específico por la cantidad de combustible utilizado. Materias primas como los fertilizantes, hexano, metanol e hidróxido de sodio cuentan con factores de gasto de energía fósil por unidad de masa producida, se supuso que esta energía fósil utilizada correspondía al diesel.

De esta manera se obtiene el total de la cantidad de dióxido de carbono emitido durante la producción de biodiesel.



### 3.2.4 Combustión

De acuerdo a los datos publicados en la literatura, la emisión de dióxido de carbono durante la combustión del biodiesel es similar a las emisiones de diesel convencional (Nurum, 2008), las ventajas que presenta el biodiesel son emisiones 100% libres de compuestos azufrados y supone una combustión más completa. Como las fronteras del sistema no abarcan los procesos posteriores al transporte del biodiesel a la refinería, se supone que el biodiesel que se produce se quema en una mezcla B100. A esta cantidad de barriles se le aplica el mismo factor de emisión del dióxido de carbono.

### 3.2.5 Modelo de comparación

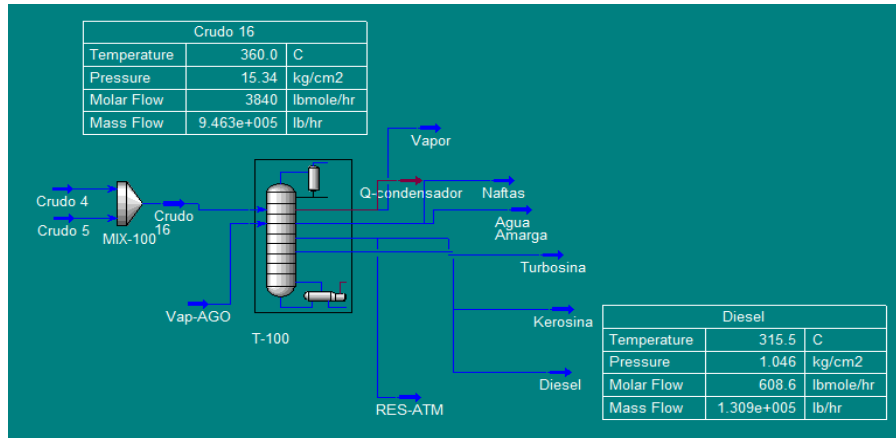
Con el fin de obtener la cantidad en toneladas de dióxido de carbono que se dejan de emitir tomando como punto de comparación la cantidad de dióxido de carbono que se emite durante la producción y quema de la misma cantidad de barriles de diesel convencional. Los factores de consumo - emisión en los procesos de producción del diesel convencional fueron tomados del análisis de ciclo de vida, (Sheeban, 1998).

Tabla 7.32 Factores de emisión de la producción de diesel convencional.

Factores Emisión		
Extracción Crudo	78.1874	$g_{CO_2}/kg$ Crudo
Transporte <sub>refinería</sub>	76.6231	$g_{CO_2}/kg$ Crudo
Refinación	360.415	$g_{CO_2}/kg$ Diesel
Transporte <sub>Abastecimiento</sub>	18.259	$g_{CO_2}/kg$ Diesel

Estos factores se multiplican por el factor de producción, sea crudo o diesel según el caso. Se considera que por cada barril de crudo que entra en el proceso de refinación se obtiene 0.24 barriles del diesel. Obteniendo así las toneladas de dióxido de carbono emitidas durante el proceso de producción. Se suma el dióxido de carbono emitido por su combustión. La figura 3.6 muestra un ejemplo básico de

destilación de crudo, que sirvió como base para la determinación del factor de cantidad de diesel obtenido por barril de crudo.



**Figura 3.6 Ejemplo de destilación de crudo.**

Las toneladas no emitidas, es la diferencia del dióxido de carbono que se emite entre los procesos de diesel y biodiesel. El proceso de producción de biodiesel tiene un efecto positivo por la fijación de dióxido de carbono que se lleva a cabo durante el crecimiento de los árboles

## IV. CAPÍTULO RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 VARIABLES DEL MODELO

El modelo desarrollado requiere la entrada de un cierto número de variables y condiciones, que quedan a disposición del usuario. Se cuenta con dos bloques de variables, la primera tiene incidencia directa sobre la cantidad de materias primas requeridas y el resultado del balance energético. Bajo este modelo se cubre la demanda nacional de diesel, se realiza un estudio para encontrar aquellas variables con mayor impacto sobre la cantidad de materia prima empleada y el balance energético obtenido, identificadas en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1 Variables de Proceso**

Panel de Control			Consumo Nal.
Demanda Diesel	<b>386200</b>	<b>bl/día</b>	✓
% Mezcla Diesel/Biodiesel	100%- 0.5%	-	✓
% Rendimiento Rxn g Aceite/g Biodiesel	80%- 98.0%	-	✓
Densidad de cultivo	<b>2000</b>	<b>árbol/ha</b>	✓
Productividad de cultivo	1-10	<b>ton/ha</b>	✓
% Aceite g Semilla/g Aceite	15%-50%	-	✓
% Humedad inicial g Semilla/g Agua	<b>21.00</b>	-	
Distancia Extracción-Transesterificación	<b>850</b>	<b>km</b>	
Distancia Extracción-Distribución	<b>300</b>	<b>km</b>	
Poder Calórico Biodiesel	32-40	<b>MJ/Kg</b>	✓

Mientras que del segundo bloque, tabla 4.2, hace relación al balance de emisiones de CO<sub>2</sub>.

**Tabla 4.2 Variables de Cultivo**

Panel de Control CO <sub>2</sub>		
H árbol	<b>200</b>	<b>Cm</b>
D árbol	<b>20.00</b>	<b>Cm</b>
P Madera	<b>0.26</b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>
Vida cultivo	<b>40</b>	<b>Años</b>
% C g Madera/g Carbono	<b>41.0%</b>	-

La sección de resultados cuenta con tres apartados, en el primero de ellos se encuentre la información referente a materia prima y producto. Ver tabla 4.3.

**Tabla 4.3 Resultados Materia Prima**

<b>Resultados Materia Prima y Productos</b>		
Biodiesel Requerido	-	<b>bl/día</b>
Aceite Requerido	-	<b>ton/día</b>
Semilla Requerida	-	<b>ton/día</b>
Hectáreas de Cultivo	-	<b>ha</b>
Bagazo Producido	-	<b>ton/día</b>
Glicerina Producida	-	<b>ton/día</b>
NaOH Requerido	-	<b>ton/día</b>
Metanol Requerido	-	<b>ton/día</b>
Hexano Reposición	-	<b>ton/día</b>

En la segunda sección se dan a conocer los resultados sobre el balance energético del proceso. Tabla 4.4.

**Tabla 4.4 Balance Energético**

<b>Resultados Energéticos</b>			<b>% Energía</b>
Gasto Energético Fase Agrícola	-	<b>MJ/kg<sub>BIO</sub></b>	Total -%
Gasto Energético Fase Extracción	-	<b>MJ/kg<sub>BIO</sub></b>	-%
Gasto Energético Fase Transesterificación	-	<b>MJ/kg<sub>BIO</sub></b>	-%
<b>Gasto Energético Total</b>	-	<b>MJ/kg<sub>BIO</sub></b>	<b>100%</b>
Gasto Energético Total x U. Volumen	-	<b>MJ/L<sub>BIO</sub></b>	
Ganancia Energética Neta	-	<b>MJ/kg<sub>BIO</sub></b>	
<b>Relación Energética</b>	-	<b>-</b>	

El tercer apartado se enfoca en el balance de emisiones de CO<sub>2</sub> involucrado en el proceso de obtención. Tabla 4.5.

**Tabla 4.5 Emisiones de CO<sub>2</sub>**

Resultados CO <sub>2</sub>		
Carbono Fijado <sub>cultivo</sub>	-	ton/año
CO <sub>2</sub> Fijado <sub>Cultivo</sub>	-	ton/año
CO <sub>2</sub> Fijado <sub>Cultivo</sub>	-	tonCO <sub>2</sub> /L <sub>BIO</sub>
CO <sub>2</sub> Emitido <sub>Producción</sub>	-	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido <sub>Producción</sub>	-	tonCO <sub>2</sub> /L <sub>BIO</sub>
Relación CO <sub>2</sub> fijado/emittedo Proceso	-	-
CO <sub>2</sub> Emitido <sub>Combustión @100%</sub>	-	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido <sub>Combustión @100%</sub>	-	tonCO <sub>2</sub> /L <sub>BIO</sub>
Relación CO <sub>2</sub> fijado/emittedo Total	-	-

Los resultados y su análisis están enfocados a la situación que vive el mercado mexicano del biodiesel, desde el uso como aditivo lubricante del Diesel Pemex UBA hasta la situación más ambiciosa, donde se contempla la sustitución de diesel por biodiesel en una mezcla B100. Pasando por el caso del estado Chiapas donde se contemplan mezclas B20, B50 y B100 para el transporte público.

## 4.2 Análisis de Sensibilidad

Con el fin de obtener resultados comparables, las variables bajo análisis serán modificadas una a la vez, mientras que el resto de las variables mantendrán la misma magnitud para todos los casos.

Es posible observar el efecto que tiene cada una de las variables sobre el balance total. Las variables que afectan directamente al modelo son las siguientes:

- **Porcentaje de Mezcla de lubricación.**
- **Rendimiento en peso de la reacción de transesterificación.**
- **Porcentaje en peso de aceite en la semilla.**
- **Capacidad de producción por hectárea.**

La tabla 4.6 muestra las variables bases del modelo

**Tabla 4.6 Variables que funcionan como base del análisis**

Panel de Control			
Demanda Diesel	60000	bl/día	Demanda UBA.
% Mezcla Diesel/Biodiesel	5%	-	% óptimo aditivo
% Rendimiento Rxn g Aceite/g Biodiesel	98.0%	-	<b>RYMSA</b>
Densidad de cultivo	2000	árbol/ha	López, R. (2008)
Productividad de cultivo	5	ton/ha	Cultivo Maduro
% Aceite g Semilla/g Aceite	35%	-	Lab. 212 F. Química
% Humedad inicial g Semilla/g Agua	21.00	-	Beerens. (2007)
Distancia Extracción- Transesterificación	850	Km	
Distancia Extracción-Distribución	300	Km	
Poder Calorífico Biodiesel	37	MJ/Kg	Ganapathy (2009)

### 4.2.1 Porcentaje de mezcla de lubricación

Es el factor que define la cantidad del biodiesel requerido en función de la demanda de diesel por cubrir. Los porcentajes de mezcla evaluados son los que hasta la fecha han sido considerados por parte de PEMEX así como por el gobierno del Estado de Chiapas. Ver tabla 4.7.

**Tabla 4.7 Efecto del porcentaje de mezcla**

% Mezcla Diesel/Biodiesel	Biodiesel[ton/día]	Aceite[ton/día]	Ha de cultivo	NaOH[ton/día]	Metanol[ton/día]
0.5%	41.97	42.83	8977.60	0.43	10.69
5.0%	419.73	428.29	89776.02	4.28	106.9
20.0%	1678.00	1713.17	359104.08	17.13	427.65
50.0%	4197.26	4282.92	897760.19	42.83	1069.12
100.0%	3394.51	8565.83	1795520.38	85.66	2138.24

PEMEX plantea la adición de un 0.5% en volumen del biodiesel al Diesel UBA como la composición mínima que brinda la lubricación perdida durante la remoción de los compuestos más pesado sulfurados, las bombas de diesel a falta de una lubricación externa dependen las propiedades lubricantes del propio diesel. Se marca hasta un 5% como el máximo nivel de la mezcla como aditivo.

A partir de este punto del 5% se comienza a hablar de un término conocido como nivel de sustitución, punto sobre el cual el biodiesel deja de ser un elemento

lubricante para convertirse en parte de la mezcla de combustión. El gobierno del estado de Chiapas dio comienzo al proceso de renovación del sistema de transporte colectivo el pasado mes de enero del año 2010, utilizado en un inicio una mezcla B20, siendo gradualmente sustituida por una mezcla B50 hasta alcanzar una mezcla B100 para el mes de marzo.

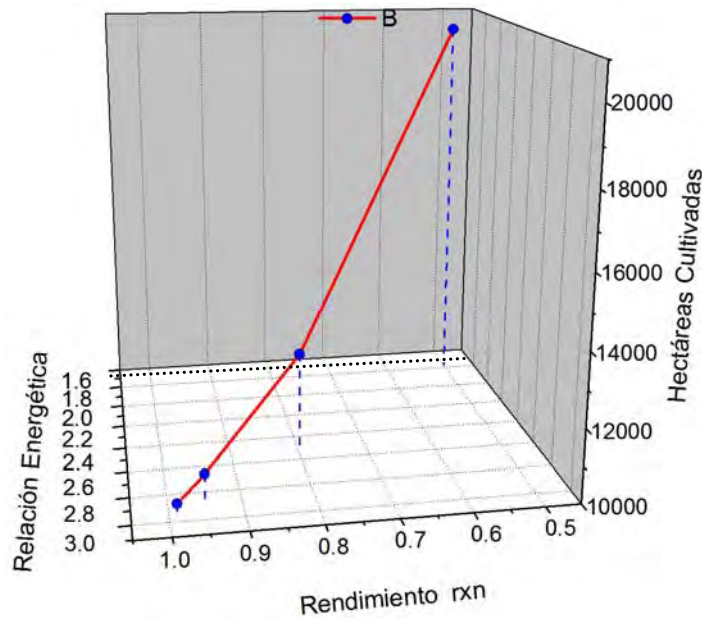
El cambio en el porcentaje de mezcla tiene un efecto proporcional sobre los resultados, y no tiene ningún efecto sobre el balance energético ya que la cantidad de energía empleada está en función de las materias primas, y si estas crecen de manera proporcional el cambio total es nulo. El mismo efecto se presenta sobre el balance energético, ya que el aumento en el CO<sub>2</sub> fijado por un cultivo de mayor extensión se ve contrapuesto por la combustión de una mayor cantidad de biodiesel que fue producido.

#### **4.2.2 Rendimiento en peso de la reacción de transesterificación**

Define la cantidad de aceite necesario para cubrir la demanda planteada, está directamente relacionada con la eficiencia tecnológica del proceso de transesterificación, separación y purificación del biodiesel. A nivel laboratorio se encontraron rendimientos sobre el 80% que a escala industrial significa una merma muy importante de producto que bajo ninguna circunstancia podría ser permitida, RYMSA S.A de C.V reporta rendimientos sobre el 98% en su reacción de transesterificación, el rendimiento del 50% fue evaluado como una situación extrema que permita observar bajo esta circunstancia la repercusión sobre el balance energético. El resumen de los resultados se puede ver en la tabla 4.8.

**Tabla 4.8 Efecto del rendimiento en la reacción transesterificación**

Rendimiento W% RXN	Relación Energética	Ha de cultivo	Gasto Energético MJ/kgBIO
98.0%	2.799	89776.02	13.219
95.0%	2.738	92611.05	13.515
90.0%	2.633	97756.11	14.052
80.0%	2.414	109975.62	15.326
50.0%	1.666	175961.00	22.206



**Figura 4.1 Efecto del Rendimiento de la Reacción**

Como tendencia general para describir el gráfico 4.1 se tiene una relación inversa entre el rendimiento de la reacción y la cantidad de hectáreas de cultivo necesarias, mientras que el comportamiento con respecto al rendimiento energético es directo.

Como se mencionó desde un principio el efecto en el rendimiento de la reacción sobre el balance global comienza a ser realmente significativo por debajo del 80%. Pese a que la variable analizada forma parte de la unidad de transesterificación el aumento en el consumo energético no es tan significativo como para el resto de las unidades de producción, de hecho de manera porcentual la unidad de producción pasa de representar el 32% de la energía total consumida al 20%, esta



variación se debe principalmente a que la cantidad de aceite a extraer aumenta cuando el rendimiento cae, por lo que la unidad de extracción experimenta un fuerte aumento en la demanda energética. Para el caso extremo, donde se presenten rendimientos del 50% el aumento energético en la fase de transesterificación solo es de 0.3 MJ por kilogramo de biodiesel producido que representa un aumento del 6.7%, mientras que en la fase agrícola y de extracción el aumento está dado casi en la misma proporción 5.4 y 2.65 MJ/Kg<sub>Biodiesel</sub> que se reflejan directamente en el valor de energía consumida y por lo tanto en la relación energética resultante de 2.79 para el 98% y tan solo 1.66 para el 50%.

El análisis muestra que el rendimiento de la reacción no es una variable de alto impacto sobre el balance energético incluso bajo rendimientos del 50% la relación energética continua siendo mayor a uno, obteniendo balances favorables. Por la naturaleza de las condiciones de reacción sería muy complicado encontrar condiciones de reacción que arroje rendimientos inferiores al 80%. Existen reportados rendimientos del 80% a temperatura ambiente, el porcentaje de aceite convertido en biodiesel solo se podría ver disminuida por inadecuadas técnicas de separación y purificación que produzcan mermas considerables.

El poder desarrollar un proceso donde las reacciones se lleven completamente es importante para otros temas afines que formen parte del proyecto integral, como lo es la purificación de glicerina, reacciones incompletas dificultan los procesos de purificación por la presencia de mono o di glicéridos residuales.

#### **4.2.3 Porcentaje en peso de aceite en la semilla**

Esta variable define la cantidad en toneladas de semillas que es requerida, en la literatura se encuentran reportados resultados de hasta 55% de aceite en la semilla, experimentalmente se encontró un máximo de 35% de aceite en la semilla mediante el uso de dos técnicas consecutivas de extracción, expresión y solventes, también se encontró que hay *Jatropha curcas* silvestre del estado de Nayarit y Puebla que cuentan con cantidades mínimas de aceite de hasta un 4%. Los resultados se reportan en la tabla 4.9.

Tabla 4.9 Efecto del porcentaje de aceite en la semilla

% Aceite	Relación Energética	Ha de cultivo	Gasto Energético MJ/kgBIO
5.0%	0.580	628432.13	63.837
10.0%	1.078	314216.07	34.310
25.0%	2.230	125686.43	16.594
35.0%	2.799	89776.02	13.219
55.0%	3.645	57130.19	10.152

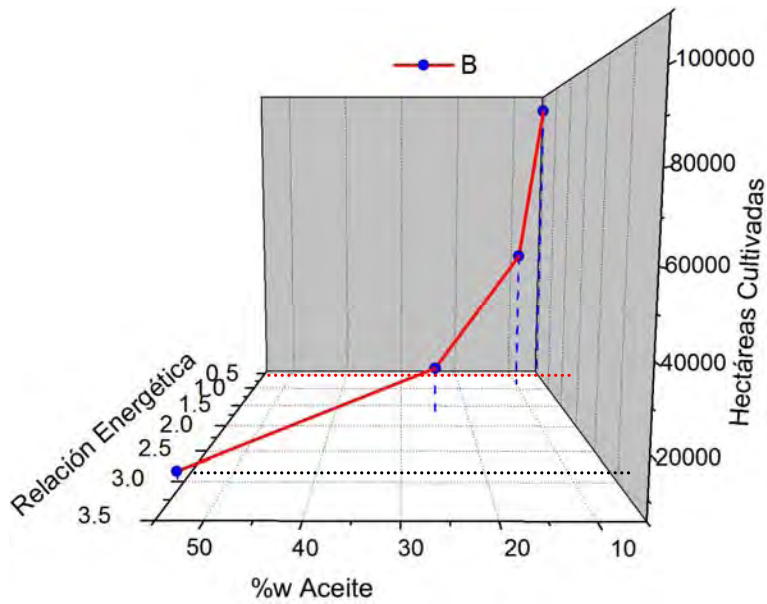


Figura 4.2 Efecto del Porcentaje de Aceite

Una mayor cantidad de aceite contenido en las semillas significa una disminución del área destinada al cultivo de la semilla y por otra parte representa aumentar el rendimiento energético de manera significativa. Ver figura 4.2

Para realización del análisis de variables se parte del punto donde el crecimiento del plantío se encuentra en una etapa de madurez total, a esta altura el efecto del porcentaje del aceite no es tan significativo como para el caso de los primeros 3 año de cultivo, donde las toneladas por hectáreas que entrega la planta están muy por debajo, sin embargo bajo la consideración de un cultivo maduro el modelo arroja balances negativos por debajo del 10% de aceite en la semilla. Al momento es la única variable en la que se han reportados pérdidas energéticas durante el proceso de producción.

Por lo que es importante obtener semilla con alto contenido de aceite para enfrentar los primeros años de crecimiento de la planta, años en los que la pobre capacidad de cultivo debe ser amortiguada al máximo por el porcentaje de aceite contenido en la semilla.

El punto importante sobre el cual se debe enfocar el análisis de la cantidad de aceite en la semilla esta dado en la disminución del área de cultivo, es un factor crítico durante la evaluación de un proyecto.

#### 4.2.4 Capacidad de producción por hectárea

Esta variable determina el número de hectáreas que es necesario cultivar. Se ha mencionado que esta es una variable que cambia a lo largo del tiempo conforme se da la maduración del cultivo, existen reportes que aseguran que una hectárea de *Jatropha curcas* entrega hasta 10 toneladas. (Getinet, 1987). La tabla 4.10 reporta el efecto que tiene la capacidad de producción.

Tabla 4.10 Efecto productividad por hectárea

Productividad[ton/año]	Gasto Energético		Relación Energética
	MJ/kgBIO	Ha de cultivo	
1.00	29.16	448880.09	1.27
2.50	17.21	179552.04	2.15
5.00	13.22	89776.02	2.80
10.00	11.23	44888.01	3.30

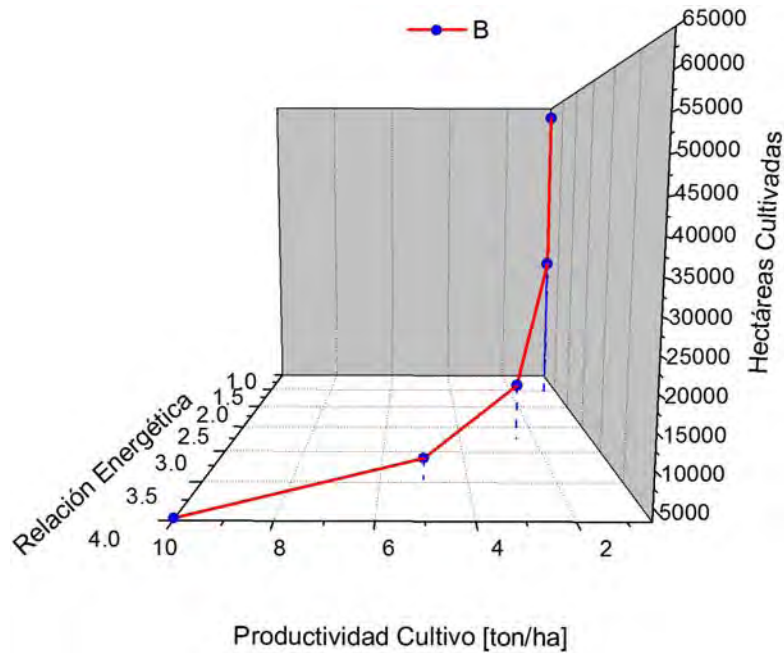


Figura 4.3 Efecto en la Capacidad del Cultivo

La capacidad de cultivo incide directamente sobre la cantidad de hectáreas de cultivo necesarias para cubrir la demanda, no así en la cantidad de semilla y aceites que están determinados por el porcentaje de aceite y rendimiento de la reacción. Ver figura 4.3. Analizando los resultados es claro observar el gran impacto de esta variable sobre el balance global. Es importante señalar que esta variable tiene una dependencia directa con el tiempo y que tan domesticada se encuentre la especie, pues a medida que los plantíos se vuelven maduros su capacidad de producción aumenta. Para el caso de la *Jatropha curcas* un plantío en crecimiento tendrá una capacidad apenas superior a los 0.5 toneladas por hectárea en su primer año, mientras que plantíos con más de 5 años se esperaba que superara las 5 toneladas por hectárea pudiendo alcanzar hasta 10 toneladas, productores del estado de Chiapas fijan su productividad en 3 toneladas por hectárea.

### 4.3 Análisis generales

Para los casos analizados, la fase agrícola representa el mayor gasto energético durante la producción de biodiesel. Sin con el crecimiento del plantío, la fase agrícola pasa a representar del 81% del embargo si se presentaran mejoras en la

capacidad del cultivo, que invariablemente se presentarán gasto energético total solamente el 35%.

Durante la fase agrícola 5 años representan un ahorro energético de 24.51 MJ/kg Biodiesel representando un ahorro superior al 86%; si se anualiza esta cuota de ahorro representa 4.90 MJ/kg Biodiesel

México cuenta con 21 millones de hectáreas para cultivo ya establecidos y adicionales a estos se planea destinar para 2012 unas 300 mil hectáreas en cultivos energéticos. Entre más productivo sea el campo energético mexicano mayor será la cantidad de recursos disponibles para su transformación.

A través de este análisis se ubica al porcentaje de aceite en la semilla como la variable más crítica y sobre la cual se debe poner especial énfasis si se desea iniciar proyectos en cuyos objetivos se pretenda registrar un crecimiento sostenido y aún más importante que se convierten en inversiones autosustentables económica y ambientalmente. En los primeros años la diferencia entre un semilla con alto nivel de aceite, 25% o más, y otra con una cantidad muy baja, menor al 5%, representa más del 20% de la energía total demandada.

La obtención de semillas con alto contenido de aceite viene precedida de una serie de acciones y cuidados que fueron bien atendidos durante la etapa de agrícola. Que se ve aun más favorecida por la orientación hacia la reproducción de semillas clasificadas como alto nivel oleico.

El poder calorífico específico del biodiesel es una variable que relaciona la calidad del producto como combustibles. El poder específico tiene una importancia trascendental en el resultado del balance energético, define la ganancia que se obtuvo por la elaboración del biodiesel. El efecto en la calidad del biodiesel sobre la relación energética se observa en la tabla 4.11.

**Tabla 4.11 Efecto del poder calorífico del biodiesel**

<b>Poder Calorífico [MJ/kg<sub>BIO</sub>]</b>	<b>Relación Energética</b>
30	2.81
33	3.09
35	3.27
38	3.56

El análisis que se hace sobre esta variable es similar al hecho sobre porcentaje de aceite en lo que respecta a que la calidad del producto debe ser en todo momento de alta ya que durante la etapa de crecimiento del cultivo los factores son poco favorables y deben ser amortiguados por alto poder calorífico, que bajo el modelo es el que factor más afecta la relación de ganancia energética.

#### **4.4 Resultados y análisis del mercado mexicano**

La paraestatal ha iniciado un periodo de demanda de biodiesel abriendo así de manera formal el mercado de biodiesel en nuestro país, se analizaran varios escenarios probables:

- I. Cubriendo el 100% de la demanda nacional, utilizando el biodiesel como aditivo al 0.5% en volumen.
- II. La completa sustitución de la demanda nacional diesel por una mezcla B100

Por otra parte se analiza el proyecto que ha puesto en marcha el gobierno del estado de Chiapas, con la introducción de transporte urbano impulsado a partir de biodiesel.

### 4.4.1 Caso PEMEX I

Tabla 4.12 Variables Caso PEMEX I

Panel de Control			100%Consumo Nal. % MIN aditivo
Demanda Diesel	386200	bl/día	
% Mezcla Diesel/Biodiesel	0.5%	-	
% Rendimiento Rxn g Aceite/g Biodiesel	98.0%	-	
Densidad de cultivo	2000	árbol/ha	
Productividad de cultivo	5	ton/ha	
% Aceite g Semilla/g Aceite	35%	-	
% Humedad inicial g Semilla/g Agua	21.00	-	
Distancia Extracción-Transesterificación	850	Km	
Distancia Extracción-Distribución	300	Km	
Poder Calorífico Biodiesel	37	MJ/Kg	

Panel de Control CO <sub>2</sub>		
H árbol	200	Cm
D árbol	20.00	Cm
P Madera	0.26	g/cm <sup>3</sup>
Vida cultivo	35	Años
% C g Madera/g Carbono	41.0%	-

Tabla 4.13 Resultados Caso I

Resultados Materia Prima y Productos		
Biodiesel Requerido	270.16	ton/día
Aceite Requerido	275.68	ton/día
Semilla Requerida	787.65	ton/día
Hectáreas de Cultivo	57785.83	ha
Bagazo Producido	515.91	ton/día
Glicerina Producida	28.43	ton/día
NaOH Requerido	2.76	ton/día
Metanol Requerido	68.82	ton/día
Hexano Reposición	1.90	ton/día

Resultados Energéticos			% Energía
Gasto Energético Fase Agrícola	5.40	MJ/kg <sub>BIO</sub>	41%
Gasto Energético Fase Extracción	3.65	MJ/kg <sub>BIO</sub>	28%
Gasto Energético Fase Transesterificación	4.17	MJ/kg <sub>BIO</sub>	32%
<b>Gasto Energético Total</b>	<b>13.22</b>	<b>MJ/kg<sub>BIO</sub></b>	100%
Gasto Energético Total x U. Volumen	15.02	MJ/L <sub>BIO</sub>	
Ganancia Energética Neta	23.78	MJ/kg <sub>BIO</sub>	
<b>Relación Energética</b>	<b>2.80</b>	-	

Resultados CO <sub>2</sub>		
Carbono Fijado cultivo	19352.12	ton/año
CO <sub>2</sub> Fijado Cultivo	70957.76	ton/año
CO <sub>2</sub> Fijado Cultivo	0.0006	tonCO <sub>2</sub> /L <sub>BIO</sub>
CO <sub>2</sub> Emitido Producción	53029.61	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido Producción	0.00047	tonCO <sub>2</sub> /L <sub>BIO</sub>
Relación CO <sub>2</sub> fijado/emitado Proces0	1.34	-
CO <sub>2</sub> Emitido Combustión @100%	53902.83	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido Combustión @100%	0.0005	tonCO <sub>2</sub> /L <sub>BIO</sub>
<b>Relación CO<sub>2</sub> fijado/emitado Total</b>	<b>0.6636</b>	-

Balance CO <sub>2</sub>					
Biodiesel			Diesel		
CO <sub>2</sub> Fijado	70957.76	ton/año	CO <sub>2</sub> Fijado	0	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido-Producción	53029.61	ton/año	CO <sub>2</sub> Emitido-Producción	18037.74	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido-Combustión	53902.83	ton/año	CO <sub>2</sub> Emitido-Combustión	53902.83	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido	106932.44	ton/año	CO <sub>2</sub> Emitido	71940.58	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido-Total	35974.69	ton/año	CO <sub>2</sub> Emitido-Total	71940.58	ton/año
Toneladas Anuales No-Emitidas			35,965.89		
% Ton CO <sub>2</sub> No Emitidas			49.99%		



#### 4.4.2 Caso PEMEX II

Para el segundo caso la única variable que sufre un cambio es el porcentaje de mezcla, el resto de las variables se mantiene y como ya se observó en el análisis de sensibilidad un movimiento en el porcentaje de mezcla solamente arroja resultados diferentes sobre la cantidad de materia prima y hectáreas a considerar.

**Tabla 4.14 Variable Caso PEMEX II**

% Mezcla Diesel/Biodiesel	100%	-	B100
---------------------------	------	---	------

**Tabla 4.15 Resultados Caso PEMEX II**

Resultados Materia Prima y Productos		
Biodiesel Requerido	54032.69	ton/día
Aceite Requerido	55135.39	ton/día
Semilla Requerida	157529.70	ton/día
Hectáreas de Cultivo	11557166.18	ha
Bagazo Producido	103181.95	ton/día
Glicerina Producida	5685.94	ton/día
NaOH Requerido	551.35	ton/día
Metanol Requerido	13763.11	ton/día
Hexano Reposición	379.96	ton/día

La diferencia primordial entre ambos escenarios radica en el área de cultivo, 57 mil hectáreas para una mezcla al 0.5% en volumen, mientras que para una mezcla B100 es necesario el doble del terreno para cubrir la demanda, 11.5 millones de hectáreas. La diferencia entre estas dos cantidades es de alrededor del 500%. Esta diferencia en un país que solamente dedica el 30% de su territorio a la agricultura es un punto primordial en el análisis de un proyecto integral. En estos momentos es muy factible cultivar 60 mil hectáreas, pero se debe analizar las opciones de crecimiento y expansión, las posibilidades reales de alcanzar un mayor nivel de sustitución. Si se toma en consideración las 300 mil hectáreas

prometidas para cultivos energéticos, apenas se estaría llegando un 2.5% de mezcla, bajo las condiciones planteadas.

#### 4.4.2.1 Caso PEMEX II.a

El porcentaje de mezcla que sea alcanzado dependerá de la capacidad que se tenga en el desarrollo y mejoramiento de las variables, es aquí donde se aborda la variable más sensible que se detectó durante el análisis del modelo, el porcentaje de aceite en la semilla.

**Tabla 4.16 Variable Caso PEMEX II.a**

% Mezcla Diesel/Biodiesel	100%	-	<b>B100</b>
% Aceite g Semilla/g Aceite	50%		

**Tabla 4.17 Resultados Caso PEMEX II.a**

Resultados Materia Prima y Productos		
Biodiesel Requerido	54032.69	ton/día
Aceite Requerido	55135.39	ton/día
Semilla Requerida	110270.79	ton/día
Hectáreas de Cultivo	8090016.32	ha
Bagazo Producido	55686.75	ton/día
Glicerina Producida	5685.94	ton/día
NaOH Requerido	551.35	ton/día
Metanol Requerido	13763.11	ton/día
Hexano Reposición	265.97	ton/día

La diferencia porcentual entre una semilla de mediano contenido oleico, 35%, y uno de alto contenido de aceite, mayor a 50%, es de cerca del 30%, porcentualmente no puede significar mucho, pero cuando se considera el 30% de una extensión de 11.5 millones de hectáreas, se convierte en una disminución del 10% del terreno total destinado a la agricultura, la búsqueda y cultivo de individuos con alto contenido oleico debe ser el primer punto a resolver.

Es claro que los terrenos que se busquen o habiliten como cultivos bioenergéticos no pueden ser los mismo que están siendo dedicados a la agricultura, México

cuenta con 70 millones de hectáreas considerados como suelos pobres que pueden ser sujetas a un análisis de suelos y analizar la viabilidad del cultivo, que en primera instancia parece ser más resistente.

El análisis de los puntos importantes del proyecto se debe realizar de manera paralela y a la vez integral, la evaluación del área de cultivo debe tener asociada la capacidad de producción.

El área de cultivo se convierte en un factor determinante en la viabilidad del proyecto, en este nivel, 57 mil hectáreas parece ser una cantidad razonable para iniciar, siempre y cuando se considere los límites de expansión, en esta extensión de terreno se estarían produciendo 1,931 barriles de producto que corresponden aproximadamente 270 toneladas de producto diariamente.

RYMSA, empresa de la cual se tomó los gastos energéticos en la reacción de transesterificación, tiene una producción mensual de 1226 toneladas mensuales, tomando en cuenta todos sus productos, si se considera a esta como su capacidad instalada, podría producir 30 toneladas, casi el 10% de la producción

Mientras que Aditivos Mexicanos S.A. de C.V cuenta con 7 reactores tipo batch, si enfocara toda la infraestructura a la producción de biodiesel se contempla una capacidad instalada superior a las 465 toneladas diarias, más del 100% de la demanda, si se incluyera como un producto más dentro del programa de producción, fácilmente podría absorber una demanda del 10% sin comprometer el resto de sus productos. **Véase Anexo II.**

Si ambas empresas enfocaran toda su capacidad de producción al biodiesel se estaría cubriendo casi el 70% de la demanda, sin la necesidad de llevar a cabo fuertes inversiones. Estos son simplemente dos ejemplos de la capacidad industrial mexicana, claro que sería necesaria la creación y participación de un mayor número de industria asegurando así mercado totalmente abierto y competitivo.

Como se ha mencionado anteriormente la producción de biodiesel tiene relacionada la coproducción de subproductos de valor agregado que también deben ser evaluados dentro de los análisis. El balance energético no considera a los subproductos como fuentes que aporten un balance más favorable.

### 4.4.3 Estado de Chiapas.

...Con la consolidación de la primera empresa transportista mixta que utilizará al 100 por ciento Biodiesel, producido en Chiapas, inicia una nueva era en la entidad en materia de transporte. En respuesta a una de las demandas más sentidas de la ciudadanía tuxtleca, la modernización del transporte público inició su proceso con la operación del “Conejobus”, el nuevo y moderno sistema de transporte colectivo que, a partir de hoy, recorre la avenida central en sustitución de la ruta uno y por la calle central y primera poniente en sustitución de la ruta dos.

Las nuevas unidades utilizarán una mezcla de 20% biodiesel y 80% diesel (B20); en una semana la mezcla será sustituida por 50% biodiesel y 50% diesel (B50). En el mes de marzo se prevé la utilización del B100, es decir, 100% biodiesel...<sup>1</sup> En el reporte que da el gobierno del estado se habla de 10 mil hectáreas de *Jatropha Curcas* plantadas en el estado, con el potencial de producir hasta 12 mil litros diarios de biodiesel. Además se toca un punto importante y que muchas veces se olvida en los proyectos, se le pagará al campesino 16 mil pesos por hectárea. De una reunión convocada por la REMBIO en la ciudad de Querétaro en Octubre del 2010, los productores chiapanecos mencionaban una productividad de 3 toneladas por hectárea en sus plantíos. Bajo estas condiciones y considerando un uso B100 de acuerdo al modelo desarrollado, el contenido oleico en la semilla esta alrededor del 22%, el cual se considera en un nivel entre intermedio y bajo, dentro del comunicado también hace referencia al respecto:

... La planta de biodiesel estará a su máximo potencial cuando se trabaje con aceite de *jatropha* de semilla, en tanto lo hará con aceite de palma, pues existen en Chiapas 30 mil hectáreas...

El proyecto se encuentra operando bajo un balance energético positivo, por cada unidad de energía que se invierte en el proceso de elaboración de biodiesel, se obtienen 1.85 unidades de energía de su combustión, en números redondos se estaría hablando casi del doble. Los resultados de dicha evaluación se reflejan en la tabla 4.18.

---

<sup>1</sup> Gobierno del Estado de Chiapas

**Tabla 4.18 Resultados evaluación caso Chiapas**

Resultados Energéticos			% Energía
Gasto Energético Fase Agrícola	11.01	MJ/kg <sub>BIO</sub>	55%
Gasto Energético Fase Extracción	4.95	MJ/kg <sub>BIO</sub>	25%
Gasto Energético Fase Transesterificación	4.04	MJ/kg <sub>BIO</sub>	20%
<b>Gasto Energético Total</b>	<b>20.00</b>	<b>MJ/kg<sub>BIO</sub></b>	100%
Gasto Energético Total x U. Volumen	22.73	MJ/L <sub>BIO</sub>	
Ganancia Energética Neta	17.00	MJ/kg <sub>BIO</sub>	
<b>Relación Energética</b>	<b>1.85</b>	-	

Un estudio de análisis de ciclo de vida hecho para el diesel publica una relación energética de 1.2 (Janulis, 2004) ligeramente superior a la unidad, si el tema se abordara desde el punto de vista energético es poco favorable producir diesel, pero la gran diferencia con respecto al biodiesel es el mercado de oferta y demanda con el que cuenta, el precio de extracción y refinación es infinitamente inferior al costo de venta, sin la existencia de un mercado que lo demanda, el biodiesel no se podrá abrir camino.

**Tabla 4.19 Comparación con respecto a otros modelos**

Balances Energéticos			
Autor	Año	Cultivo	Energía consumida[MJ/L <sub>BIO</sub> ]
Lobato et. Al	2007	Soya	15
		Canola	12.9
		Girasol	17.8
U.T Federico Santa María	2006	Girasol	17
		Canola	15
Vicente et. Al	2007	Girasol	5
Pimentel D et al	2005	Girasol	15
Sheman, et al	2005	Soya	12.5
Elsayed et al	2003	Canola	7.49
The U.S Department of Agriculture and U.S Department of Energy	1998	Soya	11.71
<b>Modelo Estado de Chiapas (Actualmente 22%)</b>	<b>2009</b>	<b>Jatropha</b>	<b>25.49</b>
<b>Modelo Estado de Chiapas (Semilla mejorada 35%)</b>	<b>2009</b>	<b>Jatropha</b>	<b>18.04</b>
<b>Modelo Estado de Chiapas (Semilla 50%)</b>	<b>2009</b>	<b>Jatropha</b>	<b>14.26</b>

La tabla 4.19 refuerza lo planteado anteriormente sobre la importancia de desarrollar semillas con alto contenido oleico y la importancia dicho factor al balance energético del proceso y su sensibilidad. Por otra parte pone en contexto los resultados del modelo con respecto a otros modelos desarrollados anteriormente. Las tablas 4.20 y 4.21 muestran los análisis del caso actual y casos hipotéticos futuros.

**Tabla 4.20 Emisiones y ahorro de CO<sub>2</sub> caso actual Chiapas**

Balance CO <sub>2</sub>					
Biodiesel			Diesel		
CO <sub>2</sub> Fijado	12279.44	ton/año	CO <sub>2</sub> Fijado	0	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido-Producción	6,672.61	ton/año	CO <sub>2</sub> Emitido-Producción	4,675.04	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido-Combustión	25246.37	ton/año	CO <sub>2</sub> Emitido-Combustión	25246.37	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido	31918.98	ton/año	CO <sub>2</sub> Emitido	29921.41	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido-Total	19639.54	ton/año	CO <sub>2</sub> Emitido-Total	29921.41	ton/año
Toneladas Anuales No-					
Emitidas			10,281.87		
% Ahorro CO <sub>2</sub>			34.36%		

**Tabla 4.21 Emisiones y ahorro de CO<sub>2</sub> caso Chis. (35% aceite)**

Balance CO <sub>2</sub>					
Biodiesel			Diesel		
CO <sub>2</sub> Fijado	12279.44	ton/año	CO <sub>2</sub> Fijado	0	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido-Producción	4,574.09	ton/año	CO <sub>2</sub> Emitido-Producción	4,675.04	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido-Combustión	25246.37	ton/año	CO <sub>2</sub> Emitido-Combustión	25246.37	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido	29820.46	ton/año	CO <sub>2</sub> Emitido	29921.41	ton/año
CO <sub>2</sub> Emitido-Total	17541.02	ton/año	CO <sub>2</sub> Emitido-Total	29921.41	ton/año
Toneladas Anuales No-					
Emitidas			12,380.39		
% Ahorro CO <sub>2</sub>			41.38%		

El aumento en el porcentaje del aceite presente en la además de reflejarse en un aumento en el número de toneladas que se dejan de emitir anualmente, permite

situar el punto a partir del cual, el proceso de producción de biodiesel comienza a equipararse con el del diesel en cuestión de emisiones atmosféricas, es decir si se logra obtener una semilla con más del 35% de aceite, no solo se estaría disminuyendo la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido por efecto de la fijación del CO<sub>2</sub> atmosférico por parte del cultivo, sino que además el proceso de producción produciría una menor cantidad de emisiones a la atmosfera.

Un aporte significativo en la emisión de CO<sub>2</sub> durante la producción de biodiesel es el hecho que una de las materias primas es obtenida a partir de la reformación y oxidación del gas natural en la industria petroquímica, que contribuyendo a las emisiones asociadas al proceso de síntesis. Además de esto, la industria petroquímica nacional presenta un grave rezago que no le permitiría hacer frente a la demanda.

Un punto esencial en la producción de biocombustibles es el hecho de que deben ser producidos a partir de materia prima renovable, el modelo planteado utiliza diesel como el principal suministro de energía y metanol como reactivo. El diesel y metanol provienen de procesos de refinación y petroquímica. Dentro del proceso de producción debe existir un punto en donde se logre cierto nivel de independencia de los suministros fósiles, esto es utilizando etanol como reactivo y sustituyendo el diesel por biodiesel.

Para llevar a cabo la sustitución de etanol por metanol, es necesario considerar y mantener la relación molar de la reacción, aproximadamente cinco veces, asegurando siempre contar un exceso de reactivo y de acuerdo al principio de Le Châtelier desplazar el equilibrio hacia los productos, asegurando así su rendimiento. Ver Anexo III

Un análisis global de la situación de México como país productor de biocombustibles se presenta a continuación.

Como resultados de este trabajo se obtiene un modelo donde se cuantifica y relaciona la cantidad de energía fósil que ingresa al proceso con la cantidad de

energía obtenida a partir del bien fabricado. Este modelo pudiera ser aplicado a otras semilla siendo necesario el ingreso de variables específicas de cada semilla.

La demanda que se cubre en estos resultados es tomando una base de cálculo del 100% de la demanda nacional de diesel, siendo utilizado el biodiesel únicamente como aditivo al 0.5%, para lo cual se necesita cultivar aproximadamente el equivalente al 0.68% de las hectáreas destinadas al cultivo del maíz en el país, y un 20% de las hectáreas que se planean destinar a cultivos energéticos para al año 2012. Mientras que la completa sustitución, es decir una mezcla B100, requeriría de aproximadamente el equivalente a un 35% más del terreno que se destina al cultivo del maíz, alrededor de 11 millones de hectáreas, es importante dimensionar las cantidades que se están manejando, como punto de referencia Ciudad Universitaria cuanta con 300 hectáreas, tomando en cuenta la reserva ecológica.

México cuenta con una extensión de suelo aproximada de 1, 934,194 Km<sup>2</sup> de los cuales solo el 0.6% corresponden a asentamientos humanos, el 35% de terreno arbolado perteneciente a selvas y bosques, y el 15% está siendo destinado a agricultura, 30 millones de hectáreas aproximadamente.

Limitando las áreas de cultivo de la semilla a suelos cuya vegetación existente corresponde a matorrales y pastizales, además de las zonas áridas y zonas reportadas como sin vegetación aparente, que en su conjunto suman 70 millones de hectáreas. En teoría terreno suficiente para el cultivo de bioenergéticos que deberá ser evaluado para su explotación.

Hoy México sería capaz de producir biodiesel a partir de *Jatropha curcas* con un balance energético favorable y una comprobada disminución en la emisión de CO<sub>2</sub>. Pero no sería capaz de producirlo a un volumen tal, que representa una sustancial mejoría en las condiciones ambientales y económicas. Este proyecto ha cumplido con sus objetivos al desarrollar el modelo de evaluación y ubicar los punto a mejorar.



Un país con 20 millones de personas en pobreza extrema no puede darse el lujo de destinar gran parte de su tierra cultivable a bioenergéticos, la solución más sana en la búsqueda de energías alternativas está en la diversificación de los procesos de generación, la optimización de la energía solar y nuclear deben ser también temas en la agenda nacional así como los bioenergéticos.

## V. CAPÍTULO CONCLUSIONES

Se comprueba la hipótesis planteada, se identifica a la fase agrícola como la etapa determinante en la viabilidad del proceso de producción de biodiesel en México, el análisis de sensibilidad ubica balances negativos en variables de proceso que corresponden directamente a la fase agrícola como productividad de cultivo y por ciento de aceite en la semilla. La productividad del cultivo, invariablemente presenta mejorías conforme se da la maduración del cultivo, sin embargo la cantidad de aceite presente en la semilla es un factor que debe ser resuelto previo a la siembra mediante técnicas de germinación de semillas embriones o inflorescencias, a partir de aquellos individuos que presenten las mejores características.

Otro aspecto a resaltar, es el hecho que las condiciones bajo las cuales puede ser cultivada la *Jatropha curcas* no son totalmente marginales, si se busca industrializar el proceso es necesario hacer la inversión y gasto necesario en fertilizantes, riego y agroquímicos. Se debe apuntar hacia una agro-industria, este cambio se traduce en un enorme aumento de las entradas energéticas, constituido principalmente de energía fósil.

La industria petroquímica nacional se ha visto en graves problemas, por el alza en los precios del mercado y la falta de tecnología, este es un factor que afecta a una de las principales materias primas para la elaboración de biodiesel, el metanol, según lo reportado por PEMEX petroquímica la producción nacional de metanol, 190 mil toneladas, sería apenas suficiente para cubrir la demanda para la producción de biodiesel como aditivo, por lo que la sustitución de metanol por etanol es conveniente.

Considerando el balance de dióxido de carbono simplemente como la diferencia entre dióxido de carbono fijado y emitido durante el proceso de producción el

resultado es marginalmente positivo, pero cuando se añade el factor de emisión por combustión el balance se vuelve completamente desfavorable. Sin embargo, si la comparación se hace con respecto al proceso de obtención de diesel convencional es posible obtener un factor de toneladas de dióxido de carbono que se dejan de emitir a la atmosfera durante la producción de biodiesel.

No se pretende dar a las estimaciones obtenidas un carácter definitivo, sino ser parte de un grupo de debate donde se puedan discutir aspectos energéticos de la actividad agraria e industrial, que definitivamente son cruciales para orientar una buena gestión de recursos, entendiendo por recursos tanto a los humanos como económicos. Adicionalmente los resultados mostrados no pueden ser de carácter definitivo debido a los problemas metodológicos e insuficiencia de información, es claro que las aproximaciones y bases bajo las cuales se realizan estos cálculos podrían variar en cuestiones referentes a detalles, pero no el sentido global del resultado.

Se muestra que la producción de biodiesel es energéticamente favorable pero también se encontró que no se puede cometer el mismo error de depender única y exclusivamente de una sola fuente de energía, como lo hemos venido haciendo, la conversión total de diesel por biodiesel B100 en México se ve complicada de lograr en primera instancia, pero las situación económica mundial llevará a México hacia esta alternativa y se debe estar preparado con estudios técnicos y de proceso que permitan la rápida instalación de la industria.

### ***ESTUDIOS PENDIENTES POR REALIZAR***

Al definir la frontera del sistema de estudio se dejó intencionalmente de lado la evaluación de los subproductos asociados al sistema de producción, como punto de continuidad se propone integrar al sistema los subproductos asociados así como el tratamiento de residuos, principalmente aguas residuales provenientes de la recuperación del solvente durante extracción del aceite y el proceso de separación del biodiesel.

## BIBLIOGRAFÍA

1. (S&T) Consultants Inc. (2009). *An examination of the potential for improving carbon/energy balance of Bioethanol*. Delta, Canada: IEA Task.
2. Abramovic, K. (1998). *The temperature dependence of dynamic viscosity for some vegetable oils*. Ljubljana: Biotechnical Faculty University of Ljubljana.
3. Achten, V. F. (2008). Jatropha biodiesel production and use. *Biomass and Bioenergy*, 1063-1084.
4. ASTM, American for Testing Materials. (2008). *D6571 Specification for Biodiesel B100*. ASTM.
5. ASTM, D6571 Specification for Biodiesel B100. (2008). *D6571 Specification for Biodiesel B100*. ASTM.
6. Ávila Zarraga, G. M. (2001). *Química Orgánica, Experimentos con un enfoque ecológico*. México DF: UNAM.
7. Bayley, A. E. (1944). *Aceites y Grasas Industriales*. México: Reverté.
8. Beerens. (2007). *Screwing pressing Jatropha seeds for fueling purposes*. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.
9. Cruz y Victoria, M., Contreras-Tinoco, K., & Anaya-Sosa, I. (2003). *ACEITE DE LA (Jatropha curcas), ANÁLISIS DE SU COMPOSICIÓN*. Mexico DF: Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Instituto Politécnico Nacional.
10. Didier Bert, F. D. (2006). Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature Pinus pinaster. *Forest and Ecology Management*, 222 (1-3), 279-295.
11. Espinola, L. (1996). *Cambios Tecnológicos en la Extracción de Aceite de Oliva*. Jaén, Linares: Universidad de Jaén.
12. FAO/OMS. (1993). Grasas y aceites en la nutrición humana. *Consulta FAO/OMS de expertos* (pág. Capítulo 2). Roma: ONU.
13. Fernandez, E. (1999). *COMPOSICIÓN DE ÁCIDOS GRASOS EN ACEITES DE MAYOR CONSUMO EN EL PERÚ*. Lima: Facultad de Farmacia y Bioquímica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
14. FFA, A. D.-9. (2003). *D5555-95 Standar Test for Determination of Free Fatty Acids*. ASTM.
15. Formo, M., Jungermann, E., Norris, F., & Sonntag, N. (1979). *Bailey's Industrial Oil and Fat Products, Chapter 1, Volume 1*. Chicago: John Wiley & Sons.
16. Forson, O. H. (2004). Performance of Jatropha oil blends in diesel engines. *Renewable energy*, 1135-1145.
17. Fukuda, K. &. (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *Bioscience & Bioengineering*, 406-416.
18. Ganapathy, M. G. (2009). Performance optimization of Jatropha biodiesel engine. *Applied Energy*, 86, 2476-2486.
19. Getinet, A. (1987). Review on breeding of Ethiopian mustard, Brassica Carinata. *7 th International Rapeseed Conference*, (págs. 593-597). Posnan.

20. Janulis, P. (2004). Reduction of energy consumption in biodiesel fuel life cycle. *Renewable Energy* , 29, 861-871.
21. Krisnangkura, K. (1986). A Simple Method For Estimation of Cetane Index of Vegetable. *American Oil Chemists's Society* , 552-558.
22. Lawson, H. (1995). *Oils and fats*. New York City: Chapman & Hall.
23. López, R. (2008). *Potencial de producción de semilla Jatropha Curcas en Sinaloa*. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro Nacional de Geociencias. Juriquilla, Qro: Centro Nacional de Geociencias.
24. Manzanares. (2007). *Biocarburantes. Marco Europeo aspectos legislativos* . Madrid: CIRCE.
25. Martinez, J., Siddhuraju, P., & Francis, G. (2006). Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents, and effects of different treatments on their levels in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Food Chemistry* , 80-89.
26. Mc Murry, J. (1997). *Química Orgánica*. México D.F: Grupo Editorial Iberoamericana.
27. NMX-F-002-1985, N. M. (1985). *ALIMENTOS. ACEITE COMESTIBLE PURO DE AJONJOLÍ*. MÉXICO D.F: DIRECCIÓN GENERAL DE NORMAS.
28. NMX-F-030-SCFI-2005. (2005). *ALIMENTOS – ACEITE COMESTIBLE PURO DE MAÍZ -ESPECIFICACIONES*. MÉXICO D.F.
29. Nurum, M. S. (14 de Noviembre de 2008). Biodiesel from cotton seed oil and its effect on engine performance and exhaust emissions. *Applied Thermal Engineering* , 2665-2270.
30. PEMEX. (enero de 2008). *Desempeño Sustentable (Ambiental)*. Recuperado el 24 de agosto de 2009, de PEMEX: [http://desarrollosustentable.pemex.com/files/content/informes\\_docs/informe\\_07/15desempeno.pdf](http://desarrollosustentable.pemex.com/files/content/informes_docs/informe_07/15desempeno.pdf)
31. PEMEX. (January de 2007). *PEMEX*. Recuperado el 16 de November de 2009, de Atención al Mercado, 2006: [www.pemex.com](http://www.pemex.com)
32. PEMEX. (2 de Agosto de 2009). *www.pemex.com*. Recuperado el 2 de Septiembre de 2009, de PEMEX: <http://www.pemex.com/index.cfm?action=news&sectionid=118&catid=11389&contentid=20711&media=pdf>
33. Rabé, S. G. (2005). *Jatropha oil in compression ignition engines* . Eindhoven: Eindhoven University of Technology.
34. Saximois. (2004). *www.saximois.com/parametros*. Recuperado el 19 de Junio de 2009, de [www.saximois.com](http://www.saximois.com): <http://www.saximois.com/parametros.htm>
35. SENER. (Noviembre de 2006). *http://www.sener.gob.mx*. Recuperado el 27 de Mayo de 2009, de Secretaría de Energía: [http://www.sener.gob.mx/webSener/res/169/Biocombustibles\\_en\\_Mexico\\_Estudio\\_Completo.pdf](http://www.sener.gob.mx/webSener/res/169/Biocombustibles_en_Mexico_Estudio_Completo.pdf)
36. Sheehan, e. a. (1998). *Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for use in Urban Bus*. U.S Department of Agriculture & U.S Department of Energy . Springfield: National Technical Information Service NTIS.

37. Tewari. (2007). *Jatropha and Biodiesel*. New Delhi: Ocen Books.
38. Yañez, e. a. (2009). The energy balance in the Palm Oil-Derived Methyl Ester (PME) life cycle for the cases in Brazil & Colombia. *Renewable Energy* , 34, 2905-2913

## ANEXO I

### Extracción de Aceite.

Para la extracción mecánica se contó con una prensa hidráulica marca “Carver” que opera a una presión máxima de 24,000 psig. Ver figura A.1. Se desarrolló una serie pasos a seguir para la correcta operación de la prensa.

#### Procedimiento

- Se adaptó una charola recolectora (1) del aceite al cilindro (2) y pistón (3)
- Se carga un lote con 200 gramos de semilla al cilindro, se introduce el pistón y se coloca sobre la base del gato (4).
- Se ajustan los tornillos superiores (5) hasta que el pistón quede perfectamente ajustado.
- Se cierra la válvula inferior del gato (6).
- Se acciona la palanca de elevación del gato (7) hasta alcanzar la máxima expresión de la semilla.
- Para lograr mejores resultados, se libera la presión, válvula (6), se vuelven ajustar los tornillo y se repite la operación.



Figura A.1 Prensa mecánica  
Carver

El resultado a las extracciones hecha a lo largo del desarrollo del proyecto con ayuda de la prensa mecánica se encuentra resumido en la tabla A.1.

**Tabla A.1 Tabla de extracción de semillas  
Jatropha Puebla Sem 2009-II**

	1	2	3	4	5	Promedio
Semilla[g]	200	200	200	200	200	
Volumen Aceite [mL]	26.5	28	33	27	32	
Masa Aceite [g.]	23.10	24.90	28.95	24.50	28.50	
$\rho$ aproximada[g/mL]	0.872	0.889	0.877	0.907	0.891	0.887
% w Aceite	11.55	12.45	14.474	12.25	14.25	12.99

**Jatropha Rosamorada, Nay. Sem 2010-II**

	Zomatlan	Manuel Herrera	GUME
Semilla[g]	200	200	200
Volumen Aceite [mL.]	10	6.5	12
Masa Aceite [g.]	8.80	5.64	10.33
$\rho$ aproximada[g/mL]	0.88	0.87	0.86
% w Aceite	4.4	2.82	5.2

**Jatropha Rosamorada, Nay. Sem 2009-I**

	Marichuy	Marichuy 2	Julia 4	Perla 6	Sindi 3	Susie 5
Semilla[g]	350	400	400	400	400	400
Volumen Aceite [mL.]	53	70	65	30	37	20
Masa Aceite [g.]	48.029	63.758	61.97	28.74	33.8	18.071
$\rho$ aproximada[g/mL]	0.906	0.911	0.953	0.958	0.914	0.904
% w Aceite	13.723	15.940	15.493	7.185	8.450	4.518





Figura A.2 Semilla Descascarillada



Figura A.3 Bagazo obtenido

El aceite se encuentra contenido en el mesocarpio de la semilla y envuelto por medio de una red proteica que resulta ser resistente a la presión ejercida por la prensa. En figura A.2 se observa el resultado obtenido al realizar el descascaramiento de la semilla, mientras que la figura A.3 muestra el bagazo obtenido posterior a la extracción de la semilla con cascara.

Una variación al método de extracción por prensado se encuentra en el precalentamiento de la semilla donde se busca desnaturalizar las proteínas, facilitando la extracción.

Otra variación que se hizo al método fue el descascarillado de la semilla, con el cual se pretendía obtener un aceite más limpio libre de las impurezas de la cascara, los resultados no fueron los esperados, ya que sin la cascara además de fluir aceite por los orificios del cilindro también se obtenía la semilla, incorporando una gran cantidad de sedimento al aceite obtenido.

Se caracterizaron diferentes semilla muestreadas de punto diferentes de *Jatropha* proveniente del estado de Nayarit, encontrando un máximo de 15% en peso y un mínimo de 4.5 % en peso de aceite contenido en la semilla.

Las semillas de *Jatropha* son provenientes del CENVITT (Centro de Valoración y Transferencia de Tecnología Agraria) en el municipio de Rosamorada, Nayarit donde encuentra un bosque natural de *Jatropha curcas*.

Trabajos que se desarrollaron en paralelo a este, lograron la extracción del aceite remanente en el bagazo mediante una extracción con hexano, la cantidad de aceite obtenido mediante estas dos técnicas reporta hasta un 35% de aceite en la semilla.

## ANEXO II

### Capacidad de producción de Biodiesel Aditivos Mexicanos S.A de C.V

La empresa filial de Chevron Oronite Chemical Company, cuenta con una capacidad de instalada de 7 reactores tipo batch con agitador, sistema de calentamiento enfriamientos, sistema de vacío, así como sistema de destilación de ligeros. La capacidad de los equipos se encuentra en la tabla A.2.

**Tabla A.2 Capacidad equipos**

Equipo	Volumen [L]
R-101	22712.46
V-100	22712.46
R-103	15141.64
R-104	21198.29
R-105	30283.28
R-106	21198.29
R-107	30283.28

De acuerdo a los resultados reportados en la tesis de licenciatura, **Torres, 2009**, las condiciones y tiempos a considerar durante la producción de biodiesel se encuentran en la tabla A.3.

**Tabla A.3 Condiciones de reacción**

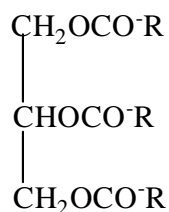
Condiciones reacción y separación	
T <sub>reacción</sub> [°C]	45
t <sub>reacción</sub> [h]	2
% Exceso volumen	
MEOH	80
% peso NaOH	1
t <sub>reposito-separación</sub> [h]	2
% volumen H <sub>2</sub> O Lavado	50

Es importante señalar que cada reactor cuenta con su propio tanque de descarga por lo que la etapa de separación de producto y subproductos, no se llevaría a cabo en el reactor permitiendo iniciar la carga de un nuevo lote. Los lavados de agua para separar el metanol no reaccionado podrían ser omitidos mediante la destilación de la mezcla en el reactor una vez llevada a cabo la reacción.

En números redondos se hablaría de 6 horas para producir un lote tomando en cuenta la pre mezcla entre el alcohol y el catalizador, mas el tiempo de reacción, destilación y los tiempos muertos entre actividades. Si la planta trabaja a tres turnos sería posible obtener hasta 4 lotes al día.

Es necesario conocer la relación molar en la reacción y el exceso en los reactivos para calcular la cantidad de material cargado a cada uno de los reactores.

La relación estequiométrica de la reacción es 3:1, es decir, por cada mol de triglicérido que alimento obtengo 3 moles de metil ester. Mediante la composición de ácidos grasos presentes en el aceite se ha obtenido el peso molecular promedio del ácido graso, tomando como base este valor es posible obtener el peso molecular de del triglicérido y el metil ester mediante un sencillo análisis de la estructura de cada molécula. Ver figura A.4.



**Figura A.4 Triglicérido**

El radical glicerilo tiene un peso molecular de 41 y esto se le suma 3 veces el valor promedio de la masa molar del ácido graso descontando un hidrogeno de enlace, se obtiene el peso molecular del triglicérido. Ver ecuación A.4

$$P.M_{\text{Triglicerido}} = (3(P.M_{\text{AcidoGraso}} - 1)) + 41_{\text{Radical Glicerilo}}$$

**Ecuación A.1 Relación P.M triglicérido**

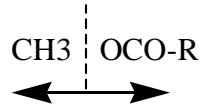


Figura A.5 Ester Metílico

El peso molecular de los ésteres se obtiene a partir de los pesos moléculas del ácido graso, “R” ver figura A.5, la que se le descuenta un hidrogeno de enlace y el alcohol al que se le descuenta el grupo OH que pasa a formar parte del glicerol. A todo esto se le suma 44, peso molecular del grupo éster. La ecuación A.2 resume el complejo análisis.

$$P.M_{\text{Ester}} = (P.M_{\text{AcidoGraso}} - 1) + (P.M_{\text{Alcohol}} - 17_{\text{OH}}) + 44$$

Ecuación A.2 Relación P.M ésteres

Con el peso molecular del aceite y la relación estequiométrica es posible calcular la cantidad de reactivo necesario para la reacción, ver ecuación A.3, se plantea la siguiente memoria de cálculo como un mecanismo general aplicable a todos los aceite, partiendo de un cierto de volumen de aceite empleado que depende de la cantidad de aceite disponible.

$$\text{Moles}_{\text{Aceite}} [\text{mol}] = \frac{(V_{\text{Aceite}} [\text{mL}]) \left( \rho_{\text{Aceite}} \left[ \frac{\text{g}}{\text{mL}} \right] \right)}{\left( M.M_{\text{Aceite}} \left[ \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right] \right)}$$

Ecuación A.3 Moles de aceite por volumen de muestra

La estequiometría de la reacción es 3 a 1, por lo que el número de moles del metanol es veces el número de moles del aceite, por lo tanto la cantidad de metanol ha agregar es la que marca la ecuación A.4.

$$\text{Volumen}_{\text{MEOH}} [\text{mL}] = \frac{(3 \text{Moles}_{\text{Aceite}} [\text{moles}]) \left( M.M_{\text{MEOH}} \left[ \frac{\text{g}}{\text{mol}} \right] \right)}{\left( \rho_{\text{MEOH}} \left[ \frac{\text{g}}{\text{mL}} \right] \right)}$$

Ecuación A.4 Volumen estequiométrico de metanol para transesterificar

Por cuestiones de desplazamiento del equilibrio y el favorecimiento en la formación de los metil esterres se agrega entre un 80-100% de exceso en volumen del metanol, como se muestra en la ecuación A.5.

$$Masa_{NaOH} [g] = 0.01(Masa_{Aceite})$$

**Ecuación A.5 Masa del catalizador**

De manera estequiométrica se puede saber la cantidad de metil esterres que teóricamente se producirán si la reacción se lleva a cabo con un rendimiento del 100%. La cantidad de moles formadas de biodiesel es igual a la cantidad de moles de metanol presente. Ver ecuación A.6.

$$Masa_{Esteres} [g] = (3Moles_{Aceite} [mol]) \left( M.M_{Esteres} \left[ \frac{g}{mol} \right] \right)$$

**Ecuación A.6 Masa Biodiesel producido.**

La tabla A.4 muestra la capacidad instalada de producción, tomando en cuenta el volumen de reactor con que se cuenta y el tamaño de lote que sería posible fabricar.

**Tabla A.4 Capacidad de producción AMSA**

Reactor	Metanol [L]	Aceite[L]	NaOH[L]	Materias Primas[L]	Vol. Reactor [L]	% Capacidad	Biodiesel[Ton]
R-101	4101.944996	17500	78.25	21680.19	22712.46	95.46%	16.19
V-100	4101.944996	17500	78.25	21680.19	22712.46	95.46%	16.19
R-103	2695.563855	11500	51.42143	14246.99	15141.64	94.09%	10.64
R-104	3820.668768	16300	72.88429	20193.55	21198.30	95.26%	15.08
R-105	5461.446766	23300	104.1843	28865.63	30283.28	95.32%	21.55
R-106	3820.668768	16300	72.88429	20193.55	21198.30	95.26%	15.08
R-107	5461.446766	23300	104.1843	28865.63	30283.28	95.32%	21.55
							116.26

Si se consideran cuatros lotes diarios por reactor, se tendría una capacidad de 465 toneladas suponiendo que el único producto que se fabricara fuera el biodiesel. Mientras que si AMSA decidiera introducir al biodiesel como uno mas de sus

aditivos ofertados, podría dedicar el uso de un reactor con productos intercalados, produciendo hasta dos lotes diarios, equivalentes a 32 toneladas diarias.

La figura A.6 muestra los reactores disponible para la producción de biodiesel en las instalaciones de la planta ubicada en la ciudad de San Juan del Rio, Querétaro.

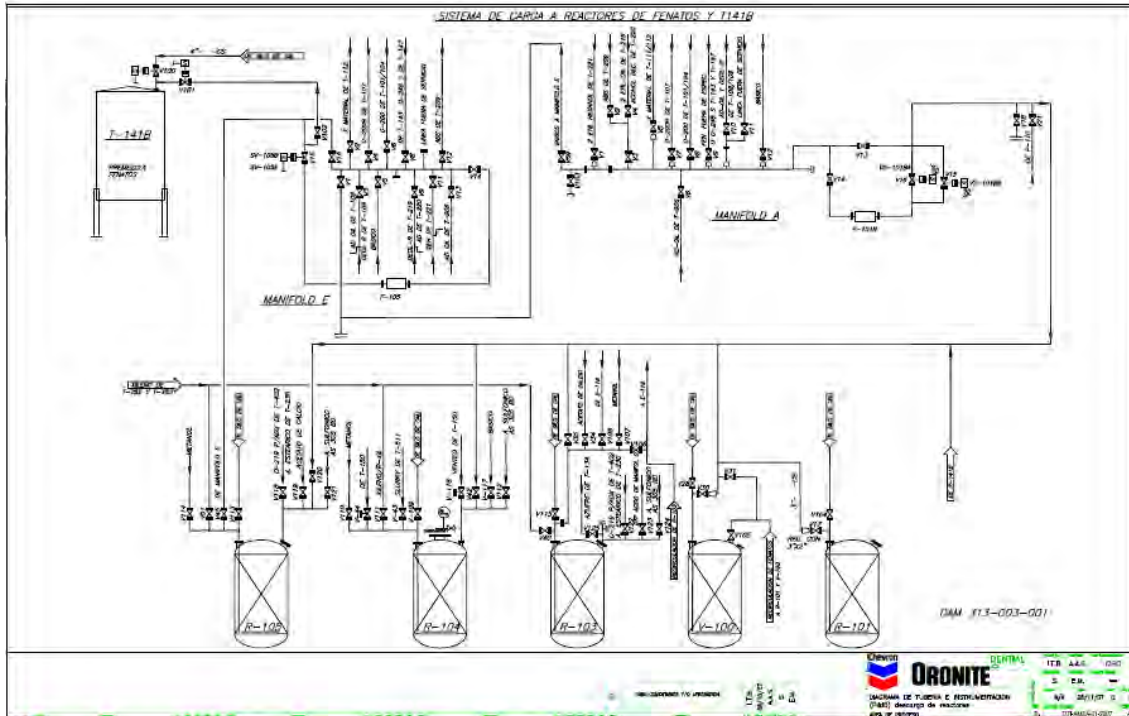


Figura A.6 Distribución reactores AMSA

## ANEXO III

### Producción de Biodiesel a partir de etanol

A continuación se presenta un análisis sencillo de las relaciones molares para ambos alcoholes. La ecuación A.7 muestra la obtención de las moles de aceite:

$$n_{aceite} = \frac{m_{aceite}}{M_{aceite}}$$

**Ecuación A.7 Moles Aceite**

La obtención de las moles del alcohol se ejemplifica en la ecuación A.8

$$n_{ROH} = \frac{V_{ROH} \cdot \rho_{ROH}}{M_{ROH}}$$

**Ecuación A.8 Moles de Alcohol**

La relación entre el número de moles del aceite y del alcohol en la reacción de transesterificación debe ser mayor a 5, como lo muestra la ecuación A.9

$$5 < R_{ROH/aceite} = \frac{n_{ROH}}{n_{aceite}}$$

**Ecuación A.9 Relación molar Alcohol/Aceite**

La ecuación A.10 muestra la relación molar entre metanol y etanol.

$$R_{R_1OH/R_2OH} = \frac{n_{R_1OH}}{n_{R_2OH}}$$

**Ecuación A.10 Relación molar entre alcoholes**

Tomando como base una cantidad de aceite de 100 g y al metanol como reactivo al 80% en exceso, se obtienen las siguientes relaciones que se muestran en la tabla A.5:



**Tabla A.5 Relaciones Molares**

	Aceite JTC	Metanol	Etanol
M[g]	100	10.98072	10.980715
V[m] <sub>EST</sub>	-	13.88207	13.882067
V[mL] <sub>EXC</sub>	-	24.98772	24.987721
$\rho$ [g/mL]	-	0.791	0.785
m[g/mol]	874.26	32	46
mol <sub>EST</sub>	0.1143824	0.343147	0.3431473
mol <sub>EXC</sub>	-	0.617665	0.4264209
R [OH/aceite]	-	5.4	3.7280273
	R[EtOH/MeOH]	0.690	

Si el flujo o cantidad de metanol alimentado al reactor es conocido, y se desea hacer el cambio a etanol solo es necesario aplicar el factor molar que existe entre ambos alcoholes, 0.7, para mantener la relación molar entre reactivos que asegure el rendimiento esperado.